

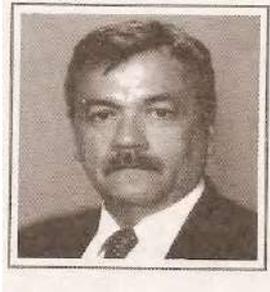
ISBN 978-958-8817-43-9.

Este texto describe gran parte de los aspectos básicos y las características estructurales y funcionales de los *medios de transmisión guiados*, más referenciados, así como sus principales aplicaciones, y los requerimientos y procesos esenciales de sus tendidos, en las diversas redes en las cuales presta su servicio.. .

Tanto los conceptos, que se exponen en este texto, así como la ejecución de los ejemplos que contienen cada uno de los capítulos, se exponen y desarrollan de la forma más descriptiva posible, dentro de un contexto académico y práctico, de tal manera que puedan servir de apoyo en la realización de las actividades profesionales que sean pertinentes.

La lectura de este libro está concebida a ser afable y motivadora en el despertar del espíritu de investigación, en la profundización y complementación del conocimiento de los avances y perspectivas que ofrecen *los medios de transmisión guiados*.

El contenido de este libro es el resultado de la reflexión sobre los diferentes tópicos tratados por los autores de los documentos relacionados en la bibliografía de cada capítulo, los cuales hacen referencia a la temática del mismo. Así como de los conocimientos y experiencias que ha logrado adquirir el autor de este texto, durante su larga vida profesional y académica, en el ámbito de *las telecomunicaciones*.



Autor
(Jaime Ramírez Artunduaga)

Ingeniero Electrónico. Especialista en Administración y Planeación Urbana y Regional; Especialista en Pedagogía y Docencia Universitaria; Especialista en Telecomunicaciones Móviles. Magíster en Teleinformática. Estudios completos en Maestría en Sistemas y en Administración Pública. Experto en Evaluación y Formulación de Proyectos. Diplomado en: Pedagogía y Didáctica de las Ciencias Básicas y la Ingeniería; Diplomado en Formación en Investigación para Docentes; Diplomado en Gestión de Conocimiento y Producción de Investigación; Diplomado en Didáctica y Pedagogía de la Educación Superior. Ingeniero Jefe Estación de Comprobación Técnica del Ministerio de Comunicaciones (1971-1973). Director de la Red de Radio-comunicaciones Sistemas Nacional de Salud (1974-1991). Asesor en sistemas de radiocomunicaciones para el sector salud de la OPS (Organización Panamericana de Salud) (1982). Miembro del Consejo Superior de la Universidad Distrital (1984-1988). Ingeniero Jefe de Ingeniería y Mantenimiento del Fondo Nacional Hospitalario (1992-1993). Director del Centro de Ingeniería e Investigación de equipo médico-hospitalario de la Universidad El Bosque (1994-1995). Miembro de GITEM (Grupo de Investigación en Telemedicina: Universidad Distrital 2000-2003). Director Caja de Compensación Familiar Cafandina Huila (1996-1997). Jurado en procesos de selección de Docentes Universitarios (Universidad: Nacional de los Llanos y Universidad Distrital). Director, asesor y evaluador de más de 100 trabajos de grado en Ingeniería Electrónica, Sistemas y Telecomunicaciones. Profesor Universitario Asociado durante 52 años. Actualmente ejerce el cargo de Profesor Asociado II de tiempo indefinido, en el Programa de Ingeniería Electrónica, de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas de la Fundación Universitaria los Libertadores y Profesor de cátedra categoría Asociado en el Programa Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada. Distinción como el mejor profesor de la Facultad de Ingeniería y también de toda la Universidad (2010 -2011), por el Consejo Directivo de la Universidad de San Buenaventura.

PRÓLOGO

El 16 de agosto de 1858, se envió el siguiente mensaje *lory to od in t e ig est, and on eart , peace, good ill to men*”, desde Valentia Harbour, en Irlanda y Trinity Bay, en Newfoundland, siendo el primer mensaje, intercontinental, que se transmitía a través de un cable submarino.

Como es bien sabido, uno de los elementos fundamentales en la estructura básica de todo sistema de transmisión de señales, sea cual fuese su naturaleza, tecnología y o complejidad, es el medio por el cual se transmite estas señales, entre las cuales se resaltan: las eléctricas, tanto de energía de potencia como de comunicación y las electromagnéticas, tanto las radioeléctricas como las ópticas.

Estos medios o canales, a través de los cuales se transmiten o difunden estas señales, se pueden clasificar en dos grandes grupos: No Guiados y Guiados. Los primeros son aquellos canales donde la señal transmitida o difundida no se guía (*no se encapsula*), como es el caso del espacio libre (*señales de radio*) y los segundos, la señal es guiada (*encapsulada*), como es el caso del cable coaxial, par trenzado, cable abierto paralelo, cables gemelos, entre otros, para señales eléctricas, y para señales electromagnéticas: las guías de ondas y la fibra óptica, principalmente.

En este texto se hace mención de los principales medios de transmisión de los de *clase guiados*, describiendo su concepción y tipos de cada uno de ellos, así como sus principales características estructurales y funcionales, haciendo una complementación con sus aplicaciones más frecuentes, y de los diversos criterios y procesos utilizados para el correspondiente tendido de los mismos.

Para lograr que una red de transmisión de energía o de comunicaciones cumpla eficientemente su función, se debe definir e implementar, en estas redes, los medios o canales de transmisión que permitan que las respectivas señales sean transmitidas de manera eficaz. Esto implica que las características estructurales y funcionales de los medios de transmisión a emplear en estas redes, dependen de las características intrínsecas de las señales a ser transmitidas a través de los mismos.

El libro está conformado por 10 capítulos, empezando por la descripción conceptual de los principales tipos de *medios de transmisión guiados*, que corresponden a la temática central de este texto, resaltando la utilización más frecuente de los mismos. De la misma forma, y de manera particular, se hace una descripción de las características estructurales y funcionales básicas globales de las *líneas de transmisión*, las cuales hacen parte fundamental de los *medios de transmisión guiados*. Consecutivamente se hace una descripción individual de cada uno de los tipos de *medios de transmisión guiados*, seleccionados en este texto, resaltando sus particularidades estructurales y funcionales, así como los parámetros operacionales de los mismos, y los diferentes tipos de tendidos utilizados para cubrir las áreas de servicio de las redes donde son requeridos.

Con la finalidad de visualizar la utilidad y aplicabilidad de los *medios de transmisión guiados*, en el contenido de la temática de cada uno de ellos, se describe la fundamentación de la estructura y funcionamiento básico de las redes de los sistemas de comunicación y de distribución de energía eléctrica, donde hacen parte esencial estos medios, tanto en la conformación como en el desarrollo de estas.

En esencia lo que este texto pretende, es hacer más asequible y afable el conocimiento de las características de los *medios de transmisión guiados*, más utilizados en las redes de transmisión eléctricas y electromagnéticas, así como en su manejo y aplicabilidad. Complementariamente, en cada uno de los capítulos se desarrollan diferentes ejemplos, correspondiente a los temas tratados en los mismos, así como al final de ellos existe una serie de preguntas y de ejercicios a desarrollar, con el propósito de fundamentar la parte conceptual ahí tratada.

En concordancia con las vivencias tenidas durante las experiencias de su vida profesional y académica universitaria, el autor de este texto ha creído conveniente plasmar sus conocimientos sobre esta temática, de manera sucinta, teniendo además como apoyo los diversos textos y documentos indicados en la referencia bibliográfica, de donde se han fundamentado la mayoría de los conceptos esenciales tratados en este texto, así como las expresiones y o modelos matemáticas, figuras, ejemplos, ejercicios y tablas que en el mismo aparecen; referencias que se recomienda consultar para ampliar y profundizar sobre los diferentes aspectos y características estructurales, técnicas, funcionales y de aplicabilidad que estos medios de transmisión ofrecen.

El contexto de este libro está orientado, esencialmente, a la descripción de los fundamentos tecnológicos básicos, de los principales *medios de transmisión guiados*, que puedan servir de cimiento para la profundización de las diversas tendencias y desarrollos que los mismos vienen presentando, buscando fomentar el espíritu investigativo en esta temática. Así mismo se pretende que este libro pueda servir de apoyo documental para los estudiantes, entre otros, de los programas de las ingenierías de: Electrónica, Telecomunicaciones, Mecatrónica, Teleinformática, Eléctrica y afines.

CONTENIDO

Prólogo.

Capítulo 1: Concepto, tipos y utilización de los medios de transmisión guiados

- 1.1 Introducción
 - 1.2 Estructura básica de los sistemas transferencia de señales
 - 1.2.1 Estructura básica de los sistemas de comunicación electrónica
 - 1.2.2 Estructura básica de los sistemas de transmisión de energía
 - 1.2.2.1 Estación y red de transmisión
 - 1.2.2.2 Sub-estación y red de reparto
 - 1.2.2.3 Sub-estación y red de distribución.
 - 1.3 Clases de medios de transmisión
 - 1.4 Concepto de medios de transmisión guiados
 - 1.5 Tipos de medios de transmisión guiados.
 - 1.6 Utilización de medios de transmisión guiados
 - 1.6.1 Transmisión de señales de información
 - 1.6.1.1 Sistemas de telefonía fija.
 - 1.6.1.2 Sistemas de transmisión de datos
 - 1.6.1.3 Sistemas de televisión por cable CAT
 - 1.6.1.4 Sistemas de circuitos cerrados de televisión CCT
 - 1.6.1.5 Sistemas de televisión por Internet IPT
 - 1.6.1.6 Sistemas de radio por Internet iRadio
 - 1.6.1.7 Sistemas de comunicaciones mediante línea de potencia (PLC).
 - 1.6.1.8 Sistemas de distribución de señal T
 - 1.6.1.9 Sistema de antena comunitaria de T
 - 1.6.1.10 Sistemas de interconexión a los transmisores de radio difusión
 - 1.6.2 Transmisión de señales de energía
 - 1.6.2.1 Sistemas de distribución de energía eléctrica.
 - 1.6.2.2 Sistemas de redes eléctricas locales
 - 1.6.2.3 Red eléctrica inteligente (REI):
 - 1.7 Circuito eléctrico equivalente de los medios de transmisión guiados conductivos.
 - 1.7.1 Potencial y corriente eléctrica en las líneas de transmisión
- Preguntas y ejercicios Capítulo 1.
- Referencias bibliográficas: Capítulo 1

Capítulo 2: Concepto, tipos y aplicaciones de las líneas de transmisión

- 2.1 Introducción
 - 2.2 Tipos de líneas de transmisión
 - 2.2.1 Cables abiertos paralelos
 - 2.2.2 Cables paralelos gemelos
 - 2.2.3 Cables de par trenzado
 - 2.2.4 Cables coaxiales
 - 2.2.5 Cintas planas conductoras paralelas
 - 2.3 Características eléctricas de las líneas de transmisión
 - 2.4 Parámetros de propagación de las líneas de transmisión.
 - 2.5 Líneas de transmisión especiales.
 - 2.5.1 Líneas de transmisión sin pérdidas.
 - 2.5.2 Líneas de transmisión sin distorsión.
 - 2.6 Impedancia de entrada de las líneas de transmisión.
 - 2.7 Onda estacionaria.
 - 2.8 Coeficiente de reflexión.
 - 2.9 Relación de onda estacionaria (ROE).
 - 2.10 Adaptador de impedancias.
 - 2.10.1 Transformador de un cuarto de longitud de onda.
 - 2.10.2 Acoplador sencillo en paralelo.
 - 2.10.3. Balanceo de línea y adaptador de impedancias.
 - 2.11 El diagrama de Smith.
 - 2.12 Cableado de las redes eléctricas
 - 2.12.1 Cables abiertos paralelos
 - 2.12.2 Cables para redes eléctricas residenciales.
 - 2.13 Dimensionamiento de los conductores
- Preguntas y ejercicios Capítulo 2.
- Referencias bibliográficas: Capítulo 2

Capítulo 3: Cables abiertos paralelos

- 3.1 Introducción.
- 3.2 Conformación de los cables abiertos paralelos
- 3.3 Tipos de cables abiertos paralelos
- 3.4 Estaciones y tendido de las redes eléctricas
 - 3.4.1 Estación y red de transmisión
 - 3.4.1.1 Conformación básica
 - 3.4.1.2 Tipo de cableado
 - 3.4.1.3 Aislamiento
 - 3.4.1.4 Cortacircuitos de potencia
 - 3.4.1.5 Catenaria y flecha
 - 3.4.2 Subestación y red de reparto
 - 3.4.3 Subestación y red de distribución
 - 3.4.4 Redes eléctricas de grandes consumidores
 - 3.4.4.1 Red de distribución.
 - 3.4.4.2 Línea de acometida

- 3.4.4.3 Caja general de comando y protección
 - 3.4.4.4 Línea repartidora
 - 3.4.4.5 Caja de derivación.
 - 3.4.4.6 Caja colectiva de contadores.
 - 3.4.4.7 Derivación individual.
 - 3.4.4.8 Dispositivos de seguridad.
 - 3.4.4.9 Contadores de energía eléctrica
 - 3.4.4.10 Cuadro privado de mando y protección.
 - 3.4.4.11 Instalación interior del abonado.
 - 3.4.4.12 Tomas eléctricas.
 - 3.4.5 Redes eléctricas residenciales
 - 3.4.5.1 Tipos de redes
 - 3.4.5.2 Transformadores de distribución
 - 3.4.5.3 Línea de acometida eléctrica
 - 3.4.5.4 Cableado eléctrico
 - 3.4.5.5 Puesta a tierra
 - 3.4.5.6 Tendido global de una red eléctrica residencial
 - 3.5 Resistividad del terreno
 - 3.6 Resistencia puesta a tierra
 - 3.7 Medición de la resistencia puesta a tierra
 - 3.8 Fuerza magnética entre cables eléctricos rectos paralelos
 - 3.9 Normas técnicas para las instalaciones eléctricas.
 - 3.10 Redes Eléctricas Inteligentes
 - 3.11 Redes de comunicación a través de líneas de potencia
 - 3.11.1 Concepto y aspectos generales
 - 3.11.2 Componentes básicos de la red interna PLC
 - 3.11.3 Bobina de onda portadora
- Preguntas y ejercicios Capítulo 3.
- Referencias bibliográficas: Capítulo 3.

Capítulo 4: Cables de par trenzado

- 4.1 Introducción.
- 4.2 Concepto y características.
- 4.3 Reseña histórica.
- 4.4 Tipos de cables par trenzado
- 4.5 Categorías de cables par trenzado
- 4.6 Conectores para cables par trenzado
- 4.7 Aplicaciones del cable par trenzado.
- 4.8 Ventajas y desventajas.
 - 4.8.1 Ventajas.

- 4.8.2 Desventajas.
 - 4.9 Variaciones en el cable par trenzado.
 - 4.10 Kit de herramientas para ponchar los cables par trenzado.
 - 4.11 Proceso para ponchar un cable par trenzado.
 - 4.12 Cableado estructurado.
 - 4.12.1 Areas de trabajo
 - 4.12.2 El cableado horizontal
 - 4.12.3 El cableado vertical.
 - 4.12.4 Cuarto de equipos (ER).
 - 4.12.5 Conexión a tierra.
 - 4.13 Aspectos generales para el diseño: Red de Cableado Estructurado.
 - 4.14 Estructura Básica de un sistema de Cableado Estructurado.
 - 4.15 Organismos y estándares sobre cableado estructurado.
 - 4.15.1 Organismos.
 - 4.15.2 Normas del cableado estructurado
 - 4.16 Ejemplo de diseño de un sistema de cableado estructurado
 - 4.16.1 Definición de los puntos terminales por piso
 - 4.16.2 Identificación los requerimientos de la Red.
 - 4.16.3 Identificación los requerimientos del usuario.
 - 4.16.4 Determinación de los equipos y dispositivos.
 - 4.16.5 Definición de las rutas.
 - 4.16.6 Estructura física de la Red.
 - 4.16.7 Componentes del cableado estructurado
- Preguntas y ejercicios Capítulo 4.
- Referencias bibliográficas: Capítulo 4.

Capítulo 5: Concepto, estructura y aplicaciones del cable coaxial

- 5.1 Introducción.
- 5.2 Concepto y conformación
- 5.3 Características eléctricas.
 - 5.3.1 Impedancia característica
 - 5.3.2 Conductancia.
 - 5.3.3 Capacitancia
 - 5.3.4 Inductancia
- 5.4 Velocidad de propagación
- 5.5 Atenuación
- 5.6 Potencial eléctrico
- 5.7 Distribución de los campos electromagnéticos

- 5.8 Potencia transmisible
 - 5.9 Pérdida por retorno estructural.
 - 5.10 Aplicaciones comunes de los cables coaxiales.
 - 5.10.1 Instalación individual entre antenas y televisor.
 - 5.10.2 Instalación de antenas comunitarias.
 - 5.10.3 Instalación a antenas transmisoras y o receptoras
 - 5.10.4 Instalación en redes de transmisión de datos.
 - 5.10.4.1 Red de área Local (LAN).
 - 5.10.4.2 Red de área Amplia (WAN)
 - 5.10.5 Redes telefónicas.
 - 5.10.5.1 Tendido aéreo
 - 5.10.5.2 Tendido subterráneo.
 - 5.10.5.3 Tendido submarino
 - 5.10.6 Redes de televisión por cable: CATV
 - 5.10.6.1 Dispositivos pasivos de las redes CATV
 - 5.10.6.2 Servicios complementarios de las redes CATV
 - 5.10.6.3 Red de acceso a CATV
 - 5.10.7 Redes de circuitos cerrados de televisión
 - 5.10.7.1 Conformación y funcionamiento
 - 5.10.7.2 Consideraciones técnicas para la implementación de un sistema integrado de CCT
 - 5.10.8 Redes de distribución de señal de televisión personalizada.
 - 5.10.9 Transmisión de audio digital
 - 5.11 Instalación y conexión del cable coaxial
 - 5.12 Construcción del cable coaxial
 - 5.13 Avances tecnológicos en los cables coaxiales
- Preguntas y ejercicios Capítulo 5.
- Referencias bibliográficas: Capítulo 5.

Capítulo 6: Guías de ondas

- 6.1 Introducción.
- 6.2 Concepto de guías de ondas
- 6.3 Modos de Propagación
- 6.4 Tipos de guías de ondas
- 6.5 Características de las guías de ondas rectangulares
 - 6.5.1 Estructura de la guía de ondas rectangular
 - 6.5.2 Modos de propagación en las guías de ondas rectangulares
 - 6.5.2.1 Modo de propagación TE_{mn} en las guías de ondas rectangulares
 - 6.5.2.2 Modo de propagación TM_{mn} en las guías de ondas rectangulares
 - 6.5.2.3 Equivalentes de TE_{mn} y TM_{mn} , en las guías de ondas rectangulares
 - 6.5.2.4 Frecuencia de corte en las guías de ondas rectangulares
 - 6.5.2.5 Impedancia característica de las guías de ondas rectangulares

- 6.5.2.6 Longitud de onda en las guías de ondas rectangulares
- 6.5.2.7 velocidades de onda en las guías de ondas rectangulares
 - 6.5.2.7.1 velocidad de fase
 - 6.5.2.7.2 velocidad de grupo (propagación)
- 6.5.2.8 Potencia media en las guías de ondas rectangulares
- 6.5.2.9 Constante de atenuación en las guías de ondas rectangulares
- 6.6 Características de las guías de ondas circulares
 - 6.6.1 Estructura de la guía de ondas circular
 - 6.6.2 Modos de propagación en las guías de ondas circulares
 - 6.6.2.1 Modo de propagación TE en las guías de ondas circulares
 - 6.6.2.2 Modo de propagación TM en las guías de ondas circulares.
 - 6.6.2.3 Función de Bessel
 - 6.6.2.4 Longitud de onda y frecuencia de corte en las guías de ondas circulares.
 - 6.6.2.5 Impedancia característica de las guías de ondas circulares.
- 6.7 Características de las guías de ondas elípticas.
 - 6.7.1 Estructura de la guía de ondas elíptica
 - 6.7.2 Modos de propagación en las guías de ondas elípticas
 - 6.7.3 Tipos de guías de ondas elípticas
- 6.8 Aplicaciones de las guía de ondas
 - 6.8.1 Guías de ondas como medio de transmisión de microondas
 - 6.8.2 Guías de ondas como altavoz
 - 6.8.3 Guías de ondas como antena.
 - 6.8.3.1 Guías de ondas como antena de apertura
 - 6.8.3.2 Guías de ondas como antena ranurada
 - 6.8.4 Guías de ondas como acoplador direccional
 - 6.8.5 Guías de ondas como filtro
 - 6.8.6 Guías de ondas como circuladores
 - 6.8.7 Guías de ondas como acopladores de modo en sistemas satelitales.
- 6.9 Transición guía-coaxial
- 6.10 Innovaciones en la guías de ondas.
 - 6.10.2 Guías de ondas dieléctricas
- 6.11 Accesorios de las guías de ondas

Preguntas y ejercicios Capítulo 6.

Referencias bibliográficas: Capítulo 6.

Capítulo 7: Cintas conductoras paralelas planas y acopladores RF

- 7.1 Introducción
- 7.2 Composición básica de las líneas planas
- 7.3 Impedancia característica de las líneas planas
- 7.4 Potencial eléctrico en las líneas planas
- 7.5 Distribución de los campos electromagnéticos
- 7.6 Interconexión: transmisor AM y torre radiador

- 7.7 Reflexión de potencias en las líneas de transmisión
- 7.8 Relación de onda estacionaria (ROE)
- 7.9 Medición de ROE
- 7.10 Acopladores de antena
- 7.11 Imágenes cajas de sintonías
- 7.12 Impedancia de entrada caja de sintonía
- 7.13 Microcintas
 - 7.13.1 Estructura
 - 7.13.2 Modo de propagación
 - 7.13.3 Impedancia característica
 - 7.13.3 Aplicaciones
 - 7.13.3.1 Antenas microstrip
 - 7.13.3.2 Filtros microstrip
- Preguntas y ejercicios Capítulo 7.
- Referencias bibliográficas: Capítulo 7.

Capítulo 8: Concepto, características y aplicaciones de la fibra óptica

- 8.1 Introducción
- 8.2 Concepto y estructura de la fibra óptica
- 8.3 Principios de funcionamiento
 - 8.3.1 Principio de Huygens
 - 8.3.2 Ley de la reflexión
 - 8.3.3 Índice de refracción
 - 8.3.4 Fenómeno de la refracción
 - 8.3.5 Ley de Snell
 - 8.3.6 La reflexión total
- 8.4 Parámetros de funcionamiento de la fibra óptica
 - 8.4.2 Ángulo de aceptación total
 - 8.4.3 Propagación de la luz dentro de fibra
- 8.5. Entenas de operación
- 8.6 Tipos de fibra óptica
 - 8.6.1 Según forma de propagación
 - 8.6.2 Según la dispersión
 - 8.6.3 Según el tipo de índice de refracción
- 8.7 Número de modos de una fibra óptica
- 8.8 Diámetro máximo permisible del núcleo
- 8.9 Aplicaciones de la fibra óptica
 - 8.9.1 Conexión a la Internet
 - 8.9.2 Sistemas de comunicaciones
 - 8.9.3 Sistemas sensoriales
 - 8.9.4 Sistemas de Iluminación
 - 8.9.5 Intervenciones médicas

- 8.9.6 Inspecciones industriales
- 8.9.7 Investigaciones arqueológicas
- 8.9.8 Aplicaciones militares
- 8.9.9 Aplicaciones vehiculares
- 8.9.10 Mapa conceptual: principales aplicaciones de la fibra óptica
- 8.10 Alcance en enlaces ópticos
- 8.11 Estructura de los cables ópticos según el tendido
- 8.12 Conectores para fibra óptica
- 8.13 Acopladores y empalmes ópticos
 - 8.13.1 Acopladores ópticos
 - 8.13.2 Empalmes ópticos
 - 8.13.2.1 Empalme por fusión
 - 8.13.2.2 Empalme mecánico
- 8.14 Mapa conceptual: principales formas de uniones ópticas
- 8.15 Fabricación de la fibra óptica
 - 8.15.1 Fabricación de la fibra óptica de vidrio
 - 8.15.2 Fabricación de la fibra óptica de plástico
- 8.16 Mapa conceptual: fabricación de las fibras ópticas de vidrio
- 8.17 Características mecánicas de los cables ópticos
- 8.18 Asignación de espectro óptico
- 8.19 Dimensionamientos estructurales de la fibra y del cable óptico
 - 8.19.1 Dimensionamientos estructurales de la fibra óptica
 - 8.19.2 Dimensionamientos estructurales del cable óptico
- 8.20 Atenuación de la señal óptica
- 8.21 Medición de atenuación en la fibra óptica
 - 8.21.1 Medidor de potencia óptica
 - 8.21.2 Reflectómetro óptico
- 8.22 Ancho de banda de las fibras ópticas
- 8.23 Tiempo de subida de total del pulso óptico
- 8.24 Dispersión cromática
- 8.25 Compendio de características de la fibra óptica

Preguntas y ejercicios Capítulo 8.

Referencias bibliográficas: Capítulo 8.

Capítulo 9: Tendidos de cableado óptico

- 9.1 Introducción
- 9.2 Tipos de tendidos del cable óptico
 - 9.2.1 Tendido aéreo
 - 9.2.1.1 Tendido aéreo a través de torres de la red eléctrica
 - 9.2.1.2 Tendido aéreo a través de postes
 - 9.2.2 Tendido subterráneo
 - 9.2.2.1 Tendido manual
 - 9.2.2.2 Tendido mediante método de soplado

- 9.2.2.3 Consideraciones generales en tendidos subterráneos
- 9.2.2.4 Pérdidas por curvaturas
- 9.2.2.5 Cálculo del radio de curvatura
- 9.2.2.5 Redes de cableado óptico terrestre
- 9.2.3 Tendido submarino
 - 9.2.3.1 Barcos cableros
 - 9.2.3.2 Robot de arrastre y tendido
 - 9.2.3.3 Aspectos en el tendido
 - 9.2.3.4 Proceso de tendido del cable óptico
 - 9.2.3.5 Proceso de tendido en ambos sentidos
 - 9.2.3.6 Marco legal de los tendidos submarinos
 - 9.2.3.7 Principales redes de cableado óptico submarino existente
 - 9.2.3.8 Cables ópticos submarinos que conectan a Colombia
 - 9.2.3.9 Mapa mundial de los cables ópticos submarinos.
 - 9.2.3.10 Recientes redes de cableado óptico submarino.
- 9.3 Estructura básica de un enlace óptico submarino
- 9.4 Aspectos básicos para el diseño de enlaces ópticos
 - 9.4.1 Requerimientos del enlace
 - 9.4.2 Pérdidas en el enlace
 - 9.4.3 Aspectos de implementación
 - 9.4.4 Cálculo de potencia en recepción teórico ideal
 - 9.4.5 Cálculo de potencia en recepción teórico real
 - 9.4.5.1 Márgenes del enlace (Mar)
 - 9.4.5.2 Penalidades del enlace (Pn)
 - 9.4.6 Factores a considerar en el diseño final del enlace
- 9.5 Detección y corrección de error
- 9.6 Funcionamiento básico del OTDR
- 9.7 Redes ópticas inteligentes
- 9.8 Pérdidas por acoplamiento entre fibras con características diferentes
- 9.9 Pérdidas en acoplamiento entre fuente a fibra
- 9.10 Pérdidas por micro-curvaturas

Preguntas y ejercicios Capítulo 9.

Referencias bibliográficas: Capítulo 9

Capítulo 10: Componentes básicos de los enlaces ópticos

- 10.1 Introducción
- 10.2 Emisores ópticos
- 10.3 Detectores ópticos
 - 10.3.1 Funcionamiento del fotodiodo
 - 10.3.2 Parámetros del fotodiodo

- 10.4 Transmisor y receptor óptico
 - 10.4.1 Transmisor óptico
 - 10.4.2 Receptor óptico
- 10.5 Repetidores o amplificadores en enlaces ópticos
 - 10.5.1 Repetidores o amplificadores opto-electrónicos
 - 10.5.2 Repetidores o amplificadores ópticos
- 10.6 Las tarjetas de red óptica
- 10.7 Divisores ópticos
 - 10.7.1 Divisores ópticos FBT
 - 10.7.2 Divisores ópticos PLC
- 10.8 Multiplexación Demultiplexación óptica
 - 10.8.1 C DM
 - 10.8.2 D DM
 - 10.8.3 Diferencias entre C DM y D DM
- 10.9 Conmutadores ópticos
- 10.10 Filtros ópticos
 - 10.10.1 Filtros de interferencia
 - 10.10.2 Filtros de absorción
 - 10.10.3 Filtros de cuña
 - 10.10.4 Filtro de Faraday
- 10.11 Nodos ópticos
- 10.12 Fuente de alimentación

Preguntas y ejercicios Capítulo 10.

Referencias bibliográficas: Capítulo 10

CAPÍTULO 1.

CONCEPTO, TIPOS Y UTILIZACIÓN DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN GUIADOS

1.1 Introducción

Los *medios de transmisión guiados*, son todos aquellos que sirven para transportar señales eléctricas, ópticas o electromagnéticas, en forma guiada (encapsulada), desde el generador que las originan hasta los usuarios o consumidores que las utilizan.

Entre las diferentes redes donde se utilizan, una gran parte de estos medios, se encuentran en las de los sistemas de comunicaciones electrónicas y ópticas, y por otro lado, algunos de ellos, en las de los sistemas de distribución de energía eléctrica.

En este capítulo se describirá, en primera instancia, la estructura y funcionamiento básico general de los sistemas de comunicaciones y de distribución eléctrica, en términos muy referenciales, con el propósito de ubicar el espacio que le corresponde a los respectivos *medios de transmisión* en estos sistemas.

El propósito de este capítulo es conceptualizar sobre lo que significa los *medios de transmisión guiados* de los sistemas de transferencia de señales de información (electrónica y ópticas) y de energía eléctrica, los diferentes tipos de dichos medios y su función fundamental (utilización). En el resto de los capítulos se describirán los principales aspectos de cada uno de los diferentes tipos de estos medios, haciendo énfasis en sus características estructurales, físicas y eléctricas, así como en la construcción e implementación, desarrollo y aplicabilidad de estos. Complementando estos aspectos con los respectivos modelos matemáticos que explican sus comportamientos.

1.2 Estructura básica de los sistemas transferencia de señales

Tal como se mencionó en la parte introductoria de este capítulo, a continuación, se describe la estructura básica de los dos principales grupos de sistemas, cuyas redes de interconexión utilizan por lo menos alguno de los diferentes tipos de *medios de transmisión guiados* a ser tratados en este libro.

1.2.1 Estructura básica de los sistemas de comunicación electrónica

Como es bien conocido, la estructura fundamental de los sistemas de comunicación electrónica se conforma de los siguientes componentes básicos:

- **Sistema de transmisión:** encargado esencialmente de captar la señal que trae el mensaje (información) a ser emitida, convertirla (en señal eléctrica), modularla o codificarla, amplificarla, transformarla (en la señal adecuada al medio de transmisión) y emitirla.
- **Medio de transmisión:** permite la acción de transferir el mensaje desde el transmisor hasta el sistema de recepción.
- **Sistema de recepción:** encargado esencialmente de recibir la señal que trae el mensaje y que ha sido transportada por el medio de transmisión, procesarla (transformarla a la señal eléctrica original que fue manejada en el transmisor), demodularla o decodificarla recuperando la señal eléctrica que trae la información y reproducirla a las características propias de la señal que ha sido captada por transductor correspondiente de entrada del transmisor.

En la figura No. 1.1 se representa un diagrama donde se indican los componentes básicos de un sistema de comunicaciones.

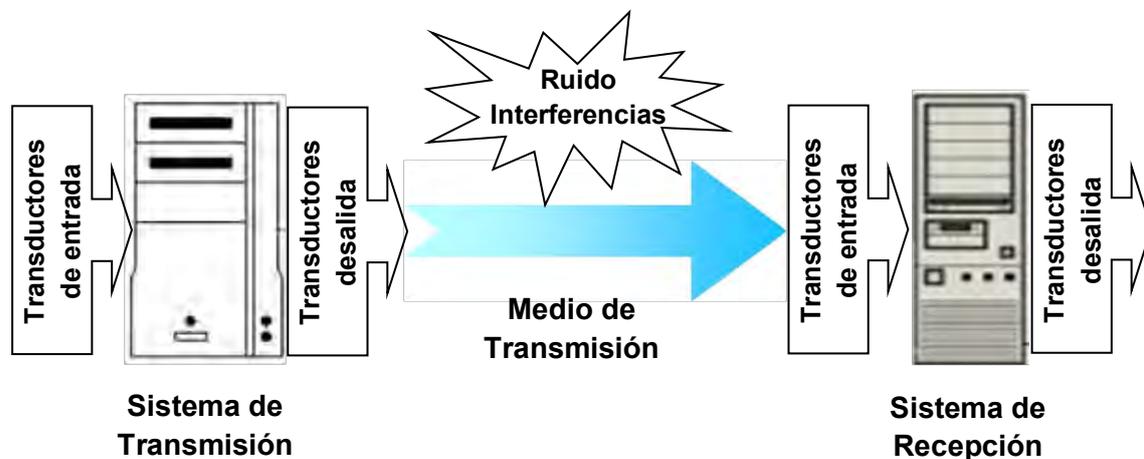


Fig. No. 1.1 Composición básica de un sistema de comunicación

Debido a que los equipos electrónicos (incluyendo los transmisores y receptores) trabajan sólo con señales eléctricas, se hace necesario convertir las señales originales, que se van a transmitir, en señales eléctricas. Entonces para captar las señales a transmitir (voz, sonido, imágenes, temperatura, niveles, entre otras muchas más), se requiere de dispositivos específicos para captar cada una de estas respectivas señales, los cuales a la vez las convierte en señales eléctricas.

A estos dispositivos se le conocen como transductores de entrada al transmisor. Entre otros tipos, de los muchos existentes, de estos transductores se encuentran: los *micrófonos* (para la voz y demás sonidos), las *cámaras* (para imágenes y video), los *sensores* (para diferentes señales tales como: temperaturas, niveles, proximidad, contaminación, entre otras muchos más). A sí mismo los generados o almacenadores de señales de datos, tales como las *consolas*, los PC, los CD, las UBS, las tabletas, entre otros. Existe una gran gama de variedades de estos transductores, tanto en tamaño como su estructura y funcionalidad. ⁽¹⁾

Dependiendo del *medio de transmisión* a ser empleado, para que se realice la transferencia de la señal de tipo eléctrico que entrega el transmisor hacia el receptor, debe convertirse esta señal a una con características específicas al medio de transmisión que permita dicha transferencia. A los dispositivos que realizan esta conversión se le conocen como transductores de salida del transmisor.

Entre otros tipos, de los muchos existentes de estos transductores, se encuentran: las *antenas transmisoras* (para radiación por el espacio libre o superficie terrestre) las cuales convierten las señales eléctricas, que contienen el mensaje a transmitir, en señales electromagnéticas, las cuales estos medios de transmisión le permiten su propagación.

Otros de estos transductores son los *emisores de luz* (para transmisión por fibra óptica), los cuales convierten las señales eléctricas que entrega el transmisor con el mensaje a transferir, en señales luminosas, las cuales estos medios de transmisión le permiten su propagación.

Para el caso de que se utilice como medio de transmisión cables conductores: cable coaxial, par telefónico, par trenzado, o cualquier otro de características conductivas, y que la señal a transmitir sea digital (PCM: *ulse Code Modulation*), y además se quiera transmitir por el mismo cable conductor la señal de pulsos que lleva la información (mensaje) y la señal DC de alimentación para los repetidores respectivos (en caso de requerirse), se debe emplear un transductor de salida denominado *codificador de línea*, el cual convierte el código PCM (que produce un DC) en un código de línea el cual no genera DC, y de esta forma no existirá conflicto alguno entre el DC de la alimentación para las repetidoras y el del código que lleva el mensaje.

Existe una gran gama de variedades de estos transductores, tanto en tamaño como en su estructura y funcionalidad.

Para que el receptor pueda procesar y manejar la señal que trae el mensaje que ha sido transmitido, ésta debe ser de características eléctricas. Por lo tanto, la señal que le entrega el *medio de transmisión* debe ser convertida a señal eléctrica, sin perjuicio del mensaje que contiene, mediante dispositivos que realicen esta conversión, los que se denominan traductores de entrada al receptor. Entre estos transductores se encuentran: las *antenas receptoras* (cuando la señal transmitida viene vía radio: espacio libre o superficie terrestre). Otro de estos traductores son los *detectores de luz* (cuando la señal transmitida viene a través de fibra óptica). Así mismo un *decodificador de línea*, si la señal viene en código de línea, convirtiéndola al código original PCM, generado en el transmisor. Existe una gran gama de variedades de estos transductores, tanto en tamaño como en su estructura y funcionalidad.

Finalmente, para que la señal sea recuperada a su estado natural o sea desplegada o utilizada en una aplicación específica, deberán existir *traductores de salida* del receptor, dependiendo de las características propias de la señal que trae la información, convirtiendo las características eléctricas de la señal que entrega el receptor a las respectivas de la señal captada en el transmisor. Entre estos transductores se encuentran: el *parlante o bocina* (para la voz y demás sonidos), las pantallas (para imágenes y video), los dispositivos o equipos terminales de datos *DETs* (*monitores, impresoras, USB, PC, y demás depósitos reproductores o almacenadores de datos*). Existe una gran gama de variedades de estos transductores, tanto en tamaño como en su estructura y funcionalidad.

1.2.2 Estructura básica de los sistemas de transmisión de energía

Las características estructurales y los requerimientos de instalación y funcionamiento de las estaciones y tendidos de las redes eléctricas dependen fundamentalmente de la magnitud de tensión de voltaje que manejen y o transporten. En la figura No. 1.2 se hace una representación esquemática de la composición básica de un sistema de transmisión de energía eléctrica.

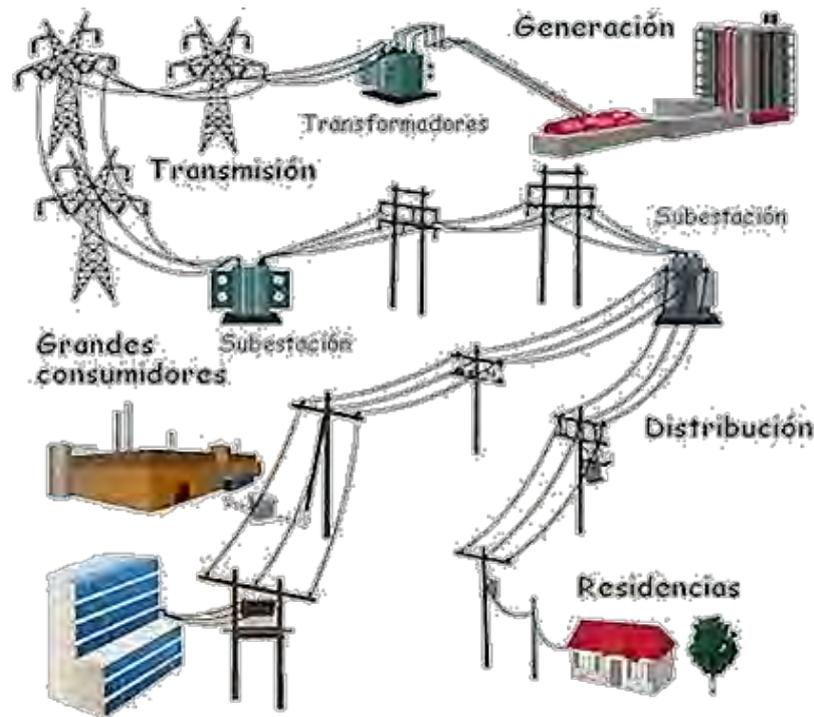


Fig. No. 1.2 Estructura básica de un sistema transmisión de energía eléctrica.

Fuente: Instalaciones eléctricas de alta tensión. (2019). Disponible:

<http://energiza.org/noticias-renovetec/122-especial-alta-tensi-C3-B3n-en-instalaciones-industriales-679-instalaciones-electricas-de-alta-tension>.

A continuación, se enunciarán algunos de los principales aspectos que estas estaciones y tendidos presentan en su conformación y operación. ⁽²⁾

1.2.2.1 Estación y red de transmisión

Corresponden a aquellas que se encargan de recibir las señales de corriente entregadas por las estaciones generadoras de energía eléctrica (hidroeléctricas, termoeléctricas, plantas nucleares, centrales eólicas, centrales de energía solar, entre otras) y transferirlas a las redes de distribución correspondientes.

Generalmente las tensiones de las señales que entregan las estaciones generadoras de energía eléctrica están por debajo de los 40 v, lo que permite que los aislamientos que se utilizan en estos generadores, por tener partes móviles, no presenten mayor dificultad en su desempeño. La frecuencia de estas señales es de 60 Hz para el caso americano y de 50 Hz para el caso europeo.

Sin embargo, para ser más eficiente la transmisión de las señales eléctricas, la tensión que salen de los generadores se eleva por encima de los 100 v, tensiones que tienen que manejar las estaciones y redes de transmisión (transporte).

1.2.2.2 Subestación y red de reparto

Corresponden a aquellas que se encargan de recibir las señales eléctricas transferidas por las redes de transmisión, reducirles sus niveles de tensión y repartirlas a las diferentes subestaciones de distribución de energía. Estas subestaciones reciben la energía de una o varias líneas de la red total de transmisión. La conformación y los aspectos estructurales de estas subestaciones son muy similares a las de las estaciones de transmisión de energía, referidas anteriormente, pero con características dimensionales menos robustas, debido a que, en su gran mayoría, manejan menor cantidad de energía eléctrica. ⁽³⁾

Estas subestaciones atienden la necesidad de que las redes eléctricas dispongan de infraestructuras eléctricas, que permitan adecuar las altas tensiones, que transportan las líneas provenientes de las estaciones generadoras de energía, para lograr niveles inferiores (menor de los 100 v). Es por esta razón que a estas subestaciones se le conocen también como de transformación. En la figura No. 1.3 se aprecia la panorámica de una subestación de reparto o de transformación.

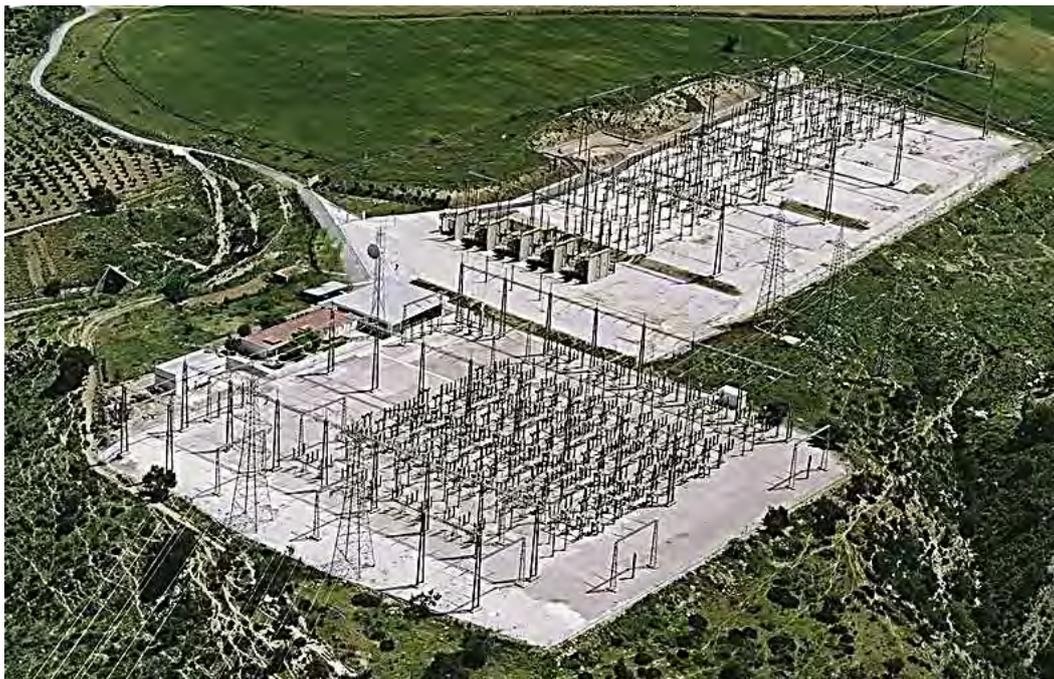


Fig. No. 1.3 Esta panorámica de una subestación de reparto o de transformación.

Fuente: Subestaciones eléctricas. (2019).

Disponible: <http://www.endesaeduca.com> Endesa educa recursos-interactivos el-transporte-de-electricidad xvi.-las-subestaciones-electricas.

Las tensiones que manejan las redes eléctricas de reparto están alrededor del promedio de los 50 v. En la figura No. 1.4 se puede apreciar las redes de una subestación de reparto.



Fig. No. 1.4 Vista de la cabecera de una red de reparto de energía eléctrica.

Fuente: Subestación eléctrica. (2019). Disponible: <http://elcomercio.pe/economia/negocios/rio-alto-mining-invirtio-us25-mlls-subestacion-electrica-noticia-1777042>.

1.2.2.3 Subestación y red de distribución

Corresponden a aquellas que se encargan de recibir las señales eléctricas transferidas por las redes de reparto, reducirles sus niveles de tensión (entre 110 kV y 30 kV) y distribuir las a las zonas y localidades donde se encuentran los consumidores finales. ⁽⁴⁾

La conformación y los aspectos estructurales de estas subestaciones son muy similares a las anteriores subestaciones, pero debido a que manejan tensiones más reducidas, sus componentes y dispositivos son de los de menor requerimiento dimensional entre todas las subestaciones de energía eléctrica.

Estas subestaciones se encuentran ubicadas muy cerca de las zonas urbanas e incluso muchas de ellas ya han sido incorporadas al perímetro urbano, debido a los procesos acelerados de expansión que han tenido muchas ciudades. En la figura No. 1.5 se muestra una panorámica de una subestación de distribución de energía eléctrica.



Fig. No. 1.5 Vista panorámica de una subestación de distribución de energía eléctrica

Fuente: "Colección de servicios de ingeniería de alta, Media y baja tensión" AecaGroup.

(4) Basic Structure of the Electric System. (2019).

Disponible: <http://2.econ.iastate.edu/classes/econ458/tesfatsion/Home458Team.htm>

1.3 Clases de medios de transmisión

Existe una gran diversidad de medios de transmisión de señales, dependiendo del tipo de la señal a ser transmitida. Entre esta diversidad de medios de transmisión está el *espacio libre*, para el caso de una conversación directa entre dos personas, donde el que habla es el transmisor y el que escucha es el receptor. Como se mencionó en la parte introductoria de este capítulo, en este libro se hará referencia a los *medios de transmisión guiados* que utilizan las redes de los sistemas de comunicación electrónica y de las de los sistemas de transmisión de energía eléctrica.

Como se ha venido indicando, en la práctica existen esencialmente dos clases de *medios de transmisión*, los que encapsulan la señal para ser transmitida denominados *medios de transmisión guiados* (cables), y los que no la encapsulan denominados *medios de transmisión no-guiados* (espacio o superficie terrestre).

1.4 Concepto de medios de transmisión guiados

En términos generales, un *medio de transmisión* es aquel medio mediante el cual se transfiere, ya sea una señal de información (para el caso de los sistemas de

comunicación electrónica) o una señal de energía eléctrica (para el caso de los sistemas de transmisión de señales eléctricas).

Los *medios de transmisión guiados* son unos de los tipos de medios utilizados en los sistemas de comunicación electrónica y en los sistemas de transmisión de energía eléctrica, a los cuales se enfocará la temática de este libro. Estos medios están conformados por componentes físicos y sólidos, de material conductor y o dieléctrico (en el caso de los cables ópticos). Como se mencionó anteriormente, corresponden a aquellos que concentran o guían la señal. Es decir, la señal se transmite encapsulada dentro de dichos medios. Estos medios son creados y desarrollados por el hombre.

1.5 Tipos de medios de transmisión guiados

Existe una gran variedad de tipos de *medios de transmisión guiados*, con sus correspondientes características estructurales y dimensionales. Dependiendo de estas características específicas, estos medios son más eficientes en determinadas aplicaciones. En la figura No. 1.6 se muestra un diagrama donde se indica los principales *medios de transmisión guiados*, para transferir señales ya sea de información o de energía.

a que todo medio físico que permita el traslado de señales que transfieren información o energía, de un punto a otro, se pueden considerar como *medios de transmisión guiados*, además de los indicados en el diagrama representado en la figura No. 1.6, otros casos tales como el de los circuitos impresos, las multicintas, pares gemelos, entre otros. En este libro se contemplarán los aspectos principales sólo de los medios de transmisión guiados indicados en la figura No. 1.6. ⁽⁵⁾

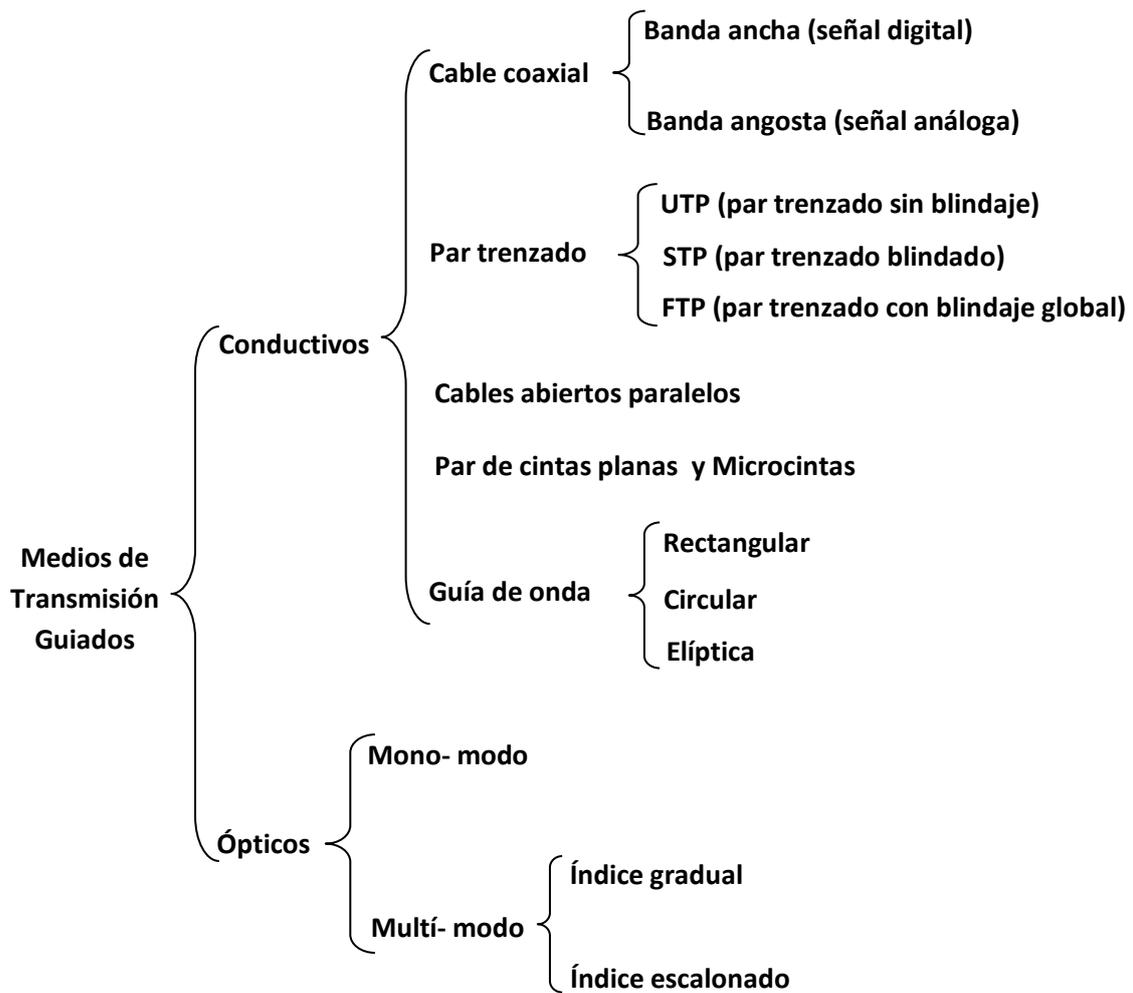


Fig. No. 1.6 Principales tipos de medios de transmisión guiados de los sistemas de comunicación electrónica.

Se podría generalizar que los *medios de transmisión guiados* están conformados por cables que se encargan de guiar las señales desde el respectivo generador hasta los usuarios correspondientes. Estos cables pueden ser de material conductor o de material dieléctrico, dependiendo del tipo de señal a transmitir. Si la señal a transmitir es una señal eléctrica, los cables deberán ser conductivos y si es de tipo luminoso los cables deberán ser dieléctricos (principalmente vidrio o plástico). La velocidad de transmisión que ofrecen estos medios depende del tipo de material que utilicen y de sus características eléctricas.

1.6 Utilización de medios de transmisión guiados

La variedad en las cuales se puede utilizar los *medios de transmisión guiados* es muy amplia. Uno de los criterios para clasificar o tipificar estos usos, corresponde

al tipo de señal que se propaga por ellos. Estos tipos de señales son básicamente: *señales de información* y *señales de energía*. Entre la gran variedad que existen de estos *medios de transmisión guiados*, se pueden resaltar los que a continuación se relacionan, entre otros:

Las *guías de ondas* son muy utilizadas, principalmente, para transferir señales de información en trayectos relativamente cortos, debido esencialmente a su alto costo y a su dificultad de tendido y distribución de la señal. Una de las tantas aplicaciones de estos medios es para la interconexión entre los equipos transmisores y los equipos receptores con sus respectivas antenas, especialmente para el caso de *señales de información* de alta frecuencia (GHz), en las cuales presentan una gran eficiencia de funcionamiento.

Los *pares de cintas planas* se utilizan principalmente para transferir señales de información de altas potencias, en frecuencias relativamente bajas (Hz), como es el caso de la interconexión entre los transmisores de las estaciones de radiodifusión AM de alta potencia y las respectivas torres radiadoras. Estos medios por su estructura plana ofrecen una superficie de disipación adecuada para señales de información de potencias altas.

Los *cables abiertos paralelos*, corresponden a aquellos medios que son muy eficientes para transferir señales de energía eléctrica, como es el caso de las redes eléctricas, utilizadas por las empresas de distribución de energía eléctrica en una región o país.

El *cable coaxial* es utilizado tanto para transmitir señales de información de potencias altas y medias, así como de potencias bajas. Para la transmisión de señales de información de potencias altas y medias se utilizan *cables coaxiales* de mayor diámetro, como es el caso de la interconexión entre los transmisores de las estaciones de radiodifusión AM y FM y sus respectivos sistemas de radiación. Para la transmisión de señales de información de potencias bajas se utilizan *cables coaxiales* de diámetros menores, como es el caso de las redes de transmisión de datos y de transmisión de audio.

Los *cables trenados* y los *cables coaxiales* de potencias bajas, como se mencionó anteriormente, se utilizan esencialmente para el cableado de las redes de transmisión de datos, en el caso de que los datos sean pulsos eléctricos, y *fibra óptica* en el caso de que las señales de los datos sean pulsos luminosos. Los *cables trenados* son los más utilizados para la transmisión de señales de información análogas como de digitales, esencialmente para enlaces relativamente reducidos y de ancho de banda moderada.

Teniendo de referencia lo expuesto anteriormente, se puede decir que entre las principales aplicaciones de los *medios de transmisión guiados* existen dos grandes categorías: *transmisión de señales de información* y *transmisión de señales de energía*.

1.6.1 Transmisión de señales de información

Para este tipo de transmisión las señales de información pueden ser análogas o digitales, ya sean de características eléctricas o luminosas. En este caso la potencia de estas señales es relativamente baja, y se utilizan, además del medio denominado radio, los *medios de transmisión guiados* con robustez liviana. Entre estos medios, se destacan principalmente: los pares trenzados, los cables coaxiales (para bajas potencias: con diámetros generalmente pequeños) y las fibras ópticas. En el cuadro No 1.1 se indican algunas de las principales características funcionales, de estos tres tipos de medios, cuando se utilizan como medios de transmisión de datos. Los valores relacionados en el cuadro son valores típicos. ⁽⁶⁾

Medio de transmisión	Ancho de banda (típico)	Velocidad binaria (típica)	Atenuación (típica)	Retardo (típico)	Separación entre repetidores	Velocidad de propagación (típico)
Par trenzado con carga	2.5 GHz	40 Gbps	0.2 dB m 1 Hz	50 us m	2 a 10 m	0.65 C
Cable coaxial	450 MHz	10 Mbps	7 dB m 10 MHz	4 us m	1 a 10 m	0.75 C
Fibra óptica	2.5 GHz	160 Tbps	0.2 a 0.5 dB m	5 us m	10 a 100 m	0.85 C

Tabla No. 1.1 Principales parámetros de funcionamiento de los medios de transmisión de datos más utilizados.

Fuente: García, T. Díaz erdejo, P. López, J. Soler, E., *Transmisión de datos y redes de computadores*, Pearson Educación.2014.

En la figura No. 1.7 se indica los rangos de frecuencia donde la utilización de los medios de transmisión de señales de información, tanto guiados como no guiados, es más eficiente. ⁽³⁾

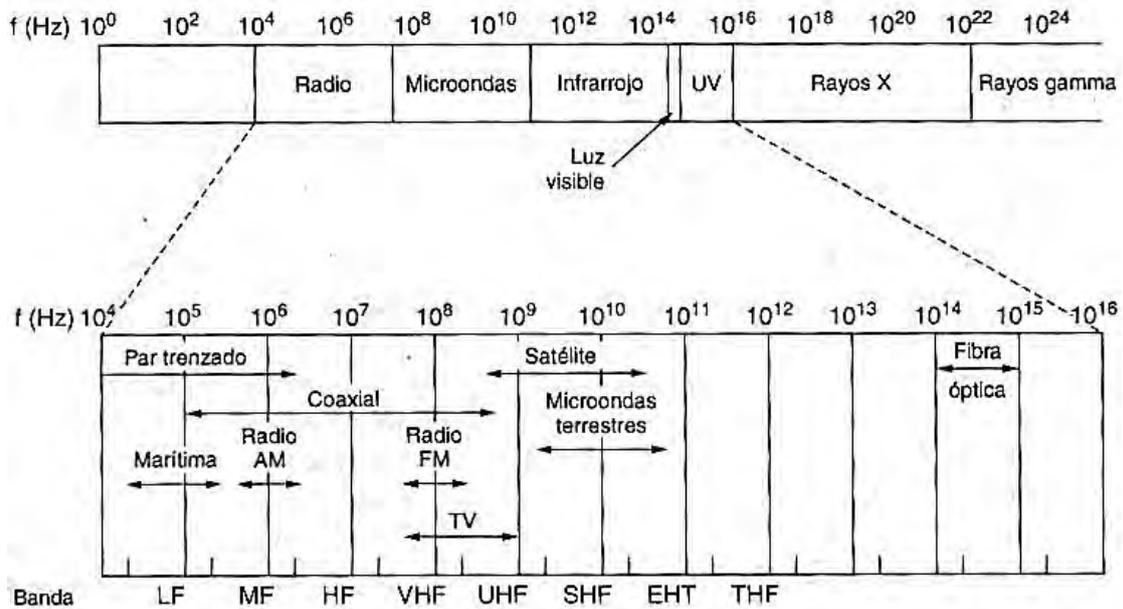


Fig. No. 1.7 Espectro electromagnético y su utilización en las telecomunicaciones

Fuente: Paola82co, Redes Inalámbricas. (2019).

Disponible: <http://monografias.com/trabajos12/reina/reina.shtml>

La utilización de estos medios es muy frecuente en las redes de características físicas de los sistemas que prestan servicio de transmisión y o difusión de información, entre los que se encuentran los que se relacionan a continuación, entre muchos otros.

1.6.1.1 Sistemas de telefonía fija

Son todos aquellos sistemas que prestan servicios de telefonía fija, como es el caso de las plantas telefónicas de las empresas, instituciones y demás organizaciones que las utilizan para sus comunicaciones internas y con el sector exterior. Así mismo los sistemas telefónicos al servicio público, conocidos como la red telefónica pública conmutada PSTN (*Public Switched Telephone Network*). En la figura No. 1.8 se hace una representación esquemática de la estructura básica de una PSTN. ⁽⁷⁾

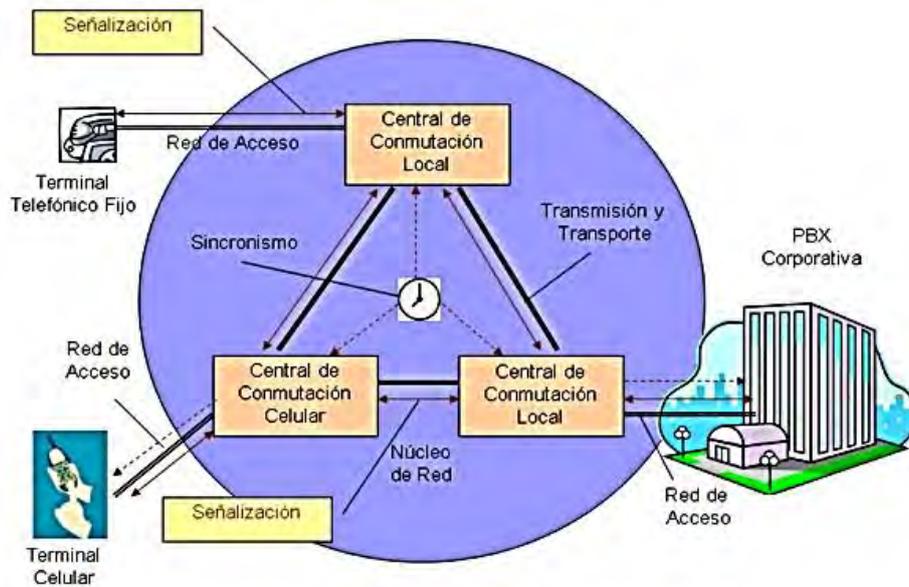


Fig. No. 1.8 Estructura básica de una red telefónica pública conmutada PSTN.

Fuente: Joskowicz, J. "Red Telefónica" Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad de la República Montevideo, Uruguay, 2018, p. 4.

1.6.1.2 Sistemas de transmisión de datos

Corresponden a todos aquellos sistemas que prestan servicios de interconexión entre varios equipos computacionales para compartir información, aplicaciones y recursos físicos que hacen parte de la red correspondiente. En la figura No. 1.9 se representa la estructura básica de una *red de transmisión de datos* típica. ⁽⁸⁾

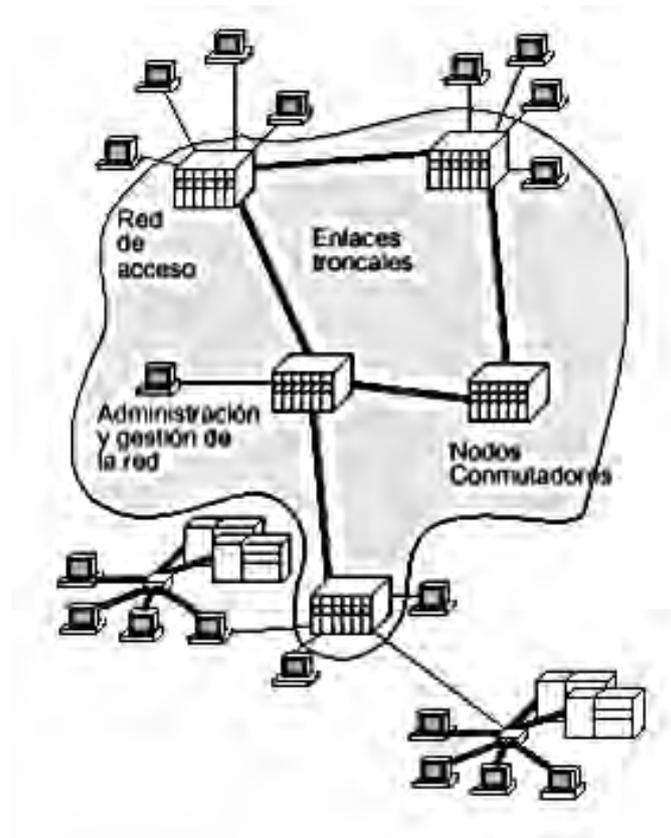


Fig. No. 1.9 Estructura básica de una red de transmisión de datos.
 Fuente: orrillo Pantaleon, M.E., *Redes de datos y conectividad*". 2016, p. 11.

(8) orrillo Pantaleon, M.E., *Redes de datos y conectividad*". 2016, pp. 11-12..

1.6.1.3 Sistemas de televisión por cable CATV

Son todos aquellos sistemas que ofrecen servicios de televisión a través de redes de cableado. En la figura No. 1.10 se representa la estructura básica de la red de un típico sistema de televisión por cable.

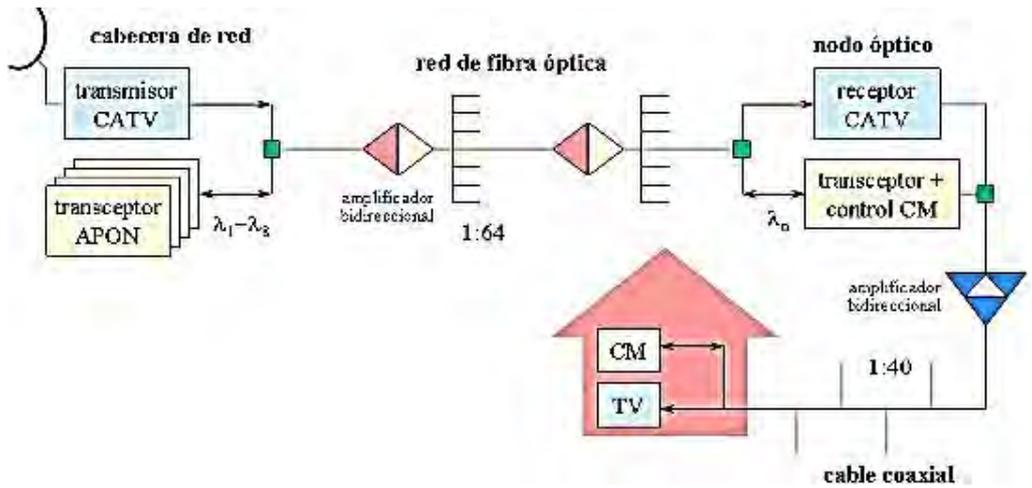


Fig. No. 1.10 Estructura básica de una red de un sistema de televisión por cable típica CAT .

Fuente: Catálogo "líneas de acceso dedicado", Marcossd, 2017..

1.6.1.4 Sistemas de circuitos cerrados de televisión CCTV

Corresponden a todos aquellos sistemas orientados a prestar el servicio de monitoreo, de los espacios de una edificación o lugar, a través de toma de video en tales sitios. En la figura No. 1.11 se muestra la estructura básica de la red de un típico sistema de circuito cerrado de televisión. ⁽⁹⁾

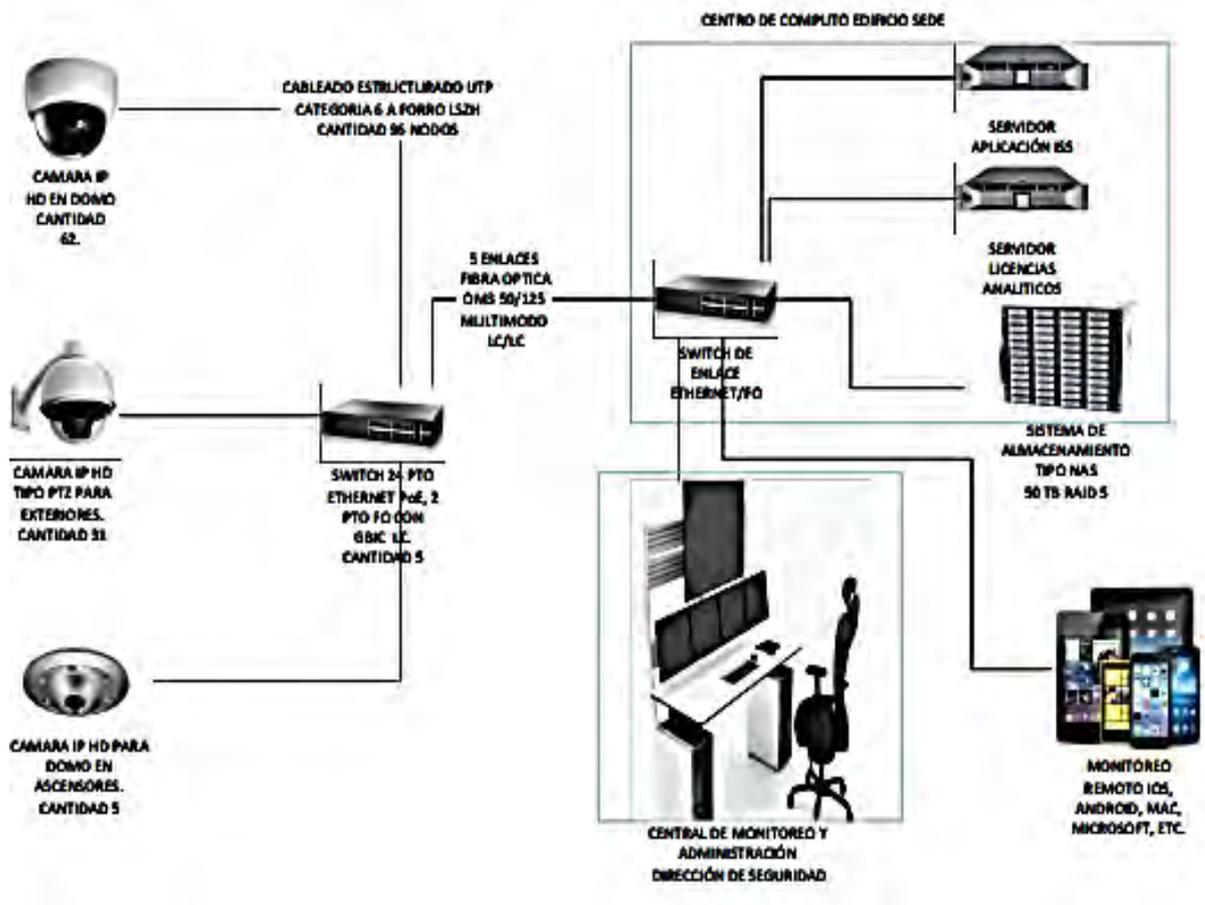


Fig. No. 1.11 Estructura básica de una red de un sistema de circuito cerrado de televisión típica CCT .

Fuente: CCT -Español (2019) Disponible: [a introducción del canal CCTV-](#) .

1.6.1.5 Sistemas de televisión por Internet IPTV

Son todos aquellos sistemas que presentan el servicio de televisión vía la infraestructura de la red de Internet. En la figura No. 1.12 se muestra la estructura básica de la red de un sistema de televisión por IP típica. ⁽¹⁰⁾

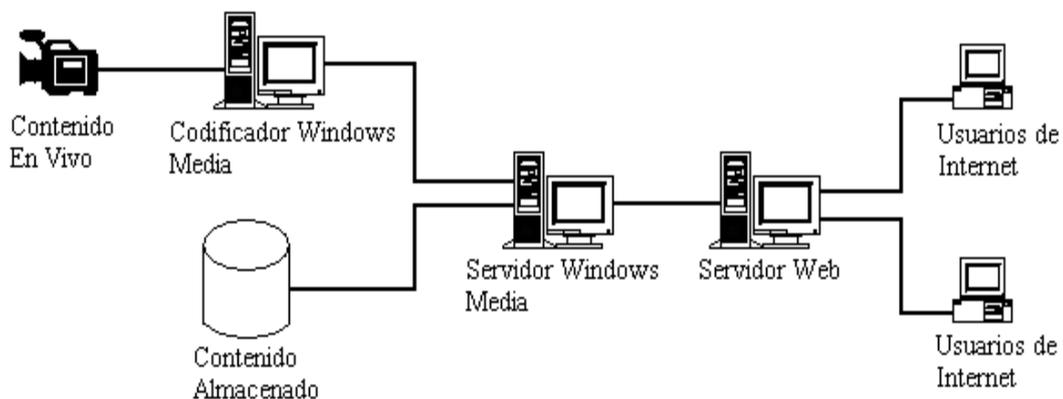


Fig. No. 1.12 Estructura básica de una red de un sistema de televisión por IP típica IPT .

Fuente: Jaén, E. G. Martínez, A. Morales, M. Rangel, N. Villarreal, ., *Implementación de la TV por Internet en la Universidad Tecnológica de Panamá* 2017, p. 5.

1.6.1.6 Sistemas de radio por Internet iRadio

Son todos aquellos sistemas que presentan el servicio de radio vía la infraestructura de la red de Internet. En la figura No. 1.13 se indica la estructura básica de la red de un típico sistema de televisión por IP. ⁽¹¹⁾

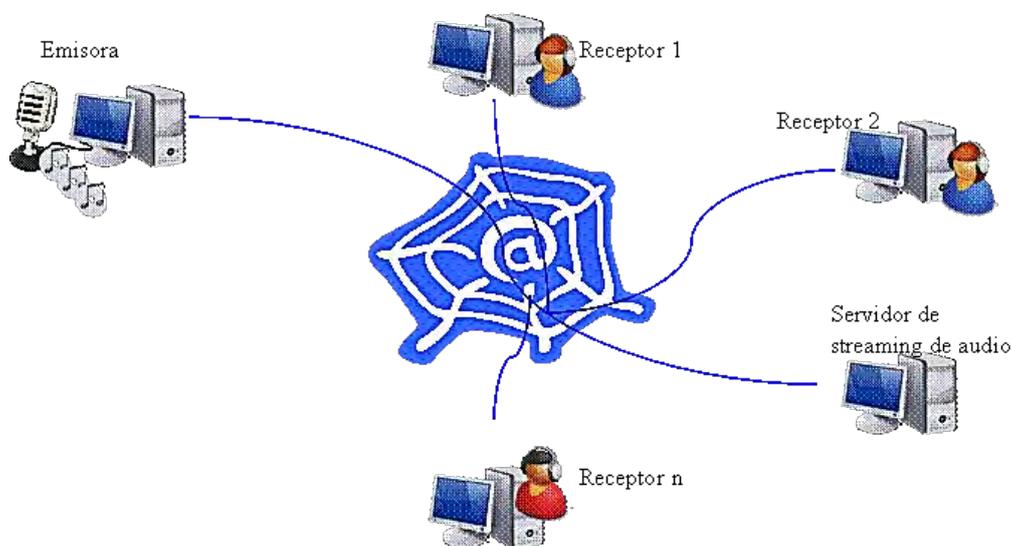


Fig. No. 1.13 Estructura básica de una red de un sistema de radio por IP típica iRadio.

Fuente: Martín, J. *Monografía: creación de una emisora de radio a través de Internet*, Observatorio Tecnológico, 2017, p. 9.

1.6.1.7 Sistemas de comunicaciones mediante línea de potencia (PLC)

Los sistemas PLC (o *Power Line Communication*) corresponden a aquellos sistemas que utilizan la red eléctrica pública o la de alguna institución, para prestar servicio de comunicación. La tecnología PLC aprovecha la red eléctrica para convertirla en una línea digital de alta velocidad de transmisión de datos, permitiendo, entre otras cosas, el acceso a la Internet mediante banda **ancha**. En la figura No. 1.14 se indica la estructura básica de la red de un sistema PLC. ⁽¹²⁾

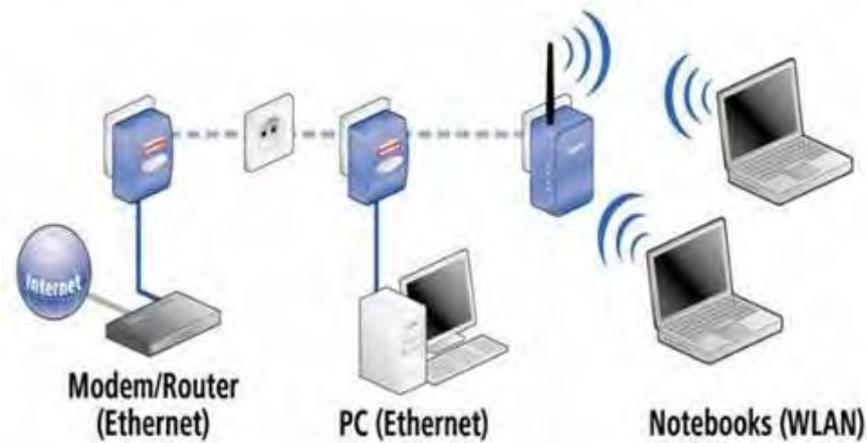


Fig. No. 1.14 Estructura básica elemental de un sistema PLC.
 Fuente: Sistemas PLC. (2019). Disponible: www.informatica-hoy.com.ar -2008-2017.

1.6.1.8 Sistemas de distribución de señal TV

Corresponden a aquellos sistemas que permiten la distribución de señal y gestión de audio y video, a una gran cantidad de puntos ubicados en diferentes sitios de una edificación. En la figura No. 1.15 se muestra la estructura básica de la red de un típico sistema de distribución de señal T .⁽¹³⁾



Fig. No. 1.15 Estructura básica de un sistema de distribución de señal T .
 Fuente: Catálogo Cable Time- distribución de señal", ideoDigital, 2017

1.6.1.9 Sistema de antena comunitaria de TV

Corresponden a aquellos sistemas de antenas destinados a dar servicio a todo o parte de un edificio y o a una agrupación residencial, suministrando señal de televisión a varios usuarios. En la figura No. 1.16 se representa una imagen de la estructura básica de un sistema de antena comunitaria de T .

En el informe 482-1 de la UIT, se relacionan algunas características que, según esta organización, deben recomendarse para la instalación y la operación los sistemas de antenas de uso doméstico, colectivo e individual, para el caso de la recepción de las emisiones terrenales. ⁽¹⁴⁾

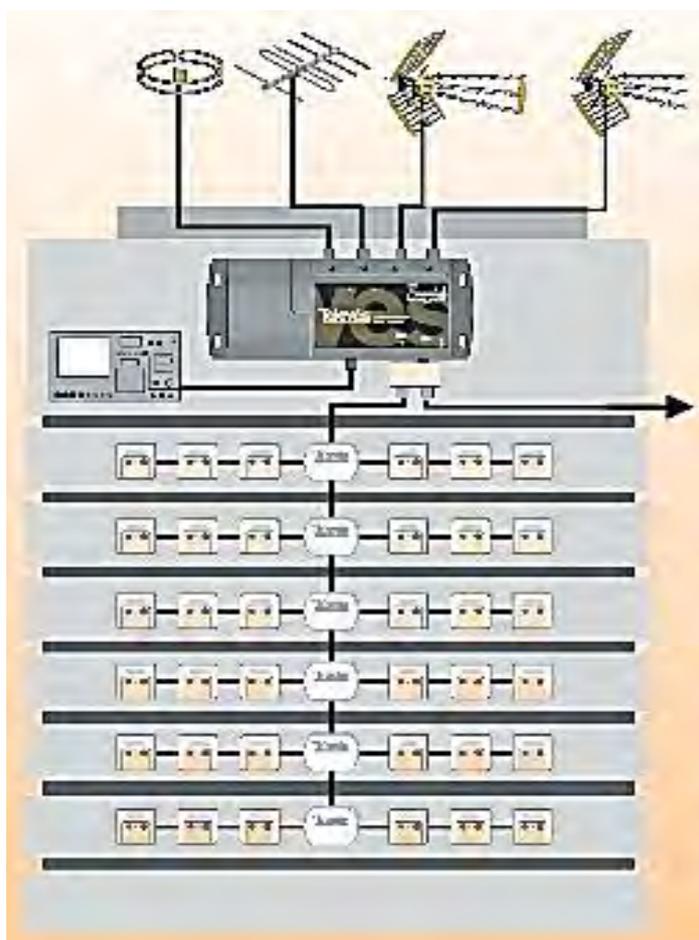


Fig. No. 1.16 Estructura básica de un sistema de antena comunitaria de T .
Fuente: Catálogo "Instalaciones y esquemas" Televes, 2018.

1.6.1.10 Sistemas de interconexión a los transmisores de radio difusión

Hay que reseñar que existen señales de información con potencias altas, como es el caso de las señales que suministran los transmisores de las emisoras de radiodifusión sonora AM y de FM, y las de las estaciones de difusión T , ya sean análogas o digitales. Estas señales las suministran los respectivos transmisores de estas estaciones a un *medio de transmisión guiado*, para que se las entreguen a las correspondientes antenas para ser radiadas.

El trayecto que cubren estos medios es relativamente reducido, comparado con los trayectos de las *redes de transmisión de datos*. Para esta utilización es frecuente el empleo de cables coaxiales de diámetros mayores que los de los cables coaxiales utilizados en el caso de las *redes de transmisión de datos*, con el propósito de poder soportar las señales de información de altas potencias. También para este tipo de señales se emplean el *par de cintas planas*, las cuales como se mencionó anteriormente, ofrecen una superficie de disipación más amplias para señales de información de potencias altas.. En la figura No. 1.17 se muestra a un *par de cintas planas*, sobre soportes, interconectando el transmisor de una estación de radiodifusión AM con su respectiva antena radiador. ⁽¹⁵⁾



Fig. No. 1.17 Interconexión entre transmisor de una estación de radiodifusión AM y su torre-radiador.

Fuente: López Tafur, m., *Antenas para onda Media AM* " Capítulo 6 EE525M UNI FIEE, 2015, p. 56.

Así mismo en algunos casos, especialmente para los radioenlaces de microondas, estas interconexiones se realizan a través de guías de onda, las cuales presentan menos atenuación a las señales RF de alta frecuencia.

1.6.2 Transmisión de señales de energía

Para este tipo de transmisión las señales de energía son análogas y contienen, por lo general potencias elevadas. Dentro de los diferentes sistemas de transmisión de señales de energía eléctrica, se encuentran los que se relacionan a continuación:

1.6.2.1 Sistemas de distribución de energía eléctrica

Corresponden a aquellas redes de distribución de la energía eléctrica desde los respectivos generadores (plantas eléctricas, centrales hidroeléctricas, centrales termoeléctricas, plantas de energía nuclear, centrales eólicas, centrales de energía solar, entre otras) a los correspondientes consumidores de una región determinada (fábrica, institución, localidad, ciudad, país, entre otros). En la figura No. 1.18 se representa el diagrama simplificado de una red de distribución de energía eléctrica. Los valores de las tensiones anotados en este diagrama corresponden a las normas europeas.

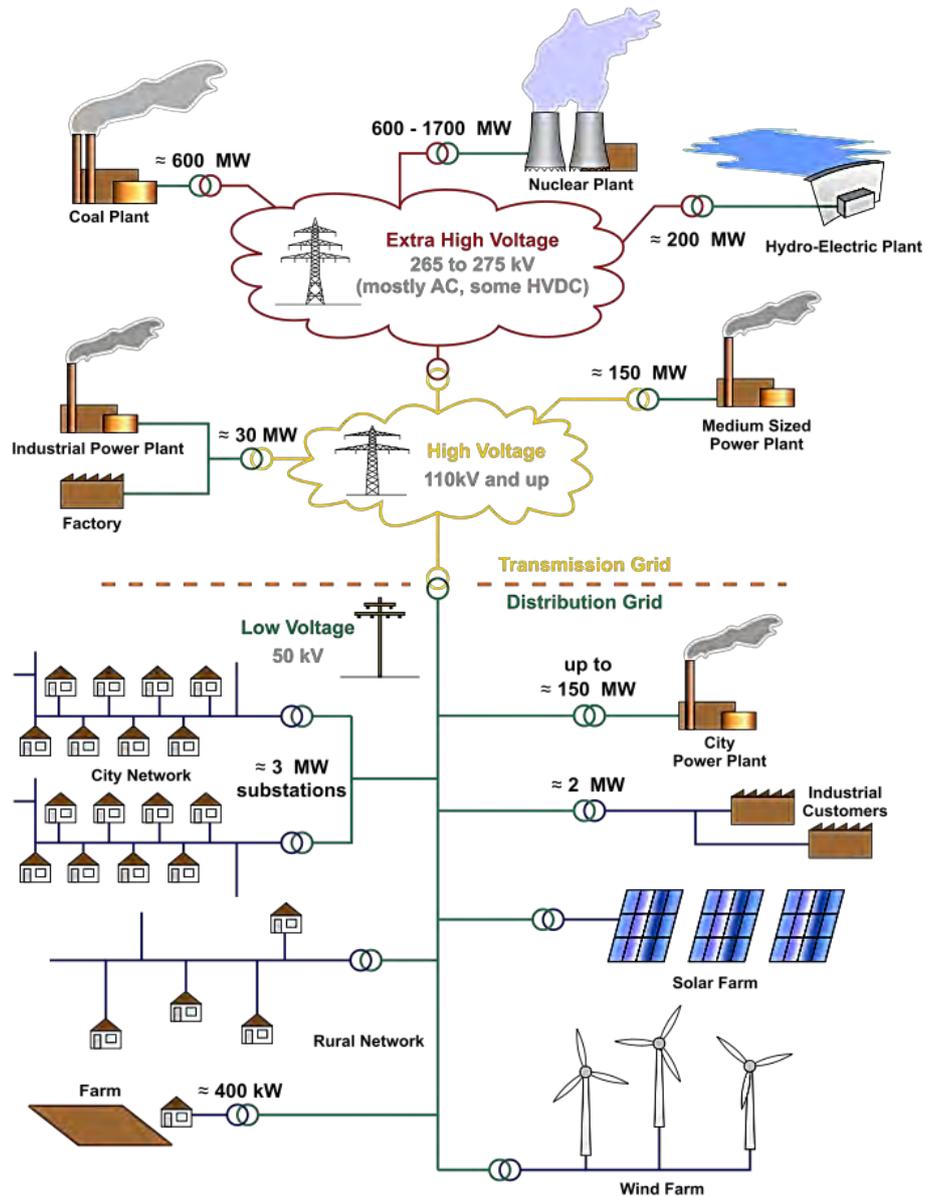


Fig. No. 1.18 Diagrama simplificado de una red de distribución de energía eléctrica.

Fuente: Sistemas de distribución de energía eléctrica. (2019).

Disponible: hez.untza.ejbv.eus adi.net.

Entre los *medios de transmisión guiados*, más utilizados para este tipo de señales son los denominados *cables abiertos paralelos*. También, en cierto tipo de distribución de energía eléctrica, se utiliza el *cable coaxial* de diámetro robusto, como es el caso del suministro eléctrico a un proceso de producción desde una fuente de energía local, propia de la empresa propietaria de dicho proceso. ⁽¹⁶⁾

1.6.2.2 Sistemas de redes eléctricas locales

Estos sistemas corresponden a la red de distribución local de la energía eléctrica en un espacio determinado de consumo, como es el de los edificios, fábricas, campus universitarios, complejo industrial, estadios deportivos, conjunto residencial, una vivienda, entre otros muchos más. En la figura No. 1.19 se indica un diagrama de una red de distribución de energía eléctrica del interior de una vivienda básica. ⁽¹⁷⁾

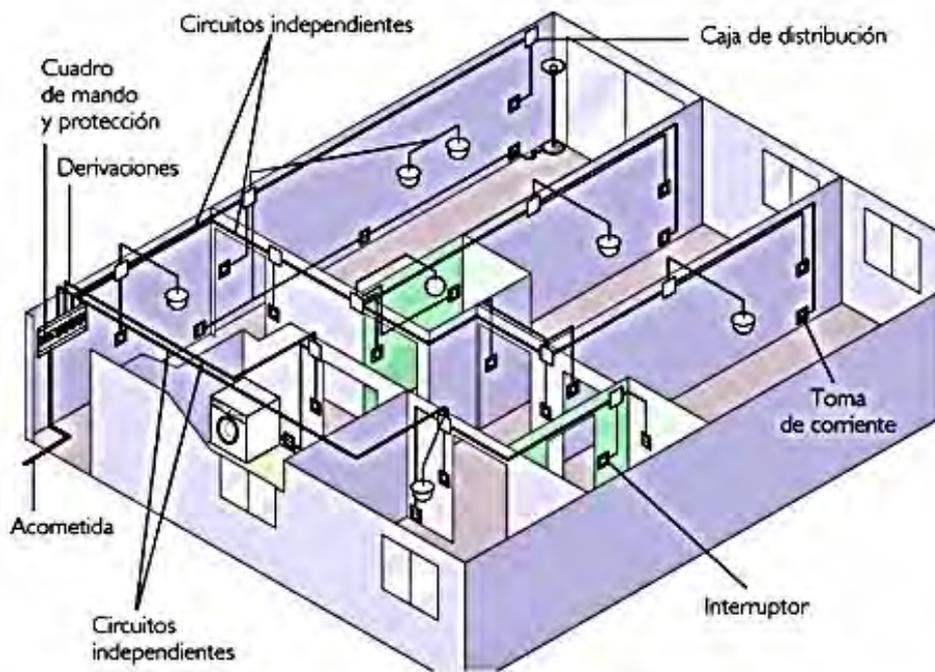


Fig. No. 1.19 Diagrama de una red de distribución de energía eléctrica del interior de una vivienda básica.

Fuente: Instalaciones eléctricas en viviendas - TICD. (2019).

Disponible: <https://ticd.files.wordpress.com/2011/02/tema-6-instalaciones-elc3a9ctricas-en-viviendas-alumnos.pdf>.

1.6.2.3 Red eléctrica inteligente (REI):

Las *redes eléctricas inteligentes* se caracterizan por que utilizan tecnologías digitales y otras tecnologías avanzadas para monitorear y administrar el transporte de electricidad de todas las fuentes de generación para satisfacer la demanda de electricidad de los usuarios finales. Las redes inteligentes coordinan las necesidades y capacidades de todos los generadores, operadores de la red, usuarios finales y partes interesadas del mercado de electricidad tan eficientemente como sea posible, para minimizar los costos y los impactos ambientales, maximizando la confiabilidad, resiliencia y estabilidad del sistema.” ⁽¹⁸⁾

Con el propósito de ilustración, en la figura No. 1.20 se muestra una imagen que contiene la estructura básica de una red eléctrica inteligente (REI), cuyo tendido

está conformado por *cables abiertos paralelos*, donde sus características dimensionales dependen de la tensión existente en cada uno de los trayectos de la misma. ⁽¹⁹⁾.

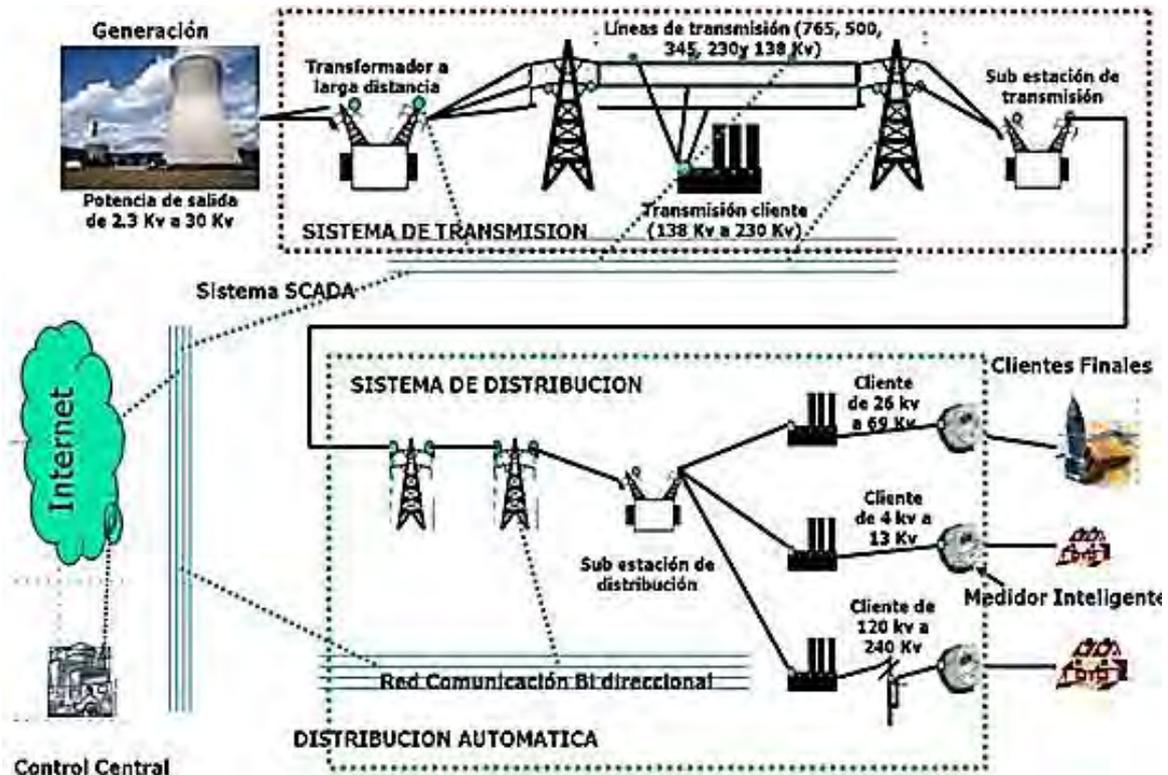


Fig. No. 1.20 Estructura básica de una red eléctrica inteligente

Fuente: Nirenberg, LL., Red Eléctrica Inteligente (REI) (2019).

Disponible: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>

1.7 Circuito eléctrico equivalente de los medios de transmisión guiados conductivos

Todo *medio de transmisión guiado* de material conductor cuenta con las siguientes características eléctricas distribuidas en toda su longitud, teniendo de presente que las características estructurales, de estos medios, sean uniformes y el material empleado sea homogéneo en toda la longitud de estos:

- **Resistencia R** (ohmios metro): debido a la resistividad del material conductor empleado.
- **Inductancia L** (H m): se produce ya que, al circular señales de corriente eléctrica por los conductores de estos medios de transmisión, se genera intensidades magnéticas (campos magnéticos) que origina inducción magnética en ellos.

- **Capacitancia C** (F m): se debe a la coherencia existente entre la estructura de los medios de transmisión guiados conductivos y la de un capacitor (conductores separados por un dieléctrico).
- **Conductancia G** (mhos metro) o (S m): corresponde al grado de conductancia que presenta el dieléctrico empleado en estos medios de transmisión.

Por lo anterior, si se toma una unidad infinitesimal de cualquier tipo de medio de transmisión guiado de material conductivo, va a contar con las anteriores características eléctricas por unidad de longitud infinitesimal. En la figura No. 1.21 se muestra un circuito eléctrico equivalente de estos medios de transmisión, por unidad de longitud infinitesimal.

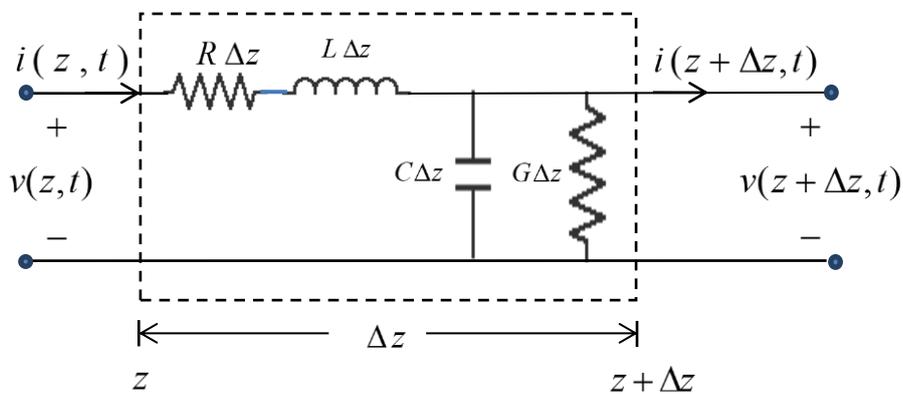


Fig. No. 1.21 Circuito eléctrico equivalente de un elemento infinitesimal de un medio de transmisión guiado de material conductivo.

1.7.1 Potencial y corriente eléctrica en las líneas de transmisión

La diferencia del potencial eléctrico (voltaje) entre los dos extremos del circuito equivalente es igual a: ⁽²⁰⁾

$$\langle 1.1 \rangle \Delta v(z, t) = v(z + \Delta z, t) - v(z, t) = -R\Delta z i(z, t) - L\Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t}$$

La diferencia de corriente entre los dos extremos del circuito equivalente es igual a:

$$\langle 1.2 \rangle \Delta i(z, t) = i(z + \Delta z, t) - i(z, t) = -G\Delta z v(z, t) - C\Delta z \frac{\partial v(z, t)}{\partial t}$$

Haciendo Δz muy pequeño y dividiendo todos los términos de la ecuación 1.1 y de la ecuación 1.2 por ∂z , se tiene que:

$$\langle 1.3 \rangle \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -\frac{R\partial z i(z,t)}{\partial z} - L\partial z \frac{\partial i(z,t)}{\partial z \partial t} = -Ri(z,t) - L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t}$$

$$\langle 1.4 \rangle \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -\frac{G\partial z v(z,t)}{\partial z} - C\partial z \frac{\partial v(z,t)}{\partial z \partial t} = -Gv(z,t) - C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t}$$

Derivando los términos de la ecuación 1.3 con respecto a z , se obtiene:

$$\langle 1.5 \rangle \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial z^2} = -R \left[\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} \right] - L \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \right]$$

Intercambiando el posicionamiento de ∂z y ∂t en la ecuación 1.5 y reemplazando

$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z}$ de la ecuación 1.4 en la ecuación 1.5, se obtiene:

$$\langle 1.6 \rangle \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial z^2} = -R \left[-Gv(z,t) - C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \right] - L \frac{\partial}{\partial z} \left[-Gv(z,t) - C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \right]$$

$$\langle 1.7 \rangle \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial z^2} = RGv(z,t) + RC \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} + LG \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial t^2}$$

Reordenando términos de la ecuación 1.7, se obtiene:

$$\langle 1.8 \rangle \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial t^2} + (RC + LG) \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} + RGv(z,t)$$

Aplicando similar proceso a la ecuación 1.4, se obtiene:

$$\langle 1.9 \rangle \frac{\partial^2 i(z,t)}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 i(z,t)}{\partial t^2} + (RC + LG) \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} + RGv(z,t)$$

Haciendo el mismo proceso anterior, pero en función de la frecuencia, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\langle 1.10 \rangle \frac{\partial v(z)}{\partial z} = -(R + j\omega L)I(z)$$

$$\langle 1.11 \rangle \frac{\partial I(z)}{\partial z} = -(G + j\omega C)V(z)$$

Derivando la ecuación 1.10 en función de z y haciendo el remplazo correspondiente, se obtiene: ⁽²¹⁾

$$\langle 1.12 \rangle \frac{\partial v^2(z)}{\partial z^2} = -(R + j\omega L) \frac{\partial I(z)}{\partial z} = -(R + j\omega L)[-(G + j\omega C)V(z)]$$

$$\langle 1.13 \rangle \frac{\partial v^2(z)}{\partial z^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)V(z)$$

(21) Boeria Esbert, ., *ines of Transmission*, Universidad Politécnica de Valencia, 2014, pp.36-38.

De la misma manera derivando la ecuación 1.11 en función de z y haciendo el remplazo correspondiente, se obtiene:

$$\langle 1.14 \rangle \frac{\partial^2 I(z)}{\partial z^2} = -(G + j\omega C) \frac{\partial V(z)}{\partial z} = -(G + j\omega C)[-(R + j\omega L)I(z)]$$

$$\langle 1.15 \rangle \frac{\partial^2 I(z)}{\partial z^2} = (G + j\omega C)(R + j\omega L)I(z)$$

Las ecuaciones obtenidas anteriormente corresponden a ecuaciones diferenciales de segundo orden homogéneas, cuya solución representan la distribución del *voltaje* y de la *corriente* a lo largo de la línea de transmisión.

$$\langle 1.16 \rangle \frac{\partial v^2(z)}{\partial z^2} - (R + j\omega L)(G + j\omega C)V(z) = 0$$

$$\langle 1.17 \rangle \frac{\partial^2 I(z)}{\partial z^2} - (G + j\omega C)(R + j\omega L)I(z) = 0$$

La solución de cada una de estas ecuaciones, son las siguientes:

$$\langle 1.18 \rangle V(z) = V_1 e^{-\gamma z} + V_2 e^{-\gamma z}$$

$$\langle 1.19 \rangle I(z) = I_1 e^{-\gamma z} + I_2 e^{-\gamma z}$$

Las anteriores ecuaciones son las expresiones matemáticas que se emplean para poder calcular las distribuciones de tensión y de la corriente eléctrica a lo largo de las diferentes líneas de transmisión. En los numerales 2.3 y 2.4 del capítulo 2 se relacionan las ecuaciones pertinentes para determinar las

características eléctricas de las diferentes líneas de transmisión, así como sus parámetros de propagación de acuerdo a sus condiciones de funcionamiento.

Ejemplo No. 1.1

A una línea de transmisión se le inyecta una señal de corriente $i(t) = 100 \cos(377t) \text{ mA}$. Las características eléctricas distribuidas de esta línea son:

$$R = 0.04 \Omega/m, \quad L = 0.5H/m, \quad C = 40pF/m, \quad G = 1.000pS/m$$

a.) Determinar el valor del gradiente (variación) del voltaje que se puede presentar en la línea.

b.) Definir los tiempos donde se presenta el valor máximo del gradiente de voltaje.

Solución:

a.) Gradiente del voltaje

El gradiente de voltaje en el dominio del tiempo está dado por la ecuación 1.3.

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -Ri(z,t) - L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t}$$

Reemplazando términos y desarrollando la derivada se obtiene:

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -(0.04)(100 \times 10^{-3} \cos 377t) - 0.5 \frac{\partial(100 \times 10^{-3} \cos 377t)}{\partial t} \text{ (v/m)}$$

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -(4 \times 10^{-3} \cos 377t) - 0.5 \left(-\frac{0.1}{377} \text{sen} 377t\right) \text{ (v/m)}$$

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -4 \times 10^{-3} \cos 377t + 0.133 \times 10^{-3} \text{sen} 377t \text{ (v/m)}$$

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -4 \cos 377t + 0.133 \text{sen} 377t \text{ (mv/m)}$$

Aplicando la siguiente identidad trigonométrica, a la expresión inmediatamente anterior, se obtiene: ⁽²²⁾

$$a \operatorname{sen}(x) + b \cos(x) = \sqrt{a^2 + b^2} \operatorname{sen}\left(x + \arctan \frac{b}{a}\right)$$

$$\sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(0.133 \times 10^{-3})^2 + (-4 \times 10^{-3})^2} = 4 \times 10^{-3}$$

$$\arctan \frac{b}{a} = \arctan \frac{-4}{0.133} = -1.54 \text{ rad.}$$

Entonces la expresión, finalmente, del gradiente del voltaje que se presenta en la línea de transmisión es la que se indica a continuación.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} &= 0.133 \operatorname{sen}(377t) - 4 \cos(377t) \\ &= 4 \times 10^{-3} \operatorname{sen}(377t - 1.54) = 4 \operatorname{sen}(377t - 1.54) \text{ (V)} \end{aligned}$$

b.) Tiempos donde se presenta el valor máximo del gradiente del voltaje:

El valor máximo de la variación del voltaje es: 4 m y se presenta cuando:

$$\operatorname{sen}(377t - 1.54) = \pm 1 \Rightarrow 377t - 1.54 = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots \text{radianes.}$$

Entonces los tiempos donde se presenta los máximos de voltaje:

$$\begin{aligned} t_1 &= (\pi/2 + 1.54)/377 = 8.25 \text{ ms} \\ t_2 &= (3\pi/2 + 1.54)/377 = 16.58 \text{ ms} \\ t_3 &= (5\pi/2 + 1.54)/377 = 24.91 \text{ ms} \\ &\dots\dots \\ t_n &= t_{n-1} + 8.33 \text{ ms} \quad \forall n = 2,3,4, \dots \end{aligned}$$

Ejemplo No. 1.2

Para la misma línea de transmisión del ejemplo inmediatamente anterior, si en un punto determinado de la misma presenta un voltaje de 15 voltios rms y la señal tiene una frecuencia de 1 Hz, determinar:

a.) El valor del gradiente (variación) de la corriente en el mismo punto donde se presenta el voltaje rms.

b.) El valor máximo del gradiente de la corriente instantánea a lo largo de la línea.

Solución:

a.) Gradiente de la corriente

El gradiente de la corriente, en el dominio de la frecuencia, a lo largo de la línea está dado por la ecuación 1.11

$$\frac{\partial I(z)}{\partial z} = -(G + j\omega C) V(z)_0$$

Reemplazando valores, se obtiene el gradiente de la corriente a lo largo de la línea:

$$\frac{\partial I(z)}{\partial z} = [1.000 \times 10^{-12} + j2\pi \times 1.000 (40 \times 10^{-12})](15 + j0) = 0.015 + j3.77 (\mu A/m)$$

b.) El gradiente máximo instantáneo de la corriente, corresponde la corriente máxima:

$$I_{rms} = \sqrt{(0.015)^2 + (3.77)^2} \times 10^{-3} = 3.77 (mA)$$

$$I_{max} = 2\pi I_{rms} = 23.69 (mA)$$

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

CAPÍTULO 1

Preguntas:

1. Cuáles son los componentes elementales que conforman la estructura básica de un sistema de comunicación electrónica. Describir las funciones esenciales de cada uno de estos componentes.
2. Relacione los principales transductores, de entrada y de salida, tanto en el transmisor como en el receptor, de un sistema de comunicación electrónica, indicando la función esencial de cada uno de ellos.
3. Cuáles son los componentes elementales que conforman la estructura básica de un sistema de transmisión de energía eléctrica) Describir las funciones esenciales de cada uno de estos componentes.
4. Dependiendo del tipo de señal que se propague por los medios de transmisión guiados, existe una clasificación de estos. Determinar cuáles son estas clases y que característica funcional deben cumplir los respectivos medios.
5. Identifique algún caso en particular existente en la práctica, que corresponda a cada una de las clases señaladas en la pregunta inmediatamente anterior.
6. En la figura No. 1.7 se indica el espectro electromagnético donde se resalta las bandas atribuidas a los diferentes y principales sistemas de comunicaciones. Identificar estas bandas para cada uno de estos sistemas y argumentar por qué se les reservaron estas bandas.
7. En que consiste un sistema de telefonía fija conmutada. Identifique sus principales elementos que lo conforman, describiendo la función esencial de cada uno de ellos.
8. Cuáles son los principales medios de transmisión guiados que se utilizan en las redes de telefonía fija conmutada, e indique las características estructurales y funcionamiento de estos.
9. En que consiste una red de transmisión de datos. Identifique sus principales elementos que la conforman, describiendo la función esencial de cada uno de ellos.

10. Cuáles son los principales medios de transmisión guiados que se utilizan en las redes de transmisión de datos , e indique las características estructurales y funcionamiento de estos.
11. En que consiste un sistema de transmisión de televisión por cable (CATV). Identifique sus principales elementos que lo conforman, describiendo la función esencial de cada uno de ellos.
12. Cuáles son los principales medios de transmisión guiados que se utilizan en las redes de transmisión de la señal de TV por cable (CATV) , e indique las características estructurales y funcionamiento de los mismos.
13. Relacione los principales operadores que prestan el servicio de CATV en Colombia. Indique para cada uno de ellos los principales servicios que ofrecen.
14. Describa la composición básica de los sistemas de televisión por Internet (IPTV), e indique el funcionamiento de los mismos.
15. Describa la composición básica de los sistemas de radio por Internet (iRadio), e indique el funcionamiento de los mismos.
16. Se ha venido últimamente incrementando la implantación y desarrollo de los sistemas de comunicación a través de las líneas de potencia (redes eléctricas): PLC. Describa su composición y funcionamiento.
17. En qué casos prácticos se vienen implementando los sistemas de comunicación a través de las líneas de potencia (redes eléctricas): PLC Describa como es el funcionamiento básico de los mismos.
18. Cuál es la estructura básica de los sistemas de redistribución de la señal de TV . Cómo es su funcionamiento y donde se encuentra, principalmente, el mercado de utilización de los mismos .
19. Cuáles son los principales medios de transmisión guiados que se utilizan en las redes de redistribución de la señal de TV , e indique las características estructurales y funcionamiento de los mismos.
20. En qué consiste las redes de antena comunitaria de TV . Identifique sus principales elementos que las conforman, describiendo la función esencial de cada uno de ellos.

21. Cuáles son los principales medios de transmisión guiados que se utilizan en las redes de antenas comunitarias de T , e indique las características estructurales y funcionamiento de los mismos.

22. En qué consiste la transmisión de las señales eléctricas . Relacione las principales redes de distribución eléctrica existentes.

22. Por qué en los radioenlaces de microondas, se utiliza como medio de transmisión de las señales entre los equipos y los sistemas de radiación a las guías de onda, en vez de cable coaxial

23 En la figura No. 1.20 se muestra la estructura básica de una red eléctrica inteligente (REI). Identifique la estructura básica de la misma y describa en que consiste la funcionalidad inteligente de la misma.

Ejercicios:

1. En la figura No. 1.21 se muestra el circuito eléctrico equivalente de un elemento infinitesimal de un medio de transmisión guiado de material conductor (línea de transmisión), indicar el por qué se presentan las diferentes características eléctricas ahí relacionadas.

2. Por qué se deben reducir al máximo los valores de las características de las líneas de transmisión y como se podría lograr esta reducción

3. La siguiente ecuación es la forma cuantitativa de expresar el comportamiento de la diferencia del potencial eléctrico (voltaje) existente entre los dos extremos del circuito equivalente de una línea de transmisión. Explicar el significado de cada uno de sus términos.

$$\Delta v(z, t) = v(z + \Delta z, t) - v(z, t) = -R\Delta z i(z, t) - L\Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t}$$

4. La siguiente ecuación es la forma cuantitativa de expresar el comportamiento de la diferencia de la corriente eléctrica existente entre los dos extremos del circuito equivalente de una línea de transmisión. Explicar el significado de cada uno de sus términos.

$$\Delta i(z, t) = i(z + \Delta z, t) - i(z, t) = -G\Delta z v(z, t) - C\Delta z \frac{\partial v(z, t)}{\partial t}$$

5. A una línea de transmisión se le inyecta una señal de corriente $i(t) = 50 \cos(2\pi \times 10^3) \text{ mA}$. Las características eléctricas distribuidas de esta línea son:

$$R = 0.05 \Omega/m, \quad L = 0.6 \text{ H}/m, \quad C = 38 \text{ pF}/m, \quad G = 980 \text{ pS}/m$$

a.) Determinar el valor del gradiente (variación) del voltaje que se puede presentar en la línea.

b.) Definir los tiempos donde se presenta el valor máximo del gradiente de voltaje.

6. Para la misma línea de transmisión del ejercicio inmediatamente anterior, si en un punto determinado de la misma presenta un voltaje de 15 voltios rms y la señal tiene una frecuencia de 2 Hz, determinar:

a.) El valor del gradiente (variación) de la corriente en el mismo punto donde se presenta el voltaje rms.

b.) El valor máximo del gradiente de la corriente instantánea a lo largo de la línea.

7. Considérese la misma línea de transmisión de los dos ejercicios anteriores. Determinar;

a.) La magnitud del fasor (rms) de la corriente transversal, a una trayectoria de 15 cm de la longitud de la línea

b.) El ángulo de fase con relación a la tensión de la línea en el punto en cuestión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 1

- (1) Communications Systems. (2019). Disponible:
<https://www.slideshare.net/ldunphy/communications-systems>
- (2) MacDonald, J., *Electric Power Substations Engineering*, Editorial McDonald, 2016, pp. 32-34.
- (3) Cesine, *berdrola culmina la mejora de subestación de avalperal, Valencia*. 2019, p.1.
- (4) International Linemans Rodeo, *Effective Risk Management: From Generation to Distribution* 2020. pp1-3.
Disponible:
<http://www2.econ.iastate.edu/classes/econ458/tesfatsion/Home458Team.htm>
- (5) Fusario, R. J., *Medios de transmisión*. McGraw-Hill, 2016, pp.5-6.
- (6) García, T. Díaz Verdejo, P. López, J. Soler, E., *Transmisión de datos y redes de computadores*, Pearson Educación.2014, pp.23-26.
- (7) Josovicz, J. *Red Telefónica* Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Universidad de la República Montevideo, Uruguay, 2016, pp. 4-5.
- (8) Corralo Pantaleon, M.E., *Redes de datos y conectividad*. 2016, pp. 11-12.
- (9) CCTV-Español. *La introducción del canal CCTV*. 2018.
- (10) Jaén, E. G. Martínez, A. Morales, M. Rangel, N. Villarreal, *Implementación de la TV por Internet en la Universidad Tecnológica de Panamá*. Universidad Tecnológica de Panamá 2017, pp. 5-6.
- (11) Martín, J. *Monografía: creación de una emisora de radio a través de Internet*, Observatorio Tecnológico, 2017, pp. 9-10.
- (12) Sistemas PLC. (2018). Disponible: www.informatica-hoy.com.ar -2008-2017.
- (13) Catálogo *Cable Time- Distribución de señal*, Video Digital, 2017
- (14) Catálogo *Instalaciones y esquemas*. Televes, 2018.
- (15) López Tafur, m., *Antenas para Banda Media AM* Capítulo 6 EE525M UNI FIEE, 2016, pp. 56-57

- (16) Sistemas de distribución de energía eléctrica. (2019). Disponible: untza.ejbv.eus/adi.net.
- (17) Instalaciones eléctricas en viviendas - TICD. (2019). Disponible: <https://ticd.files.wordpress.com/2016/02/tema-6-instalaciones-elctricas-en-viviendas-alumnos.pdf>
- (18) International Energy Agency (IEA), Department of Energy, 2018.
- (19) Nirenberg, LL., *Red eléctrica inteligente (R²)* (2018). Disponible: <http://www.eia.doe.energy.gov/smartgrid.htm>
- (20) Neriela, R., *Lines of Transmission*, Mc Graw Hill, 2014, pp. 51-52
- (21) Boria Esbert, J., *Lines of Transmission*, Universidad Politécnica de Valencia, 2014, pp.36-38.
- (22) Spiegel, M. Abellanas, L.: *Fórmulas y tablas de matemática aplicada*, Ed. McGraw-Hill, 2016

CAPÍTULO 2

CONCEPTO, TIPOS Y APLICACIONES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.1 Introducción

Las *líneas de transmisión* corresponden a todo medio que se utiliza para transmisión de señales eléctricas (con o sin información). En este capítulo se hará referencia a las características eléctricas relevantes de las principales *líneas de transmisión*, relacionado los principales tipos y características estructurales y funcionales esenciales de las mismas.

Así mismo se mencionará los parámetros de propagación más referenciados que se asocian a las señales eléctricas cuando se propagan a través de estas líneas, y se complementará el contenido de este capítulo con algunas de las diferentes aplicaciones especiales de estas líneas, las cuales son adicionales ala del transporte de señales eléctricas.

2.2 Tipos de líneas de transmisión

Tomando como referencia el concepto que se tiene de las *líneas de transmisión*, existe una gran variedad de tipos de estos medios, empezando por los circuitos impresos y multicintas hasta los cables abiertos paralelos. La característica común de toda *línea de transmisión* es que se utiliza para transmitir señales eléctricas, de cualquier nivel de tensión con o sin información, y por lo tanto debe ser de características conductivas. Entre más conductivas sean esta línea, menos resistencia óhmica le presenta al flujo de la corriente eléctrica, y por lo tanto menos pérdidas por disipación se producen.

A continuación, se relacionan algunas de las principales tipos de *líneas de transmisión* más utilizadas, cuyas características dimensionales y eléctricas básicas, así como su utilización, se describen en apartes anteriores y posteriores, correspondientes, de este libro.

2.2.1 Cables abiertos paralelos

Están conformados por dos cables conductores lineales abiertos paralelos (desnudos o encauchados), espaciados relativamente muy cerca, con dieléctrico de aire y cuentan con espaciadores no conductivos, los cuales se poseionan a

intervalos establecidos, para mantener el distanciamiento entre los cables en forma uniforme en todo su tendido. Para el caso de las *redes eléctricas*, el tendido de estos cables se hace sobre torres o mástiles, de conformidad con la tensión que soportan.

La separación entre los dos cables conductores depende de la intensidad de corriente que por ellos circulan, especialmente para el caso de que sean utilizados para los tendidos de las *redes eléctricas*, para reducir los efectos de inducción magnética entre ellos, especialmente si las intensidades de las corrientes son elevadas. El rango de esta separación está entre los 50 cm y los 160 cm. Así mismo el calibre de los cables conductores depende de la intensidad de la corriente que vayan a transportar. En la tabla No. 2.4 se indican los valores máximos típicos de corriente que pueden soportar los cables conductores de acuerdo con su calibre. En la figura No. 2.1 se muestra la imagen de uno de los diferentes tipos *cables abiertos paralelos*, con espaciadores.

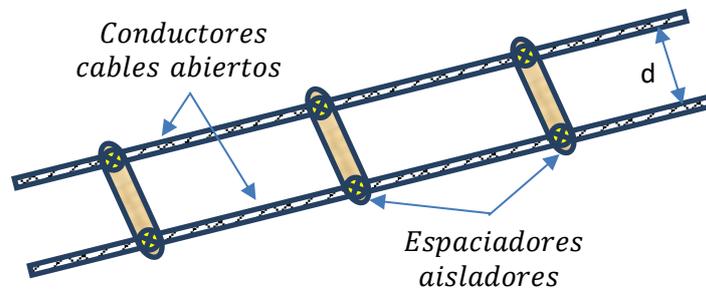


Fig. No. 2.1 Cables abiertos paralelos con espaciadores incorporados.

Estos cables presentan altas pérdidas por radiación y son muy susceptibles al ruido e interferencias. Pero debido a su característica de línea balanceada (un cable transmite la señal desfasada 180° con respecto al otro) reducen el efecto de ruido e interferencias. ⁽¹⁾

2.2.2 Cables paralelos gemelos

Estos cables también están conformados por dos conductores paralelos, tal como los cables abiertos paralelos, pero separados por un dieléctrico diferente al aire, generalmente de tipo teflón o polietileno. El calibre es bastante reducido y por lo tanto la intensidad de corriente que soporta es limitada, cuyos valores dependen del calibre de los cables. La separación entre los dos conductores es de unos 8 cm en promedio. Los cables son de tipo sólido o multifilares. Estos cables también son de características balanceados. En la figura No. 2.2 se representa la estructura básica de un cable paralelo gemelo.

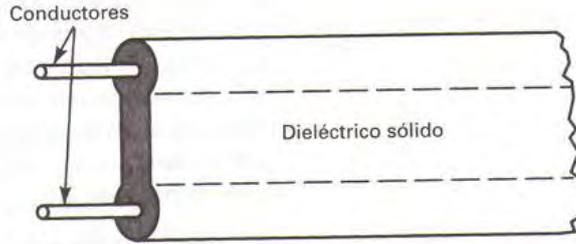


Fig. No. 2.2 Estructura de una línea de transmisión de conductores paralelos gemelos.

Fuente: Tipos de líneas de transmisión. (2019). Disponible:

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208019/MODULO_20ANTENAS_20_20PROPAGACION-2011/leccion_3_tipos_de_linea_de_transmision.html.

2.2.3 Cables de par trenzado

Estos cables están conformados esencialmente por dos conductores eléctricos aislados y entrelazados entre sí. El entrelazado busca eliminar, por un lado la diafonía entre los cables y por otro lado las interferencias externas. Cada cable trenzado consta de ocho hilos (cuatro pares trenzados). Dependiendo del tipo de trenzado, el cable corresponde a una categoría, que va desde la categoría uno hasta la categoría siete, actualmente, incrementándose progresivamente las velocidades de transmisión. ⁽²⁾

Estos cables se tipifican en dos grandes grupos:

- **Par trenzado sin blindaje UTP (Unshielded Twisted Pair):** los cuales son muy utilizados para los tendidos de las redes locales LAN (Local Area Network). La impedancia de estos cables es de unos 100 ohmios, generalmente. Son de fácil manejo y de costo reducido, pero debido a la falta de blindaje son más propensos a ser afectados por el ruido e interferencias de fuentes externas, lo que no es recomendable su utilización para redes de áreas amplias (Wide Area Network). En la figura No. 2.3 se ilustra un cable UTP típico.

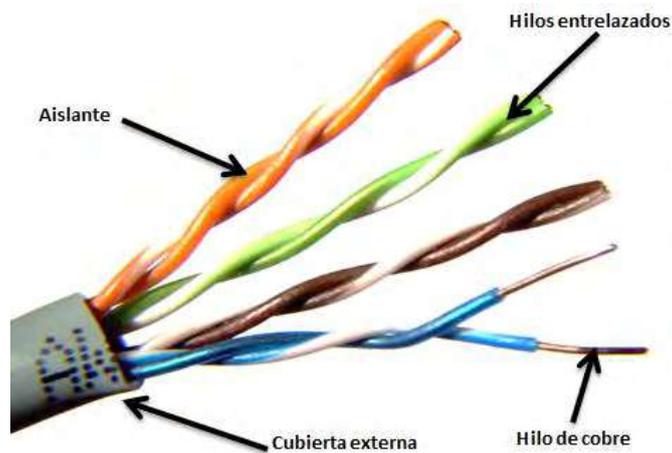
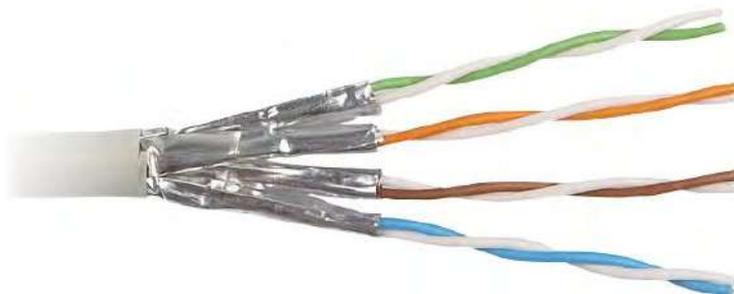


Fig. No. 2.3 Cable UTP.

Fuente: Cable UTP. (2019). Disponible: <http://mariaisabelsmr1.blogspot.com.co/2018/11/el-cable-de-par-trenzado.html>

ar tren ado con blindaje: estos cables son prácticamente inmunes al ruido externo y su blindaje puede ser en cada uno de los cuatro pares trenzados, independientemente, STP (*S ielded T isted air*) o un blindaje global que involucre a todos los cuatro pares de cables trenzados, denominados par trenzado con blindaje global FTP (*oiled T isted air*). Para que sea más eficaz el blindaje, en cualquiera que sea el caso, se requiere que los blindajes estén interconectados a tierra. Estos cables blindados son más costosos y su manejo es menos fácil que el caso de los UTP. Debido a su grado de protección contra perturbaciones externas (ruido e interferencias), son más aconsejables para redes de cobertura amplia AN. Los STP ofrecen protección no solamente a las perturbaciones externas sino que también a las que se puedan originar entre los mismos pares del cable. En la figura No. 2.4 se ilustra algunos de los diferentes tipos de cables trenzados blindados.



a.) Cable STP



b.) Cable FTP

Fig. No. 2.4 Cables par trenzados blindados

Fuente: Cables STP. (2019). Disponible: <http://www.testdevelocidad.es/redes/elegir-mejor-cable-red-aprovechar-al-maximo-nuestra-conexion> .

2.2.4 Cables coaxiales

Los cables coaxiales, de los cuales ya se hizo referencia en el capítulo 6, es otra de las *líneas de transmisión* que tienen una gran demanda en su utilización. Esta línea de transmisión, como se ha venido mencionando, está conformada, básicamente, por dos cables conductores posesionados en forma coaxial, separados por un dieléctrico y recubierto por un aislamiento como capa protectora de la intemperie. El conductor central (interior) se conoce como núcleo y generalmente es sólido, aunque en algunos casos es de tipo multifilar. El conductor externo puede ser de tipo de lámina liza o corrugada, aunque también puede ser de tipo de malla. En la figura No. 2.5 se muestra la configuración básica de un cable coaxial típico.

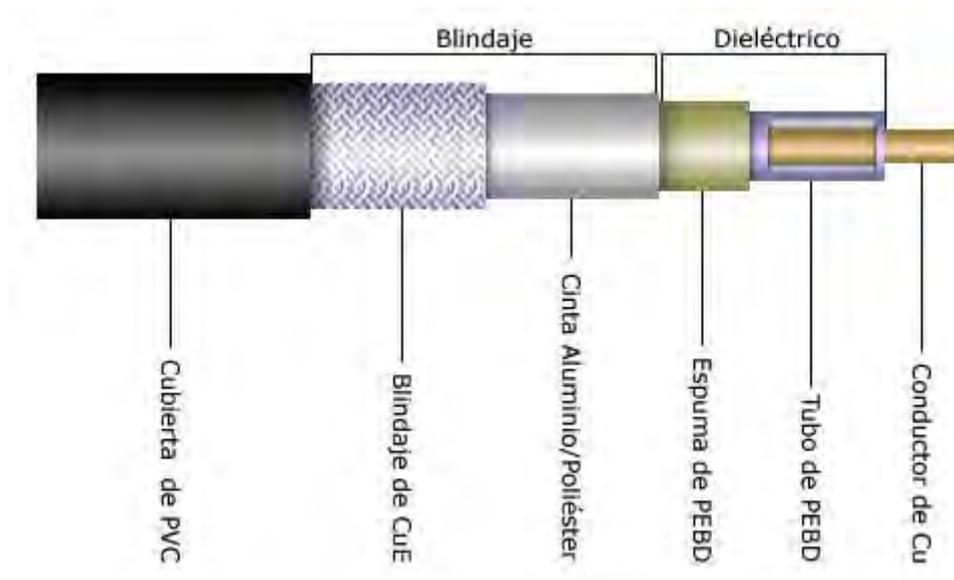


Fig. No. 2.5 Estructura básica de un cable coaxial típico.

Fuente: Coaxial Cable Trun . (2019). Disponible: <http://spanish.coaxialpoercable.com/sale-5007987-commscope-cable-coaxial-qr500-messenger-p3-500-coaxial-cable-trun-cable-rg500-messenger.html>.

Los cables coaxiales son utilizados, tanto para transmisión de señales eléctricas con información, como para señales eléctricas que solo contienen energía. Para el caso de transmisión de información, estos cables son de calibre relativamente delgados, mientras que para transmisión de energía son de calibre más gruesos. Estos cables también pueden contar con mallas o capas de blindaje para protegerlo de señales perturbadoras externas, especialmente los que van a ser utilizados para transmisión de información.

2.2.5 Cintas planas conductoras paralelas

Estas *líneas de transmisión* están conformadas por dos placas conductoras, posicionadas en forma paralela, de cierta anchura y de espesor determinado, separadas por aire o por un dieléctrico diferente de constante dieléctrica ϵ_r . Son muy utilizadas, entre otros usos, para transportar corrientes de intensidad elevada, como es caso de la alimentación a los radiadores de las estaciones de radiodifusión sonora AM de altas potencias. Lo anterior se debe a que pueden ofrecer mayor superficie al flujo de corriente. La intensidad de corriente que pueden soportar depende, principalmente, de la anchura (b) y espesor (t) de las cintas. En la figura No.2.6 se muestra la estructura básica de cintas planas paralelas, separadas con dieléctrico y con aire (vista frontal).

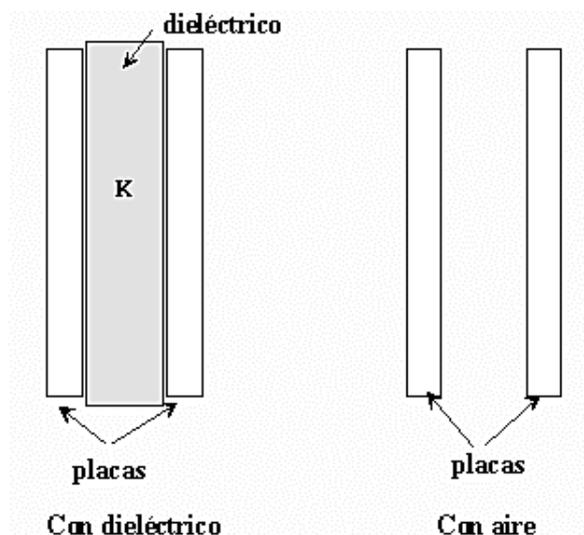


Fig. No. 2.6 Cintas planas conductoras paralelas.

Fuente: Modulo: Antenas Propagación. (2019). Disponible:

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208019/MODULO_20ANTENAS_20_20PROPAGACION-2018/leccion_3_tipos_de_linea_de_transmision.html.

2.3 Características eléctricas de las líneas de transmisión

Las *líneas de transmisión* presentan ciertas características eléctricas distribuidas a lo largo de su longitud, dependiendo esencialmente de su estructura y composición física y del material de sus componentes, las cuales básicamente son las siguientes:

- *Resistencia por unidad longitud* R (Ω/m): su presencia corresponde a las condiciones óhmicas de los conductores que constituyen la línea de transmisión.
- *Inductancia por unidad de longitud* L (H/m): su presencia corresponde a la inducción magnética que se presenta en la línea de transmisión, cuando fluye por ella corriente eléctrica.
- *Capacitancia por unidad de longitud* C (F/m): su presencia se debe a la estructura misma de la línea de transmisión, que corresponde a la de un capacitor (conductores separados por un dieléctrico) .
- *Conductancia por unidad de longitud* G (S/m): corresponde a la conductancia del dieléctrico que separa los conductores de la línea de transmisión.

Para calcular estas características, de cada uno de los diferentes tipos de líneas de transmisión existentes, se cuenta con las respectivas ecuaciones, de las cuales se encuentran relacionadas en la tabla No. 2.1, para el caso solo de las líneas de transmisión de tipo: cableado abierto o aislado paralelo, cableado coaxial y cintas planas conductoras paralelas. Las dimensiones estructurales de las *líneas de transmisión* relacionadas en la tabla, corresponden a las indicadas en la figura No. 2.7. ⁽³⁾

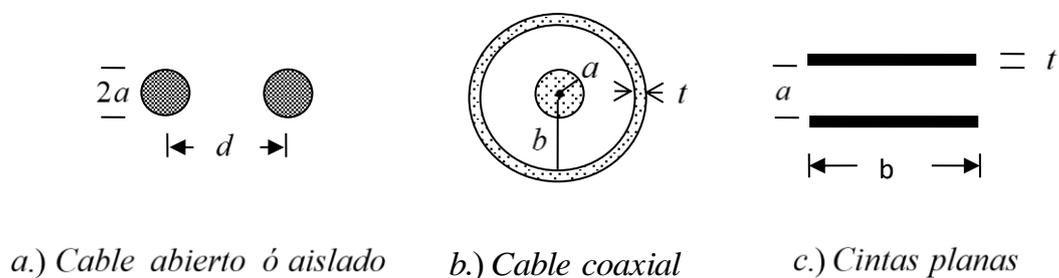


Fig. No. 2.7 Características dimensionales de tres tipos de líneas de transmisión (vista frontal).

Características eléctricas	Cables paralelos abiertos o aislados	Cable coaxial	Cintas planas paralelas
Resistencia: $R(\Omega/m)$ (Alta frecuencia) R_s : resistencia superficial conductores:	$R_s / a\pi$ $R_s = \sqrt{w\mu_c / 2g_c}$	$(R_s / 2\pi)[(1/a) + (1/b)]$ $R_s = \sqrt{w\mu_c / 2g_c}$	$2R_s / b$ $R_s = \sqrt{w\mu_c / 2g_c}$
Resistencia: $R(\Omega/m)$ (Baja frecuencia)	$(2 / g_c) / \pi a^2$	$(1 / \pi g_c) / [(1/a^2) + (1/2bt)]$	$(2 / g_c) / bt$
Inductancia: $L(H/m)$	$(\mu / \pi) \ln(d/a)$	$(\mu / 2\pi) \ln(b/a)$	$\mu a / b$
Capacitancia: $C(F/m)$	$\pi \epsilon / \cosh^{-1} \frac{d}{2a}$	$2\pi \epsilon / \ln(b/a)$	$\epsilon b / a$
Conductancia: $G(S/m)$	$\frac{2\pi g / \ln(d/d_i)}{\pi g / \cosh^{-1} \frac{d}{2a}}$	$2\pi g / \ln(b/a)$	$g b / a$

Tabla No. 2.1 Características eléctricas distribuidas de algunas líneas de transmisión.

Fuente: Grainger, . Stevenson, D., o er System Analysis”, Mc Gra Hill, 2015.

Como se puede observar, desde las expresiones dadas en la tabla No. 2.1, para cada uno de los tipos de líneas de transmisión ahí considerados, tenemos que: $LC = \mu\epsilon$ y $G/C = g/\epsilon$. Estas relaciones facilitan el cálculo de una de esas características eléctricas si se conoce la otra.

Las características intrínsecas de los materiales que conforman las líneas de transmisión, contempladas en las ecuaciones anteriores, son las relacionadas en la tabla No. 2.2.

Característica intrínseca	Dieléctrico	Conductores
Conductividad (mho m)	g	g_c
Permeabilidad (H m)	μ	μ_c
Permitividad (F m)	ϵ	ϵ_c
Profundidad pelicular (m)	----	$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu_c g_c}$

Tabla No. 2.2 Características eléctricas de los materiales que conforman las líneas de transmisión.

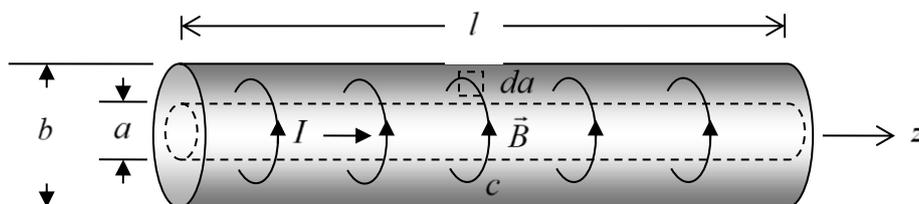
Fuente: Sadi u, M. *Elementos de Electromagnetismo*, México D.F., CECSA, tercera edición, p. 520.

La profundidad pelicular de cualquier material o región, hace referencia a la cantidad métrica que una onda electromagnética puede penetrar en los mismos. Para el caso de los dieléctricos es indeterminada, en cuanto hace referencia a que no sufre disipación alguna, ya que la atenuación de los mismos es despreciable, porque carecen de características conductivas. Sin embargo la difusión de las ondas electromagnéticas en los dieléctricos (incluyendo el aire) no es infinita, debido a que sufren pérdidas por propagación. (4)

Ejemplo No. 2.1

Para una línea de transmisión de tipo coaxial, de longitud: l , con radio interno: a y radio externo: b , y el conductor interno es macizo. Por el cable circula una corriente: I y el dieléctrico que separa los dos conductores es de un material con permeabilidad: μ . Determinar la inductancia distribuida a través de esta línea de transmisión.

Solución:



$$da = d\rho dz$$

Fig. No. 2.8 Inductancia distribuida a través de una línea de transmisión de tipo coaxial

Se parte de la ecuación genérica : $L = \frac{N\Phi_m}{I}$. Para este caso el número de circuitos es $N = 1$, entonces: $L = \frac{\Phi_m}{I}$.

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} da = \int_{\rho=a}^b \int_{z=0}^l B \hat{a}_\phi \cdot \hat{a}_\phi dz d\rho = \int_{\rho=a}^b \int_{z=0}^l B dz d\rho$$

Para determinar B , se aplica la Ley de Ampere, ya que el campo magnético B , cualquier parte de sus correspondientes trayectorias es igual:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu NI = \mu I \Rightarrow \oint_C B dl = B(2\pi\rho) = \mu I \Rightarrow B = \frac{\mu I}{2\pi\rho}$$

Haciendo el reemplazo correspondiente, tenemos:

$$\Phi_m = \int_{\rho=a}^b \int_{z=0}^l \frac{\mu I}{2\pi\rho} dz d\rho = \frac{\mu I}{2\pi} z \Big|_0^l \ln\rho \Big|_a^b = \frac{\mu I}{2\pi} l \ln(b/a)$$

Finalmente:

$$L = \frac{\Phi_m}{I} = \frac{\mu}{2\pi} l \ln(b/a) \Rightarrow \frac{L}{l} = \frac{\mu}{2\pi} \ln(b/a) : (H/m)$$

2.4 Parámetros de propagación de las líneas de transmisión

Así como los medios por los cuales se transmiten las ondas electromagnéticas (radio), le presentan a estas unos parámetros de propagación, las *líneas de transmisión* también le presentan esos mismos parámetros a las señales eléctricas que se transfieren por ellas. Estos parámetros tienen las mismas denominaciones y los mismos significados. Los valores de estos parámetros dependen de las características eléctricas de las *líneas de transmisión* y de la velocidad angular de las señales eléctricas que por ellas se propagan (transmiten). A continuación se relacionan los parámetros más referenciados de esta propagación:⁽⁵⁾

1. Constante de propagación

De igual forma que para el caso de la propagación de las ondas electromagnéticas, este parámetro, para las *líneas de transmisión*, contiene la atenuación y el desfase que esta líneas le producen a las señales eléctricas que por ellas se propagan (transmiten). El valor de este parámetro es complejo, cuya anotación es: $\varphi = \alpha + j\beta (m^{-1})$, donde su parte real corresponde a la constante de atenuación: $\alpha (Np/m)$ y su parte imaginaria a la constante de fase: $\beta (rad/m)$. La ecuación 2.1 permite determinar el valor de este parámetro.

$$\langle 2.1 \rangle \varphi = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta (m^{-1})$$

2. Impedancia característica intrínseca

Corresponde a la impedancia que las *líneas de transmisión* le presentan a las señales eléctricas que por ellas se propagan (transmiten). La ecuación 2.2 permite determinar este parámetro.

$$\langle 2.2 \rangle Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = R_0 + jX_0 (\Omega)$$

3. Velocidad de propagación

Corresponde a la rapidez con que se propagan las señales eléctricas en las *líneas de transmisión*. La ecuación 2.3 permite determinar este parámetro.

$$\langle 2.3 \rangle v_p = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f (m/s)$$

Como se puede observar, en la ecuación 2.3, la velocidad de propagación de una señal eléctrica, depende también de la longitud de onda y de la frecuencia de la señal con que está se propaga en cualquier *línea de transmisión*. Lo mismo sucede con la velocidad de propagación de las señales electromagnéticas, en cualquiera de los medios dieléctricos que utilicen para su propagación.

Ejemplo No. 2.2

Determinar la expresión de la impedancia características, de los tipos de líneas referenciadas en la tabla No. 2.1, para el caso de que la señal que se le aplica sea de alta frecuencia.

Solución:

De acuerdo a la ecuación 2.2, la impedancia característica de una línea de transmisión, para cualquier frecuencia, es:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Para altas frecuencias:

$$\omega L \gg R \quad \wedge \quad \omega C \gg G \Rightarrow Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

a.) Cables abiertos o aislados (al hacer los reemplazos correspondientes):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{(\mu/\pi)\ln(d/a)}{\pi\varepsilon/\ln(d/a)}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln(d/a) = \frac{\eta}{\pi} \ln(d/a) (\Omega)$$

Donde:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} : \text{p\u00e9rdidas diel\u00e9ctricas}$$

b.) Cable coaxial (al hacer los reemplazos correspondientes):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{(\mu/2\pi)\ln(b/a)}{2\pi\varepsilon/\ln(b/a)}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln(b/a) = \frac{\eta}{2\pi} \ln(b/a)$$

c.) Cintas planas paralelas (al hacer los reemplazos correspondientes):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu a/b}{\varepsilon b/a}} = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{\eta a}{b}$$

Ejemplo No. 2.3

Un cable coaxial RG-58 de radio interno de 0.45 mm y de radio externo de 2,5 mm, con impedancia caracter\u00edstica de 50 ohmios, est\u00e1 siendo utilizado para interconectar un equipo de radiocomunicaci\u00f3n con la respectiva antena. El equipo transmite una se\u00f1al de 500MHz a la antena. Determinar las siguientes caracter\u00edsticas de este cable, cuyos conductores son de cobre con conductividad 5.8×10^7 (S m):

- Las p\u00e9rdidas diel\u00e9ctricas.
- La permitividad relativa del diel\u00e9ctrico.
- La resistencia distribuida.

d.) La inductancia distribuida.

e.) Capacitancia distribuida.

Solución:

a.) Pérdidas dieléctricas (como la señal es de alta frecuencia):

$$Z_0 = \frac{\eta}{2\pi} \ln(b/a) \Rightarrow \eta = \frac{2\pi * Z_0}{\ln(b/a)}$$

$$\eta = \frac{2\pi * 50}{\ln(2.5/0.45)} = 182.65$$

b.) Permitividad relativa del dieléctrico:

La permeabilidad de los dieléctricos es aproximada a la del vacío, entonces:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \approx \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} \Rightarrow \epsilon = \frac{\mu_0}{\eta^2} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{(182.65)^2} = 37.66 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{37.66 \times 10^{-12}}{8.854 \times 10^{-12}} = 4.25$$

c.) Resistencia distribuida:

$$\text{Para altas frecuencias: } R = (R_s / 2\pi) [(1/a) + (1/b)]$$

Resistencia superficial de los conductores, a altas frecuencias:

La permeabilidad magnética relativa del cobre es aproximadamente igual a uno (0.999991 H m). Por lo tanto su permeabilidad es aproximada a la del vacío, en sentido práctico.

$$R_s = \sqrt{w\mu_c / 2g_c} = \sqrt{(2\pi \times 500 \times 10^6)(4\pi \times 10^{-7}) / 2(5.8 \times 10^7)} = 0.0583 \text{ (\Omega)}$$

$$R = (0.0583 / 2\pi) [(1/0.45 \times 10^{-3}) + (1/2.5 \times 10^{-3})] = 24.31 \text{ (\Omega/m)}$$

d.) Inductancia distribuida (desde la tabla No. 2.1):

$$L = (\mu / 2\pi) \ln(b/a) = [(4\pi \times 10^{-7}) / 2\pi] \ln(2.5/0.45) = 0.343 \text{ (\muH/m)}$$

e.) Capacitancia distribuida (desde la tabla No. 2.1):

$$C = 2\pi\epsilon / \ln(b/a) = (2\pi)(37.66 \times 10^{-12}) / \ln(2.5/0.45) = 138.38 \text{ (pF/m)}$$

2.5 Líneas de transmisión especiales

Como se indicó anteriormente, se busca que las *líneas de transmisión* no disipen energía de las señales que transmiten ni las distorsionen (para el caso de señales con información). A continuación se indican los valores de los parámetros para estos tipos especiales:⁽⁶⁾

2.5.1 Líneas de transmisión sin pérdidas

Para que las *líneas de transmisión* no le produzcan pérdidas (disipación) a las señales eléctricas que transmiten, sus conductores deben tener una conductividad infinita" ($g_c \rightarrow \infty$) y su dieléctrico no debe permitir que exista fugas de corriente entre los conductores, por lo tanto su respectiva conductividad debe ser nula ($g \rightarrow 0$). Teniendo en cuenta estas condiciones, tenemos que, para cualquier tipo de *línea de transmisión*, las características de resistencia y conductancia distribuidas presentaran los siguientes valores: $R = 0$ y $G = 0$ (ver tabla No. 2.1) y por lo tanto los parámetros de propagación serán:

- **Constante de propagación:**

$$\langle 2.4 \rangle \varphi = \sqrt{(j\omega L)(j\omega C)} = j\omega\sqrt{LC} = \alpha + j\beta \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

Como se puede apreciar, estas líneas no le producen atenuación (pérdidas) a las señales eléctricas: $\alpha = 0$, pero si desfasaje: $\beta = \omega\sqrt{LC}$.

- **Impedancia característica:**

$$\langle 2.5 \rangle Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = R_0 + jX_0 \text{ (}\Omega\text{)}$$

Como se puede apreciar, la impedancia característica de estas líneas no tiene componente reactivo ($X_0 = 0$), solo resistivo ($R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$), es decir son líneas resonantes.

- **Velocidad de propagación:**

$$\langle 2.6 \rangle v_p = \frac{w}{\beta} = \frac{w}{w\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \lambda f \text{ (m/s)}$$

Como se puede observar, en la ecuación 2.6, la velocidad de propagación de la señal eléctrica que se propaga por una *línea de transmisión* sin pérdidas, corresponde a la velocidad con que se propaga, por el dieléctrico, la onda electromagnética asociada a la señal eléctrica, y la cual depende de las características eléctricas del dieléctrico de la correspondiente *línea de transmisión*.

En la tabla No. 2.3 se indican unos valores promedios de la relación entre la velocidad de con que se propaga una señal electromagnética en un medio dieléctrico, con respecto a la velocidad con que se propagaría en el vacío (velocidad de la luz).

Dieléctrico	Factor de velocidad de propagación (f _p)
Aire	0.95 a 0.975
Hule	0.56 a 0.65
Polietileno	0.66
Teflón	0.70
Espuma de teflón	0.82
Pins de teflón	0.81
Espira de teflón	0.81

Tabla No. 2.3 Factor de velocidad de propagación.

Fuente: avier. . A., *ines of transmission*", UniversitalOberta de Catalunya, 2016, p. 85.

Ejemplo No. 2.4

Determinar la longitud de onda de una señal eléctrica que se propaga, con una frecuencia de 100 MHz, por una *línea de transmisión*, cuyo dieléctrico es de espira de teflón.

Solución:

Para dieléctrico de espira de teflón el factor de velocidad de propagación es: 0.81, entonces:

$$f_p = \frac{v_p}{C} \Rightarrow v_p = f_p * C = 0.81 * 3 \times 10^8 = 2.43 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$v_p = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{2.34 \times 10^8}{100 \times 10^6} = 2.24 \text{ m.}$$

2.5.2 Líneas de transmisión sin distorsión

Son aquellas líneas que no produce cambio alguno a la estructura fundamental de las señales eléctricas que transmiten (no alteran su componente espectral). Para lograr esta propiedad, las *líneas de transmisión* deben cumplir con las siguientes condiciones: la constante de atenuación (si presenta pérdidas): α , debe ser independiente de la frecuencia de la señal que transmite y la constante de fase: β , debe ser linealmente dependiente de dicha frecuencia. Estas condiciones se logran si: $(L/C) = (C/G)$, para cualquier tipo de *línea de transmisión*. Teniendo en cuenta lo indicado anteriormente, los parámetros de propagación para este tipo de líneas son:(7)

- **Constante de propagación:**

$$\langle 2.7 \rangle \varphi = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{LC} = \alpha + j\beta \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

La obtención de la expresión final de la ecuación 2.7 se puede apreciar en el ejemplo No. 2.5. Como podemos apreciar, de esta ecuación, la constante de atenuación: $\alpha = \sqrt{RG}$, es independiente de la frecuencia de la señal que se transmite y la constante de fase: $\beta = \omega\sqrt{LC}$, es dependiente de la misma pero en forma lineal.

- **Impedancia característica:**

$$\langle 2.8 \rangle Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R}{G}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = R_0 + jX_0 \text{ (}\Omega\text{)}$$

La obtención de la expresión final de la ecuación 2.8 se puede apreciar en el ejemplo No. 2.6. Como podemos apreciar de esta ecuación, la impedancia característica es completamente resistiva (resonante) $R_0 = \sqrt{R/G} = \sqrt{L/C}$, es

decir no tiene componente reactivo que es el que afecta la frecuencia de las señales.

- **Velocidad de propagación:**

$$\langle 2.9 \rangle v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\omega\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \lambda f \text{ (m/s)}$$

Como se puede apreciar de las ecuaciones anteriores, la condición de una línea de transmisión sin distorsión tiene los mismos parámetros de propagación que los de una línea sin pérdidas, excepto por la constante de atenuación que es distinta de cero.

Ejemplo No. 2.5

Determinar la expresión indicada en la ecuación 2.7, la cual corresponde a la constante de propagación de una línea de transmisión sin distorsión.

Solución:

Partiendo de la expresión de la ecuación 2.7:

$$\varphi = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \sqrt{R(1 + j\omega L/R)G(1 + j\omega C/G)}$$

Teniendo de presente que para *líneas de transmisión* sin distorsión, se debe

cumplir que: $\frac{L}{R} = \frac{C}{G}$, entonces:

$$\begin{aligned} \varphi &= \sqrt{RG(1 + j\omega L/R)^2} = \sqrt{RG} \sqrt{(1 + j\omega L/R)^2} = \sqrt{RG}(1 + j\omega L/R) \\ &= \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{RG}(L/R) = \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{RG(L/R)^2} = \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{G(L/R)L} \\ &= \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{G(C/G)L} = \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{LC} = \alpha + j\beta \text{ (m}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

Ejemplo No. 2.6 Determinar la expresión indicada en la ecuación 2.8, la cual corresponde a la impedancia característica de una línea de transmisión sin distorsión.

Solución:

Partiendo de la expresión de la ecuación 2.8:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{R(1 + j\omega L/R)}{G(1 + j\omega C/G)}}$$

Teniendo de presente que para *líneas de transmisión* sin distorsión, se debe cumplir que: $\frac{L}{R} = \frac{C}{G}$, entonces:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R(1 + j\omega L/R)}{G(1 + j\omega L/R)}} = \sqrt{\frac{R}{G}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = R_0 + jX_0 \text{ (}\Omega\text{)}$$

Como podemos observar, para este caso, la impedancia característica es completamente resistiva (resonante):

$$Z_0 = R_0 = \sqrt{\frac{R}{G}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ (}\Omega\text{)} .$$

Haciendo las equivalencias y los reemplazos respectivos se obtienen las siguientes relaciones, que facilitan el cálculo de las características eléctricas de las *líneas de transmisión sin distorsión*, partiendo de la condición $\frac{L}{R} = \frac{C}{G}$:⁽⁸⁾

$$\langle 2.10 \rangle R = \alpha Z_0 \quad \wedge \quad L = Z_0 / v_p \quad \wedge \quad C = 1/(Z_0 v_p) \quad \wedge \quad G = \alpha^2 / R$$

Ejemplo No. 2.7

Una línea de transmisión sin distorsión, tiene los siguientes parámetros de funcionamiento:

- Constante de atenuación: $\alpha = 22 \text{ mN}_p / \text{m}$
- velocidad de propagación: $v_p = 0.8 C \text{ m/s}$
- Impedancia característica: $Z_0 = 75 \Omega$

Determinar las características eléctricas distribuidas de la línea.

Solución:

De acuerdo a la ecuación 2.10:

$$R = \alpha Z_0 = (22 \times 10^{-3})(75) = 1.65 \text{ } (\Omega / m)$$

$$L = Z_0 / v_p = (75) / (0.8)(3 \times 10^8) = 0.3125 \text{ } (\mu H / m)$$

$$C = 1 / (Z_0 v_p) = 1 / (75)(3 \times 10^8) = 0.3125 \text{ } (\mu H / m) = 44.44 \text{ } (pF / m)$$

2.6 Impedancia de entrada de las líneas de transmisión

Teniendo como referencia la figura No. 2.9 se puede obtener la impedancia de entrada: Z_{in} , de una *línea de transmisión*, en función de la impedancia característica de la misma: Z_0 y de la impedancia de la carga: Z_L que está siendo alimentada por la *línea de transmisión*. La ecuación 2.11 corresponde a la fórmula para poder calcular la impedancia de entrada de una *línea de transmisión* con carga.⁽⁹⁾

$$\langle 2.11 \rangle Z_{in} = Z_0 \left[\frac{Z_L + Z_0 \tanh \phi l}{Z_0 + Z_L \tanh \phi l} \right]$$

Donde ϕ : corresponde a la constante de propagación y l : longitud de la *línea de transmisión*, a partir de la carga.

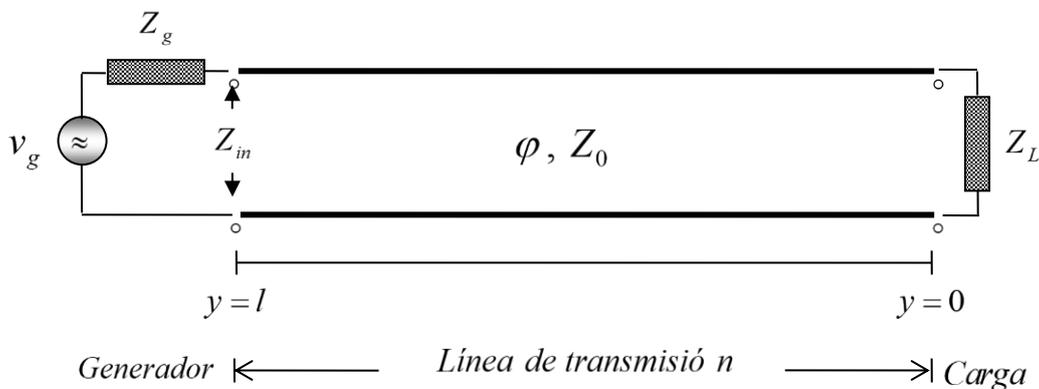


Fig. No. 2.9 Impedancia de entrada de una línea de transmisión.

Ejemplo No. 2.8

Si se le coloca una carga con igual impedancia a la impedancia característica ($Z_L = Z_0$), a la salida de una *línea de transmisión*, determinar su impedancia de entrada:

Solución:

$$Z_{in} = Z_0 \left[\frac{Z_L + Z_0 \tanh \varphi l}{Z_0 + Z_L \tanh \varphi l} \right]_{Z_L = Z_0} = Z_0 \left[\frac{Z_0 + Z_0 \tanh \varphi l}{Z_0 + Z_0 \tanh \varphi l} \right] = Z_0$$

Lo anterior nos indica que si existe un perfecto acople entre la impedancia de la carga con la impedancia de la *línea de transmisión*, la impedancia a la entrada de esta línea es igual a la impedancia característica de la misma e igual a la impedancia de la carga.

Ejemplo No. 2.9

Determinar la impedancia de entrada de las *líneas de transmisión* sin pérdidas (no disipativas).

Solución:

Para las *líneas de transmisión* sin pérdidas se tiene que $\alpha = 0$ y por lo tanto $\varphi = j\beta$, lo que implica que: $\tanh \varphi l = \tanh j\beta l = j \tan \beta l$. Además, se tiene que: $Z_0 = R_0 = \sqrt{L/C}$, por lo tanto, la ecuación 2.11, de la impedancia de entrada de cualquier tipo de línea de transmisión, queda de la siguiente manera:

$$\langle 2.12 \rangle Z_{in} = R_0 \left[\frac{Z_L + jR_0 \tan \beta l}{R_0 + jZ_L \tan \beta l} \right]$$

Ejemplo No. 2.10

Para una línea de transmisión sin pérdidas y con una impedancia característica de $Z_0 = 50 \Omega$ está alimentando a una carga de $Z_L = (50 - j30) \Omega$, determinar la impedancia de entrada, para:

- una longitud eléctrica de 0.3λ
- una longitud eléctrica de 0.5λ

Solución:

Se aplica la ecuación 2.12:

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(50 - j30) + j50 \tan \beta l}{50 + j(50 - j30) \tan \beta l} \right]$$

Desde la ecuación 2.9 se determina el valor de la constante de fase

$$v_p = \frac{w}{\beta} = \lambda f \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{w}{\lambda f} = \frac{2\pi f}{\lambda f} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ (rad/m)}$$

Reemplazando se tiene:

a.) Para $l = 0.3\lambda$

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(50 - j30) + j50 \tan(2\pi / \lambda)0.3\lambda}{50 + j(50 - j30) \tan(2\pi / \lambda)0.3\lambda} \right]$$

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(50 - j30) + j50 \tan 0.6\pi}{50 + j(50 - j30) \tan 0.6\pi} \right] = 50 \left[\frac{(50 - j30) - j153.85}{50 - 153.85j - j92.31} \right]$$

$$= 50 \left[\frac{50 - j183.85}{50 - j246.16} \right] = 50 \left[\frac{(50 - j183.85)(50 + j246.16)}{(50 - j246.16)(50 + j246.16)} \right]$$

$$= 37.14 + j2.47 \Omega$$

b.) Para $l = 0.5\lambda$

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(50 - j30) + j50 \tan(2\pi / \lambda)0.5\lambda}{50 + j(50 - j30) \tan(2\pi / \lambda)0.5\lambda} \right]$$

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(50 - j30) + j50 \tan \pi}{50 + j(50 - j30) \tan \pi} \right] = 50 \left[\frac{(50 - j30)}{50} \right] = (50 - j30) \Omega$$

Como se puede observar, de los resultados de este ejemplo, la impedancia de entrada es exactamente igual a la impedancia de carga, cuando $l = 0.5\lambda$.

Ejemplo No. 2.11

Una carga de impedancia $Z_L = (110 - j110) \Omega$ está siendo alimentada por una fuente de voltaje de $v_g = 10 \cos(2\pi \times 10^8 t) V$, con impedancia interna de

$Z_g = 50 \Omega$, a través de una línea de transmisión con impedancia característica de $Z_o = 50 \Omega$, sin pérdidas y con dieléctrico de aire. Si la longitud de la línea $l = 10 \text{ cm}$, determinar:

a.) La impedancia de la carga observada desde los terminales de entrada de la línea de transmisión.

b.) El voltaje y la corriente en los terminales de entrada de la línea de transmisión.

Solución:

Se aplica la ecuación 2.12:

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(110 - j110) + j50 \tan \beta l}{50 + j(110 - j110) \tan \beta l} \right]$$

Desde la ecuación 2.9 se determina el valor de la constante de fase

$$v_p = \frac{w}{\beta} = \lambda f \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{w}{\lambda f} = \frac{2\pi f}{\lambda f} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Como línea de transmisión en aire, entonces:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ (m/s)}}{10^8 \text{ (1/s)}} = 3 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{2}{3} \pi \text{ (rad/m)}$$

Reemplazando:

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(110 - j110) + j50 \tan(2/3)\pi \times 0.10}{50 + j(110 - j110) \tan(2/3)\pi \times 0.10} \right]$$

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(110 - j110) + j50 \tan 0.067 \pi}{50 + j(110 - j110) \tan 0.067 \pi} \right] = 50 \left[\frac{(110 - j110) + j107}{50 + j(23.54 - j23.54)} \right]$$

$$Z_{in} = 50 \left[\frac{(110 - j110) + j107}{50 + j(23.54 - j23.54)} \right] = 50 \left[\frac{110 - j3}{73.54 + j23.54} \right] = \frac{5.500 - j150}{73.54 + j23.54}$$

$$Z_{in} = \frac{(5.500 - j150)(73.54 - j23.54)}{(73.54 + j23.54)(73.54 - j23.54)} = 67.25 - j23.56 \Omega$$

b.) voltaje y corriente en la entrada de la línea de transmisión.

En la figura No. 2.10 se hace una representación del circuito enunciado en el ejemplo:

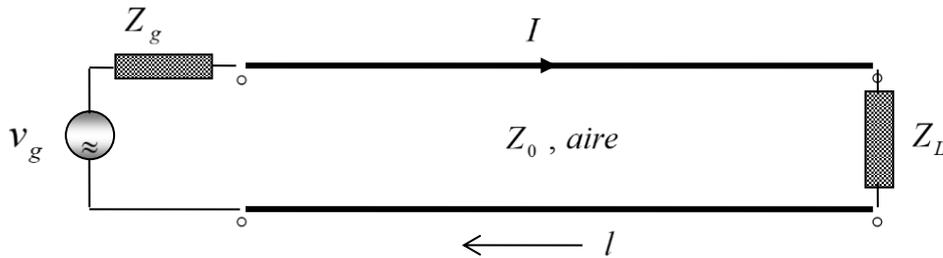


Figura No. 2.10 Carga alimentada a través de una línea de transmisión.

El circuito equivalente en los terminales de entrada a la línea es el siguiente:

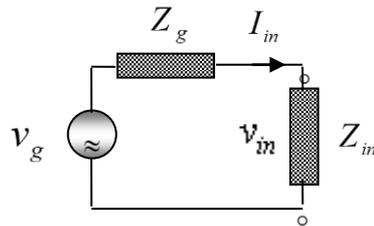


Figura No 2.11 Circuito equivalente

Aplicando divisor de voltaje, se determina el voltaje a la entrada de la línea:

$$v_{in} = \left[\frac{Z_{in}}{Z_g + Z_{in}} \right] v_g = \left[\frac{(67.25 - j23.56)}{50 + (67.25 - j23.56)} \right] [10 \cos(2\pi \times 10^8 t)]$$

$$= \frac{71.25 e^{-j88.69}}{119.60 e^{j11.36}} [10 \cos(2\pi \times 10^8 t)] = 5.99 e^{-j77.33} \cos(2\pi \times 10^8 t) (V)$$

Aplicando la ley de Ohm:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{Z_{in}} = \frac{5.99e^{-j77.33}}{67.25 - j23.56} \cos(2\pi \times 10^8 t) = \frac{5.99e^{-j77.33}}{71.25 e^{-j88.69}} \cos(2\pi \times 10^8 t)$$

$$= 0.084 e^{j11.36} \cos(2\pi \times 10^8 t) \text{ (A)} = 84 e^{j11.36} \cos(2\pi \times 10^8 t) \text{ (mA)}$$

2.7 Onda estacionaria

Una onda estacionaria corresponde al resultado de la superposición de dos señales (ondas), que se propagan por un mismo medio de transmisión con la misma frecuencia pero en sentido contrario.

Para el caso de las *líneas de transmisión*, la onda estacionaria se produce cuando la señal eléctrica, que se propaga por ella, incide en una carga que está siendo alimentada por la línea no es completamente consumida por la carga, produciéndose por lo tanto una señal reflejada, cuya intensidad corresponde a la cantidad de la energía de la señal que no fue consumida. Está señal reflejada se propaga por la misma línea en sentido contrario a la señal incidente. De esta forma se superponen estas dos señales generándose así la onda estacionaria sobre la línea.

Considerando que la impedancia de la *línea de transmisión* debe tener una impedancia característica solo resistiva, la señal reflejada se puede presentar en las siguientes situaciones:

- Cuando los terminales de la línea se encuentre abierta o en corto o que la impedancia de la carga que está alimentando sea solo reactiva (inductiva o capacitiva). En este caso la señal incidente se refleja totalmente, ya que no existe componente resistivo alguno que consuma energía en sus terminales finales. En el ejemplo No.2.12 y No. 2.13 se describe el desarrollo para determinar la conformación de las ondas estacionarias para una línea de transmisión no disipativa, tanto para el caso de que los terminales de la línea se encuentre en circuito abierto como en corto circuito, respectivamente.
- Cuando la impedancia de la carga contiene componente resistivo y componente reactivo. La señal incidente se reparte entre los dos componentes de la impedancia de la carga, donde solamente el componente que consume energía es el resistivo, mientras el componente reactivo la refleja. En este caso la intensidad de la señal reflejada es una parte de la de la señal incidente, la cual corresponde a la que no consumió el componente reactivo de la carga.
- Cuando la impedancia de la carga es solo resistiva, pero su valor no coincide con la impedancia característica de la línea. En este caso la energía

que lleva la señal incidente no se transfiere completamente a la carga, reflejándose parte de ella, cuya intensidad es proporcional a la diferencia resistiva existente entre la de la carga y la de la línea o viceversa.

En la única situación que no existe onda reflejada y por lo tanto tampoco onda estacionaria, es cuando las impedancias tanto de la línea como el de la carga ambas son resistivas y de igual valor. En este caso existe lo que se denomina acople perfecto de impedancias y es cuando toda la energía que llega a los terminales de la línea es transferida a la carga (máxima transferencia de energía).

2.8 Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión por voltaje: Γ , en una línea de transmisión, determina el grado de desacople que existe entre las impedancias de la carga, que está alimentando la línea, y la impedancia característica de esta. Este coeficiente está definido como la relación que existe entre las intensidades de voltajes de la señal reflejada y la señal incidente en la carga.⁽¹⁰⁾

$$\langle 2.13 \rangle \Gamma = \frac{\text{señal reflejada}}{\text{señal incidente}} \Big|_{\text{en la carga}} = \frac{V_{\text{reflejada}}}{V_{\text{incidente}}} \Big|_{y=0} = \frac{V_r}{V_i} \quad \text{ó} \quad \frac{I_{\text{reflejada}}}{I_{\text{incidente}}} \Big|_{y=0} = \frac{I_r}{I_i}$$

El coeficiente de reflexión, se puede expresar en función de la impedancia de la carga y de la impedancia característica de la línea de transmisión. En la ecuación 2.14 se indica esta relación (ver en el ejemplo No. 2.13 la deducción).

$$\langle 2.14 \rangle \Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Ejemplo No. 2.12

Graficar las ondas eléctricas, tanto de voltaje como de corriente, que se presenta en una línea de transmisión no disipativa si la carga es completamente resistiva ($Z_L = R_L$), para los siguientes casos: a.) $Z_L > Z_0$, b.) $Z_L < Z_0$ y c.) $Z_L = Z_0$.

Solución:

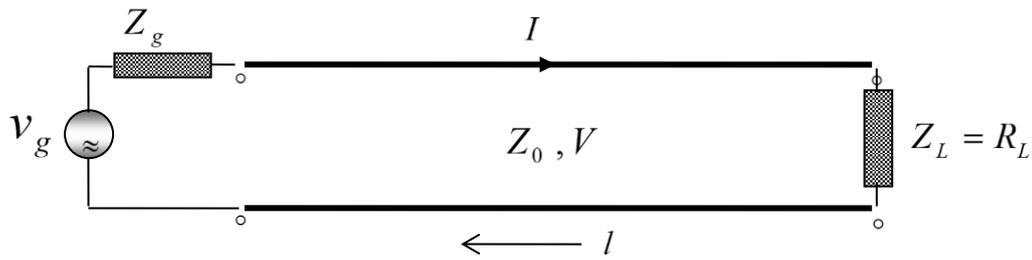


Fig. No. 2.12 Línea de transmisión no disipativa con carga resistiva.

Para el caso de las *líneas de transmisión* no disipativas (sin pérdidas), las señales eléctricas no sufren atenuación alguna a través de toda la longitud de la línea y estas señales (voltaje y corriente eléctrica) se expresan de las siguientes ecuaciones: 2.15 y 2.16, respectivamente:

$$\langle 2.15 \rangle V = V_i e^{-j\beta l} + V_r e^{j\beta l} = V_i (e^{-j\beta l} + (V_r / V_i) e^{j\beta l}) = V_i (e^{-j\beta l} + \Gamma e^{j\beta l}) \quad (V)$$

$$\langle 2.16 \rangle I = \frac{1}{Z_0} (V_i e^{-j\beta l} - V_r e^{j\beta l}) = \frac{V_i}{Z_0} (e^{-j\beta l} - (V_r / V_i) e^{j\beta l}) = \frac{V_i}{Z_0} (e^{-j\beta l} - \Gamma e^{j\beta l}) \quad (A)$$

Teniendo de presente el coeficiente de reflexión definido en la ecuación 2.14, se obtiene:

$$V = V_i \left(e^{-j\beta l} + \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) e^{j\beta l} \right) = V_L \left(e^{-j\beta l} + \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) e^{j\beta l} \right)$$

$$I = \frac{V_i}{Z_0} \left(e^{-j\beta l} - \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) e^{j\beta l} \right) = I_L \left(e^{-j\beta l} - \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) e^{j\beta l} \right)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 2.6, la constante de fase para cualquier tipo de *línea de transmisión* está definida por:

$$\beta = \frac{\omega}{v_p} = \frac{2\pi f}{\lambda f} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{rad} / m)$$

Reemplazando este valor de β , en las ecuaciones inmediatamente anteriores, tenemos:

$$V = V_L \left(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}l} + \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\beta l} \right) (V)$$

$$I = I_L \left(e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}l} - \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) e^{j\frac{2\pi}{\lambda}\beta l} \right) (A)$$

a.) Para $Z_L > Z_0$, haciendo los reemplazos respectivos, se tiene la siguiente tabla y el gráfico correspondiente:

l	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ
V	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}
I	I_{\min}	I_{\max}	I_{\min}	I_{\max}	I_{\min}

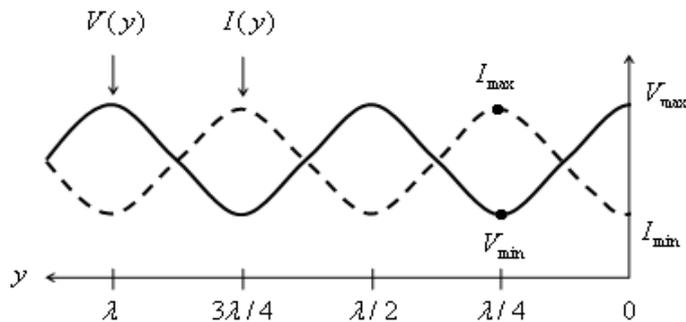


Fig. No. 2.13 Ondas eléctricas de voltaje y de corriente para $Z_L > Z_0$

b.) Para $Z_L < Z_0$, haciendo los reemplazos respectivos, se tiene la siguiente tabla y su gráfico correspondiente:

l	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ
V	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}	V_{\max}	V_{\min}
I	I_{\max}	I_{\min}	I_{\max}	I_{\min}	I_{\max}

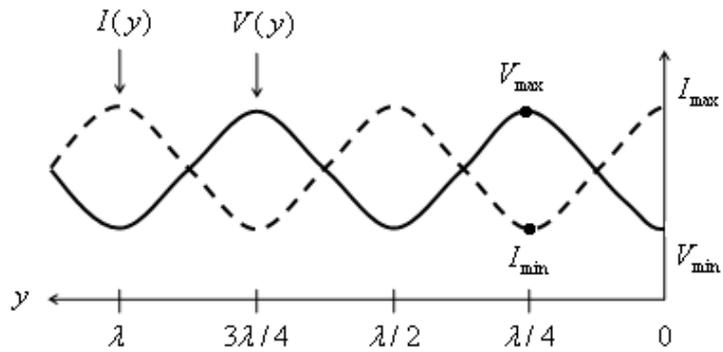


Fig. No. 2.14 Ondas eléctricas de voltaje y de corriente para $Z_L < Z_0$

c.) Para $Z_L = Z_0$, haciendo los reemplazos respectivos, se tiene la siguiente tabla y el gráfico correspondiente:

l	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ
$ V $	V_L	V_L	V_L	V_L	V_L
$ I $	I_L	I_L	I_L	I_L	I_L

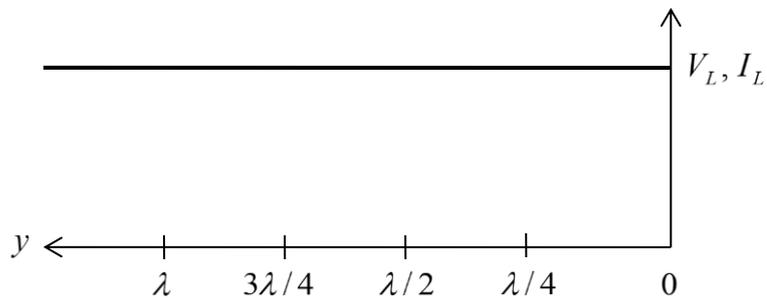


Fig. No. 2.15 Ondas eléctricas de voltaje y de corriente para $Z_L = Z_0$

Ejemplo No. 2.13

Deducir la expresión, dada en la ecuación 2.14, donde el coeficiente de reflexión esta dado en función de la impedancia de la carga y de la impedancia característica de la *línea de transmisión*.

Solución:

Se tiene que por definición (ecuación 2.13):

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i}$$

Ahora:

$$Z_L = \frac{V_L}{I_L} = \frac{V_i + V_r}{(1/Z_0)(V_i - V_r)} \Rightarrow \left(\frac{Z_0 + Z_L}{Z_0} \right) V_r = \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_0} \right) V_i$$

$$\Rightarrow V_r = \left(\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \right) V_i$$

Entonces:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Ejemplo No. 2.14

Representar gráficamente las ondas estacionarias, tanto de voltaje como de corriente, en una *línea de transmisión* abierta (circuito abierto), sin pérdidas (no disipativas).

Solución:

Si existe circuito abierto en los terminales de las *líneas de transmisión*, no hay carga alguna que consuma la energía transmitida a través de la misma y por lo tanto toda la señal se refleja. Para este caso el valor del voltaje en los terminales de la línea es el máximo (circuito abierto) y $V_r = V_i$ (en fase) y por lo tanto $\Gamma = 1$.

Mientras que el valor de la correspondiente corriente es el mínimo (cero) en dicho punto. Teniendo en cuenta que las ondas estacionarias, tanto de voltaje como de corriente, se repiten cada $\lambda/2$, tenemos que las ondas estacionarias son las que se muestran a continuación.

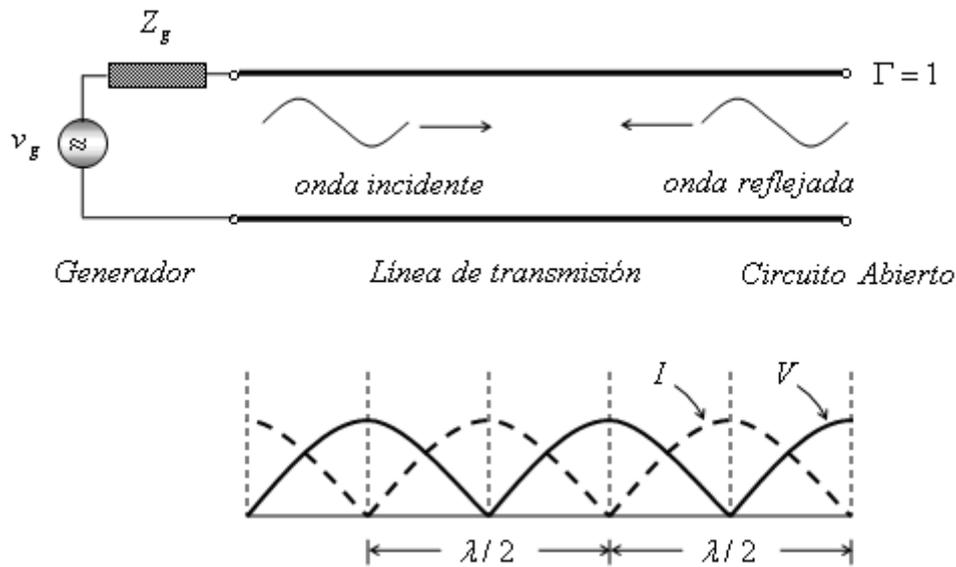


Fig. No. 2.16 Ondas estacionarias de voltaje y de corriente en una línea de transmisión sin disipación abierta

Ejemplo No. 2.15

Representar gráficamente las ondas estacionarias, tanto de voltaje como de corriente, en una *línea de transmisión* en corto (corto circuito), sin pérdidas (no disipativas).

Solución:

Si existe corto circuito en los terminales de las *líneas de transmisión*, tampoco, como en el caso de circuito abierto, existe carga alguna que consuma la energía transmitida a través de la misma y por lo tanto toda la señal se refleja. Para este caso el valor del voltaje en los terminales de la línea es el mínimo (cero) (corto circuito) y $V_r = -V_i$ (en desfase) y por lo tanto $\Gamma = -1$. Mientras que el valor de la correspondiente corriente es el máximo en dicho punto. Como se menciona en el ejercicio inmediatamente anterior, ya que las ondas estacionarias, tanto de voltaje como de corriente, se repiten cada $\lambda/2$, tenemos que las ondas estacionarias son las que se repiten a continuación.

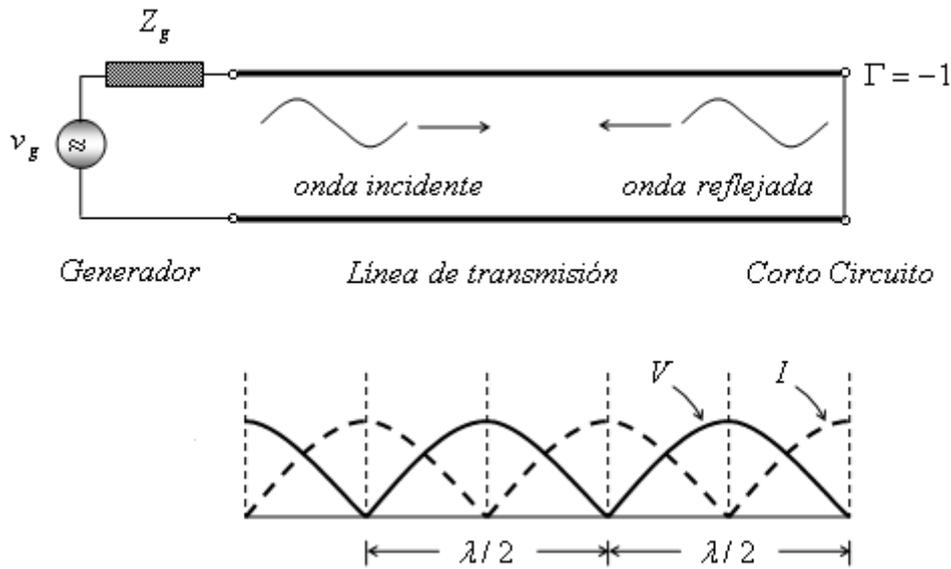


Fig. No. 2.17 Ondas estacionarias de voltaje y de corriente en una línea de transmisión sin disipación en corto.

Como podemos apreciar de las ondas estacionarias, tanto para circuito abierto como para corto circuito en los terminales de la línea de transmisión, cada $\lambda/4$, a partir de dichos terminales, se produce una inversión de impedancia. Es también oportuno reseñar que si la carga es completamente reactiva (inductiva ó capacitiva) toda la señal se refleja. El componente resistivo de las cargas es el único que consume energía.

2.9 Relación de onda estacionaria (ROE)

La relación de onda estacionaria por voltaje: *ROE* (sigla en español) y *SWR* (*Stationary wave Ratio*: sigla en inglés), en una *línea de transmisión*, corresponde a la relación que existe entre el voltaje máximo y el voltaje mínimo ó corriente máxima y corriente mínima en la *línea de transmisión*. La forma más común como se anota esta relación es: $S^{(1)}$

$$\langle 2.17 \rangle S = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$$

La relación de onda estacionaria se puede expresar en función del coeficiente de reflexión, tal como se indica en la ecuación 2.18 (ver en el ejemplo No. 2.16 la deducción).

$$\langle 2.18 \rangle S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Ejemplo No. 2.16

Deducir la expresión donde la relación de onda estacionaria, se puede expresar en función del coeficiente de reflexión, dada en la ecuación 2.18.

Solución:

Se tiene que por definición (ecuación 2.16):

$$S = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

Ahora:

$$V_{\max} = (1 + |\Gamma|) V_i \text{ y } V_{\min} = (1 - |\Gamma|) V_i$$

Entonces:

$$S = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Ejemplo No. 2.17

Si se le coloca un corto circuito ($Z_L = 0$) a la salida de una *línea de transmisión* sin pérdidas, determinar:

- a.) La impedancia de entrada y dibujarla.
- b.) El coeficiente de reflexión en la carga.
- c.) La relación de onda estacionaria.

Solución:

- a.) Impedancia de entrada (desde ecuación 2.12):

$$Z_{in} = R_0 \left[\frac{Z_L + jR_0 \tan\beta l}{R_0 + jZ_L \tan\beta l} \right]_{Z_L=0} = R_0 \left[\frac{jR_0 \tan\beta l}{R_0} \right] = jR_0 \tan\beta l$$

Haciendo los reemplazos respectivos, se tiene la siguiente tabla y el gráfico correspondiente.

Haciendo los reemplazos respectivos, se tiene la siguiente tabla y el gráfico correspondiente.

βl	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$Z_{in} = jX_i$	0	$\pm \infty$	0	$\pm \infty$	0

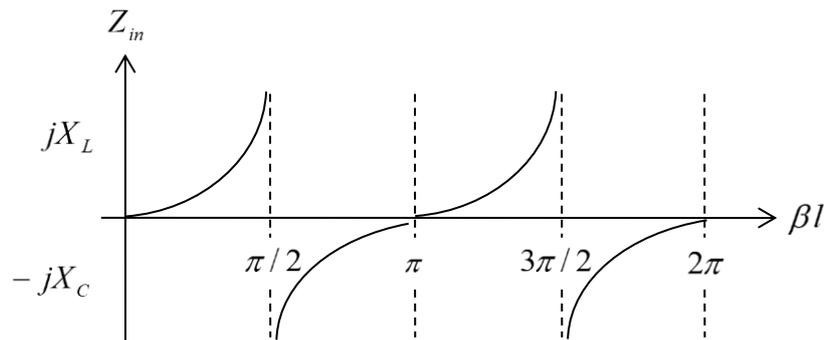


Fig. No.2.18 Línea de transmisión sin pérdidas en corto

Se puede observar en la figura, la impedancia de entrada (Z_{in}) de una *línea de transmisión* sin pérdidas, con corto circuito como carga, es reactiva: inductiva o capacitiva, dependiendo del valor de: βl .

b.) Coeficiente de reflexión en la carga (desde la ecuación 2.14):

$$\Gamma = \frac{Z_L - R_0}{Z_L + R_0} \Big|_{Z_L=0} = -1$$

c.) Relación de onda estacionaria (desde ecuación 9.16):

βl	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π
$Z_{in} = jX_i$	$-\infty$	0	$\mp \infty$	0	$+\infty$

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \Bigg|_{Z_L=0} = \frac{1+1}{1-1} \rightarrow \infty$$

Como podemos apreciar, si la *línea de transmisión* está en corto la señal incidente se refleja totalmente.

Ejemplo No. 2.18

Si se le coloca un circuito abierto ($Z_L \rightarrow \infty$) a la salida de una *línea de transmisión* sin pérdidas, determinar:

- La impedancia de entrada y dibujarla.
- El coeficiente de reflexión en la carga.
- La relación de onda estacionaria.

Solución:

a.) Impedancia de entrada (desde ecuación 2.12):

$$Z_{in} = R_0 \left[\frac{Z_L + jR_0 \tan \beta l}{R_0 + jZ_L \tan \beta l} \right]_{Z_L \rightarrow \infty} = R_0 \left[\frac{Z_L}{jZ_L \tan \beta l} \right] = R_0 \frac{1}{j \tan \beta l} = -jR_0 \cot \beta l$$

Haciendo los reemplazos respectivos, se tiene la siguiente tabla y el gráfico correspondiente.

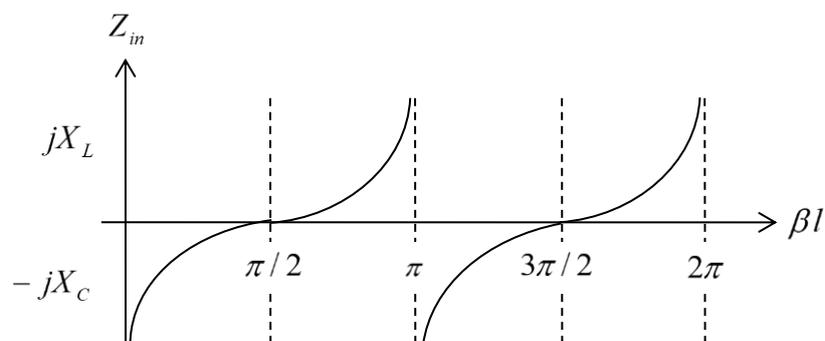


Fig. No.2.19 Línea de transmisión sin pérdidas con circuito abierto

Como se puede observar en la figura, la impedancia de entrada (Z_{in}) de una *línea de transmisión* sin disipación, con circuito abierto como carga, es reactiva: inductiva o capacitiva, dependiendo del valor de: βl .

b.) Coeficiente de reflexión en la carga (desde la ecuación 2.14):

$$\Gamma = \frac{Z_L - R_0}{Z_L + R_0} \Big|_{Z_L = \infty} = \frac{Z_L}{Z_L} = +1$$

c.) Relación de onda estacionaria (desde ecuación 2.18):

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \Big|_{Z_L = 0} = \frac{1 + 1}{1 - 1} \rightarrow \infty$$

Como se puede apreciar, si la *línea de transmisión* está en circuito abierto la señal incidente se refleja totalmente.

Ejemplo No. 2.19

Si se le coloca una carga con igual impedancia a la impedancia característica ($Z_L = R_0$), a la salida de una *línea de transmisión* sin disipación, determinar:

- La impedancia de entrada.
- El coeficiente de reflexión en la carga.
- La relación de onda estacionaria.

Solución:

a.) Impedancia de entrada (desde ecuación 2.12):

$$Z_{in} = R_0 \left[\frac{Z_L + jR_0 \tanh\beta l}{R_0 + jZ_L \tanh\beta l} \right]_{Z_L = R_0} = R_0 \left[\frac{R_0 + jR_0 \tanh\beta l}{R_0 + jR_0 \tanh\beta l} \right] = R_0$$

Como se puede apreciar, cuando existe un perfecto acople de impedancias entre la de la línea y la de la carga, la impedancia de entrada (Z_{in}) de una *línea de*

transmisión, en cualquiera de los puntos de la longitud de la misma, es igual a su impedancia característica.

b.) Coeficiente de reflexión en la carga (desde la ecuación 2.14):

$$\Gamma = \frac{Z_L - R_0}{Z_L + R_0} \Big|_{Z_L=R_0} = \frac{R_0 - R_0}{R_0 + R_0} = 0$$

c.) Relación de onda estacionaria (desde ecuación 2.18):

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \Big|_{Z_L=R_0} = \frac{1 + 0}{1 - 0} = 1$$

Como se puede apreciar, si la impedancia característica de una *línea de transmisión* está en perfecto acople con la de la carga: no existe reflexión alguna ($\Gamma = 0$) y por lo tanto no existe onda estacionario ($S = 1$), lográndose de esta manera la máxima transferencia de energía eléctrica, que transporta la *línea de transmisión*, hacia la carga.

Ejemplo No. 2.20

Un transmisor que opera a una frecuencia de: 30 MHz le entrega a una antena, que tiene una impedancia de: $Z_L = 300 \Omega$, una potencia de: 5 W a través de un cable coaxial $RG - 8A/U$ de longitud: $l = 20 \text{ m}$. Calcular:

- El coeficiente de reflexión.
- La longitud eléctrica del cable coaxial en longitud de onda (λ).
- La relación de onda estacionaria (S).
- La cantidad de potencia neta radiada por la antena.

Solución:

a.) Coeficiente de reflexión en la carga (desde la ecuación 2.14):

La impedancia característica del cable coaxial $RG - 8A/U$ es de: $Z_0 = 50 \Omega$.

Por lo tanto:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{300 - 50}{300 + 50} = 0.71$$

b.) Longitud eléctrica del cable coaxial:

La velocidad de propagación de las ondas, en el cable coaxial $RG - 8A/U$, es: $v_p = 2.07 \times 10^8$ (m/s), por lo tanto:

$$v_p = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{2.07 \times 10^8}{30 \times 10^6} = 6.9 \text{ (m)}$$

Para una longitud física de $l = 20$ m, se tiene que la longitud eléctrica del cable es de:

$$\frac{20 \text{ (m)}}{6.9 \text{ (m/}\lambda)} = 2.9 \lambda$$

c.) Relación de onda estacionaria (desde ecuación 2.18):

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + 0.71}{1 - 0.71} = 5.9$$

d.) Potencia radiada (P_{rad}):

La eficiencia de reflexión: $e_{ref} = 1 - |\Gamma|^2 = 1 - (0.71)^2 = 0.4959$. Por lo tanto y considerando que la antena no consume (disipa) potencia por resistencia óhmica, tenemos que la potencia radiada es:

$$P_{rad} = e_{ref} P_{in} = (0.4959)(5W) = 2.48 \text{ W}$$

Lo anterior indica que debido al desacople de impedancias entre las de la línea de transmisión (cable coaxial) y la de la entrada de la antena. de los 5 que el cable coaxial le entrega a los terminales de la antena, tan solo 2,48 se utilizan (radian y el resto se reflejan).

Ejemplo No. 2.21

Por una *línea de transmisión* se transmite una señal eléctrica, la cual le produce a esta señal una atenuación $\alpha = 6$ (dB/m) y un desfase de $\beta = 1.2$ (rad/m)

. La línea tiene una longitud de $l = 10 \text{ (m)}$ y una impedancia característica $Z_0 = 100 + j50 \text{ (}\Omega\text{)}$. Si a la línea se le conecta una carga de impedancia $Z_L = 60 \text{ (}\Omega\text{)}$, determinar:

- La impedancia de entrada de la línea.
- El coeficiente de reflexión en la carga.
- La relación de onda estacionaria.

Solución:

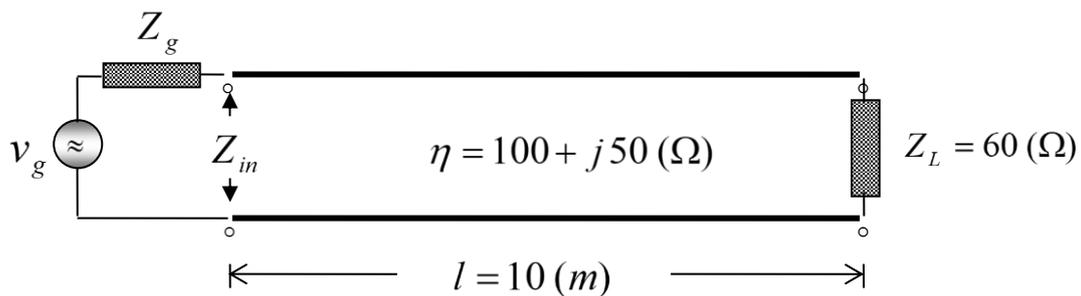


Fig. No. 2.20 Línea de transmisión disipativa con carga resistiva

En primer lugar, se tiene que expresar α en Np/m :

$$1 \text{ (Np/m)} \rightarrow 8,686 \text{ (dB/m)}$$

$$\alpha \text{ (Np/m)} \rightarrow 6 \text{ (dB/m)}$$

$$\alpha \text{ (Np/m)} = \frac{6 \text{ (NpdB/m}^2\text{)}}{8,686 \text{ (dB/m)}} = 0.69 \text{ (Np/m)}$$

Entonces la constante de propagación está dada por: $\varphi = \alpha + j\beta = 0.69 + j1.2$

- Impedancia de entrada (desde la ecuación 2.11):

$$\begin{aligned}
Z_{in} &= Z_0 \left[\frac{Z_L + Z_0 \tanh \phi l}{Z_0 + Z_L \tanh \phi l} \right] \\
&= (100 + j50) \left[\frac{60 + (100 + j50) \tanh[(0.69 + j1.2)(10)]}{(100 + j50) + 60 \tanh[(0.69 + j1.2)(10)]} \right] \\
&= (100 + j50) \left[\frac{60 + (100 + j50) \tanh[6.9 + j12]}{(100 + j50) + 60 \tanh[6.9 + j12]} \right]
\end{aligned}$$

Se tiene que:

$$\tanh(6.9 + j12) = \frac{e^{(6.9+j12)} - e^{-(6.9+j12)}}{e^{(6.9+j12)} + e^{-(6.9+j12)}}$$

$$e^{(6.9+j12)} = e^{6.9} e^{j12} = e^{6.9} (\cos 12 + j \sin 12)$$

$$= e^{6.9} (0.84 - j 0.54) = 833.51 - j 535.83$$

$$e^{-(6.9+j12)} = e^{-6.9} e^{-j12} = e^{-6.9} (\cos 12 - j \sin 12)$$

$$= 8.46 \times 10^{-4} + j 5.44 \times 10^{-4}$$

Entonces:

$$\begin{aligned}
\tanh(6.9 + j12) &= \frac{(833.51 - j 535.83) - (8.46 \times 10^{-4} + j 5.44 \times 10^{-4})}{(833.51 - j 535.83) + (8.46 \times 10^{-4} + j 5.44 \times 10^{-4})} \\
&\approx \frac{(833.51 - j 535.83)}{(833.51 - j 535.83)} = 1
\end{aligned}$$

Reemplazando en ecuación:

$$Z_{in} = (100 + j50) \left[\frac{60 + (100 + j50)}{(100 + j50) + 60} \right] = (100 + j50) \left[\frac{160 + j50}{160 + j50} \right] = (100 + j50)$$

Para este caso, coincide que la impedancia de entrada es igual a la impedancia característica de la línea.

b.) Coeficiente de reflexión en la carga (desde la ecuación 2.14):

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{60 - (100 + j50)}{60 + (100 + j50)} = \frac{-40 - j50}{160 + j50} \\ &= \frac{(-40 - j50)(160 - j50)}{(160 + j50)(160 - j50)} = -0.317 - j0.213 \end{aligned}$$

$$|\Gamma| = \sqrt{(-0.317)^2 + (0.213)^2} = 0.382$$

c.) Relación de onda estacionaria (desde ecuación 9.16):

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + 0.382}{1 - 0.382} = 2.24$$

2.10 Adaptador de impedancias

Además de la utilización de las *líneas de transmisión* como medio de transmisión de las señales eléctricas (energía eléctrica sola o con información), también se emplean para otras aplicaciones. A continuación se hace referencia de algunas de estas aplicaciones, en el caso del cableado paralelo abierto, como adaptador de impedancias. ⁽¹²⁾

Son diferentes las formas de lograr obtener, mediante las *líneas de transmisión*, sistemas de acoplamiento de impedancias, entre la de estas líneas y la de la carga que ellas alimentan. Los sistemas o dispositivos de acoplamiento de impedancia es de una gran utilidad para lograr la eficiencia óptima de transferencia de potencia (energía) entre el alimentador y el consumidor (carga) de energía eléctrica. A continuación se relacionan algunos de estos adaptadores, a través de las mismas *líneas de transmisión*. ⁽¹³⁾

2.10.1 Transformador de un cuarto de longitud de onda

Es una de las formas para realizar una adaptación ó acople de impedancias, entre la de la carga y la de la *línea de transmisión*. La impedancia de la *línea de*

transmisión debe ser totalmente resistiva, mientras que la de la carga puede ser solo resistiva ó compleja. Lográndose que el valor de la impedancia en los terminales del transformador de $\lambda/4$, sea resistiva e igual a la de la *línea de transmisión*: $Z_0 = R_0$.

A continuación se describe como se logra cada uno de estos acoples, dependiendo si la carga es sólo resistiva ó compleja. Es conveniente anotar que esta técnica no consiste físicamente de un transformador, pero realiza el proceso de transformación de impedancia.

a.) Carga sólo resistiva ($Z_L = R_L$):

Si la carga tiene una impedancia resistiva: R_L y la impedancia característica de la *línea de transmisión* es también resistiva: $Z_0 = R_0$, donde $R_0 \neq R_L$, la técnica de acoplamiento de impedancias, para ese caso, consiste básicamente en ubicar un fragmento de una línea de transmisión de longitud eléctrica: $\lambda/4$ con impedancia característica: Z^* , entre la carga y la *línea de transmisión*, propiamente dicha (ver figura 2.21). La impedancia de la línea de $\lambda/4$, se determina mediante la ecuación 2.19. La impedancia resistiva resultante en los terminales del transformador de $\lambda/4$, es igual al valor de la *línea de transmisión*: $Z_0 = R_0$, lográndose de esta forma un acople de impedancia entre esta y la de la carga resistiva, y de esta forma se pueda presentar la posibilidad de la máxima transferencia de energía a la carga.

$$\langle 2.19 \rangle Z^* = \sqrt{R_0 R_L}$$

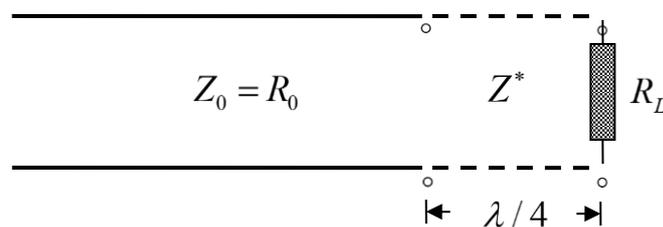


Fig. No.2.,21 Sección: adaptador de impedancia de $\lambda/4$, para el caso de que la impedancia de la carga sea resistiva: $Z_L = R_L$

b.) Carga compleja ($Z_L = R_L \pm jX$):

Para este caso, se coloca los terminales finales del transformador de un cuarto de longitud de onda, en el punto: A , donde la impedancia de la *línea de transmisión* sea resistiva: R_{l^*} , a partir de la carga hacia el generador. Por lo tanto, se debe determinar la correspondiente longitud: l^* (ver figura No.2.22).

Para determinar la longitud: l^* y el valor de la resistencia: R_{l^*} , se utiliza el diagrama de Smith, tal como se indica en el desarrollo del ejemplo No. 9.19. En este punto se determina la impedancia resistiva de la *línea de transmisión*: R_{l^*} , y se calcula la impedancia resistiva: $Z^* = \sqrt{R_0 R_{l^*}}$, de la línea de $\lambda/4$.

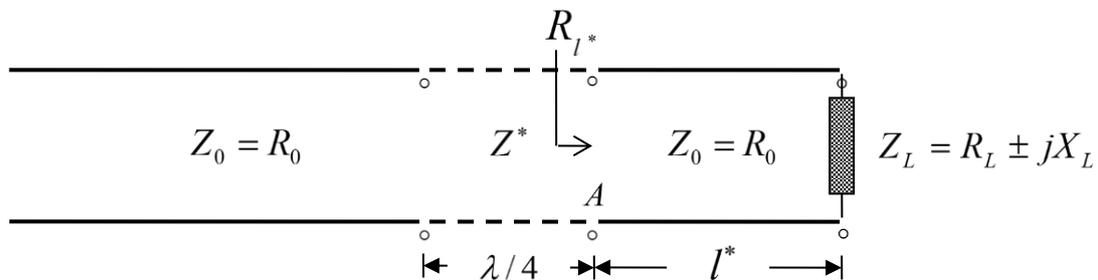


Fig. 2,22 Sección: adaptador de impedancia de $\lambda/4$, para el caso de que la impedancia de la carga sea compleja: $Z_L = R_L \pm jX_L$

2.10.2 Acoplador sencillo en paralelo

Es otra técnica para lograr la adaptación o acople de impedancias, entre la de la carga y la de la *línea de transmisión*, cuando la impedancia de la carga sea compleja: $Z_L = R_L \pm jX$. A esta técnica también se le conoce como: *Tubo o talón sintoni ador*.

Consiste básicamente en implementar un corto circuito, en el punto: A , mediante un par de cables paralelos (talón) (ver figura No. 2.23). La distancia: d , desde la carga hacia el generador, donde se debe implementar el talón, y la longitud del acoplador (talón): t , se determina mediante el diagrama de Smith, tal como se indica en el desarrollo del ejemplo No.2.25. Se acostumbra dejar el aseguramiento del corto circuito, de tal forma que se pueda desplazar para realizar los ajustes finos correspondientes.

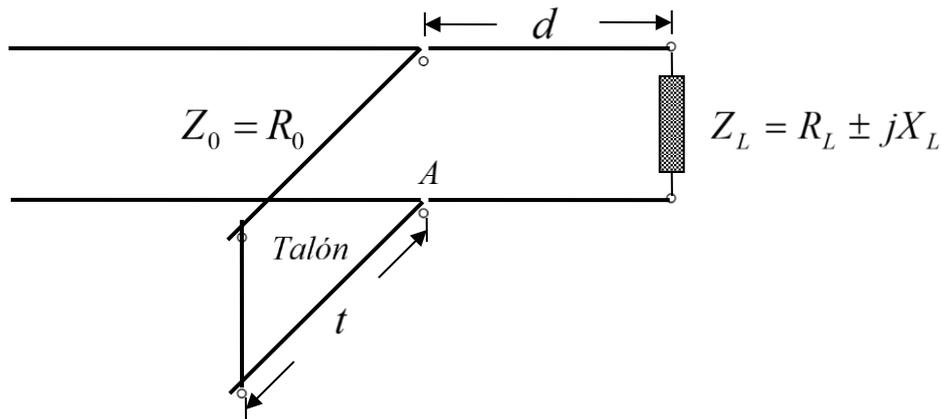


Fig. No.2.23 Sección: adaptador de impedancia tipo talón sintonizador

2.10.3. Balanceo de línea y adaptador de impedancias

La *línea de transmisión*, tipo coaxial, es una línea desbalanceada, ya que las áreas transversales correspondientes de sus conductores, externo e interno, son diferentes. Para conectar una carga que sea balanceada (como es el caso de una antena dipolar) con un cable coaxial, se utiliza el *balun*. Este dispositivo se comporta como un transformador de: impedancia balanceada a impedancia no balanceada ó viceversa. En la figura No. 2.24 se hace una representación del circuito eléctrico del *balun*, así como de su estructura básica.

La construcción del *balun* se realiza con el mismo tipo de cable coaxial, correspondiente al del la *línea de transmisión* con la cual se va a conectar la carga. El *balun* también funciona como transformador de impedancia: para el caso de que la longitud del cable coaxial del *balun*, correspondiente a su parte de forma *U*, sea de $\lambda/2$, respecto al conductor interno, se obtiene, además del balanceo, una transformación de impedancia de $Z_1 = (1/4)Z_2$.

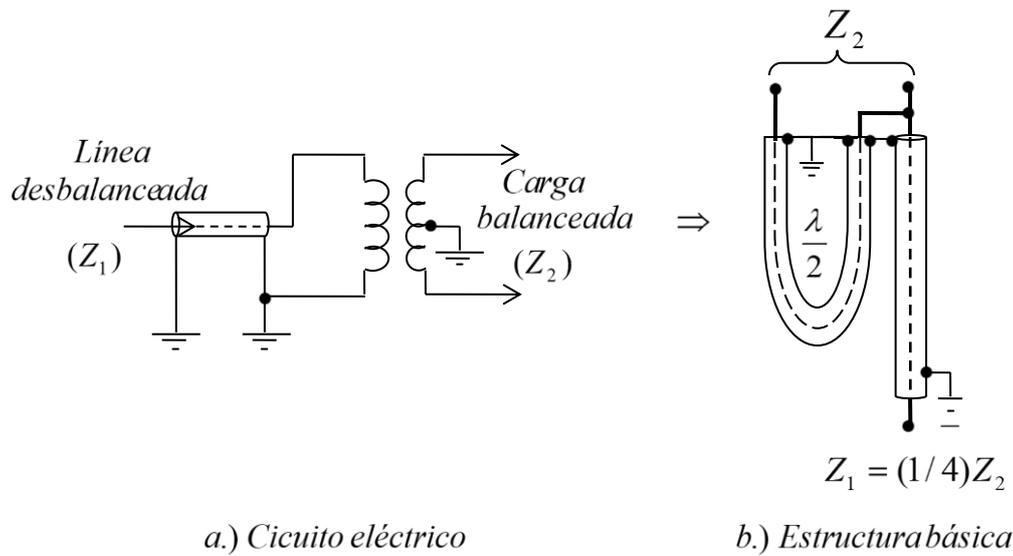


Fig. No.2.24 Balun coaxial: $\lambda/2$

2.11 El diagrama de Smith

Tal como se mencionó en el numeral 2.6, la impedancia de entrada o sea la impedancia en cualquier punto de una *línea de transmisión* sin pérdidas, está dada por la ecuación 2.11:

$$Z_p = R_0 \left[\frac{Z_L + jR_0 \tan \beta l}{R_0 + jZ_L \tan \beta l} \right]$$

El proceso para calcular la impedancia en cualquier punto de una *línea de transmisión*, desde su carga, aplicando la ecuación indicada anteriormente, es un poco engorroso, tal como se puede apreciar en los ejemplos correspondientes realizados anteriormente. El señor P.H. Smith, desde 1938, desarrollo el diagrama que lleva su nombre, que permite, entre otras aplicaciones, calcular en forma más sencilla la impedancia de entrada de una *línea de transmisión* sin pérdidas, en cualquier punto desde su carga. Las soluciones que nos permite obtener la utilización del diagrama de Smith, desde hace varios años, ya se logran alcanzar mediante programas implementados en computadores o calculadoras programables. Sin embargo hoy en día aún este diagrama está vigente, especialmente si se carece de las herramientas computacionales. ⁽¹⁴⁾

En la figura No. 2.25, se ilustra el diagrama de Smith. Este diagrama básicamente consta de dos conjuntos de curvas. El primer conjunto, las cuales son de forma circular, equivalen a los valores resistivos de las *líneas de*

transmisión. Cada una de estas circunferencias representa un valor resistivo constante y son todas tangentes en el lado derecho del diagrama, al final de la recta horizontal que atraviesa todo el diagrama y que pasa por el centro del mismo. El valor resistivo correspondiente de cada una de estas curvas se indica sobre la recta horizontal central que atraviesa el diagrama, empezando con el valor cero, incrementándose progresivamente, correspondiéndole el valor de uno a la curva que pasa por el centro del diagrama y al final, del lado derecho del diagrama, se encuentran las circunferencias con los valores resistivos de mayor valor.

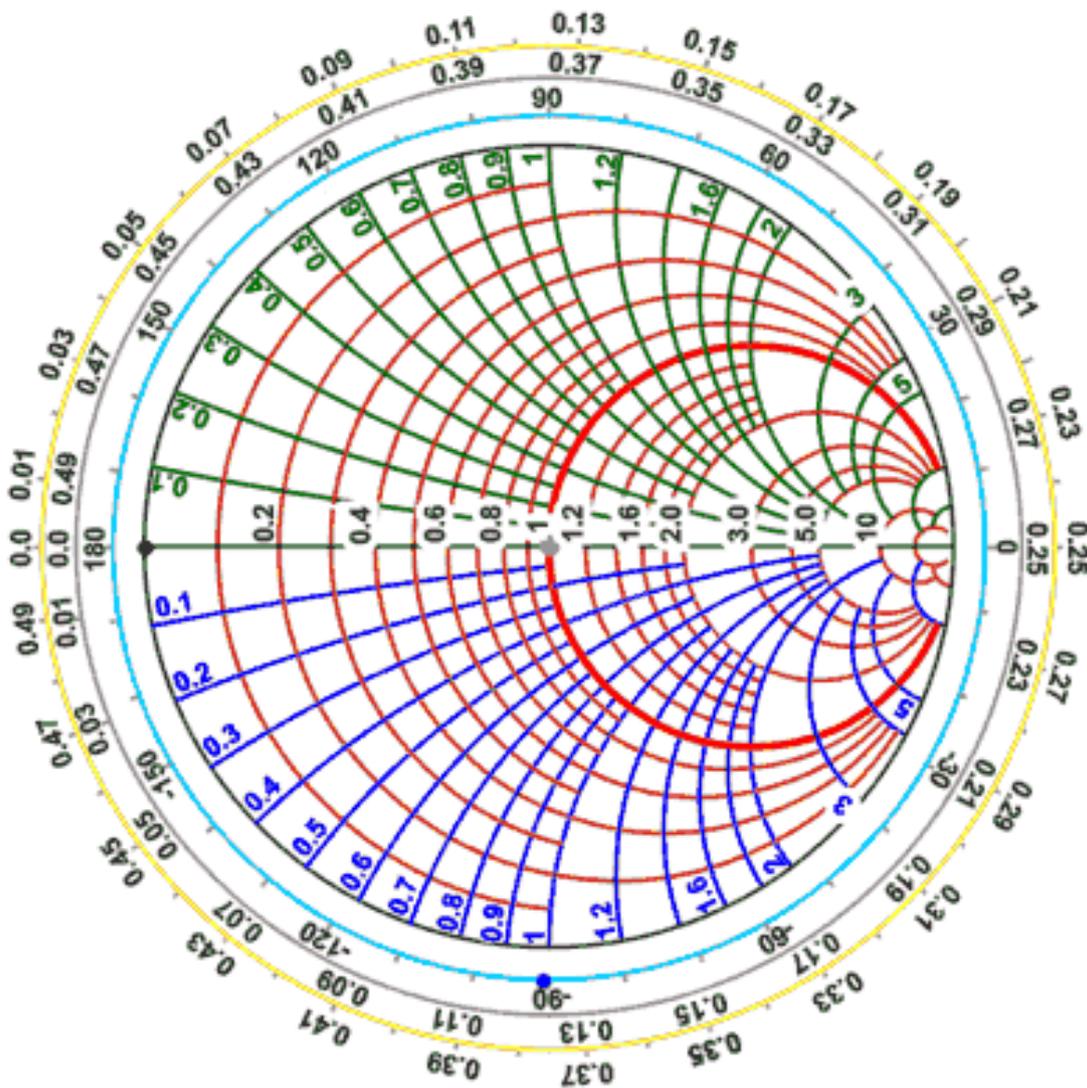


Fig. No. 2.25 Diagrama de Smith

Fuente: Aplicaciones del ábaco de Smith. (2019). Disponible: http://lu6etj.host-argentina.com.ar/lu6etj/tecnicos/smith/abaco_smith.htm.

El segundo conjunto de curvas, las cuales tienen forma de arcos, equivale a los valores reactivos de las *líneas retransmisión*. Cada uno de estos arcos representa un valor reactivo constante. Estos arcos son también tangentes en el lado izquierdo del diagrama. Los valores de las reactancias de cada uno de los arcos son indicados en la parte extrema de los mismos. Los valores de los arcos correspondientes a la mitad superior del diagrama son positivos (reactancia inductiva) y los valores de los arcos correspondientes a la mitad inferior son negativos (reactancias capacitivas).

Son varias y diversas las aplicaciones y soluciones que nos facilita la utilización del diagrama de Smith. En los diferentes ejemplos que se desarrollan a continuación se puede apreciar algunos de estos aplicativos.⁽¹⁵⁾

Ejemplo No. 2.22

Determinar: el coeficiente de reflexión: Γ y la relación de onda estacionaria, sobre la carga, así como la impedancia de entrada en los terminales de una *línea de transmisión* sin pérdidas, de longitud $l = 50 \text{ m}$, impedancia característica $Z_0 = R_0 = 50 \Omega$ y velocidad de propagación de $v_p = 0.6 C$, por la cual se transmite una señal eléctrica con frecuencia $f = 1.5 \times 10^8 \text{ Hz}$ y la carga que alimenta es $Z_L = 80 + j50 \Omega$, utilizando primero las ecuaciones correspondientes y posteriormente el *diagrama de Smit*.

Solución:

a.) Utilizando las ecuaciones correspondientes:

- Coeficiente de reflexión (ecuación 2.14):

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{(80 + j50) - 50}{(80 + j50) + 50} = \frac{(30 + j50)(130 - j50)}{(130 + j50)(130 - j50)} = 0.33 + j0.26$$

$$|\Gamma| = \left[(0.33)^2 + j(0.26)^2 \right]^{1/2} \approx 0.42$$

$$\theta_\Gamma = \tan^{-1}(0.26/0.33) = 38.23^\circ$$

$$\Gamma = 0.42 \angle 38.23^\circ$$

- Relación de onda estacionaria (ecuación 2.18):

$$S = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{1 + 0.42}{1 - 0.42} = 2.45$$

- La constante de fase (de la ecuación 9.6):

$$\beta = \frac{\omega}{v_p} = \frac{2\pi(1.5 \times 10^8)}{(0.6)(3 \times 10^8)} = 5.24 \text{ (rad / m)}$$

- Impedancia de entrada para línea sin pérdidas (ecuación 2.12):

$$\begin{aligned} Z_{in} &= R_0 \left[\frac{Z_L + jR_0 \tan \beta l}{R_0 + jZ_L \tan \beta l} \right] = 50 \left[\frac{(80 + j50) + j50 \tan(5.24 \times 50)}{50 + j(80 + j50) \tan(5.24 \times 50)} \right] \\ &= 50 \left[\frac{(80 + j50) + (j50)(2.98)}{50 + j(80 + j50)(2.98)} \right] = 50 \left[\frac{(80 + j50) + j149}{50 + j(238.4 + j149)} \right] \\ &= 50 \left[\frac{80 + j199}{-99 + j238.4} \right] = 50 \frac{(80 + j199)}{(-99 + j238.4)} \frac{(-99 - j238.4)}{(-99 - j238.4)} = 29.65 - j29.1 \Omega \end{aligned}$$

b.) Utilizando el *diagrama de Smit* (ver figura No.2.26):

- Coeficiente de reflexión:

En primer lugar se normaliza la impedancia de carga con respecto a la impedancia característica de la *línea de transmisión*:

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{80 + j50}{50} = 1.6 + j1.0$$

Se localiza el valor de la impedancia de carga normalizada: z_L , en el *diagrama de Smit* de la figura 2.26: punto: *A* (correspondiente a la intercepción de la circunferencia de resistencia: $r = 1.6$ y el arco de la reactancia inductiva: $x_L = 1.0$).

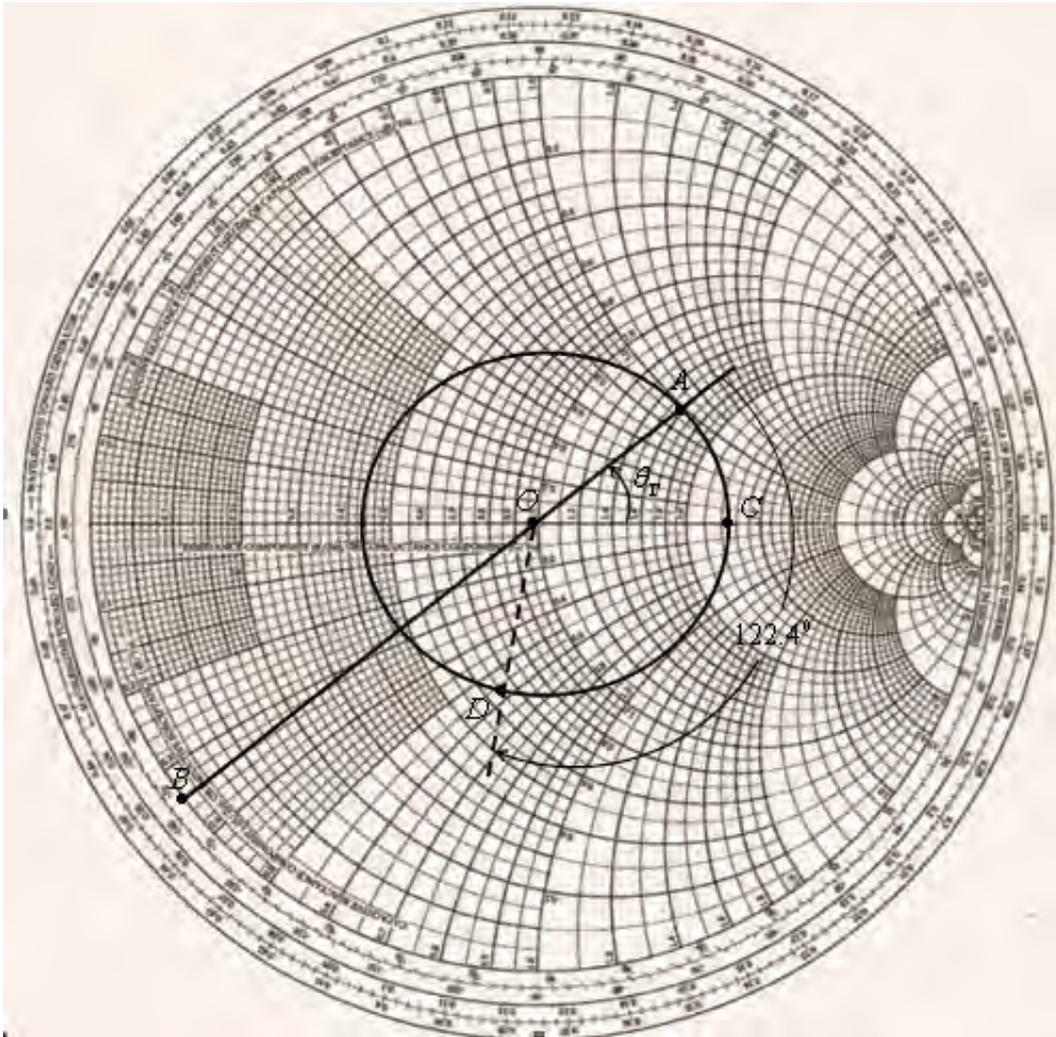


Fig. No. 2.26 Resultados del desarrollo del ejemplo 9.17

Fuente: Ramírez, J., *Campos Electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*, USB, 2014, p.488.

Se unen, mediante una línea recta, el origen del diagrama: O y el punto: A (donde $z_L = 1.6 + j1.0$): \overline{OA} . Se prolonga esta línea hasta el punto: B (circunferencia donde $r = 0$): \overline{BA} .

Como \overline{OB} corresponde a $|\Gamma| = 1$ (donde se produce total reflexión ya que la carga es un corto), entonces en el punto A , se tiene que:

$$|\Gamma| = \frac{\overline{OA}}{\overline{OB}} = \frac{3.3 \text{ cm}}{7.85 \text{ cm}} \approx 0.42$$

El ángulo: θ_{Γ} , corresponde al existente entre la línea central del diagrama (reactancia cero), a partir de su lado derecho ($r > 1$), y \overline{OA} , en sentido contrario a las manecillas del reloj. Para este caso: $\theta_{\Gamma} \approx 38.23$ (este valor se puede determinar mediante a un transportador o directamente se puede deducir en el diagrama, en el círculo $r = 0$). Por lo tanto:

$$\Gamma \approx 0.42 \angle 38.23^{\circ}$$

- Relación de onda estacionaria:

Para determinar: S , utilizando el *diagrama de Smit*, se traza una circunferencia con radio: \overline{OA} y centro: O . Esta circunferencia corresponde a la circunferencia de S constante o circunferencia de $|\Gamma|$. Donde esta circunferencia atraviese la línea central del diagrama (reactancia cero), a partir de su lado derecho ($r > 1$), se localiza el punto: C . En este punto: $S = r$. Para este caso: $S \approx 2.45$.

- Impedancia de entrada:

En primer lugar, hay que expresar la longitud de la *línea de transmisión* en términos de λ o de grados:

$$v_p = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{0.6C}{1.5 \times 10^8} = \frac{(0.6)(3 \times 10^8)}{1.5 \times 10^8} = 1.2 \text{ m}$$

La longitud de la línea en longitud de onda:

$$\frac{l}{\lambda} = \frac{50 \text{ m}}{1.2 \text{ m}} \approx 41.67 \Rightarrow l \approx 41.67\lambda$$

En el diagrama: λ corresponde a un movimiento angular de: 720° (cada giro completo: 360° equivale a $\lambda/2$ en el diagrama), entonces la longitud de la línea corresponde a un movimiento angular de:

$$l^{\circ} = 41.67(720^{\circ}) = 30.002,4^{\circ}$$

Lo anterior nos indica que nos movemos desde la carga (hacia el generador) $30.002,4^{\circ}$, sobre la circunferencia de: S , en el sentido de las manecillas del reloj, a partir del punto: A (que corresponde a la carga). Cada giro completo corresponde a 360° , entonces se producen 83 giros completos)

$(30.002.4^0 / 360^0) = 83.34$ que pasan por el punto: A , quedando 122.4^0 ($30.002.4^0 - (83 \times 360^0) = 122.4^0$). Al realizar este desplazamiento de 122.4^0 , desde el punto: A , en el sentido de las manecillas del reloj, se obtiene el punto: D , sobre la circunferencia de: S , el cual corresponde a la impedancia normalizada de entrada $z_{in} \approx 0.593 - j0.582$, por lo tanto la impedancia de entrada es:

$$Z_{in} = 50 \times z_{in} = 50(0.593 - j0.582) = 29.65 - j29.1 \Omega$$

Ejemplo No. 2.23

Mediante el *diagrama de Smit*, determinar: a.) la relación de onda estacionaria y b.) la impedancia de entrada, para una *línea de transmisión* de longitud 5.4λ , si la impedancia característica de la línea es $Z_0 = 50 \Omega$ y tiene una carga cuya impedancia es de: $Z_L = 100 - j75 \Omega$.

Solución:

En el *diagrama de Smit*, relacionado en la figura No. 2.27 se indican todos los resultados del proceso de este ejercicio.

a.) Relación de onda estacionaria:

En primer lugar, se determina la impedancia normalizada de la carga: z_L , con respecto a la impedancia característica de la *línea de transmisión*:

$$z_L = \frac{Z_L}{\eta} = \frac{100 - j75}{50} = 2 - j1.5$$

Se ubica el valor de esta impedancia normalizada $z_L = 2 - j1.5$ en el *diagrama de Smit* (punto A). Se traza la circunferencia: S (relación de onda estacionaria), con origen en el centro de del diagrama: O y con radio: \overline{OA} . En el sentido de las manecillas del reloj, a partir del punto: A (impedancia de carga normalizada) en el primer cruce de la circunferencia con la línea central del diagrama, en su lado derecho, corresponde al valor de la relación de onda estacionaria (punto B).

$$S = 3.3$$

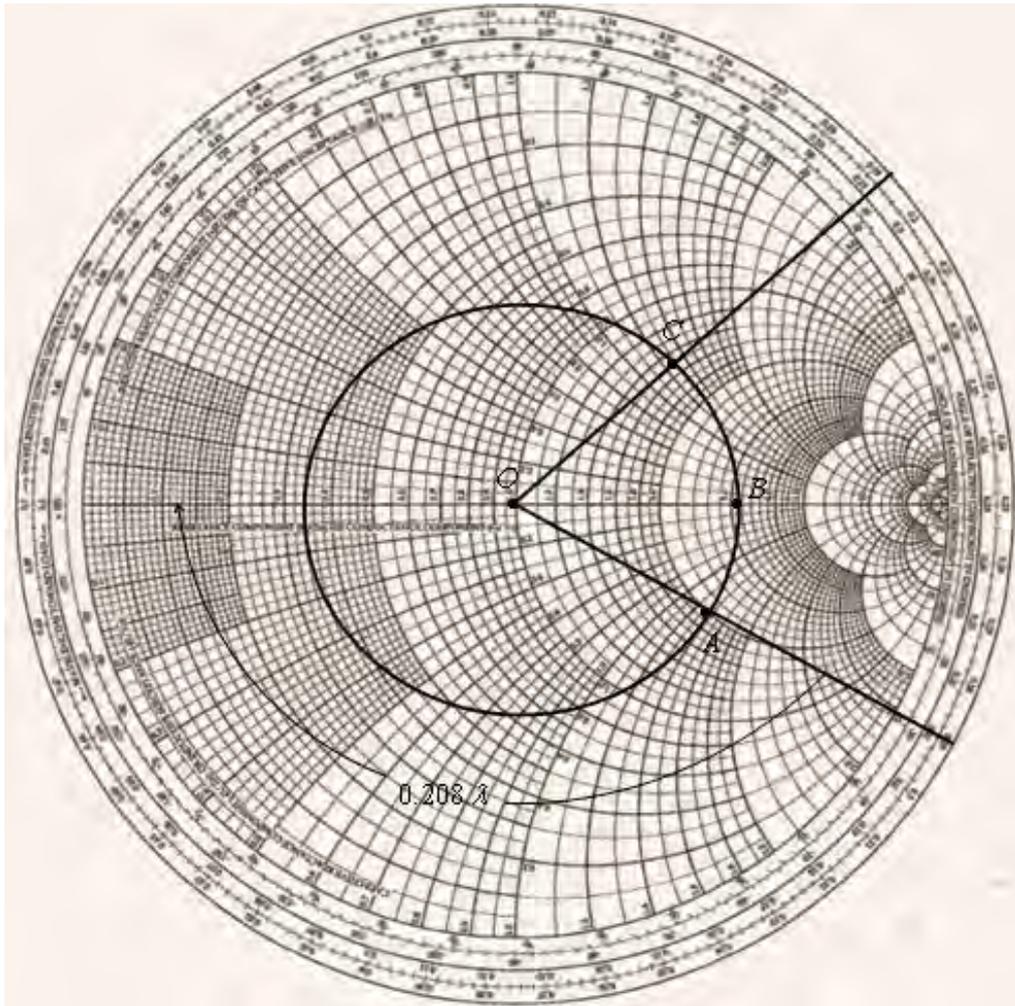


Fig. No. 2.27 Resultados del desarrollo del ejemplo 9.18

Fuente: Ramírez, J., *Campos electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*, USB, 2014, p. 490.

b.) Impedancia de entrada:

Se prolonga la recta \overline{OA} para encontrar el valor inicial de la longitud de onda, valores que se encuentran en borde del diagrama, para este caso es: 0.292λ . A partir de este punto, en el sentido de las manecillas de reloj (hacia el generador), se cuantifica la longitud de 5.4λ . Como cada vuelta entera corresponde a 0.5λ (cada 0.5λ se repite la impedancia de la línea), entonces pasa por el punto A : 10 veces quedando un remanente de 0.4λ , a partir de este punto (carga). Desde este punto hasta la iniciación de la cuantificación de la longitud de onda (borde del diagrama, parte izquierda) existe un valor de: 0.208λ ($0.5\lambda - 0.292\lambda$). Lo que nos da un valor de: $0.4\lambda - 0.208\lambda = 0.192\lambda$, a partir del punto de iniciación de la cuantificación de la longitud de onda. Desde este valor: 0.192λ , se traza una recta hasta el centro del diagrama, donde

cruce a la circunferencia: S corresponde a la impedancia normalizada de entrada de la línea. Para este caso punto C : $z_{in} = 1.5 + j1.5 \Omega$. Por lo tanto la impedancia de entrada es:

$$Z_{in} = z_{in} \times \eta = (1.5 + j1.5)(50) = 51.5 + j51.5 \Omega$$

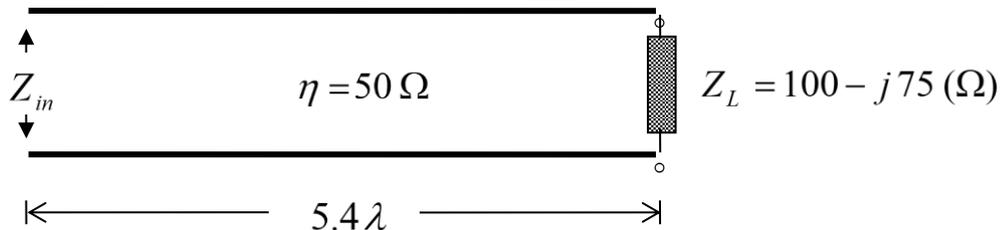


Fig. No. 2.28 Impedancia de entrada de una línea de transmisión de $\eta = 50 \Omega$, longitud 5.4λ y con carga $Z_L = 100 - j75 \Omega$

Para determinar la longitud respectiva de la línea de transmisión en unidades métricas, se requiere conocer la frecuencia de la señal que se va a transmitir por la línea ($\lambda = c/f$, donde C : velocidad de la luz).

Ejemplo No. 2.24

A una *línea de transmisión* de impedancia característica de $Z_0 = 75 \Omega$, con una carga de impedancia $Z_L = 50 - j100 \Omega$, se le inserta un transformador de $\lambda/4$ como adaptador de impedancia. Calcular: a.) la relación de onda estacionaria: S , para la impedancia característica del transformador de $\lambda/4$, b.) la distancia a la cual se debe colocar el transformador de $\lambda/4$ desde la carga y c.) la impedancia resistiva de la línea de $\lambda/4$.

Solución:

Para mayor compresión del desarrollo del ejercicio, se toma como referencia el esquema mostrado en la figura No. 2.22y los resultados del mismo se indican en el *diagrama de Smit* relacionado en la figura No. 2.29.

a.) Relación de onda estacionaria:

En primer lugar, se determina la impedancia normalizada de la carga: z_L , con respecto a la impedancia característica de la *línea de transmisión*:

$$z_L = \frac{Z_L}{\eta} = \frac{50 - j100}{75} = 0.67 - j1.33$$

Se posiciona el valor de esta impedancia normalizada: Z_L en el *diagrama de Smit* (punto *A*). Se grafica la circunferencia *S* (relación de onda estacionaria), con radio \overline{OA} , la cual pasa por Z_L . En el punto donde esta circunferencia cruza la recta central del diagrama en su lado derecho, corresponde al valor de la relación de onda estacionaria. Para este caso (punto *B*):

$$S = 4.7$$

b.) Distancia a partir de la carga, donde debe iniciarse el transformador de $\lambda/4$:

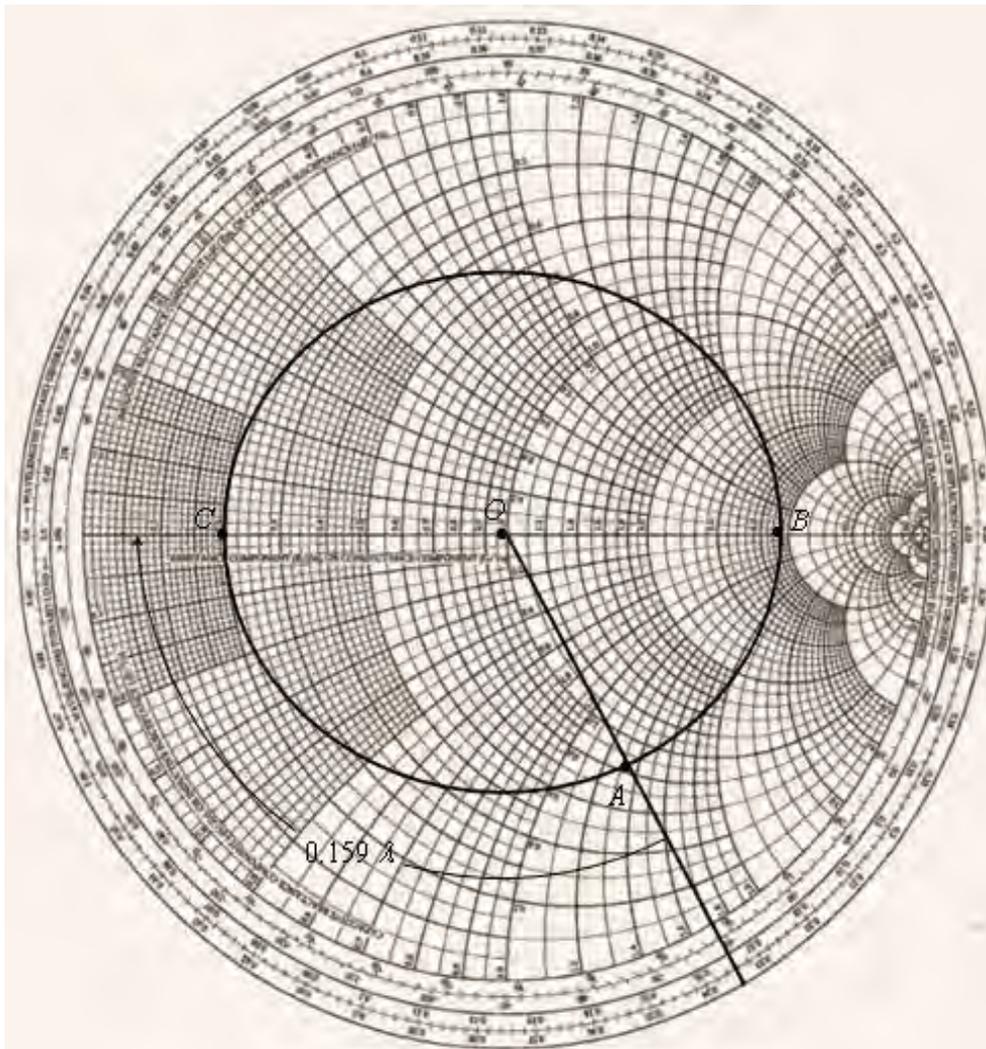


Fig. No. 2.29 Resultados del desarrollo del ejemplo No. 9.19.

Fuente: Ramírez, J., *Campos Electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*, USB, 2014, p. 492.

Corresponde a la distancia, en longitud de onda, existente entre el punto A y el punto donde la circunferencia de S cruza por primera vez, en el sentido de las manecillas del reloj (hacia el generador), la recta central del diagrama, medida sobre borde del diagrama. Para este caso (punto C):

$$l^* = 0.5 \lambda - 0.341 \lambda = 0.159 \lambda$$

c.) La impedancia resistiva de la línea de $\lambda/4$ ($Z^* = \sqrt{R_0 R_{l^*}}$):

La impedancia resistiva de la *línea de transmisión*: R_{l^*} , en el punto donde se inicia el transformador de $\lambda/4$, corresponde al valor resistivo donde se encuentra el punto: C . En este punto el valor normalizado de esta resistencia es: $r_{l^*} = 0.21$, entonces el valor de la resistencia es:

$$R_{l^*} = (r_{l^*})(\eta) = (0.21)(75) = 15.75 \Omega$$

Por lo tanto:

$$Z^* = \sqrt{R_0 R_{l^*}} = \sqrt{(75)(15.75)} = 34.37 \Omega$$

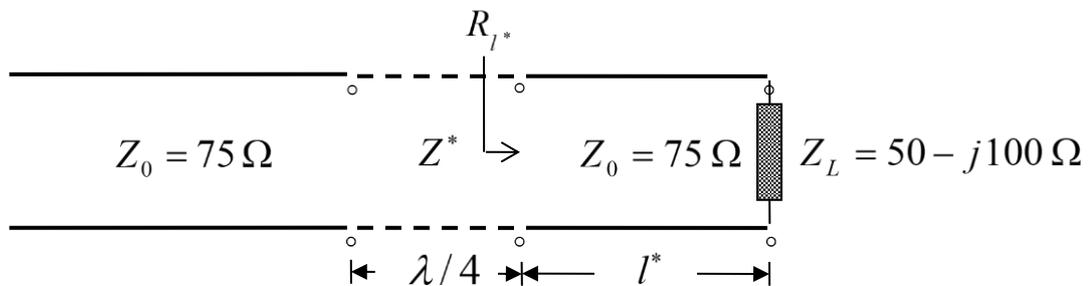


Fig. No. 2.30 Transformador de $\lambda/4$ como adaptador de impedancia de una línea de transmisión con impedancia característica: $\eta = 75 \Omega$ y con carga:

$$Z_L = 50 - j100 \Omega$$

Ejemplo No. 2.25

Una *línea de transmisión* con impedancia característica de 50Ω , se conecta a una carga de $Z_L = 60 + j80 \Omega$. Para obtener el acople de impedancias entre la

carga y la *línea de transmisión*, se utiliza un acoplador sencillo en paralelo cuya impedancia característica también es de 50Ω . Determinar:

a.) Las posibles distancias donde se debe colocar el acoplador (talón) a partir de la carga: d (dentro de la primera media longitud de onda: $\lambda/2$)

b.) La longitud del acoplador (talón): t .

Solución:

En el *diagrama de Smit*, relacionado en la figura No. 2.31 se indican todos los resultados del proceso de este ejercicio.

a.) Distancias posibles a colocarse el acoplador:

Como el acoplador (talón) se inserta en forma paralela a la línea de transmisión, es más apropiado trabajar con la admitancia en lugar de impedancia.

En primer lugar, se determina la admitancia normalizada de la carga: y_L , con respecto a la impedancia característica de la *línea de transmisión*:

$$y_L = \frac{1}{z_L} = \frac{1}{(60 + j80)/50} = \left(\frac{50}{60 + j80} \right) \left(\frac{60 - j80}{60 - j80} \right) = 0.30 - j0.40$$

Este punto en el diagrama corresponde a: B . Las admitancias normalizadas también se pueden determinar directamente desde el *diagrama de Smit*. El proceso para tal fin es básicamente el siguiente: se determina previamente la impedancia normalizada de la carga $z_L = (60 + j80)/50 = 1.2 + j1.6$ y se ubica en el diagrama (punto: A); posteriormente se traza una recta desde este punto hasta el centro del diagrama y se prolonga con una longitud igual (punto: B).

Este punto corresponde a la admitancia normalizada de la carga: Y_L . Es decir, la impedancia y admitancia normalizadas respectivas se encuentran a una distancia de 180° .

Los puntos correspondientes a los respectivos valores de: z_L y Y_L , se encuentran en la misma circunferencia S (relación de onda estacionaria).

Se dibuja la circunferencia S , desde el centro del diagrama con radio \overline{OA} ó \overline{OB} . En la circunferencia con conductancia normalizada: $g = 1$ (la cual corresponde a la misma de la resistencia normalizada: $r = 1$) se tiene el punto: C con

admitancia normalizada: $1 + j1.5$ y el punto: D con admitancia normalizada: $1 - j1.5$. Desde el punto: B (admitancia normalizada de la carga: Y_L), hasta los puntos: C y D , las distancias en longitud de onda, medidas sobre borde del diagrama hacia el generador, desde el extremo derecho del diagrama, son las siguientes:

$$d_C = 0.066\lambda + 0.176\lambda = 0.242\lambda$$

$$d_D = 0.066\lambda + 0.25\lambda + 0.074\lambda = 0.39\lambda$$

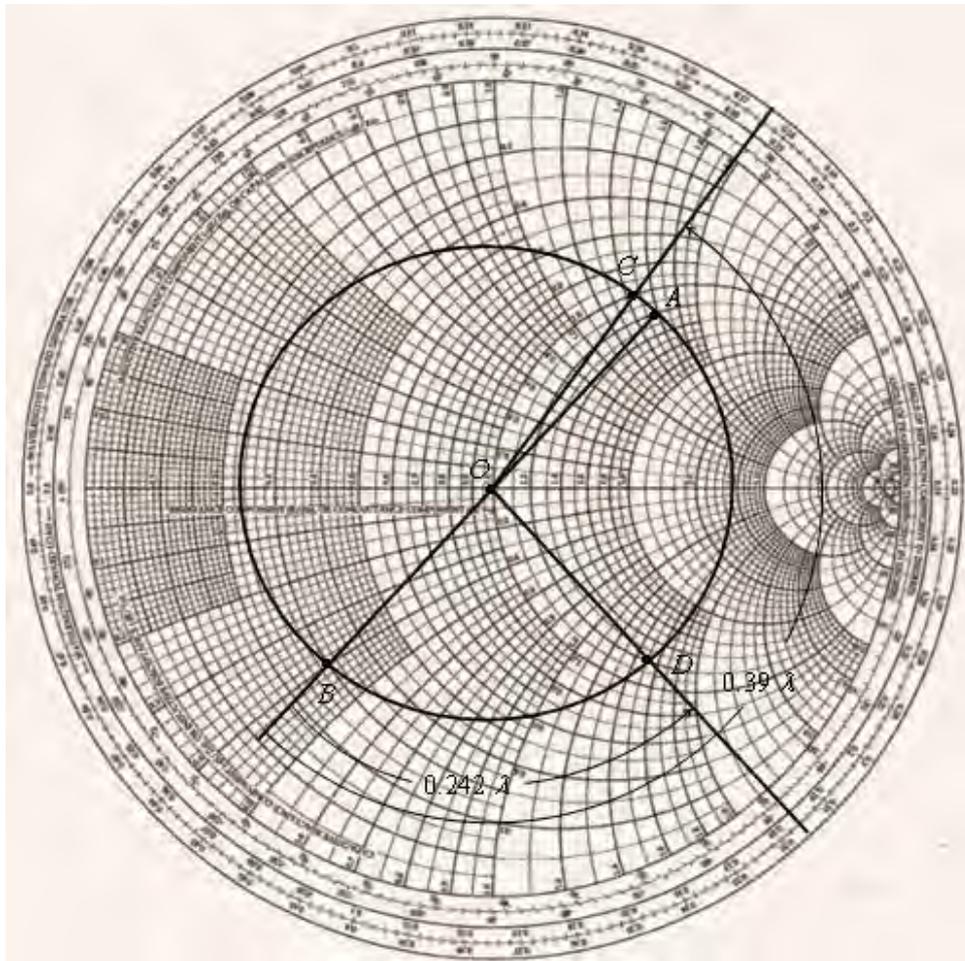


Fig. No. 2.31 Resultados del desarrollo del ejemplo No. 2.25.

Fuente: Ramírez, J., *Campos electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*, USB, 2014, p. 495.

b.) Longitud del acoplador:

La susceptancia que se requiere introducirse, mediante el acoplador (talón), en cada una de las posibles distancias indicadas anteriormente, para neutralizar las que ahí se presentan son:

En el punto $C : -j1.5$ y en el punto $D : +j1.5$, lográndose por lo tanto que en estos puntos solamente exista componente resistivo (resonancia). De tal manera que partiendo del extremo derecho del diagrama hacia el generador, las longitudes que deberán tener cada uno de los posibles acopladores son las siguientes:

Para la distancia d_C : donde se encuentra la susceptancia: $-j1.5$ es de: $t_C = 0.324\lambda - 0.25\lambda = 0.074\lambda$ y para la distancia d_D : donde se encuentra la susceptancia: $+j1.5$ es de: $t_D = 0.176\lambda + 0.25\lambda = 0.426\lambda$.

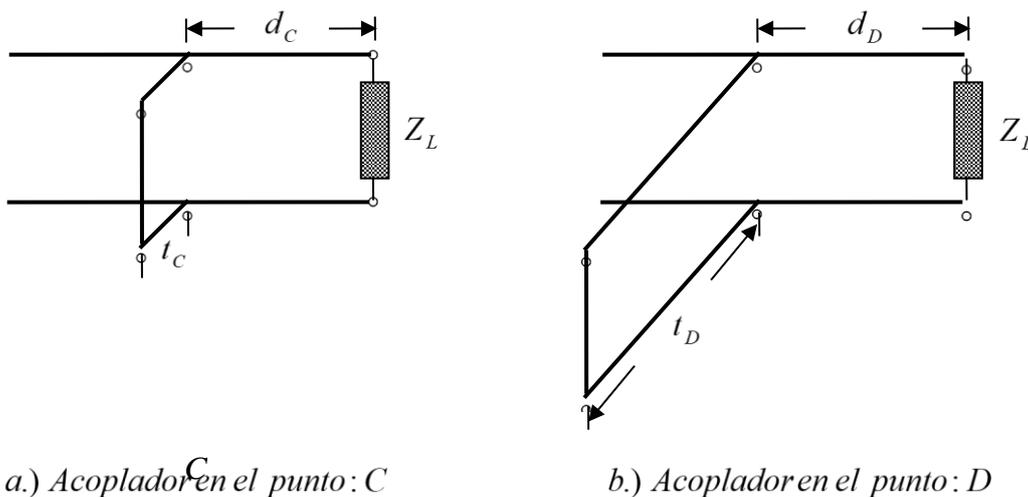


Fig. No. 2.32 Localización de los acopladores (talones)

Para poder determinar las longitudes respectivas en unidades métricas, se requiere conocer la frecuencia de la señal que se va a transmitir por la línea ($\lambda = c / f$, donde c : velocidad de la luz).

2.12 Cableado de las redes eléctricas

En el numeral 1.2.2 se mencionó los componentes básicos que conforman una red eléctrica, desde la central generadora hasta los consumidores finales, indicando los principales aspectos de sus correspondientes componentes. En el numeral 2.2 se hizo referencia a las líneas de transmisión en general. En este numeral se hace mención de las principales características estructurales y funcionales de los cables, que con mayor asiduidad se utilizan en los tendidos de las redes eléctricas.

2.12.1 Cables abiertos paralelos

Corresponden a los cables utilizados para el tendido externo de las redes eléctricas. Estos cables constan de hilos conductores paralelos separados por el aire. Por este tipo de cables se transmite las señales de la energía eléctrica. Las señales eléctricas son de alto voltaje y a frecuencias bajas (60 Hz norma americana o 50 Hz norma europea).

Este cableado, esencialmente, consta de tres hilos en los primeros tramos de la red de distribución (*Red de Transportey Red de Reparto*) y de dos hilos en los tramos finales (*Red de distribución de media tensión y Red de acometida*) (ver figura No. 2.33).

Los primeros tramos de la red se distinguen por contar con torres de estructuras robustas y de cables conductores, generalmente de cobre, aluminio o acero, de secciones relativamente grandes y de la existencia de un tercer cable más delgado, ubicado en la parte central de los dos cables de conducción, generalmente en la parte superior de las torres, y corresponde a la línea de tierra. Como se indicó anteriormente, estos cables de conducción generalmente son alambres en forma trenzada, con enrollamiento en sentido opuesto, proporcionando de esta manera mayor superficie para el flujo de la corriente y además flexibilidad en su manejo (ver figura No. 1.2 *estructura básica de un sistema transmisión de energía eléctrica*”).

El promedio del número de torres para los tramos de alta tensión es de por lo menos cuatro torres por cada kilómetro de tendido, dependiendo, especialmente, de las condiciones topográficas del terreno. En algunos tendidos los cables son huecos, por donde circula aceite a baja presión con el propósito de protegerlos contra el agua que podrían generar fugas de corriente en el cable.⁽¹⁶⁾

Para el caso de las líneas de transmisión de dos cables paralelos abiertos, para las redes eléctricas externas, estos se encuentran separados por aire. En la figura No. 2.35 se hace una representación de los cables paralelos abiertos.

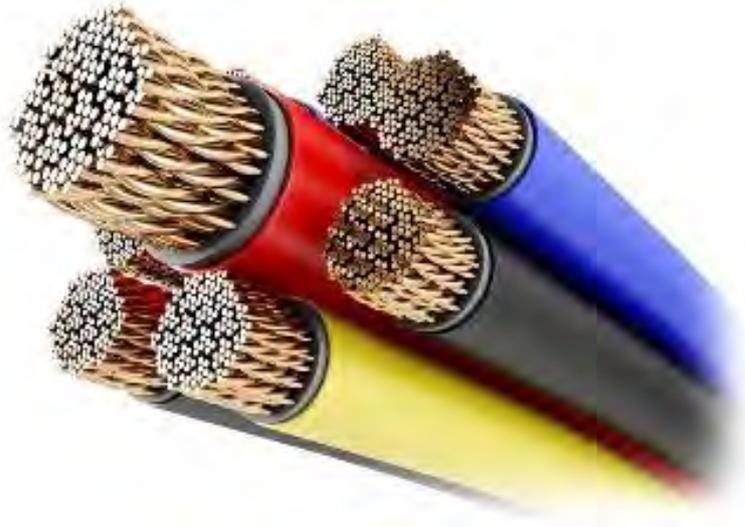


Fig. No. 2.33 Cables paralelos abiertos para altas y medianas tensiones

Fuente: Cables conductores eléctricos. (2019). Disponible: <http://.diselec.es/material-electrico-cables-conductores-electricos>

El circuito eléctrico equivalente de la unidad Δz de una línea de transmisión de cables abiertos paralelos se ilustra en la figura No. 2.34. Una línea de transmisión ideal es aquella donde todas sus características eléctricas tiendan a cero. La resistencia de los conductores (R), para reducir al máximo las pérdidas por disipación. La conductancia del dieléctrico (G), para reducir las posibilidades de fugas de corriente de un conductor a otro. Los componentes reactivos (L y C) para proteger a las señales, que se transmiten por estas líneas, de componentes espectrales adicionales que puedan afectar la estructura de las mismas, esencialmente para las señales eléctricas que transporten información (especialmente digitales).

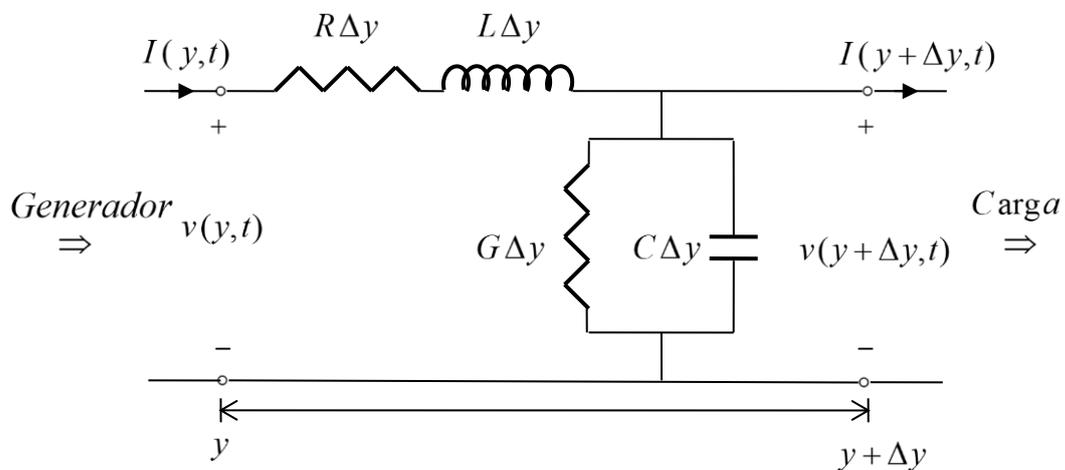


Fig. No. 2.34 Circuito eléctrico equivalente de una línea de transmisión de cables abiertos paralelos.

La impedancia característica de los *cables abiertos paralelos* (ver figura No 2.35) se puede calcular, además de la ecuación 9.7 que corresponde para cualquier tipo de línea de transmisión, con la ecuación 9.18.



Fig. No. 2.35 Cables abiertos paralelos

$$\langle 2.20 \rangle Z_0 = 276 \log_{10}(d / a)$$

d : separación entre los cables (m)

a : radio de los conductores (m)

Ejemplo No. 2.26

Determinar el diámetro que deben tener los *cables abiertos paralelos* de una instalación eléctrica, si se desea que su impedancia característica sea de 5.000 ohmios y la separación entre ellos sea de 1 metro.

Solución:

Aplicando la ecuación 9.18:

$$Z_0 = 276 \log_{10}(d / a) \Rightarrow d / a = 10^{Z_0/276} = 10^{5.000/276} \approx 18.12$$

$$a = d / 18.12 = 1 / 18.12 \approx 0.055 \text{ m} \Rightarrow 2a = 11 \text{ cm}$$

2.12.2 Cables para redes eléctricas residenciales

Mientras que en los *cables abiertos paralelos*, utilizados en los tendidos de las redes eléctricas, se encuentran separados por el aire, en los cables de las redes residenciales están separados por un polímero. En la figura No. 2.36 se indican unas imágenes de algunos de los tipos de cables empleados en las redes eléctricas residenciales.



Fig. No.2.36 Cables para redes eléctricas residenciales.

Fuente: Cables de uso eléctrico, telefónico e informático. (2019).

Disponible: [http:// clasipar.paraguay.com cables de uso el ctrico telef nico e inform tico 298 5685.html](http://clasipar.paraguay.com/cables-de-uso-elctrico-telefonico-e-informatico-2985685.html).

2.13 Dimensionamiento de los conductores

Las dimensiones de los cables eléctricos se especifican en función del diámetro, dado en unidades MILS (milésimas de pulgadas) o su equivalente de milímetros. En el caso americano, para referenciar el calibre de los cables se utiliza el sistema AWG (*American Wire Gauge*), el cual está basado en la proporción matemática que existe entre los pasos sucesivos del proceso de estirado del alambre.⁽¹⁷⁾

El sistema AWG es una referencia de clasificación de los cables eléctricos de acuerdo a sus diámetros, teniendo en cuenta que cuanto más alto es el número del cable, menor es el diámetro del mismo. El cable eléctrico a menor calibre (mayor diámetro) presenta una menor resistencia al flujo de corriente y por lo tanto puede soportar mayores intensidades de la misma. En la tabla No. 2.4, se relaciona algunos de los diferentes calibres de cables de cobre, de acuerdo al sistema AWG, indicando sus dimensiones transversales, su resistencia promedio por kilómetro y la corriente máxima que resiste, en el mejor de los casos.

Número AWG	Diámetro (mm)	Sección (mm) ²	Resistencia (ohm/km)	Corriente máx. (A)
0	8,250	53.50	0.322	150
2	6,544	33.63	0.513	115
4	5,189	21.15	0.815	85
6	4,115	13.30	1,178	65
8	3,264	8.36	2,060	45

10	2,588	5.26	3,276	30
12	2,053	3.31	5,208	20
14	1,628	2.08	8,282	15
16	1,291	1.31	13,172	10
18	1,024	0.82	20,943	6.5
20	0,8118	0.52	33,292	2.5

Tabla No.2.4 Características básicas de cables eléctricos: sistema A G.

Fuente: Características cables eléctricos. (2019).

Disponible: <http://m2010potenciaelectrica.blogspot.com.co/2014/05/calibre-de-un-conductor.html>.

PREGUNTAS y EJERCICIOS

CAPÍTULO 2

Preguntas:

1. ¿Qué se entiende por *líneas de transmisión*? ¿Cuál es la función esencial que desempeñan?
2. En base al concepto de las *líneas de transmisión*, existe una gran variedad de tipos de estos medios. ¿Cuál es la característica que es común en todos los diferentes tipos de *líneas de transmisión* existentes?
3. ¿Cuáles son los principales tipos de *líneas de transmisión* de mayor utilización en las diferentes redes de distribución de señales eléctricas (señales eléctricas que contengan o no información)? Identifique, para cada uno de ellos, su característica estructural fundamental que los diferencia de los demás.
4. En qué tipo de redes se presenta la mayor utilización de las líneas de transmisión denominadas *cables abiertos paralelos*?
5. En qué tipo de redes se presenta la mayor utilización de las líneas de transmisión denominadas *cables paralelos gemelos*?
6. En qué tipo de redes se presenta la mayor utilización de las líneas de transmisión denominadas *cables de par trenado*?
7. En qué tipo de redes se presenta la mayor utilización de las líneas de transmisión denominadas *cables coaxiales*?
8. En qué tipo de redes se presenta la mayor utilización de las líneas de transmisión denominadas *cintas planas conductoras paralelas*?
9. Todo tipo de *línea de transmisión* presentan unas características eléctricas distribuidas. ¿Por qué se le denomina distribuidas? ¿Cómo se calcula el valor total de estas características en cualquier tipo de línea de transmisión?
10. Así como los medios por los cuales se transmiten las ondas electromagnéticas (radio), le presentan a estas unos parámetros de propagación, las *líneas de transmisión* también le presentan esos mismos parámetros a las señales eléctricas que se transfieren por ellas. ¿Cuáles son estos parámetros y cuál es el significado de cada uno de ellos?
11. En las *líneas de transmisión* se pretende reducir al máximo los dos inconvenientes esenciales que estas le producen a las señales eléctricas que por ellas se transfieren. ¿Cuáles son estos dos inconvenientes y cómo se

denominan las líneas que cumplen con la no existencia de cada uno de estos inconvenientes .

12. En las *líneas de transmisión* que solamente transfieren señales eléctricas de energía sin información, uno de los dos esenciales inconvenientes que se presentan en toda tipo de *líneas de transmisión* no es tan problemático. Cuál es este inconveniente y porque no es tan preocupante su presencia .

13. Cómo quedan las expresiones de los parámetros de propagación para el caso de las *líneas de transmisión sin pérdidas* .

14. Cómo quedan las expresiones de los parámetros de propagación para el caso de las *líneas de transmisión sin distorsión* .

15. Cuál es la expresión que se emplea para poder determinar la impedancia de entrada de una *línea de transmisión* .

16. En qué consiste la onda estacionaria . Cuándo se produce este fenómeno qué se debe hacer para lograr eliminar la onda estacionaria

17. Qué representa el coeficiente de reflexión en la conexión entre una *línea de transmisión* y la carga que esta alimentando

18. Cuál es la función esencial de un adaptador de impedancias . Relacione los principales adaptadores de impedancia que son más comunes su aplicación.

19. Qué se entiende por un transformador de cuarto de longitud de onda .
Cómo se puede lograr su construcción

20. Qué se entiende por un acoplador sencillo en paralelo . Cómo se puede lograr su construcción En que tipo de aplicación es más frecuente su implementación

21. Qué se entiende por un balanceo de línea y adaptador de impedancia .
Cómo se puede lograr su construcción . En que tipo de aplicaciones es más frecuente su implementación .

22. Por qué se le denomina a los cables coaxiales líneas desbalanceadas .
Cómo se puede lograr contrarrestar este desbalanceo .

23. En qué consiste el Diagrama de Smith y cuál son sus principales aplicaciones .

24. Cuáles son los principales tipos de líneas de transmisión utilizados en el cableado de las redes eléctricas .

25. Describa las características estructurales y eléctricas de las líneas de transmisión denominados cables abiertos paralelos.

26. Relacione las características estructurales y eléctricas de los cables utilizados para redes eléctricas residenciales.

27. Universalmente en qué unidades se especifican las dimensiones de los cables eléctricos. En el caso americano, para referenciar el calibre de los cables eléctricos, qué sistema se utiliza

Ejercicios:

1. Determinar la inductancia distribuida para una línea de transmisión de cables paralelos abiertos, con una separación entre ellos de d y con un radio a cada uno de ellos, si el dieléctrico que separa los dos cables es aire.

2. Si el equipo transmisor de una estación de radiodifusión sonora, cuya frecuencia de transmisión es de 540 MHz, se interconecta con la antena radiador correspondiente a través de un cable coaxial de radio interno de 0.52 mm y radio externo de 2.68 mm, determinar las siguientes características de este cable, cuyos conductores son de cobre con conductividad 5.8×10^7 (S m):

- Las pérdidas dieléctricas.
- La permitividad relativa del dieléctrico.
- La resistencia distribuida.
- La inductancia distribuida.
- Capacitancia distribuida.

3. Si por una línea de transmisión se propaga una señal eléctrica con frecuencia de 500 MHz, cuyo dieléctrico es de aire, determinar la longitud de onda de la señal.

4. Determinar las características eléctricas distribuidas de una línea de transmisión sin distorsión, si esta línea está funcionando con los siguientes parámetros.

- Constante de atenuación: $\alpha = 32 \text{ mN}_p / \text{m}$
- Velocidad de propagación: $v_p = 0.75 \text{ C m} / \text{s}$
- Impedancia característica: $Z_0 = 50 \Omega$

5. Calcular la impedancia de entrada de una línea de transmisión sin pérdidas, de impedancia característica de $Z_0 = 75 \Omega$ y la cual está alimentando a una carga de $Z_L = (75 - j40) \Omega$, para:

- una longitud eléctrica de 0.4λ

b.) una longitud eléctrica de 0.5λ

6. Una fuente de voltaje de $v_g = 12 \cos(2\pi \times 10^9 t) V$, con impedancia interna de $Z_g = 80 \Omega$, alimenta a una carga de $Z_L = (120 - j120) \Omega$, a través de una línea de transmisión con impedancia característica de $Z_o = 50 \Omega$, sin pérdidas y con dieléctrico de aire. Si la longitud de la línea es de $l = 12 \text{ cm}$, determinar:

a.) La impedancia de la carga observada desde los terminales de entrada de la línea de transmisión.

b.) El voltaje y la corriente en los terminales de entrada de la línea de transmisión.

7. Si a una línea de transmisión sin pérdidas está alimentando una carga $Z_L = 0$, determinar:

a.) La impedancia de entrada y dibujarla.

b.) El coeficiente de reflexión en la carga.

c.) La relación de onda estacionaria.

8. Si a una línea de transmisión sin pérdidas está alimentando una carga $Z_L = \infty$, determinar:

a.) La impedancia de entrada y dibujarla.

b.) El coeficiente de reflexión en la carga.

c.) La relación de onda estacionaria

9. Si a una línea de transmisión sin pérdidas está alimentando una carga $Z_L = R_0$, determinar:

a.) La impedancia de entrada.

b.) El coeficiente de reflexión en la carga.

c.) La relación de onda estacionaria.

10. Un transmisor que opera a una frecuencia de: 150 MHz le entrega a una antena, que tiene una impedancia de: $Z_L = 300 \Omega$, una potencia de: 12 W a través de un cable coaxial $RG - 8A/U$ de longitud: $l = 20 \text{ m}$. Calcular:

a.) El coeficiente de reflexión.

b.) La longitud eléctrica del cable coaxial en longitud de onda (λ).

c.) La relación de onda estacionaria (S).

d.) La cantidad de potencia neta radiada por la antena.

11. Por una *línea de transmisión* se transmite una señal eléctrica, la cual le produce a esta señal una atenuación $\alpha = 5 \text{ (dB/m)}$ y un desfase de $\beta = 0.9 \text{ (rad/m)}$. La línea tiene una longitud de $l = 15 \text{ (m)}$ y una impedancia característica $Z_0 = 100 + j50 \text{ (\Omega)}$. Si a la línea se le conecta una carga de impedancia $Z_L = 50 \text{ (\Omega)}$, determinar:

a.) La impedancia de entrada de la línea.

b.) El coeficiente de reflexión en la carga.

c.) La relación de onda estacionaria.

12. Determinar: el coeficiente de reflexión: Γ y la relación de onda estacionaria, sobre la carga, así como la impedancia de entrada en los terminales de una *línea de transmisión* sin pérdidas, de longitud $l = 65 \text{ m}$, impedancia característica $Z_0 = R_0 = 50 \text{ \Omega}$ y velocidad de propagación de $v_p = 0.7 C$, por la cual se transmite una señal eléctrica con frecuencia $f = 10^9 \text{ Hz}$ y la carga que alimenta es $Z_L = 50 + j50 \text{ \Omega}$, utilizando primero las ecuaciones correspondientes y posteriormente el *diagrama de Smit*.

13. Determinar, a través del *diagrama de Smit*: a.) la relación de onda estacionaria y b.) la impedancia de entrada, para una *línea de transmisión* de longitud 5.0λ , si la impedancia característica de la línea es $Z_0 = 50 \text{ \Omega}$ y tiene una carga cuya impedancia es de: $Z_L = 75 - j75 \text{ \Omega}$.

14. Si a una *línea de transmisión* de impedancia característica de $Z_0 = 50 \text{ \Omega}$, con una carga de impedancia $Z_L = 100 - j100 \text{ \Omega}$, se le inserta un transformador de $\lambda/4$ como adaptador de impedancia. Calcular: a.) la relación de onda estacionaria: S , para la impedancia característica del transformador de $\lambda/4$, b.) la distancia a la cual se debe colocar el transformador de $\lambda/4$ desde la carga y c.) la impedancia resistiva de la línea de $\lambda/4$.

15. Para obtener el acople de impedancias entre la carga de $Z_L = 80 + j80 \text{ \Omega}$ y la *línea de transmisión* con impedancia característica de 50 \Omega , se utiliza un

acoplador sencillo en paralelo cuya impedancia característica también es de 50Ω . Determinar:

a.) Las posibles distancias donde se debe colocar el acoplador (talón) a partir de la carga: d (dentro de la primera media longitud de onda: $\lambda/2$)

b.) La longitud del acoplador (talón): t .

16. Si la impedancia característica de una línea de transmisión de *cables abiertos paralelos* es de 2.000 ohmios y la separación entre ellos sea de 85 centímetros, determinar el diámetro que deben tener los cables.

17. En el *diagrama de Smit* de la figura 2.37 se indica el proceso para determinar a qué distancia de la carga, qué tipo de elemento y de qué valor hay que intercalar entre la carga y la línea de transmisión para que a partir de ese punto la línea quede adaptada a la carga. La carga tiene una impedancia de $Z_L = 20 - j10 \Omega$ y la impedancia característica de *línea de transmisión* es de $Z_0 = 50 \Omega$. Determinar los resultados de los parámetros que el proceso logro obtener mediante la utilización del mencionado diagrama. ⁽¹⁸⁾

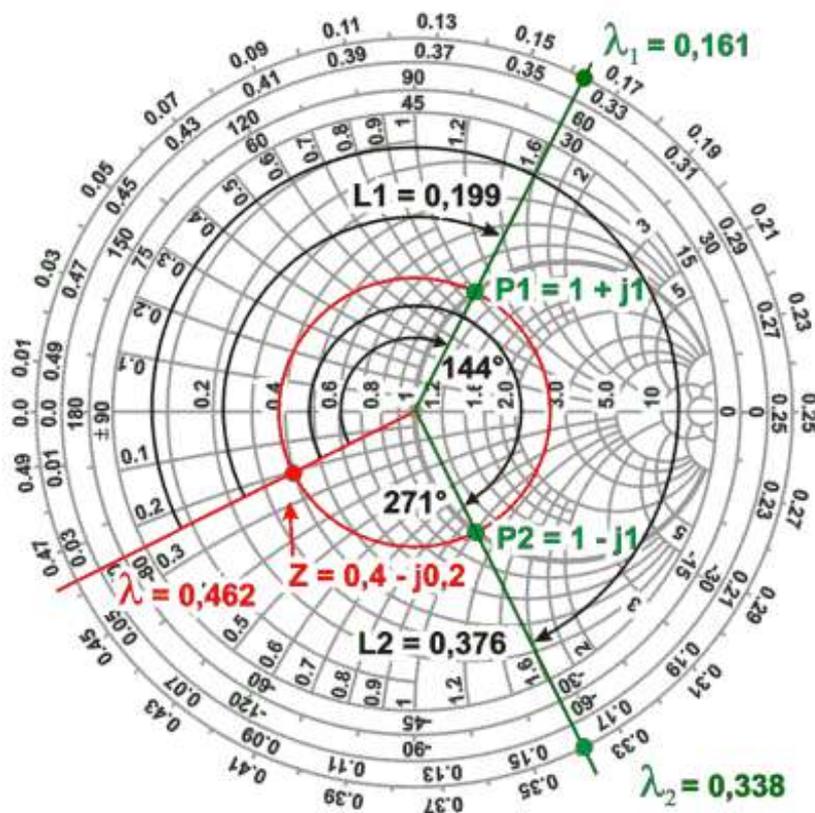


Figura 2,37 Diagrama de Smith con un proceso desarrollado

Fuente: Ghezzi, M. R., *Smit s abacus applications*". (2019). Disponible:

http://lu6etj.host-argentina.com.ar/lu6etj_tecnicos_smith_abaco_smith.htm

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 2

- (1) Neri, R. *Lines of transmission*. Pearson Educación. Primera edición, 2014, pp. 20-21.
- (2) Tanenbaum, A. *Computer networking*. Pearson Prentice Hall. México: 2017. pp. 90-91.
- (3) Grainger, J. Stevenson, D., *Power System Analysis*. McGraw Hill, 2016, pp. 45-46.
- (4) Ramírez, J., *Campos electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*. USB. 2014. pp. 454-455.
- (5) Ramírez, J. *Campos electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*. USB. 2016. pp. 456-457.
- (6) Savier, J. A. *Lines of transmission*. Universitat Oberta de Catalunya. 2016, pp. 84-85.
- (7) Broxonll, J.H Linhart, D. *Distorted-Mode Transmission Lines*. RF Design, 2017, pp. 73-75.
- (8) Sadiku, M. *Elementos de electromagnetismo*, México D.F. CECOSA, tercera edición, pp. 526-527.
- (9) Fernández, J. C., *líneas de transmisión*, Departamento de Física Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires www.fi.uba.ar, 2016, 234-235.
- (10) Wheeler, H. A. *Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-3, No.3. marzo 2012, pp. 172-173.
- (11) Bahl, I. J. Trivedi, D. *A Designer's Guide to Microstrip Lines*, Microwave. (2018). Disponible: <http://www.rogers-corp.com/multimedia/litintbl.htm>. pp. 174-176.
- (12) Ramírez, J. *Campos electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*. USB, 2014. pp. 460-462.
- (13) Ramírez, J. *Campos electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*. USB. 2014. pp. 488-495.
- (14) Muller, Andrei, A. Moldoveanu, Alin. Asavel, Victor. Dascalu, Dan. IEEE Microwave journal article *A Schematic based on the Riemann sphere for active and passive microwave circuits* June 2016
- (15) Ramírez, J., *Campos electromagnéticos: conceptos básicos y ejercicios resueltos*, USB, 2014, pp. 307-308.

(16) Folch, R. Palau Garrabou, J. M. Moreso Ventura, A., *Electrical Transport and its environmental impact*, ERF Estudi Ramon Folch Associats, S.L. 2017. pp.64-65

(17) Farina, A. L. *Electric cables and conductors*, Alsina. 2018, pp. 38-39.

(18) Ghezzi, M. R., *Smith's abacus applications*. (2019). Disponible: <http://lu6etj.host-argentina.com.ar/lu6etj/tecnicos/smith/abaco/smith.htm>

CAPÍTULO 3

CABLES ABIERTOS PARALELOS

3.1 Introducción

En capítulos anteriores se han relacionado las principales características estructurales y funcionales de las líneas de transmisión, que con mayor presencia se utilizan, especialmente en los tendidos de las redes de transmisión de datos. En este capítulo se describen los aspectos fundamentales de conformación, tipos, características eléctricas, utilización y tendido, de otro de los tipos de líneas de transmisión que son muy referenciados, los cuales se conocen como *cables abiertos paralelos*, así como de aquellas líneas de transmisión denominados *cables gemelos*.

También se hace referencia, en forma muy global, a los aspectos de montaje y de distribución de las diferentes redes eléctricas donde, por lo general, se emplean estos tipos de cables. Como es el caso de las redes de energía de alta potencia, las de los edificios y las residenciales. También se hace mención de las recomendaciones principales a tener en cuenta, para el eficiente y seguro uso y aprovechamiento de dichas redes.

3.2 Conformación de los cables abiertos paralelos

Tal como se mencionó en el numeral 2.2.1 de este libro, los cables abiertos paralelos están conformados: *por dos cables conductores lineales abiertos paralelos desnudos o encaucados, espaciados relativamente muy cerca, con dieléctrico de aire y cuentan con espaciadores no conductivos, los cuales se poseionan a intervalos establecidos, para mantener el distanciamiento entre los cables en forma uniforme en todo su tendido. Para el caso de las redes eléctricas, el tendido de estos cables se hace sobre torres o mástiles, de conformidad con la tensión que soportan.*

La separación entre los dos cables conductores depende de la intensidad de corriente que por ellos circulan, especialmente para el caso de que sean utilizados para los tendidos de las redes eléctricas, para reducir los efectos de inducción magnética entre ellos, especialmente si las intensidades de las corrientes son elevadas. El rango de esta separación está entre los 30 cm y los 100 cm. Así mismo el calibre de los cables conductores depende de la intensidad de la corriente que vayan a transportar. En la tabla 3.1 se indican los valores máximos típicos que

pueden soportar los cables conductores de acuerdo a su calibre. En la figura No. 2.1 se muestra la imagen de uno de los diferentes típicos *cables abiertos paralelos*, con espaciadores.

3.3 Tipos de cables abiertos paralelos

En concordancia con lo descrito en el numeral 2.12.1 de este libro, el criterio más utilizado para tipificar los *cables abiertos paralelos* corresponde a la cantidad de tensión que soportan o manejan estos cables, en las redes de distribución de energía eléctrica. Los valores de estas cantidades de tensión varían según la reglamentación que exista en cada una de las regiones donde se encuentren estas redes. A continuación, y a manera de referencia, se indican unos rangos promediados de los valores de estas tensiones. ⁽¹⁾

En la figura No. 3.1 se ilustra nuevamente la estructura global de una red de distribución de energía eléctrica.

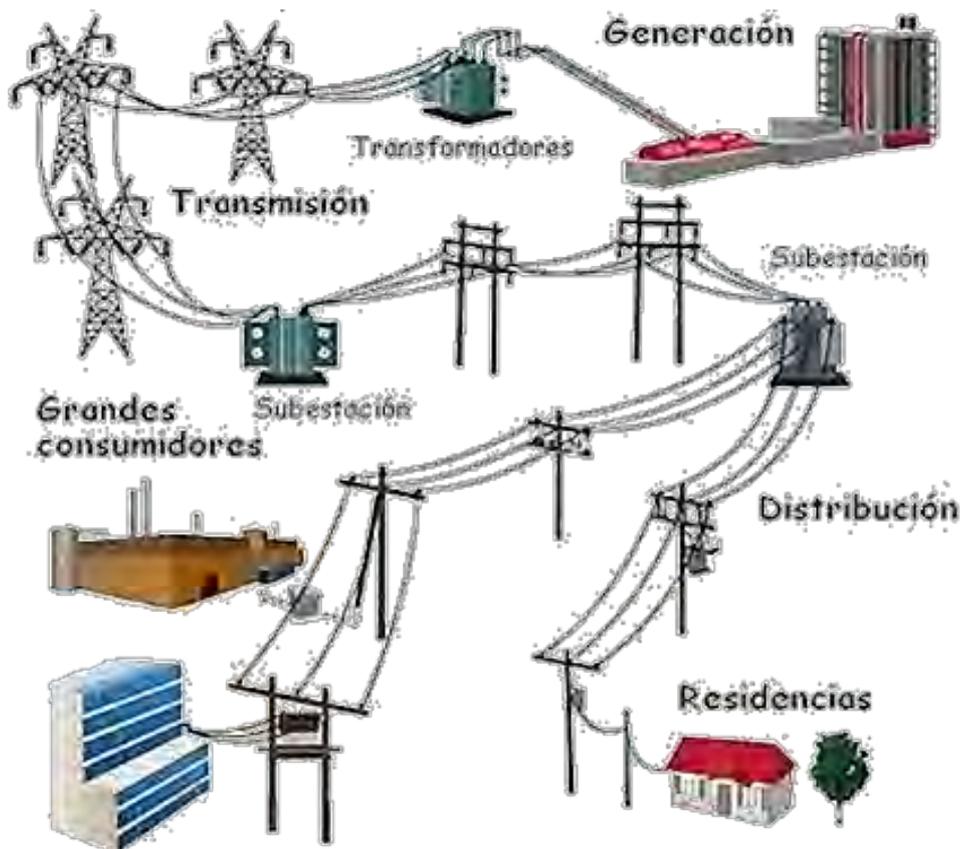


Figura. No. 3.1 Estructura básica de una red de distribución de energía eléctrica.

Fuente: Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión. (2019). Disponible:

<http://energiza.org/noticias-renovetec/122-especial-alta-tensi-C3-B3n-en-instalaciones-industriales-679-instalaciones-electricas-de-alta-tension..>

- *líneas de alta tensión*: corresponde a aquellas que manejan las mayores tensiones de las redes eléctricas, cuyo valor referencial puede ser superior a los 100 kV. Según como se mencionó anteriormente estas líneas conforman la *red de transporte*, la cual parte del respectivo generador de energía eléctrica hasta llegar a las estaciones de reparto.

Generalmente el tendido de estas líneas es de largas distancias, requiriéndose por lo tanto la elevación de la tensión a altos valores para lograr la disminución de las corrientes eléctricas, a ser transferidas por dichas líneas, y de esta forma minimizar las pérdidas por disipación, lográndose de esta manera optimizar la potencia transportada por las mismas.

Además, como se ha venido indicando anteriormente, al disminuir el valor de las corrientes eléctricas también se reduce los requerimientos del grosor (diámetro) de las líneas, lo que implica disminución en los costos y peso de dichas líneas. La reducción en los pesos de las líneas conlleva también a la disminución de los requerimientos estructurales y o de distanciamiento de las torres que las soportan.

En la figura No. 3.2 se muestra unas imágenes de algunos de los diferentes tipos de torres que se utilizan en los tendidos de las redes eléctricas para el caso de líneas de alta tensión.



Figura. No. 3.2 Tipos de torres para el tendido de líneas de alta tensión

Fuente: Transformadores de corriente Transporte de Energía. (2019). Disponible:
<http://www.fisica.hiru.eus/transformadores-de-corriente-transporte-de-energia>.

- *líneas de media-alta tensión*: corresponden a aquellas que soportan tensiones de menor intensidad que las líneas de alta tensión. Los valores de estas tensiones pueden estar entre los 30 kV y 100 kV. Estas líneas conforman la denominada *red de reparto* y se encargan de repartir la energía eléctrica, que le llegan de la respectiva *red de transporte*, a las *subestaciones de distribución* que

servirán a centros de grandes consumo, después de haber sufrido la respectiva reducción de tensión.

En la figura No. 3.3 se ilustra unas imágenes de algunos de los diferentes tipos de torres que se utilizan en los tendidos de las redes eléctricas para el caso de *líneas media-alta tensión*.

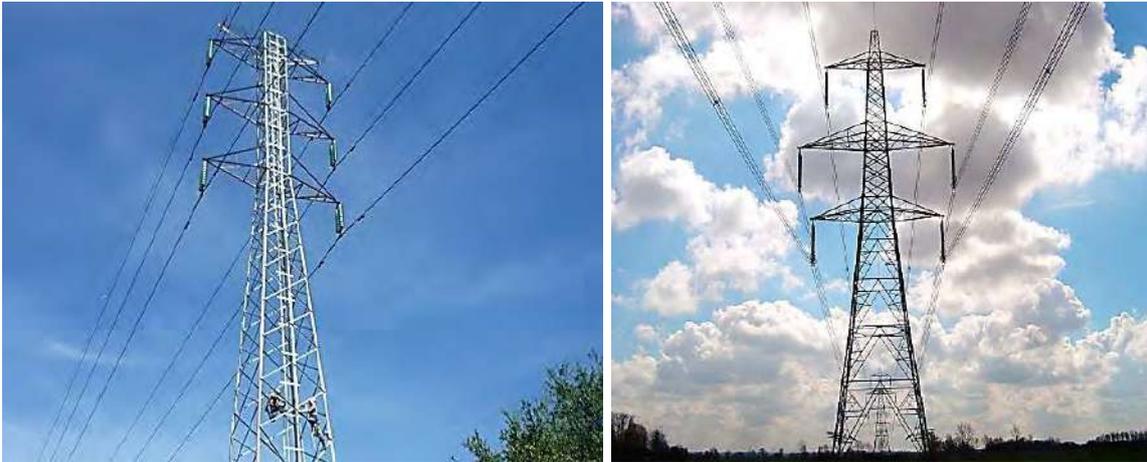


Figura. No. 3.3 Tipos de torres para el tendido de líneas de media-alta tensión

Fuente: Torres de energía en departamento de Antioquia. (2019). Disponible: <http://www.areacucuta.com/tropas-de-la-brigada-movil-25-evitaron-accion-terrorista-en-contra-de-las-torres-de-energia-en-el-departamento-de-antioquia/>. .

- *líneas de media tensión*: corresponden a aquellas que soportan tensiones que pueden estar entre los 1 y 30 . Estas líneas conforman las denominadas *redes de distribución* y se encargan de distribuir la energía eléctrica a los *centros de transformación*, que cubren áreas específicas de consumo.

En la figura No. 3.4 se ilustra unas imágenes de algunos de los diferentes tipos de torres que se utilizan en los tendidos de las redes eléctricas para el caso de *líneas de media tensión*.



Figura No. 3.4 Tipos de torres para el tendido de líneas de media tensión

Fuente: Proyectos eléctricos de alta tensión. (2019). Disponible:

<http://www.ingenieriazaragoza.es/ingenieria-industrial/proyectos-electricos-de-alta-tension/>.

Consultado en diciembre 2016.

- *líneas de baja tensión*: corresponden a aquellas que soportan tensiones por debajo de 1 kV. Las redes a los centros o zonas de consumo generalmente pueden estar entre los 115/220 V (monofásica) y 0/220/380 V (trifásica) y se encargan de entregar el suministro de energía a los usuarios finales

En la figura No. 3.5 se ilustra unas imágenes de algunos de los diferentes tipos de postes o mástiles que se utilizan en los tendidos de las redes eléctricas para el caso de *líneas de baja tensión*.





Figura. No. 3.5 Tipos de postes para el tendido de líneas de baja tensión

Fuente: Redes Eléctricas en Zonas Cafeteras de la Provincia. (2019). Disponible:
<http://sotop.tabasco.gob.mx/content/ampliacion-de-la-red-de-distribucion-en-el-sector-agricola-en-media-y-baja-tension-en-el-fraccionamiento-ixtacomitlan-de-santander-comunera>
<http://www.vanguardia.com/santander/comunera/302338-mejoran-las-redes-electricas-en-zonas-cafeteras-de-la-provincia>.

3.4 Estaciones y tendido de las redes eléctricas

Las características estructurales y los requerimientos de instalación y funcionamiento de las estaciones y tendidos de las redes eléctricas, dependen fundamentalmente de la magnitud de tensión de voltaje que manejen y o transporten. A continuación, se enuncian algunos de los principales aspectos que estas estaciones y tendidos presentan en su conformación y operación. ⁽²⁾

3.4.1 Estación y red de transmisión

Corresponden a aquellas que se encargan de recibir las señales de corriente entregadas por las estaciones generadoras de energía eléctrica (hidroeléctricas, termoeléctricas, plantas nucleares, entre otras) y transferirlas a las redes de distribución correspondientes.

Generalmente las tensiones de las señales que entregan las estaciones generadoras de energía eléctrica están por debajo de los 40 kV, lo que permite que los aislamientos que se utilizan en estos generadores, por tener partes móviles, no presenten mayor dificultad en su desempeño. La frecuencia de estas señales es de 60 Hz para el caso americano y de 50 Hz para el caso europeo.

Sin embargo, por las razones que se han mencionado anteriormente, para ser más eficiente la transmisión de las señales eléctricas, la tensión que salen de los

generadores se elevan por encima de los 100 , tensiones que tienen que manejar las estaciones y redes de transmisión (transporte).

3.4.1.1 Conformación básica

Estas estaciones de transmisión de la energía eléctrica están conformadas básicamente por los siguientes componentes esenciales:

1. Centro de control, comandos y protección.

Toda central generadora de energía eléctrica sea cual sea su tecnología, dispone de un *centro de control, comandos y protección*, encargado de monitorear el estado y funcionamiento de la red en general y realizar, en tiempo real, las acciones pertinentes para asegurar un comportamiento eficiente y seguro de la misma.

Estos centros son más amplios y complejos dependiendo del tipo de central a controlar y de la cobertura de la red. Para el caso de las redes eléctricas denominadas inteligentes, los centros de control poseen características especiales y de alta tecnología. En el numeral 5.10 se hará referencia a este tipo de centros.

La composición básica de los centros de control de toda red eléctrica, la conforman esencialmente dos grandes unidades: los circuitos de monitoreo y control, y la central de visualización y comandos.

El componente correspondiente a los circuitos de monitoreo y control, se encuentran incorporados en gabinetes (o tableros en algunos casos) concebidos para tal fin. Estos circuitos realizan, por separado, funciones específicas, tales como: de medición de corrientes, voltajes y frecuencia de la señal; de comandos; de protección de sobre cargas; de alarmas y señalización; de iluminación; de refrigeración; entre otros. Se recomienda utilizar cables de colores para facilitar la diferenciación de la función que cumplen. Así mismo todas las partes metálicas, de los gabinetes, se deben encontrar perfectamente aterrizadas.

Por lo general la estructura de estos gabinetes o tableros es de tipo modular, con el propósito de ofrecer la posibilidad de adicionar nuevos circuitos y dispositivos que se requieran. En la figura No. 3.6 se muestran unas imágenes de unos de los diferentes tipos de estos gabinetes que se encuentran en las estaciones de transmisión de energía eléctrica. Las características de fabricación, montaje y funcionamiento, de los circuitos de monitoreo y control, para las estaciones y subestaciones eléctricas se encuentran estipuladas en las normas: IEC 62271-200 NENA ANSI.



Figura No. 3.6 Imágenes de diferentes tipos gabinetes de monitoreo y control en una estaciones de transmisión de energía eléctrica.

Fuente: Catálogo "Tableros eléctricos", Disproser, 2018 Transporte y Distribución de Electricidad. (2019). Disponible: <https://www.smartgridsinfo.es/transporte-distribucion-electricidad..>

La central de visualización y control corresponde a aquella donde se puede observar el estado de funcionamiento general y o segmentado de la red, a través de mapas o diagramas e iconos simbólicos, sobre pantallas individuales (PC s) y o pantallas panorámicas gigantes. Así mismo estas centrales disponen de equipos (PC s), de donde el personal técnico de monitoreo y control pueden realizar las acciones de comandos y o de protección que se requieran en la red. En la figura No. 3.7 se ilustra una imagen donde se reproduce la central de visualización y control de una estación de transmisión de energía eléctrica.



Figura No. 3.7 Central de visualización y control de una estación de transmisión de energía eléctrica.

Fuente: Intelligent Net or ing Farms. (2019). Disponible: <https://phys.org/news/2015-04-intelligent-net-or-ing-farms.html>.

2. *Sistemas de transformadores (elevadores de voltaje).*

Como se ha reiterado, los niveles de voltaje con que sale las señales eléctricas de las respectivas estaciones generadoras se deben elevar a niveles de alta tensión, para que puedan acceder a las redes de transmisión, de tal manera que cada máquina generadora debe contar con un transformador que realice esta función. Cuando existen varios transformadores juntos, se recomienda disponer de un sistema de aislamiento entre ellos denominado GIS (*Gas Insulated Switchgear*), evitando la presencia de influencias mutuas entre ellos. ⁽³⁾

En la figura No. 3.8 se exponen unas imágenes donde se muestran algunos de los diferentes tipos de transformadores de alta tensión empleados en las estaciones y redes de transmisión.



Figura No. 3.8 Imágenes de transformadores de alta tensión empleados en las estaciones y redes de transmisión.

Fuente: Equipamientos Eléctricos de Extra Alta Tensión. (2019). Disponible: <http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com.co> 2018 08 espana-el-gobierno-de-aragon-firma-el.html. <https://www.taringa.net/post/imagenes/17325014/Equipamientos-electricos-de-extra-alta-tension.html>.

. Sistema puesta a tierra

Los sistemas de puesta a tierra minimizan el gradiente (incremento) de potencial en el acceso a las estaciones y subestaciones eléctricas, buscando asegurar un control adecuado a la presencia de estos gradientes generados por la presencia de una falla a tierra.

En las estaciones de transmisión, así como en las subestaciones de distribución eléctrica de alto potencial, se recomienda lograr una resistencia de tierra no mayor

a 1 ohmio. Para el caso de las subestaciones de distribución de mediano potencial eléctrico, el rango generalmente aceptable es de 1 a 5 ohmios. ⁽⁴⁾

Además de asegurar un gradiente mínimo de potencial eléctrico, los sistemas de puesta a tierra ofrecen las siguientes garantías, para lo cual deben disponer de una resistencia muy baja y contar con una gran capacidad de conducción de corriente eléctrica: ⁽⁵⁾

- Protección de cargas estáticas o de descargas eléctricas generadas por fenómenos o situaciones atmosféricas.
- Mantiene unos niveles de tensión a tierra muy seguros, dentro de los niveles de aislamiento requeridos, asegurando el mantenimiento de valores determinados de tensión fase-tierra de los sistemas eléctricos.
- Restringe las tensiones eléctricas producidas por maniobras y operaciones en los equipos.
- Confina las tensiones eléctricas generadas a contactos no intencionales con sistemas de mayor tensión.
- Ofrece a los equipos o sistemas de protección existentes en su entorno el aislamiento rápido de las fallas.

En términos generales los sistemas puesta a tierra deben asegurar una suficiente capacidad de dispersión de corriente eléctrica en el suelo, así como un control eficiente de gradiente de potencial, de tal forma de mantener una confiable y efectiva seguridad de las personas debido a una falla a tierra.

Uno de los sistemas puesta a tierra de mayor utilización para las estaciones de transmisión y subestaciones de distribución eléctrica, es el recomendado por el estándar IEEE 80-2000, el cual consiste básicamente en una malla de tierra, cuyas características estructurales y de instalación son las siguientes: ⁽⁶⁾

- La malla la conforma un determinado número de cables conductores entre cruzados, en forma de grilla, con separación entre los cables de 3 a 7 metros, dependiendo del área a cubrir la malla. La malla debe rodear, por lo menos, toda el área de la subestación, de tal forma que se logre obtener la resistencia de tierra adecuada.
- Los cables conductores deben ser de cobre electrolítico desnudo de unos 50 mm², de área transversal, enterrados a una profundidad entre 0.5 a 1.5 metros.

- Los cruces entre los cables conductores deben tener una sujeción eficiente, recomendándose realizarse mediante soldadura exotérmica. De la misma manera las uniones entre los conductores y jabalinas que se utilicen.
- Para el caso de que una subestación exterior, la malla se cubre con piedra fraccionada en trozos de unos 15 cm de espesor o eventualmente de hormigón. Para el caso de subestaciones interiores, comúnmente, se utiliza una loza de hormigón, de un espesor entre los 10 a 15 centímetros. Tanto las piedras como el hormigón deberán tener una resistividad no mayor de los 2.500 ohmios-metro.

En la figura No. 3.9 se muestran unas representaciones, tanto del cubrimiento de la malla como de su configuración y de su implementación, en una subestación exterior.



a.) Cubrimiento de la malla

b.) Configuración de la malla



c.) Malla instalada

Figura No. 3.9 Imágenes de un sistema puesta a tierra en las subestaciones eléctricas

Fuente: Productos HTML. (2019). Disponible: <http://.gaesti.com.mx> e [pages productos.HTML](http://pages.productos.HTML)

4. *Redes de transmisión transporte de energía de alta tensión.*

Una vez que el transformador correspondiente a cada máquina generadora de energía eléctrica ha elevado la tensión de la señal eléctrica al nivel correspondiente, es entregada al nodo o cabecera de la red de transmisión y de ahí se transporta por cada una de las respectivas líneas de transmisión. En la figura No. 3.10 se muestran unas imágenes de una cabecera y de una línea eléctrica, para el caso de una estación y red de transmisión.



a.) Cabecera de la red de transmisión



b.) Una línea de la red de transmisión.

Figura No. 3.10 Cabecera y una línea de una red de transmisión de energía de alta tensión.

Fuente: Generación de la Energía Eléctrica. (2019). Disponible:

<http://electrosandaniel.blogspot.com.co/2018/05/generacion-de-la-energia-electrica.html>

[http://.lasandino.com.ni/articulos/ver/titulo:6952-asamblea-nacional-aprueba-prestamo-para-ampliar-lineas-de-transmision-electrica.](http://.lasandino.com.ni/articulos/ver/titulo:6952-asamblea-nacional-aprueba-prestamo-para-ampliar-lineas-de-transmision-electrica)

En la figura No. 3.11 se expone una imagen donde se muestra la panorámica de una estación de transmisión de energía eléctrica.



Figura No. 3.11 Imagen de la panorámica de una estación de transmisión de energía eléctrica.

Fuente: Estación Transformadora. (2019). Disponible:

<http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com.co/2018/09/estacion-transformadora-vista-desde-las.html>.

3.4.1.2 Tipo de cableado

En el capítulo 9 se hace una referencia de algunos de los aspectos estructurales del cableado para las líneas de las redes eléctricas, incluyendo los de las redes de alta tensión. Por lo general la estructura de estos cables es de alambres gruesos en forma trenzada, con enrollamiento en sentido opuesto, proporcionando de esta manera mayor superficie para el flujo de la corriente y además flexibilidad en su manejo. Estos cables en su gran mayoría son de cobre, aluminio o acero. En algunos casos se encuentran descubiertos y en otros casos cuentan con capas protectoras de la intemperie (ver figura No. 3.12).

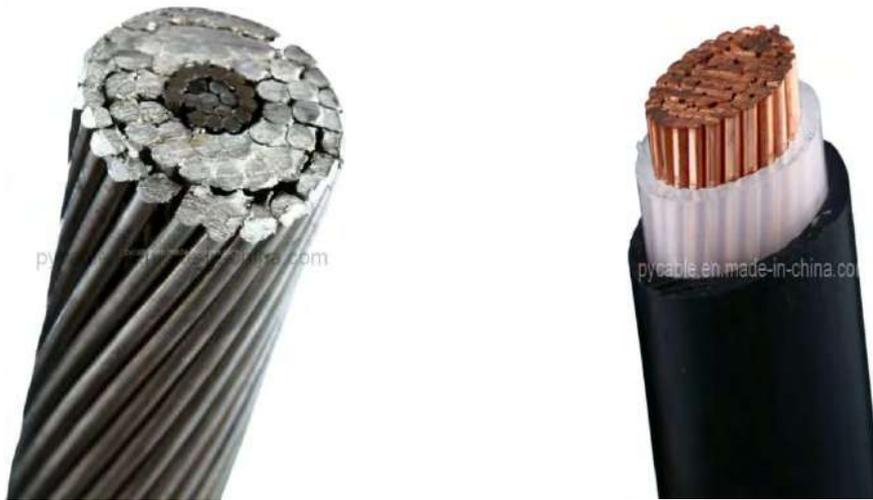


Figura No. 3.12 Cables eléctricos para altas tensiones

Fuente: Catálogo “ACSR Cable de alta tensión”, Henan Leshan Cable Co. Ltd. 2018.

Las líneas eléctricas de transmisión constan de dos de estos cables conductores, de secciones relativamente grandes y de la existencia de un tercer cable más delgado, ubicado en la parte central de estos dos cables de conducción (parte central de la torre de soporte), el cual corresponde a la línea de tierra.

Unos de los cables muy utilizados en los tendidos de las redes eléctricas son los denominados: cables de aluminio con alma de acero ACSR (*Aluminum Conductors Steel Reinforced*). Estos cables están conformados con alambres de aluminio, extraduro, sobre un núcleo de acero. En la tabla No. 3.1 se relacionan las principales características estructurales y eléctricas de los cables ACSR.

Sección nominal	Formación Aluminio	Formación Acero	Díametro aprox.	Masa aprox.	Largo de expedición	Carga de rotura calculada	Resist. en c. c. y 20°C	Corriente admisible (1)
mm ²	Nº x mm	mm	mm	Kg/km	m.	kg	ohm/km	A
16/2,5	6 x 1,8	1 x 1,8	5,4	60	5000	591	1,88	100
25/4	6 x 2,25	1 x 2,5	6,8	100	3500	917	1,20	130
35/6	6 x 2,7	1 x 2,7	8,1	140	2500	1254	0,835	160
50/8	6 x 3,2	1 x 3,2	9,6	195	2000	1713	0,595	195
70/12	26 x 1,85	7 x 1,44	11,7	280	5000	2681	0,413	255
95/15	26 x 2,15	7 x 1,67	13,6	380	4000	3558	0,306	305
120/20	26 x 2,44	7 x 1,9	15,5	490	3000	4526	0,237	365
150/25	26 x 2,7	7 x 2,1	17,1	600	2500	5464	0,194	415
185/30	26 x 3,0	7 x 2,33	19,0	740	2000	6646	0,157	475
210/35	26 x 3,2	7 x 2,49	20,3	845	2000	7482	0,138	505
240/40	26 x 3,45	7 x 2,68	21,9	980	2500	8675	0,119	565
300/50	26 x 3,86	7 x 3,0	24,5	1230	2500	10700	0,0949	650
340/30	48 x 3,0	7 x 2,33	25,0	1170	2000	9310	0,0851	670
380/50	54 x 3,0	7 x 3,0	27,0	1440	2000	12322	0,0767	715
435/55	54 x 3,2	7 x 3,2	28,8	1640	2000	13688	0,0666	765
550/70	54 x 3,6	7 x 3,6	32,4	2080	1500	17095	0,0526	865
680/85	54 x 4,0	19 x 2,4	36,0	2550	1000	21043	0,0426	1000

Tabla No. 3.1 Características básicas de los cables tipo ACSR , para temperatura ambiente de 40⁰ C, expuesto al sol, al nivel del mar, con viento de 0.6 m seg.

Fuente: Características de los conductores. (2019). Disponible:

<http://ingenieriaelectricaexplicada.blogspot.com.co/2018/06/caracteristicas-de-los-conductores-de.html>.

3.4.1.3 Aislamiento

Otro de los diversos elementos esenciales que se requieren en las instalaciones de las redes eléctricas son los aisladores, de los cuales se hizo referencia en el capítulo 4, en cuanto a los diferentes tipos y utilización de estos. En la figura No. 3.13 se muestran algunos de los tipos de aisladores utilizados en las estaciones y redes de transmisión de energía eléctrica.

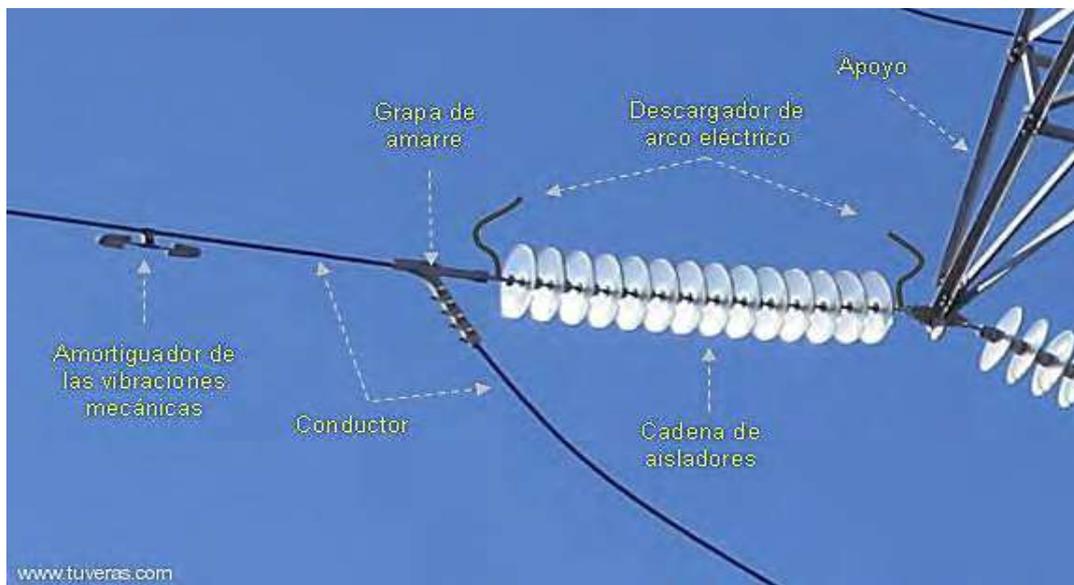


Figura No. 3.13 Aisladores utilizados en la redes eléctricas de alta tensión.

Fuente: Instalaciones eléctricas de alta tensión. (2019). Disponible: <https://www.tuv-nord.com/es/instalaciones-electricas/instalaciones-electricas-de-alta-tension-476.htm>.

<http://www.ing.uc.edu.ve/~vipер/LINEAS.html>.

Generalmente las líneas de transmisión aéreas de alta tensión utilizan como elemento aislador el de tipo de suspensión, donde el cable conductor se suspende por debajo de dicho aislador. En la figura No. 3.14 se ilustra un aislador de suspensión y algunos conjuntos (cadenas) de este tipo de aislador.



Fig. No. 3.14 Aislador de suspensión y conjunto de los mismos.

Fuente: Redes Eléctricas. (2019). Disponible:

<http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/gispud/redeselectricas/site/cap3/Images3/aisla1.jpg>
pg.

El número de unidades que conforman el conjunto de un aislador de suspensión es proporcional a la tensión que soportan los cables conductores correspondientes. En la tabla No. 3.2 se relacionan el rango del número de aisladores de tipo suspensión estándar (254 – 146 mm) para diferentes tensiones de transmisión, así mismo la resistencia de aislamiento (NBI al impulso). ⁽⁷⁾

Tensión nominal (KV)	NBI al impulso (KV)	Número de aisladores de suspensión
69	350	4 – 6
115	500	7 – 9
138	650	10 – 12
161	750	12 – 14
230	900	14 – 20
400	1250	20 – 24

Tabla No. 3.2 Número de aisladores de tipo suspensión estándar (254 – 146 mm) para diferentes tensiones de transmisión, así mismo la resistencia de aislamiento (NBI al impulso).

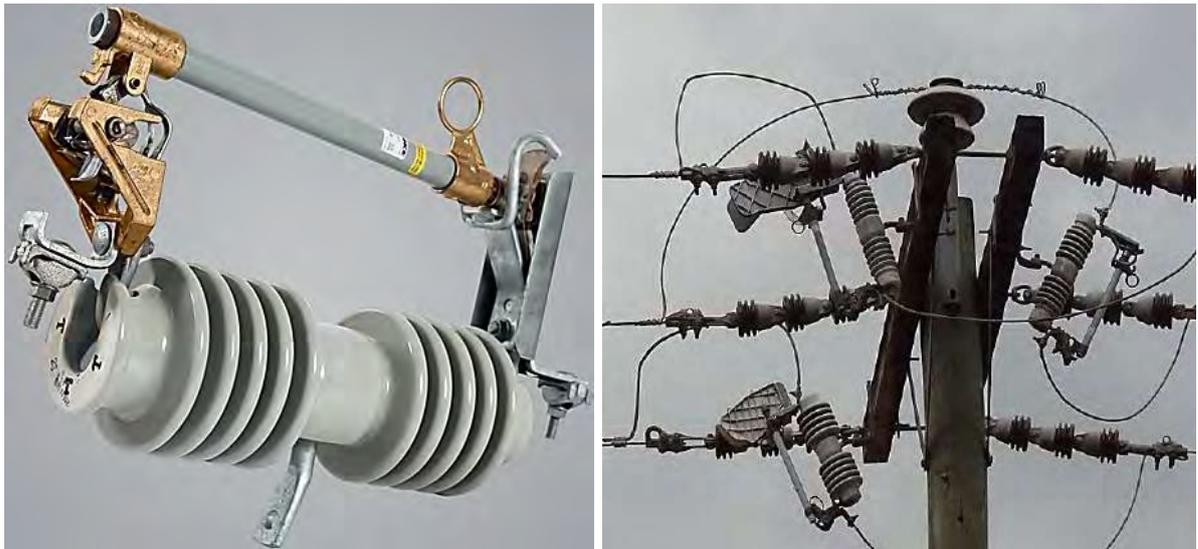
Fuente: Calles, F. I. Chazaro, R., *Diseño de aislamiento de líneas de transmisión*, Universidad eracruzana, 2017, p. 42.

3.4.1.4 Cortacircuitos de potencia

Corresponde a aquellos dispositivos que se utilizan en las redes eléctricas, para protegerse de la presencia de niveles de corriente de corto circuito de valores muy altos. Se le conocen como fusibles y cuchillas de alta potencia. Estos dispositivos

se abren a determinados valores de corriente, interrumpiendo el paso de la misma, para estos niveles de corriente o superiores.

Además del mismo tendido de la red eléctrica, estos dispositivos se emplean para proteger de presencia de sobrecargas que se puedan presentar en los transformadores, en los bancos de capacitores y en general en las subestaciones de transmisión y o distribución de energía eléctrica. En la figura No. 3.15 se ilustra algunos de estos tipos de protectores.



a.) Fusibles de potencia



b.) Cuchillas giratorias

Figura No. 3.15 Cortacircuitos de potencia.

Fuente: Dropout fuse outout for distribution overhead power lines. (2019). Disponible:
<http://spanish.polymericinsulators.com/sale-8085708-grey-36-v-drop-out-fuse-cutout-for-distribution-overhead-power-lines.html> <http://carrrcttecnicasdecdec.blogspot.com.co/2018/09/01/archive.html>
<http://grupoteimexico.com.mx/cortacircuitos-de-potencia.php>

3.4.1.5 Catenaria y flecha

La *catenaria* se le denomina a la curva que se presenta en el tendido de un cable conductor de peso uniforme apoyado entre dos torres sucesivas de la misma altura. A la distancia entre el punto más bajo de la *catenaria* y la recta entre los dos puntos de apoyo del cable, se le conoce como *flecha* a (f) (ver figura No.3.16).⁽⁸⁾

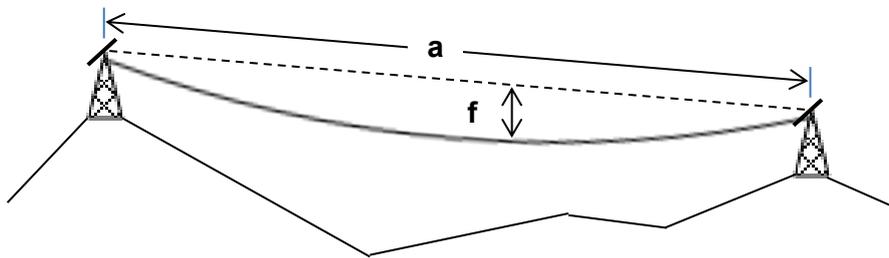


Figura No. 3.16 La Catenaria y la flecha de un cable eléctrico.

En la ecuación 3.1 se indica la forma de calcular la longitud de la flecha que se presenta en el tendido de un cable entre dos torres de igual altura.

$$(3.1) f = \frac{T_0}{P} \left[\cosh \frac{aP}{2T_0} - 1 \right]$$

f : flecha (m)

T_0 : Tensión física en el punto de flecha del cable (Kg)

P : Peso del cable por unidad de longitud (Kg/m)

a : vano (dist \leftrightarrow ancia recta entre las dos torres (m))

En la tabla No. 3.3 se relacionan los valores de las longitudes de flechas, para diferentes valores de vano, tensiones y temperatura ambiente, en el caso de un cable ACSR 556.500 MCM EAGLE.

°C	Kg	FLECHAS EN METROS							
		LONGITUDES DE VANO EN METROS							
		220	240	260	280	300	320	340	360
- 5	1996	3,77	4,48	5,26	6,10	7,00	7,97	8,99	10,08
0	1944	3,86	4,60	5,40	6,26	7,19	8,18	9,23	10,35
5	1892	3,98	4,73	5,55	6,44	7,39	8,41	9,49	10,64
10	1847	4,07	4,85	5,69	6,60	7,58	8,62	9,73	10,91
15	1802	4,17	4,97	5,83	6,76	7,76	8,83	9,97	11,17
20	1760	4,27	5,08	5,97	6,92	7,94	9,04	10,20	11,44
25	1722	4,36	5,19	6,09	7,07	8,12	9,23	10,42	11,69
30	1683	4,47	5,32	6,24	7,24	8,31	9,46	10,67	11,97
35	1649	4,56	5,43	6,37	7,39	8,48	9,65	10,90	12,22

Tabla No. 3.3 Longitudes de flechas, para diferentes valores de vano, tensiones y temperatura ambiente, en el caso de un cable ACSR 556.500 MCM EAGLE.

Fuente: Nava Bustillo, G. A., *Electric Power Transmission Lines*, U.T.O F. N. I. 2016, p. 153.

En la figura No. 3.17 se muestra la panorámica de la iniciación de una red de una estación de transmisión de energía eléctrica.



Figura. No. 3.17 Panorámica de la iniciación de una red de una estación de transmisión de energía eléctrica.

Fuente: Portafolio de servicio: *Sistemas y Redes Eléctricas*, ESIN, Cosultoria S.A. 2017.

3.4.2 Subestación y red de reparto

Corresponden a aquellas que se encargan de recibir las señales eléctricas transferidas por las redes de transmisión, reducirles sus niveles de tensión y repartirlas a las diferentes subestaciones de distribución de energía. Estas subestaciones reciben la energía de una o varias líneas de la red total de transmisión. La conformación y los aspectos estructurales de estas subestaciones son muy similares a las de las estaciones de transmisión de energía, referidas

anteriormente, pero con características dimensionales menos robustas, debido a que, en su gran mayoría, manejan menor cantidad de energía eléctrica.

Estas subestaciones atienden la necesidad de que las redes eléctricas dispongan de infraestructuras eléctricas, que permitan adecuar las altas tensiones, que transportan las líneas provenientes de las estaciones generadoras de energía, para lograr niveles inferiores (menor de los 100 kV). Es por esta razón que a estas subestaciones se le conocen también como de transformación. En la figura No. 3.18 se aprecia la panorámica de una sub-estación de reparto o de transformación.



Figura No. 3.18 Vista panorámica de una subestación de reparto o de transformación.

Fuente: Subestaciones Eléctricas. (2019).

Disponible: http://www.endesaeducacion.com/Endesa_educacion/recursos-interactivos/el-transporte-de-electricidad/xvi.-las-subestaciones-electricas..

Las tensiones que manejan las redes eléctricas de reparto están alrededor del promedio de los 50 kV. En la figura No. 3.19 se puede apreciar las redes de una subestación de reparto.

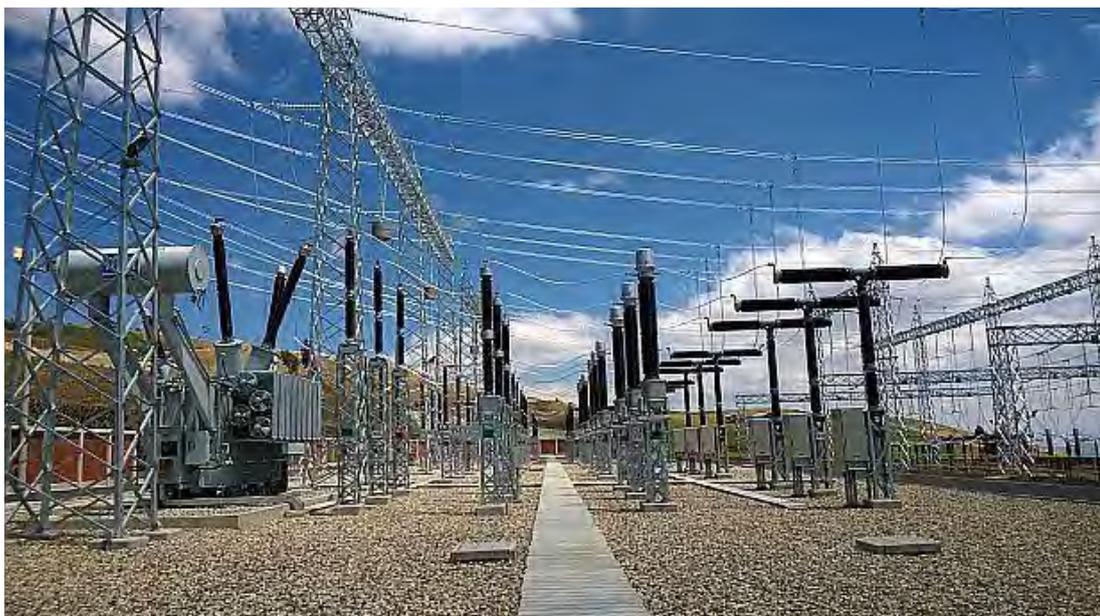


Figura No. 3.19 Vista de la cabecera de una red de reparto de energía eléctrica.

Fuente: Subestaciones eléctricas (2019). Disponible: <http://elcomercio.pe/economia/negocios/rio-alto-mining-invirtio-us25-mlls-subestacion-electrica-noticia-1777042>.

3.4.3 Subestación y red de distribución

Corresponden a aquellas que se encargan de recibir las señales eléctricas transferidas por las redes de reparto, reducirles sus niveles de tensión (entre 1 y 30 kV) y distribuir las a las zonas y localidades donde se encuentran los consumidores finales.

La conformación y los aspectos estructurales de estas subestaciones son muy similares a las anteriores subestaciones, pero debido a que manejan tensiones más reducidas, sus componentes y dispositivos son de los de menor requerimiento dimensional entre todas las subestaciones de energía eléctrica.

Estas subestaciones se encuentran ubicadas muy cerca de las zonas urbanas e incluso muchas de ellas ya han sido incorporadas al perímetro urbano, debido a los procesos acelerados de expansión que han tenido muchas ciudades. En la figura No. 3.20 se muestra una panorámica de una subestación de distribución de energía eléctrica.



Figura No.3.20 Vista panorámica de una subestación de distribución.
Fuente: "Colección de servicios de ingeniería de alta, Media y baja tensión" AecaGroup, 2018.

Las líneas de las redes de distribución eléctrica se soportan en estructuras mucho más sencillas, generalmente en mástiles o postes, y sus aisladores y demás elementos de instalación son de dimensiones relativamente mucho menor. En la figura No. 3.21 se ilustran unos tendidos de redes de distribución eléctrica.

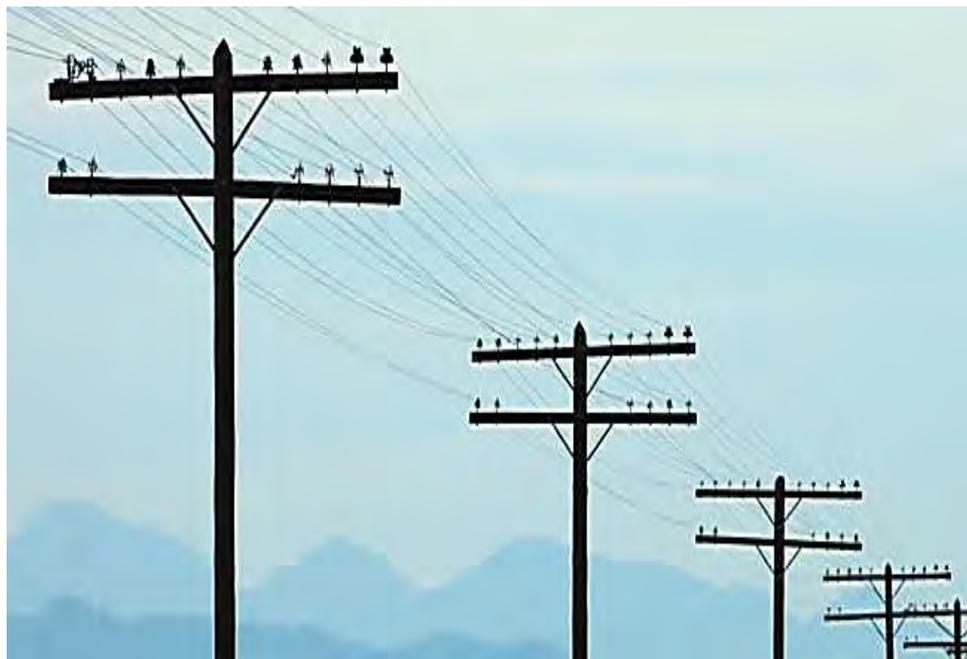


Figura No. 3.21 Líneas de una red de distribución

Fuente: Líneas de Distribución. (2020). Disponible:
[http: .fundiherrajesdecolombia.com lineas-de-distribucion.](http://.fundiherrajesdecolombia.com/lineas-de-distribucion)

Así mismo los transformadores que se utilizan en estas subestaciones de distribución de energía eléctrica, son menos robustos que para el caso de las subestaciones de reparto y que para las estaciones de transmisión, debido a que

manejan niveles de tensión menores. En la figura No. 3.22 se muestran unos transformadores típicos empleados en las subestaciones de distribución.



Figura No. 3.22 Transformadores típicos utilizados en las sub-estaciones de distribución de energía eléctrica.

Fuente: Transformadores de meia potencia. (2020). Disponible:
<http://g2tingenieria.com/project/item/linea-aerea-media-tension> <http://.transformadores.cl/project/transformadores-de-media-potencia> lang en.

El tipo de cable que conforman las líneas de las redes de distribución de energía eléctrica son de menor diámetro que para el caso de las redes de reparto y de transmisión. En la figura No. 3.23 se ilustran unas imágenes de este tipo de cables.



Figura No. 3.23 Tipos de cables en las redes de distribución de energía eléctrica.

Fuente: Cables para medias potencias. (2019). Disponible: <http://melexa.com/categoria-producto/categorias-melexa/conductores->

3.4.4 Redes eléctricas de grandes consumidores

Los grandes consumidores de la energía eléctrica están conformados esencialmente por: Edificios y conjuntos residenciales; Centros comerciales; Fábricas y empresas industriales y constructoras; Instalaciones universitarias y centros educativos; Instituciones gubernamentales y militares; Hospitales y complejos hoteleros y vacacionales; Alumbrado público; entre otros.

A la acometida de estas redes llega la red de distribución de la energía eléctrica pública, desde los transformadores finales que reducen el voltaje a de 10 30 a ciertos niveles típicos, tales como: 115 220 (monofásica) y o 220 380 (trifásica). En la figura No. 3.24 se muestra algunos de los diferentes tipos de transformadores finales que alimentan las entradas de los grandes consumidores.



Figura No 3.24 Transformadores típicos para las acometidas de los grandes consumidores de energía eléctrica.

Fuente: Regulador de voltaje monofásico. (2019). Disponible:
http://www.myeel.com.ar/producto.php_producto_Regulador_de_voltaje_Monofasico.

La estructura de la distribución eléctrica de los grandes consumidores, varía dependiendo de la distribución, de la cobertura espacial que tenga sus instalaciones físicas y de la cantidad de puntos de consumo, así como de la magnitud del consumo que estos requieran. En la figura No. 3.25 se hace una representación de un esquema típico de la estructura básica de una red de distribución eléctrica de un pequeño edificio:⁽⁸⁾

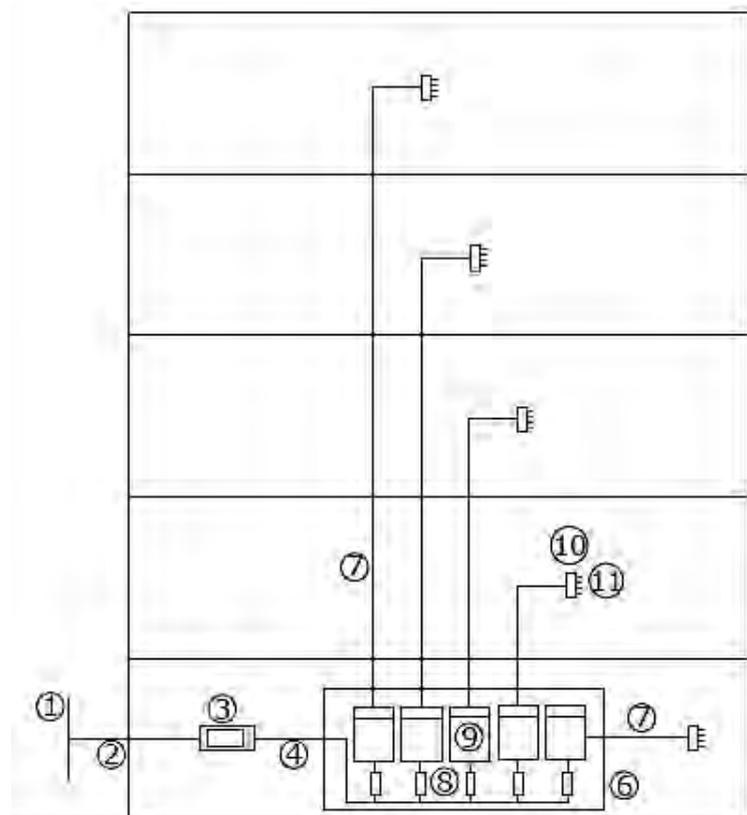


Figura No. 3.25 Esquema típico de distribución eléctrica en edificios.

Fuente: Flórez, ., *Instalaciones eléctricas y Telefónicas en edificios*, Escuela Politécnica, Ecuador, 2016, p. 38.

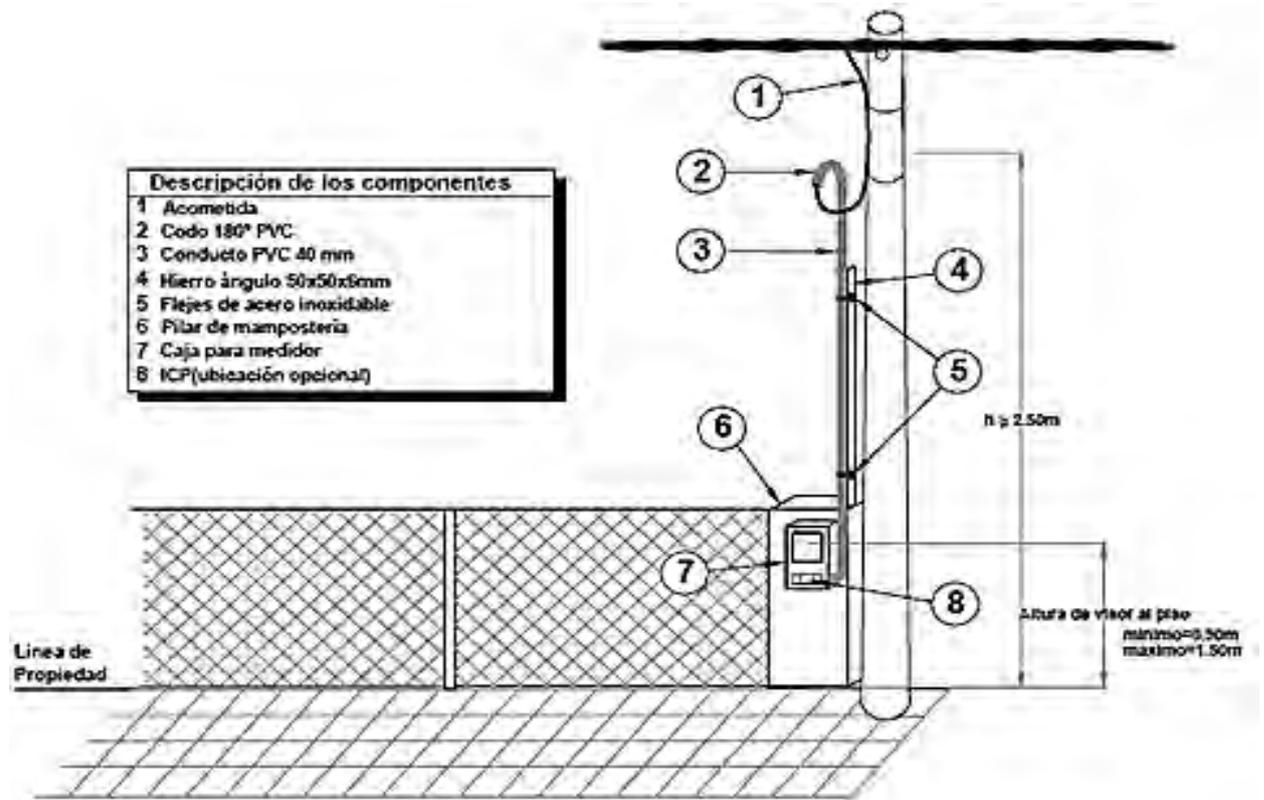
Los componentes principales de una red eléctrica de un edificio y los cuales se encuentran enumerados en la figura No 3.25, son los siguientes:

3.4.4.1 Red de distribución

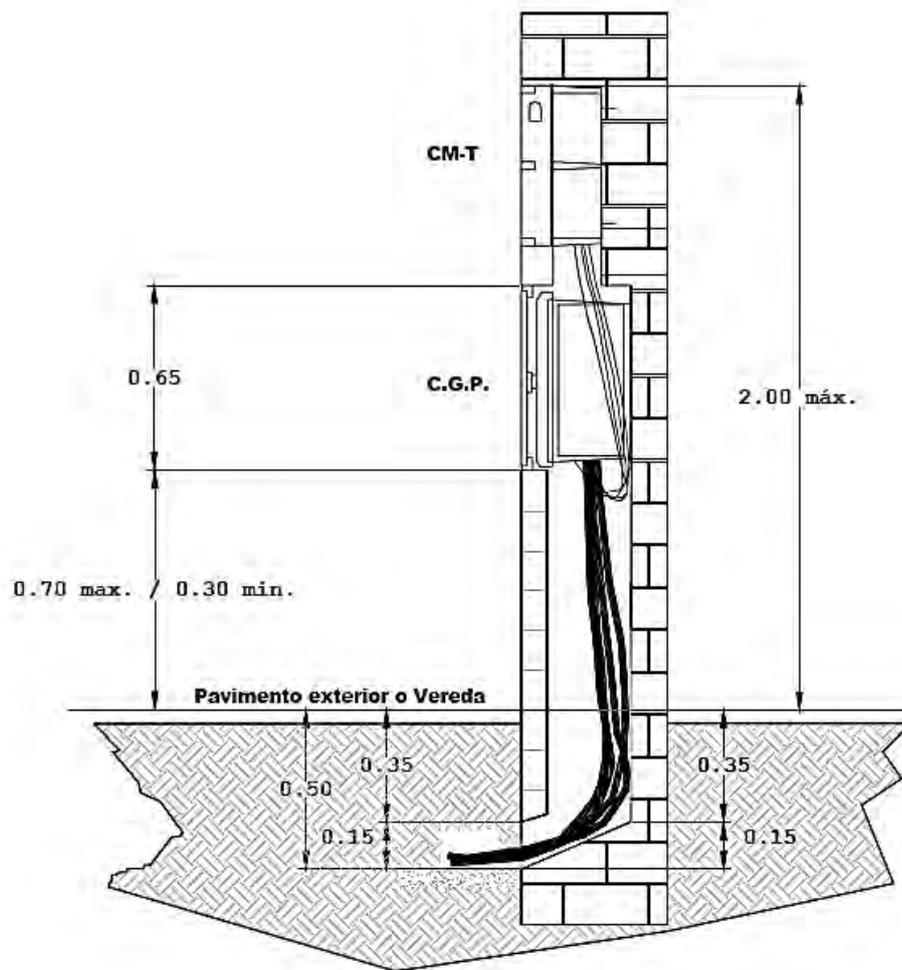
Corresponde a la red eléctrica de la empresa de energía de la localidad, la cual puede ser de tendido aéreo o subterráneo.

3.4.4 .2 Línea de acometida:

Pueden ser de instalación aérea o subterránea, de acuerdo de la red de distribución a la cual se interconecta. Conecta la red de distribución con la red eléctrica del edificio. También pertenece a la empresa que presta el servicio de energía de la localidad. Para el caso de que la red sea trifásica, la acometida requiere de tres cables conductores de fase y del correspondiente cable del neutro. En la figura No. 3.26 se muestra unos esquemas correspondientes a la acometida desde la red de distribución eléctrica aérea y desde la red de distribución eléctrica subterránea.



a.) Acometida eléctrica aérea



b.) Acometida eléctrica subterránea.

Figura No.3.26 Esquemas típicos de acometidas eléctricas.

Fuente: *Normas de instalación de enlace de baja potencia*, UTE, 2015, p. 15 p. 26.

Existe una gran variedad de cajas para hacer los tendidos de la línea de acometida subterránea a los grandes consumidores. En la figura No. 3.27 se muestran unos esquemas de la estructura de alguno de los tipos de estas cajas.

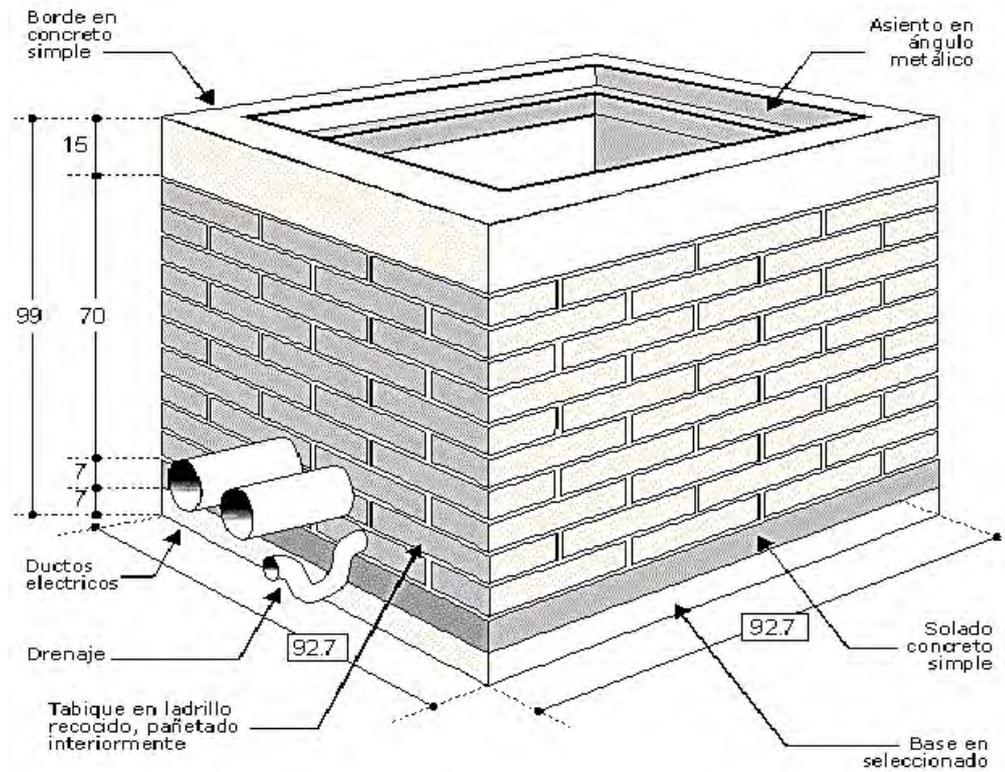
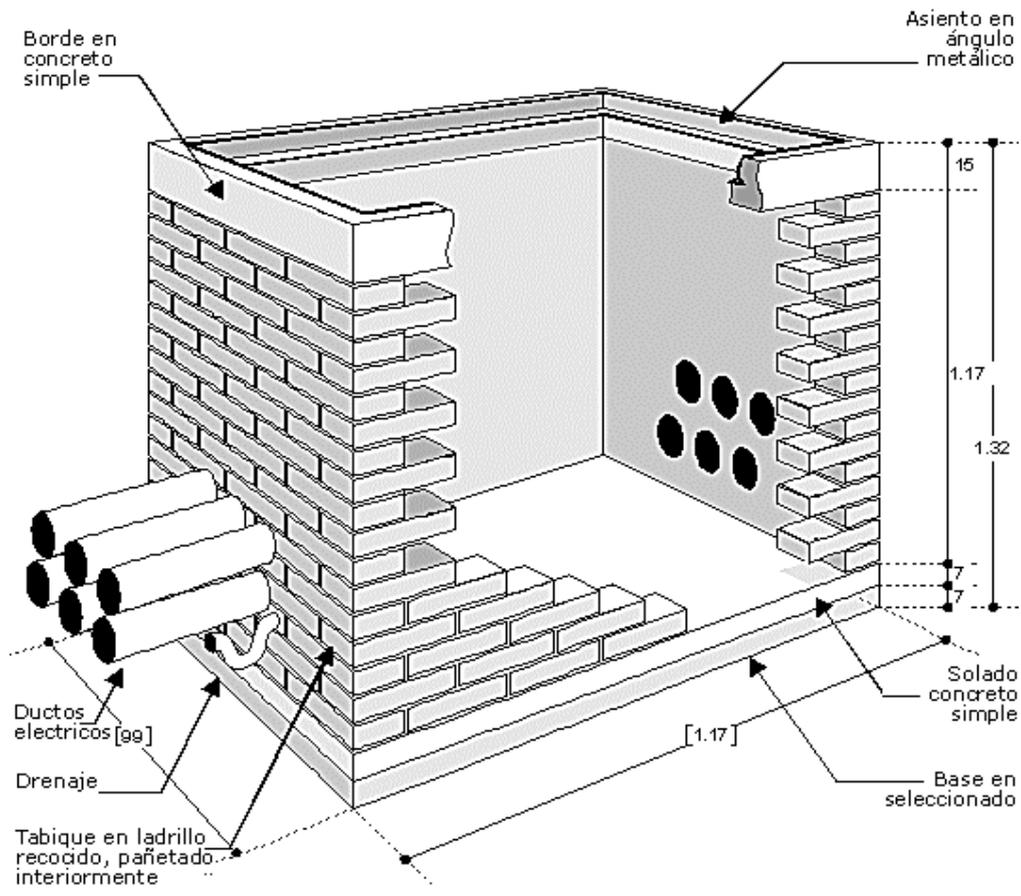


Figura No. 3.27 Tipos de cajas para tendidos de líneas de acometida subterránea. Fuente: Manual de instalación de redes eléctricas: tubería, cajas y accesorios. Construtada. 2016.

3.4.4.3 Caja general de comando y protección

Es el primer elemento de la red eléctrica perteneciente al edificio, en el cual se encuentran los dispositivos de protección (fusibles e interruptores) de toda la red del conjunto o edificio. Es a esta caja (CGCP) donde llega la línea de acometida. En la figura No. 3.28 se muestran algunos de los diferentes tipos de cajas generales de comando y protección.



Figura No.3.28 Cajas generales de comando y protección.

Fuente: Catálogos *Caja general de protección Casa Trifásica A*”, Sumidelec, 2013 *protección Tecnológica y Belleza*”, Hager, 2016 *Instalación eléctrica en residencias*. (2019).

Disponible: <https://instalelectricas.wordpress.com/2015/09/04/instalacion-electrica-en-residencia-para-mayores-interior/>.

Por lo general el CGMP se sitúa a la entrada de la edificación o del área de los usuarios finales y de él sale la línea repartidora que conecta a los contadores de energía de toda la edificación.

3.4.4.4 Línea repartidora

Es aquella línea que interconecta la caja general de protección con la caja colectiva de los contadores de energía. Para el caso de que existan varios contadores, lo que sucede en los edificios, los cables de esta línea llegan al embarrado de la caja de contadores, de donde se interconectan cada uno de ellos. Para el caso de las viviendas unifamiliares, esta línea no existe, debido a que el contador de cada una de estas viviendas se conecta directamente con la caja de protección.

3.4.4.5 Caja de derivación

Generalmente debe haber una *caja de derivación* por estancia, donde se realizan las conexiones necesarias para cada uno de los correspondientes circuitos de cada una de las estancias. Se debe tener presente que las conexiones entre cables se hacen a través de regletas o clemas. Los empalmes deben hacerse siempre mediante clemas y nunca con cinta aislante. En la figura No. 3.29 se muestra una caja de derivación para dos enchufes.

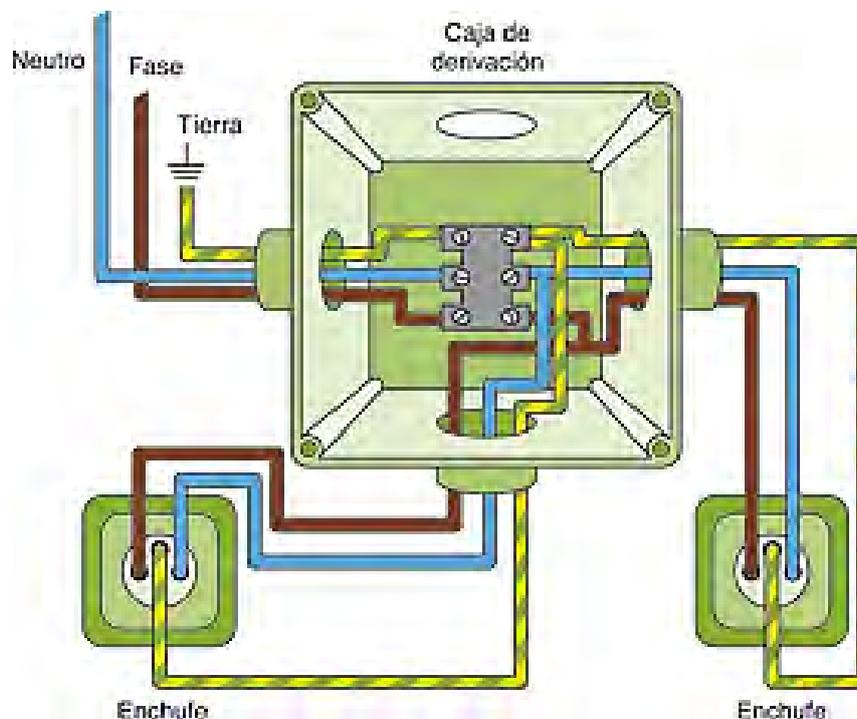


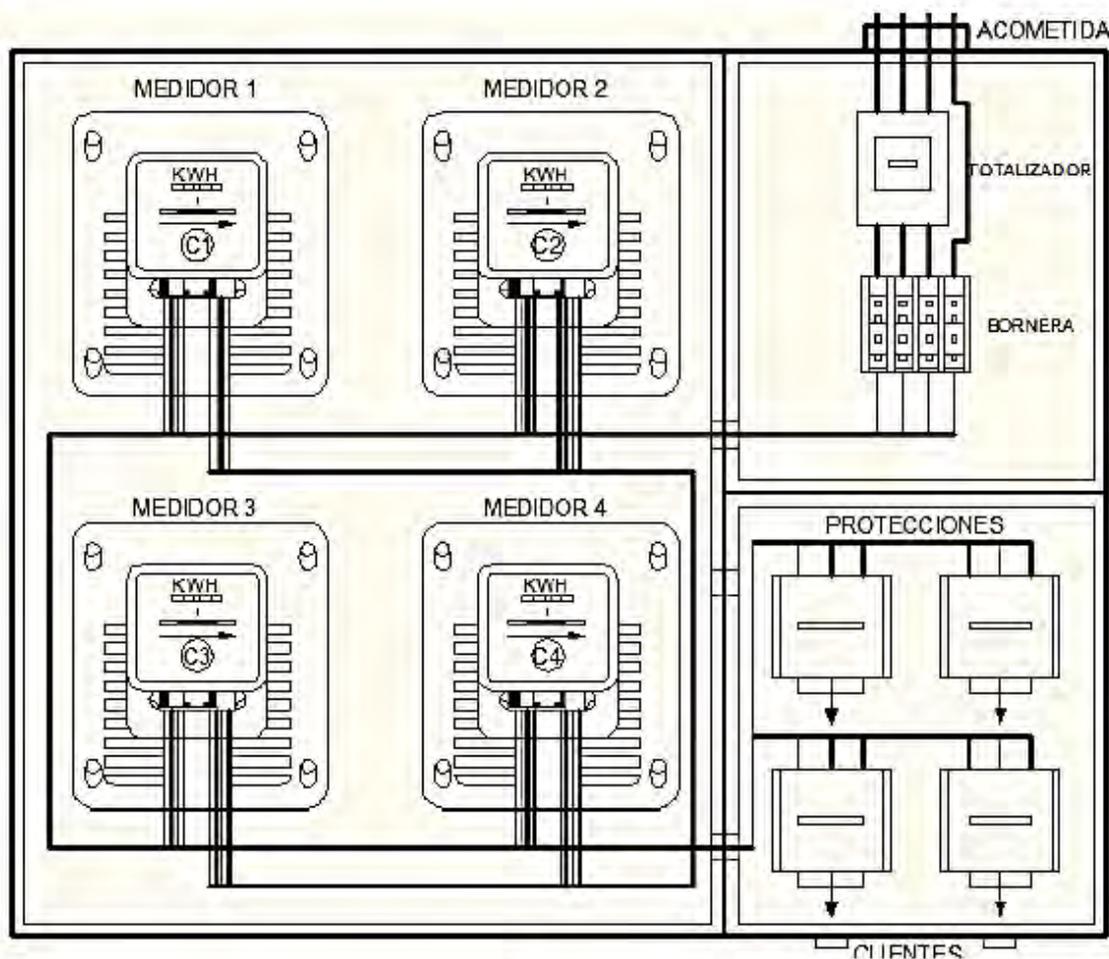
Figura No. 3.29 Caja de derivación para dos enchufes.

Fuente: Instalación eléctrica. (2019). Disponible:

.o upatutambien.net p-content uploads 2018 05 Instalación-electrica.pdf

3.4.4.6 Caja colectiva de contadores

Corresponde a aquella caja donde se instalan los respectivos contadores del consumo de energía de cada uno de los consumidores individuales. En esta caja se encuentra el embarrado donde se realiza la conexión individual de cada usuario. Esta caja puede ser instalada en la parte exterior o en la parte interior del edificio. Para el caso de ubicación exterior, generalmente se utiliza la línea de propiedad del edificio o en la zona de retiro, del mismo, sobre pared o pilastra. Para ubicación interior, frecuentemente, se ubica en la planta baja o subsuelo del edificio, en un sitio de fácil acceso. Se recomienda, por motivos de facilidad de instalación y de la operatividad de los contadores, que la cantidad de contadores centralizados, en cada caja, no sobre pase de 15. En la figura No. 3.30 se representan en la imagen superior un esquema de conexión para caja de cuatro contadores trifásicos y la imagen inferior un armario para quince medidores trifásicos.



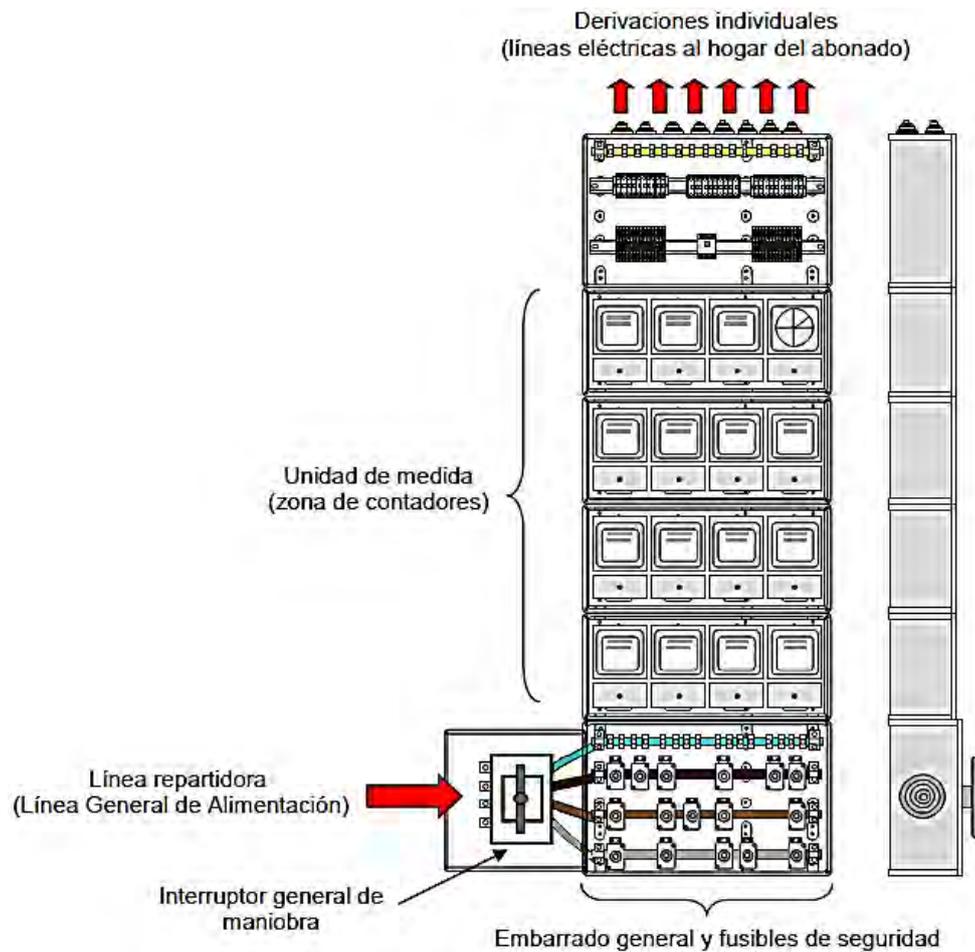


Figura No.3.30 Esquema de conexión para caja de cuatro medidores trifásicos (imagen superior) y armario para quince medidores trifásicos (imagen inferior).

Fuente: Instalaciones Eléctricas en una vivienda. (2019). Disponible:
http://www.c3a.edu.xunta.gal/centros/iesfelixmuriel/system/files/inst_el_C3_A
http://www.montevideo.gub.uy/sites/default/files/concurso_materiales_668.

En algunos casos se requiere, en una misma edificación, redes trifásicas y monofásicas. Para estos casos se podría tomar como referencia el montaje indicado en el esquema de la figura No. 3.31, en cual se indica la instalación de una instalación trifásica y diez monofásicas.

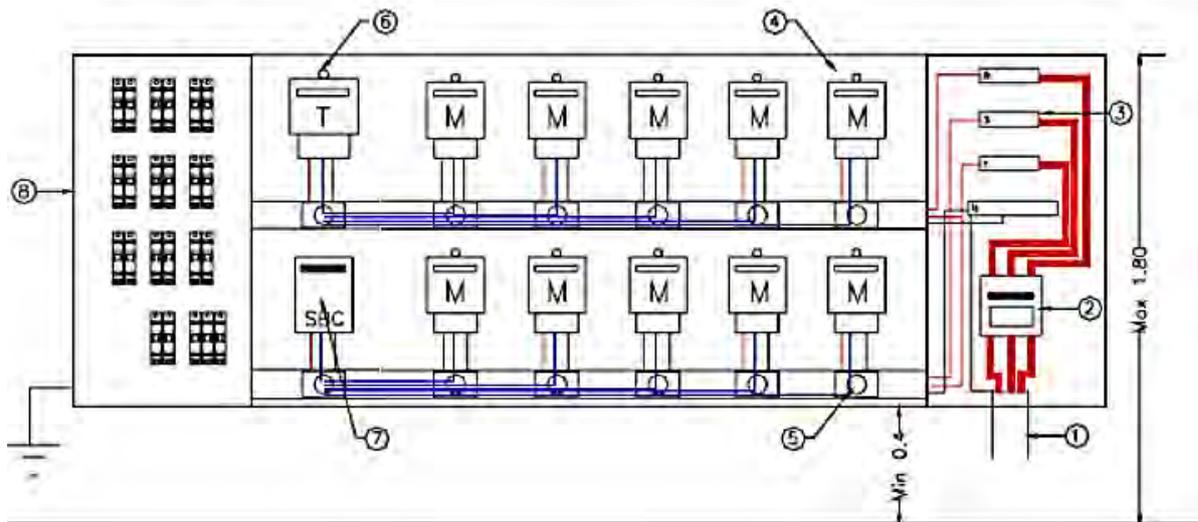


Figura No. 3.31 Esquema de 10 medidores monofásicos y uno trifásico
 Fuente: Medidores monofásicos. (2019). Disponible: <http://www.ceal.com.ar/arcivos/rat.pdf>.

A continuación, se describe el significado de la numeración indicada en el esquema mostrado en la figura inmediatamente anterior:

1. Entrada de alimentación (acometida).
2. Caja de protección (área de acometida: fusibles).
3. Barras de fase y neutro.
4. Contador monofásico.
5. Base interceptora unipolar tipo "U".
6. Contador trifásico.
7. Caja de protección (área de medición: fusibles).
8. Tableros primarios (área de derivaciones).

Existen, por parte de las empresas prestadoras del servicio eléctrico, en sus reglamentos de instalación, algunas recomendaciones respecto al montaje de las cajas de los contadores de energía eléctrica, entre las cuales se podrían reseñar las siguientes: ⁽⁹⁾

- La altura de instalación debe ser entre 1.5 y 1.7 metros, para facilitar la visión de la marcación de los contadores. En caso de que la caja se instale por debajo de los 80 cm, se recomienda adicionarle una reja metálica frontal con el fin de proteger los contadores de posibles impactos.
- Las cajas con puerta fija se empotran sobre pared y las de tapa removible se sobrepone ó se empotran parcialmente en postes.
- Cuando las cajas se instalen en el interior de un edificio o dentro de conjuntos cerrados, podrían ser sobrepuestas en los muros o paredes de la estructura de los mismos.
- Si la conexión a tierra de las cajas no se encuentre empotrada, debe tenderse en un ducto galvanizado.

La cantidad de medidores, en especial en los grandes consumidores, depende del número de espacios diferentes en los cuales se quiere registrar el consumo correspondiente. Cada uno de los medidores se pueden colocar en cajas independientes o en gabinetes colectivos de medición.

3.4.4.7 Derivación individual

Conciérne a la instalación que parte de los contadores y llega a cada una de las tomas de los puntos de consumo final de la corriente eléctrica (usuarios). Para esta instalación se tiene en cuenta ITC-BT-14 y las normas establecidas por la empresa que presta el servicio de energía eléctrica local. Los cables aislados utilizados en esta instalación deben ser de cobre o de aluminio con una sección transversal de 6 mm² mínima, con tensión de aislamiento de 450 750 voltios o mejor.

Cada derivación individual es completamente independiente de las otras, donde los correspondientes cables se canalizarán de acuerdo con lo indicado en ITC-BT-15:
(10)

- Tubos empotrados.
- Tubos enterrados.
- Tubos en montaje superficial.
- Canaletas con tapa protectora.
- Canaletas eléctricas que cumplan la norma UNE-EN 60.439-2.

En la figura No.3.32 se ilustra un esquema donde se indica una concentración de contadores, con sus correspondientes derivaciones individuales. Este esquema es frecuentemente utilizado en conjuntos de edificación vertical u horizontal, ya sea que estén destinados a viviendas, locales comerciales, de oficinas o de una concentración de industrias.

Este esquema es utilizado para el caso de contadores centralizados y las derivaciones individuales se realizan a través de canalizaciones eléctricas prefabricadas, teniendo en cuenta lo establecido en la norma UNE-EN 60439-2. A continuación se describe el significado de la numeración indicada en este esquema.

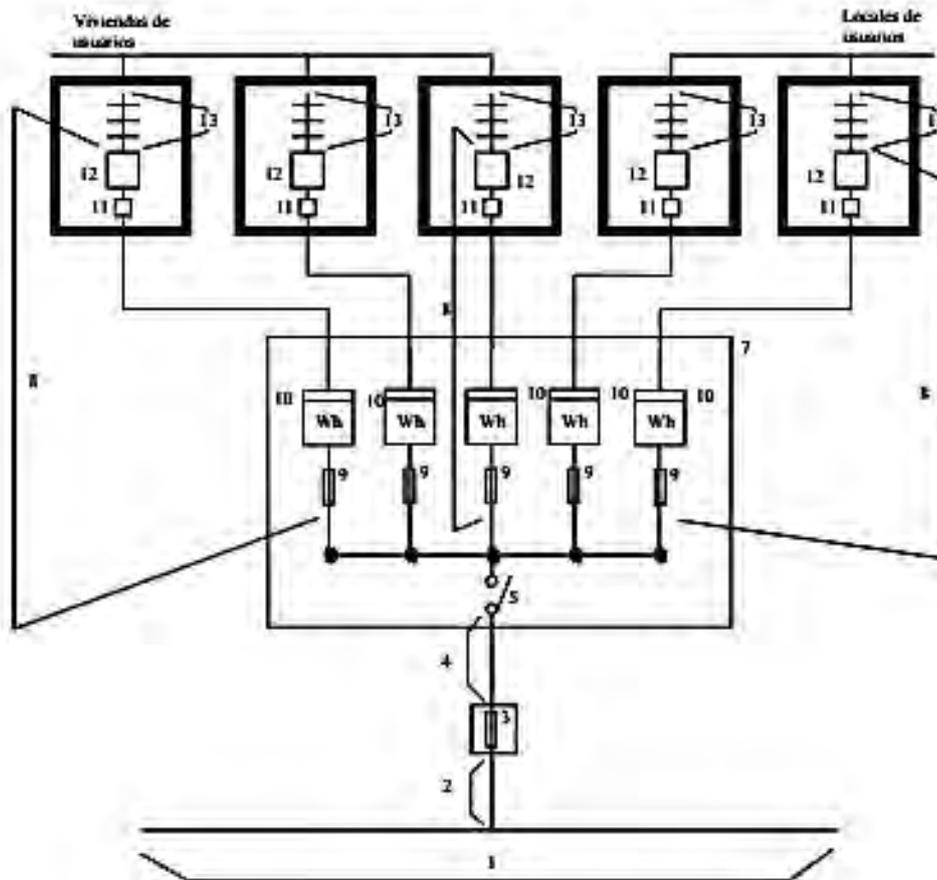


Figura .3.32 Esquema de varias derivaciones individuales con contadores centralizados.

Fuente: Instrucción técnica complementaria para baja tensión. (2019). Disponible: http://platea.pntic.mec.es/alabarta/C_E_Soporte_Materiales_modulo2.pdf.

1. Red de distribución (propiedad de la empresa de energía local).
2. Acometida.
3. Caja general de protección.
4. Línea general de alimentación.
5. Interruptor general de maniobra.
6. Caja de derivación.
7. Emplazamiento de contadores.
8. Derivaciones individuales.
9. Fusibles de seguridad.
10. Contadores.
11. Caja para interruptor de control de potencia.
12. Dispositivos privados de mando y protección.
13. Instalaciones interiores.

Para el caso de instalaciones monofásicas, cada derivación individual está conformada por un conductor de fase, un conductor neutro y otro la tierra. En la figura No. 3.33 se ilustra una imagen donde se indica las conexiones de unas derivaciones individuales monofásicas.

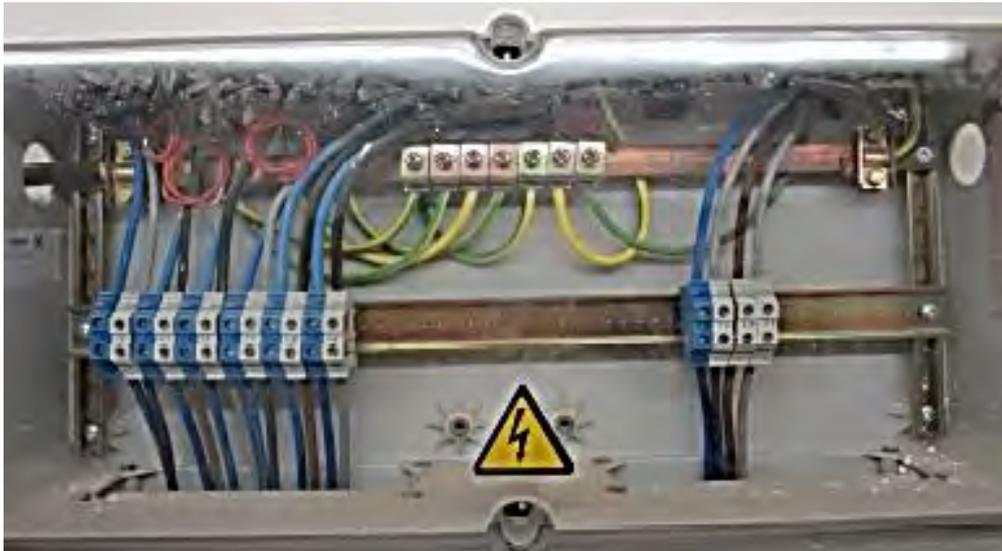


Figura No. 3.33 Conexión de unas derivaciones individuales monofásicas

Fuente: Derivaciones individuales monofásicas. (2019). Disponible:
:http: .edu.xunta.gal centros iesfelixmuriel system files inst el C3 A9ctricas viviendas.pdf.

3.4.4.8 Dispositivos de seguridad

Estos dispositivos (fusibles y o interruptores) hacen parte del sistema de protección de las derivaciones individuales y de los. Interrumpen el paso de la corriente eléctrica en caso de que se presente alguna anomalía (por ejemplo, la presencia de una sobrecarga, un corto circuito o una falla a tierra) en las derivaciones individuales o en los contadores.

Dependiendo de la cantidad de consumo, que demande las respectivas cargas de las instalaciones internas del usuario, corresponderá el tipo de interruptor o fusible, así como de su amperaje y robustez. Estos dispositivos de seguridad se encuentran dentro la caja colectiva de los contadores. En la figura No. 3.34 se muestran algunos tipos de fusibles e interruptores individuales conectados a cada uno de los contadores.



Figura No. 3.34 Tipos de fusibles e interruptores individuales.

Fuente: Revista Electrónica ,(2019).

Disponible:http: .edu.xunta.gal centros iesfelixmuriel system files inst el C3 A9ctricas vivie ndas.pdf https: .lo es.com.mx category 662-fusibles-e-interruptores..

3.4.4.9 Contadores de energía eléctrica

Es el dispositivo que registra el consumo de energía de las instalaciones eléctricas de los respectivos usuarios. Generalmente estos dispositivos están diseñados para registrar la energía consumida en unidades de kilovatio-Hora (kWh). Existen básicamente los siguientes tipos de contadores:⁽¹¹⁾

- *Contadores electromecánicos*: emplean bobinados por los cuales circula la corriente demanda por el usuario, produciéndose campos magnéticos que a su vez inducen corrientes en un disco, haciéndolo girar, y de esta forma mueve las agujas del cuadrante que registra el consumo.
- *Contadores electrónicos*: también conocidos como contadores digitales, emplean convertidores analógicos a digital, y el consumo de energía lo registran en pantalla. En principio estos contadores disponen de un circuito secuencial conformado por biestables y puertas lógicas (flip-flops) instalados en cascada. La cantidad de estos dispositivos depende de la escala de conteo que ofrece el contador.
- *Contadores con telegestión*: también conocidos como contadores de telemedida o inteligentes, cuya característica principal es que permiten realizar operaciones y lecturas del consumo de forma remota. Disponen de un contador estático monofásico (*smart meter*) con comunicación a través de la red eléctrica de la localidad (PLC: *Power Line Communications*). Estos contadores hacen la lectura del consumo en tiempo real, información que el usuario puede consultar en cualquier momento y poder optimizar el consumo de energía. ⁽¹²⁾

En la figura No. 3.35 se muestran algunos modelos de los diferentes tipos de contadores de energía eléctrica.



a.) Electromecánico

b.) Electrónico

c.) Inteligente

Figura No. 3.35 Diferentes tipos de contadores de energía eléctrica.

Fuente: Manual *Contador eléctrico*, Nergiza, 2016 *Contadores electrónicos*, Circutor, 2016.

3.4.4.10 Cuadro privado de mando y protección

El suministro de energía a cada usuario llega desde la *derivación individual* al cuadro privado de mando y protección (CPMP), el cual corresponde al elemento inicial de la instalación eléctrica interior, de cada uno de los usuarios finales que hacen parte del edificio o conjunto residencial. En este cuadro se instalan los dispositivos privados de mando y protección que tienen como propósito proteger toda la instalación interior, del usuario final, contra sobrecargas y cortocircuitos, y a las personas y animales domésticos contra contactos directos e indirectos. Generalmente se sitúan en cuadro próximo a la puerta de entrada del local o vivienda del usuario.

Además de los interruptores de protección contra sobrecargas y cortocircuitos, existen otros tipos de interruptores especiales, tales como: ⁽¹³⁾

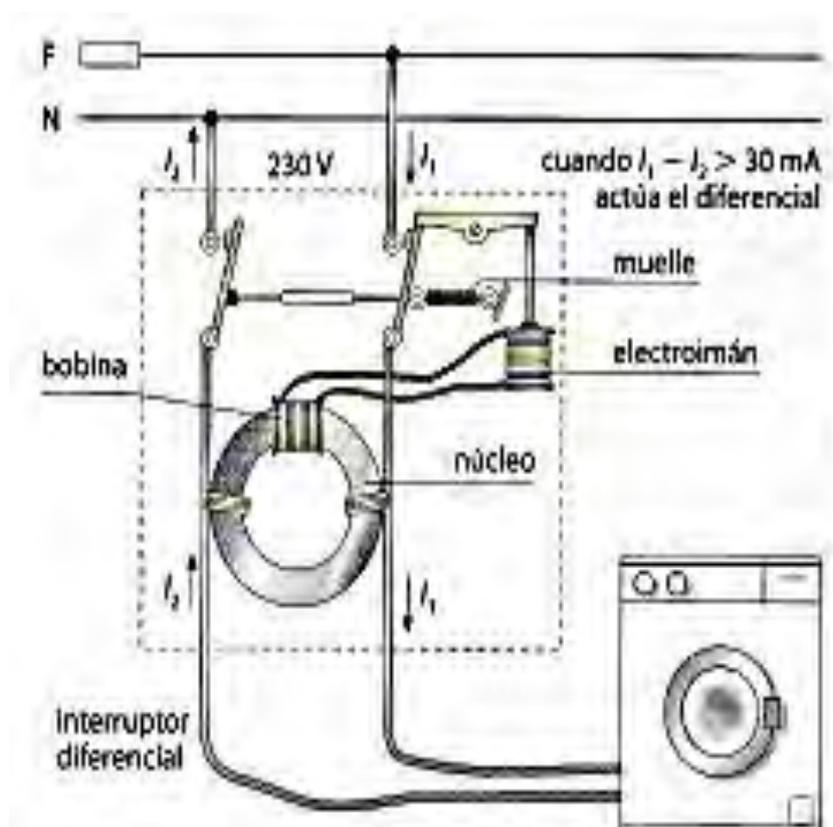
Los *interruptores diferenciales* (ID), los cuales están destinados a proteger a las personas cuando hacen contacto directo con la parte activa del cableado de la red eléctrica interna o de alguno de sus dispositivos que la conforman o de alguno de sus elementos o equipos consumidores. Adicionalmente protegen contra incendios provocados por la red eléctrica interna. Estos interruptores son muy indispensables tanto en las instalaciones residenciales como en las industriales, los cuales funcionan conjuntamente con la puesta a tierra de los enchufes y masas metálicas de todos los equipos eléctricos y electrónicos.

El principio de funcionamiento de los *interruptores diferenciales* se basa en que el cuerpo humano o animal es de características conductivas, por su gran cantidad de material líquido que lo conforma. Si una persona o animal, no aislada, hace contacto con la parte activa de algunos de los componentes de la red eléctrica interna, entonces la corriente eléctrica circulará por el cuerpo correspondiente hacia la tierra, de tal manera que si esta corriente es igual o mayor a la sensibilidad del ID se dispara suprimiendo el flujo de corriente.

En la figura No. 3.36 se ilustra unas imágenes donde se indica: dos modelos comerciales y el esquema interno del *interruptor diferencial*.



Dos modelos comerciales de Interruptor Diferencial



Esquema interno del Interruptor Diferencial

Figura 3.36 Modelos de interruptores diferenciales y su circuito interno.

Fuente: Interruptores Diferenciales. (2020). Disponible:
http://www.edu.xunta.gal/centros/iesfelixmuriel/system/files/inst_el%C3%A9ctricas_viviendas.pdf.

También existen unos interruptores de control de potencia (ICP), el cual es ofrecido por la empresa local prestadora del servicio de energía eléctrica. Estos interruptores, esencialmente, limitan el consumo de energía del usuario a la cantidad que se ha contratado, de tal forma que si la energía consumida por los equipos y dispositivos conectados es superior a la acordada interrumpe el suministro.

Es frecuente que los ICP se ubiquen en el *cuadro privado de mando y protección*, los cuales se conectan a los conductores respectivos de la *derivación individual*. En la figura No. 3.37 se muestran unos de los ICP que existen en el mercado.



Figura No. 3.37 Interruptores de control de potencia.

Fuente: Interruptores de control de potencia. (2019).

Disponible: <https://www.iberdroladistribucion.es/distribucion-electrica/interruptor-control-potencia>
<http://www.schneider-electric.es/es/product-category/4200-interruptores-automaticos-de-potencia-y-reles-diferenciales> ..

En la figura No. 3.38 se muestra una imagen de la conformación del CPMP, en donde se encuentran los dispositivos de mando y protección de las instalaciones eléctricas del usuario final.

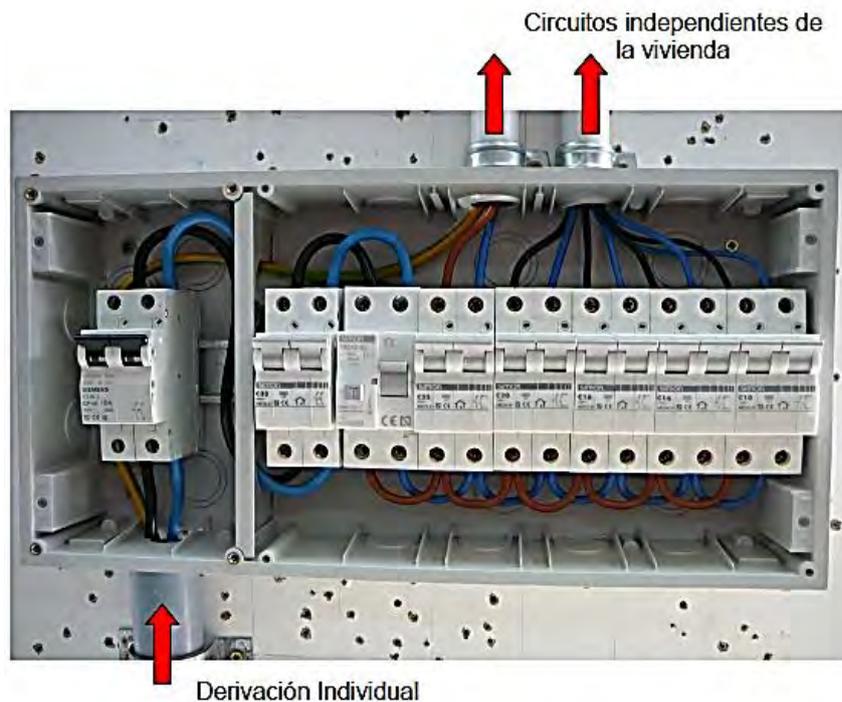


Figura No. 3.38 Cuadro privado de mando y protección de las instalaciones internas del usuario final.

Fuente: Guía técnica de aplicación: Instalaciones de enlace, Dispositivos generales e individuales de mando y protección, Interruptor de control de potencia”, Ministerio de Industria y Energía, 2018.

3.4.4.11 Instalación interior del abonado

El cableado de las instalaciones internas de cada usuario final parte del CPMP, las cuales generalmente se distribuyen dentro de tubería de P C (flexibles o rígidos) o de metal empotrada en obra. Cuando se requiera hacer instalaciones internas en edificaciones ya existentes, generalmente se emplean perfiles o canaletas prefabricadas de P C o aluminio, aseguradas en las paredes del local del usuario final, preferiblemente de color blanco o con tono de imitación de madera. En la figura No.3.39 se muestran algunos de los diferentes tipos de tubos y de canaletas P C empleados para las instalaciones internas de los usuarios finales de una red eléctrica.



a.) Tubos flexibles b.) Tubos rígidos c.) Canaletas

Figura . No. 3.39 Tipos de tubos y canaletas empleadas en las instalaciones internas de los usuarios finales de una red eléctrica.

Fuente: Catálogo "Tubería para Redes Eléctricas" Fierros, 2018.

El tipo y calibre del cable a emplearse depende de la intensidad de corriente máxima que demanda cada uno de los puntos de suministro de la red interna. En general deben tener 450 750 voltios de aislamiento y no permitir la propagación de incendio. A continuación, se relacionan algunos calibres mínimos del cable para determinados usos:⁽¹⁴⁾

- Alumbrado: cables de 1.5 mm².
- De fuerza: cables de 2.5 mm².
- Electrodomésticos: cables de 4 mm².

Los conductores se encuentran protegidos por una cubierta de material aislante, lo que evita, además, que se produzca corto entre ellos cuando se encuentran en los tubos o canaletas. Como en oportunidad anterior se mencionó, para instalaciones monofásicas se requiere de tres cables, mientras que para las trifásicas de cuatro cables. Existe un código de colores en los cables, dados por la norma UNE 21089, los cuales se podría concretar en la siguiente manera:

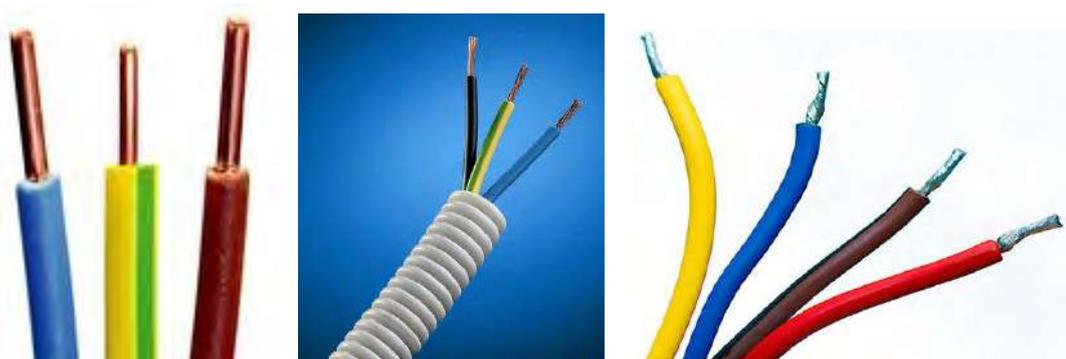
a.) *ara instalaciones monofásicas:*

1. *Cable fase:* es el que lleva la corriente eléctrica (puede ser de color: marrón, negro o gris).
2. *Cable neutro:* es el cable de retorno de la corriente eléctrica (es de color azul).
3. *Cable Tierra:* es el conductor a tierra (es de color amarillo con verde).

b.) *ara instalaciones trifásicas:*

1. *os cables de fase:* los que llevan la corriente eléctrica (cable marrón y cable azul).
2. *Cable neutro:* es el cable de retorno de la corriente eléctrica (es de color rojo).
3. *Cable Tierra:* es el conductor a tierra (es de color amarillo con verde).

En la figura No. 3.40 se ilustran unas imágenes donde se muestran algunos de los diferentes tipos de cables para instalaciones monofásicas y trifásicas en las redes eléctricas internas del usuario final.



a.) Monofásica

b.) Trifásica

Figura No. 3.40 Cables para instalaciones monofásicas y trifásicas en las redes eléctricas internas del usuario final.

Fuente: Catálogo "Tubería para Redes Eléctricas" Fierros, 2018

http: .sehurtado.com servicios . Consultado en febrero 2019.

Para el caso de potencias más altas (caso de procesos industriales y o las instalaciones de las acometidas a los grandes consumidores el calibre de los cables debe ser superior. En la tabla No. 3.4 se relacionan los calibres mínimos que deben tener los cables conductores de material de cobre para diferentes potencias de consumo.

Potencia (KV)	Sección C_U (mm ²)
≤ 15	6
≤ 25	10
≤ 35	16
≤ 50	25
≤ 60	35
≤ 70	50
≤ 85	70
≤ 100	95
≤ 120	120
≤ 140	150
≤ 170	185
≤ 200	240
> 200	A determinar por la Distribuidora

Tabla No. 3.4 Calibres mínimos de cables eléctricos de cobre para diferentes rangos de frecuencia.

Fuente: Reglamento Acometidas parte 1, p.26 (2020) Disponible:
<http://www.ceal.com.ar/archivos/rat1.pdf>.

En la figura No. 3.41 se ilustra una imagen donde se muestra el CPMP de una instalación interior del abonado (usuario final), y el cableado de las respectivas instalaciones que salen de dicho cuadro a cada una de los puntos de las tomas eléctricas.

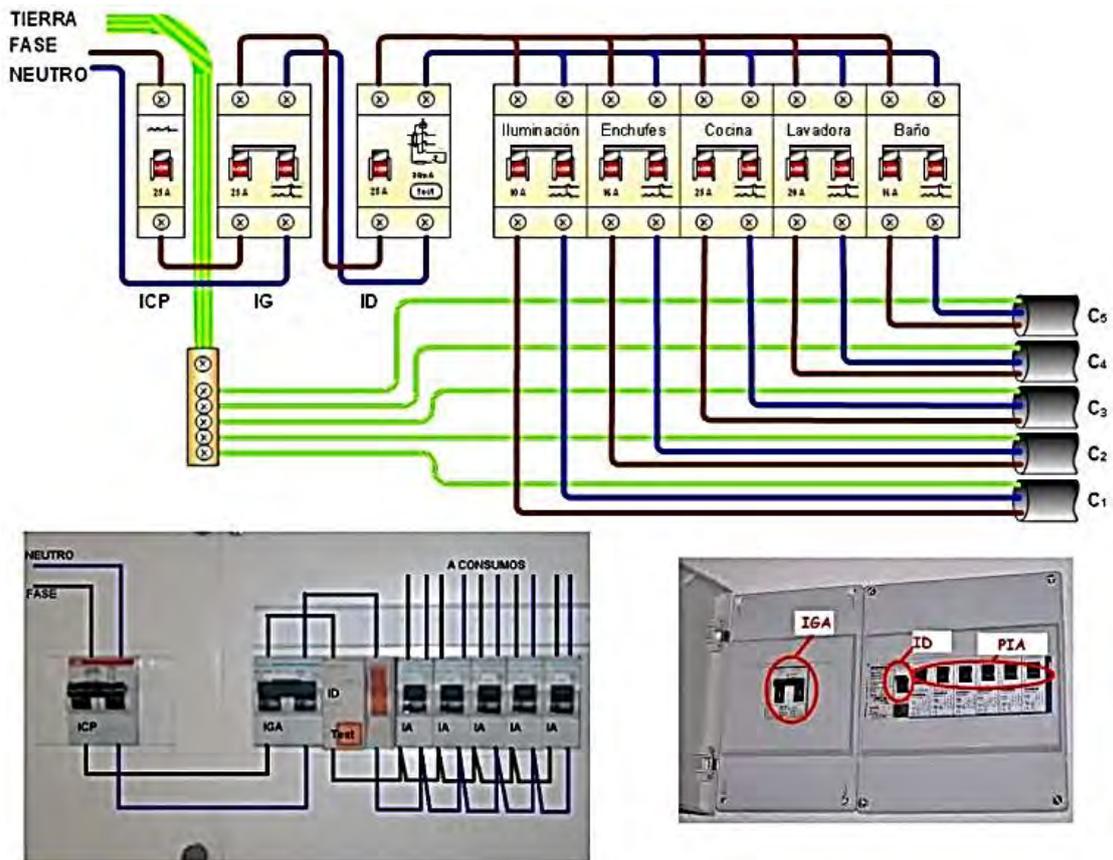


Figura No.35.41 CPMP e instalación interior de un abonado.

Fuente: AeraTecnología. (2019). Disponible: [.aeratecnologia.com](http://aeratecnologia.com).

3.4.4.12 Tomas eléctricas

Los tomacorrientes corresponden a los puntos donde se conectan los respectivos equipos y dispositivos del usuario final, que demandan la energía eléctrica del correspondiente local o residencia. En la actualidad han salido al mercado unas tomas especiales, esencialmente, para los puntos finales de las redes industriales. En la figura No. 3.42 se muestra unos tipos de tomas eléctricas clásicas, de frecuente utilización en residencias, oficinas, establecimientos y locales comerciales, entre otros usuarios. Estas tomas resisten tensiones de 110 220 y consumos entre los 15 A y 30 A.



Figura No. 3.42 Tipos de tomas trifásicas y monofásicas clásicas.

Fuente: Elementos en una instalación . (2019) Disponible:

<http://aprendeelectricidad.eebly.com/elementos-en-una-instalacioacuten.html>

<http://.cambre.com.ar/productos/listado.php/categoria/7/subcategoria/16>.

En la figura No. 3.43 se ilustra un esquema de la instalación de un circuito eléctrico sencillo de tipo monofásico.

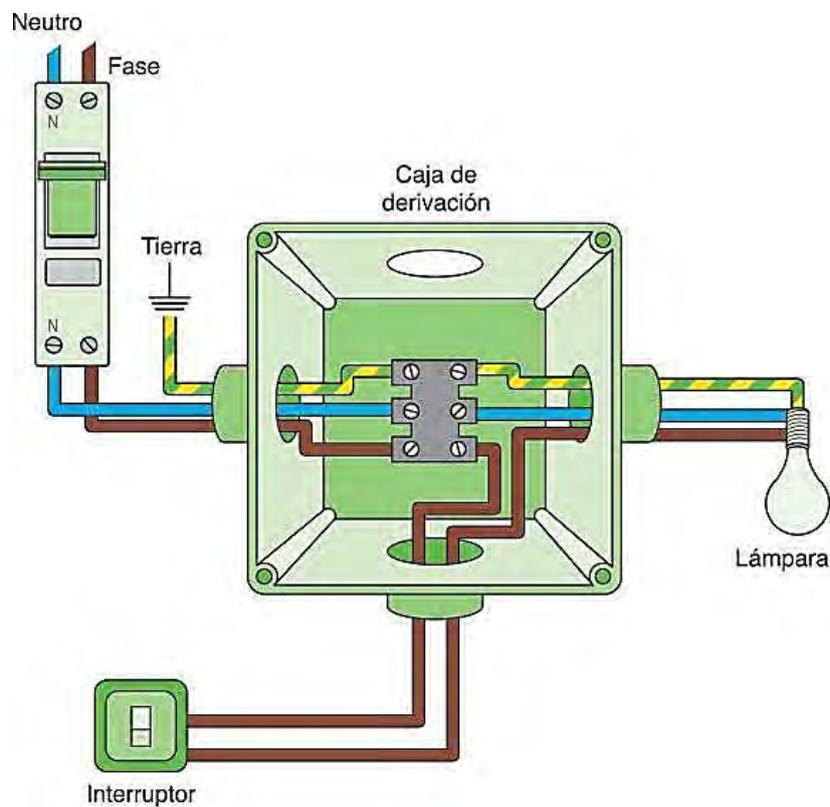
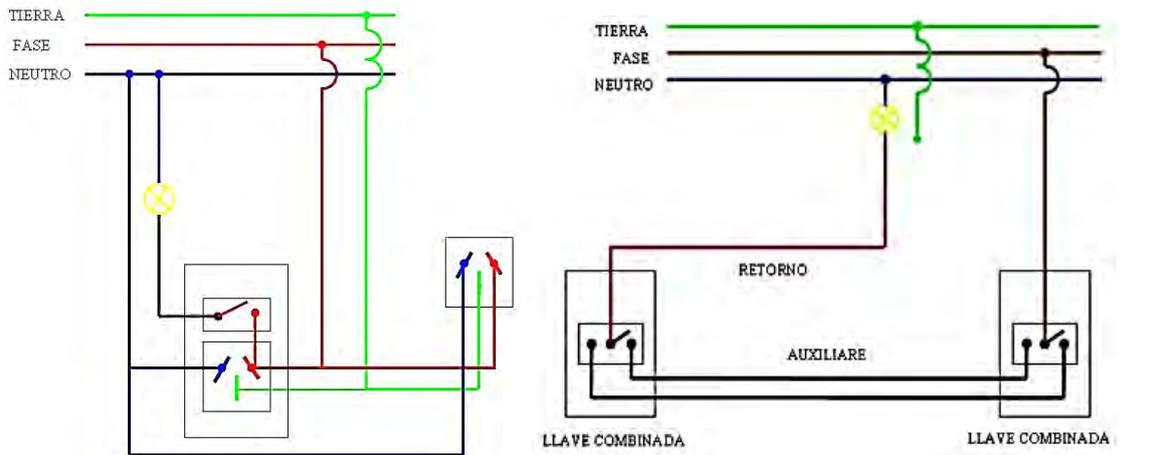


Figura No. 3.43 Esquema de la instalación de un circuito eléctrico sencillo de tipo monofásico.

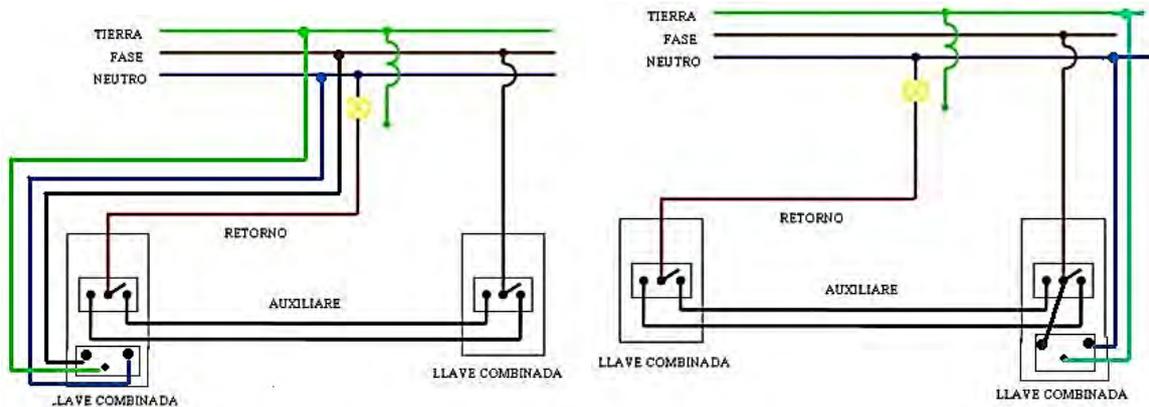
Fuente: Instalación eléctrica básica. (2019). Disponible: http://.taringa.net_posts_hazlo-tu-mismo_14128010_Instalacion-electrica-basica-videos-tutoriales.html.

Existe una gran diversidad de variedades de conexiones entre las diferentes tomas que hacen parte de una instalación eléctrica interna, con el propósito de optimizar el aprovechamiento de las mismas. En la figura No. 3.44 se indican algunas de estas conexiones, de tipo monofásicas.



a.) Toma a partir de otra toma

b.) Llaves combinadas caso 1



c.) Llaves combinadas caso 2

d.) Llaves combinadas caso 3

Figura No. 3.44 Diversidad de interconexiones internas.

Fuente: Electricidad. (2019) Disponible: http://hogar.yoreparo.com_electricidad_sacar-enchufe-de-interruptor-simple-t1001645.html.

En la figura No. 3.45 se hace una representación de un esquema típico de distribución de la red eléctrica de un edificio.

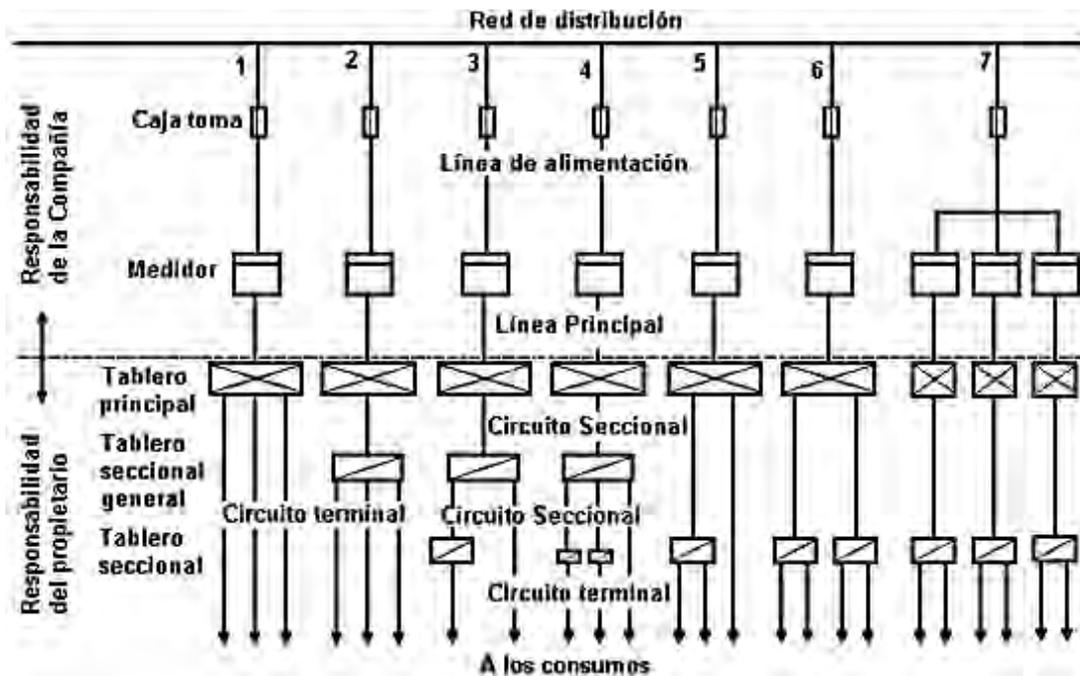


Figura No. 3.45 Esquema típico de distribución de la red eléctrica de un edificio.

Fuente: Instalaciones eléctricas. (2019). Disponible:

<https://www.monografias.com/trabajos102/instalacion-electrica/instalacion-electrica.shtml>

3.4.5 Redes eléctricas residenciales

Las redes eléctricas residenciales son aquellas redes internas que utilizan los hogares u otros consumidores menores, para la distribución de la energía eléctrica que le suministra las redes exteriores de las empresas prestadoras de este servicio. Gran parte de los aspectos que a continuación se relacionan para las redes eléctricas residenciales, también corresponden a las redes eléctricas de los grandes consumidores, con variación fundamental en que son más robustos en su dimensionamiento y estructuración.

3.4.5.1 Tipos de redes

Estas redes pueden ser monofásicas o trifásicas. El voltaje en estas redes es de baja tensión 110 220 ⁽¹⁵⁾.

Las redes monofásicas cuentan con tres cables conductores, dos para suministrarle corriente eléctrica (fase y neutro) a los equipos y el otro de protección (tierra). En la figura No. 3.46 se representa un esquema simplificado de una red eléctrica monofásica.

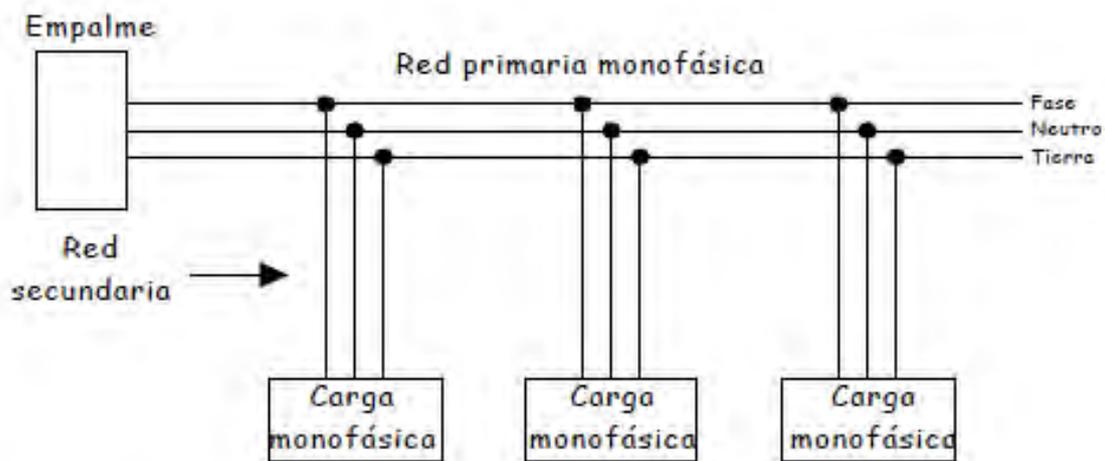


Figura No. 3.46 Red eléctrica residencial monofásica.

Fuente: Gonzáles, C., *Concepto generales de Redes eléctricas*, Inacap, Santiago Chile, 2017, p. 3.

Las redes trifásicas cuentan con cuatro o cinco cables conductores. Las de cuatro cables tres son de fases y uno de tierra, y las de cinco cables se le adiciona un cable para neutro. En la figura No. 3.47 se representa un esquema simplificado de una red eléctrica trifásica, donde se puede apreciar la conexión de una carga (equipo) monofásico, otra trifásica con cuatro cables y otra trifásica con cinco.

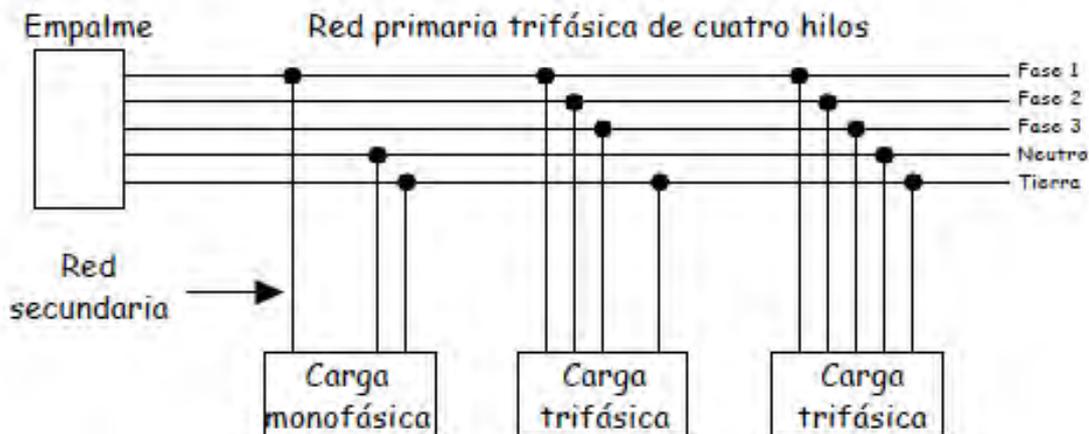


Figura No. 3.47 Red eléctrica residencial trifásica.

Fuente: Gonzáles, C., *Concepto generales de Redes eléctricas*, Inacap, Santiago Chile, 2017, p. 4.

3.4.5.2 Transformadores de distribución

Los transformadores encargados de la distribución de la energía eléctrica a las redes residenciales pueden ser de instalación *tipo poste* o *de tipo pedestal* o *de tipo subterráneo*. El rango de los niveles de voltajes que reciben estos transformadores se encuentra entre los 15 a 35 , dependiendo de la subestación de distribución a la cual pertenece, y entregando niveles de

volatajebajos (110 220 , entre otros). En la figura No. 3.48 se ilustran una imágenes las cuales indican algunos transformadores monofásicos y otros trifásicos. ⁽¹⁶⁾



a). Tranformadores monofásicos.



b.) Transformador Trifásico

c.) Transformador Monofásico Trifásico.

Figura No. 3.48 Tipo de transformadores de distribución para redes electricas residenciales.

Fuente: Catálogos *Transformadores tipo poste*”, Prolec General Electric, 2016 *Transformadores*” Promelsa, 2017.

Los niveles de de voltaje que manejan estos transformadores de distribución al usuario final, depende del consumo de la zona a cubrir. En la tabla No. 3.5 se relacionan algunos de los niveles de tensiones más frecuentes, así como el nivel básico de aislamiento al impulso (NBAI) de estos transformadores de distribución.

	MONOFASICOS	TRIFASICOS	NBAI
Capacidad (KVA)	5, 10, 15, 25, 37.5 50, 75, 100, 167	15, 30, 45, 75 112.5, 150	
Tensiones en el Primario(V) Clase 15 KV	13200 13200YT/7620	13200	95 KV
Clase 25 KV	23000 22860YT/13200	23000	95 KV
Clase 34.5 KV	33000 33000YT/19050	33000	150 KV
Tensiones en el Secundario (V)	120/240	220Y/127 440Y/254	125 KV 200 KV 150 KV 30 KV
Conexiones en el primario Conexiones en el secundario	----- Serie 3 hilos o paralelo	Delta Estrella	

Tabla No.3.5 Niveles de voltajes que manejan los transformadores de distribución de energía al usuario final.

Fuente: Catálogo *Transformadores tipo poste*, Prolec General Electric, 2018.

a.) *Transformadores tipo poste*

Los transformadores tipo poste se utilizan en redes eléctricas de distribución aérea públicas o privadas. Las normas que se deben cumplir, cuando su uso es privado (residencial, comercial o industrial), son las NOM-002 ANCE. En la figura No. 3.49 se muestra algunos ejemplos de este tipo de montaje.



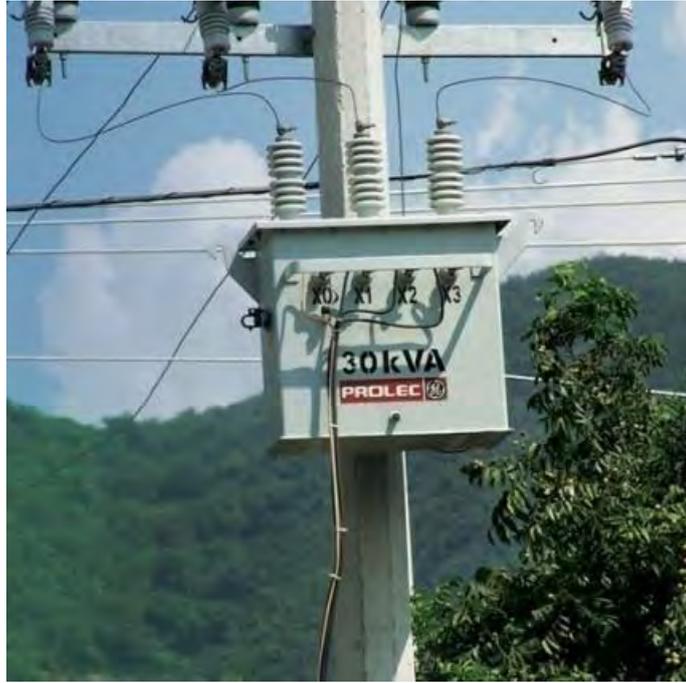


Figura No. 3.49 Transformadores de montaje tipo poste.

Fuente: Catálogo "Transformadores tipo poste", Prolec General Electric, 2018.

b.) *Transformadores tipo pedestal*

Los transformadores de montaje *tipo pedestal*, se encuentran protegidos de la intemperie mediante un gabinete provisto de puertas con cerraduras. Generalmente se encuentran ubicados en una base de concreto a nivel de piso (tipo pedestal). Este tipo de transformadores son empleados para acometidas eléctricas subterráneas de residencias, hoteles, edificaciones y demás usuarios de consumo moderado. En la figura No. 3.50 se muestra algunos ejemplos de este tipo de montaje.



Figura No.3.50 Transformadores de montaje tipo pedestal.

Fuente: Catálogo” Transformadores *tipo pedestal*”, Prolec General Electric, 2018

c.) *Transformadores tipo subterráneo*

Los transformadores de instalación tipo subterráneos se colocan dentro de una bóveda normalmente construidas de hormigón. Se utilizan frecuentemente en zonas muy habitadas, con el propósito de no presentar obstáculo alguno. Estos transformadores deben contar con protección de la inmersión (humedad). En la figura No. 3.51 se ilustra una imagen donde se puede apreciar la colocación de un transformador en una bóveda.



Figura No. 3.51 Transformador de montaje tipo subterráneo (bóveda).

Fuente: Catálogo de “Transformadores”, Rymel, 2018.

3.4.5.3 Línea de acometida eléctrica

La conexión entre el transformador de distribución correspondiente y la entrada eléctrica de la vivienda, generalmente se le denomina *línea de acometida*. Estas líneas de acometida eléctrica se pueden calificar según la tensión que soportan y según el tipo de tendido con que llegan a la entrada eléctrica de la vivienda. ⁽¹⁷⁾

a.) *Según la tensión:*

- *Acometida de baja tensión:* entre 127 , 200 , 550 como límite inferior y 600 o 1.000 como límite superior, dependiendo de la normatividad del país o región.
- *Acometida de alta tensión:* entre 600 o 1.000 como límite inferior y 5 , 25 , 40 como límite superior, dependiendo de la normatividad del país o región.

b.) Según el tipo de tendido:

- **Acometida aérea:** son más utilizadas para el caso de tendidos de baja tensión, para minimizar el riesgo de descargas eléctricas sobre lo que a traviese por debajo de ellas. El tendido se hace desde el poste donde se encuentra el correspondiente transformador distribuidor, hasta la entrada (contador) de la residencia de forma aérea. En la figura No. 3.52 se muestra un esquema general de este tipo de acometida.

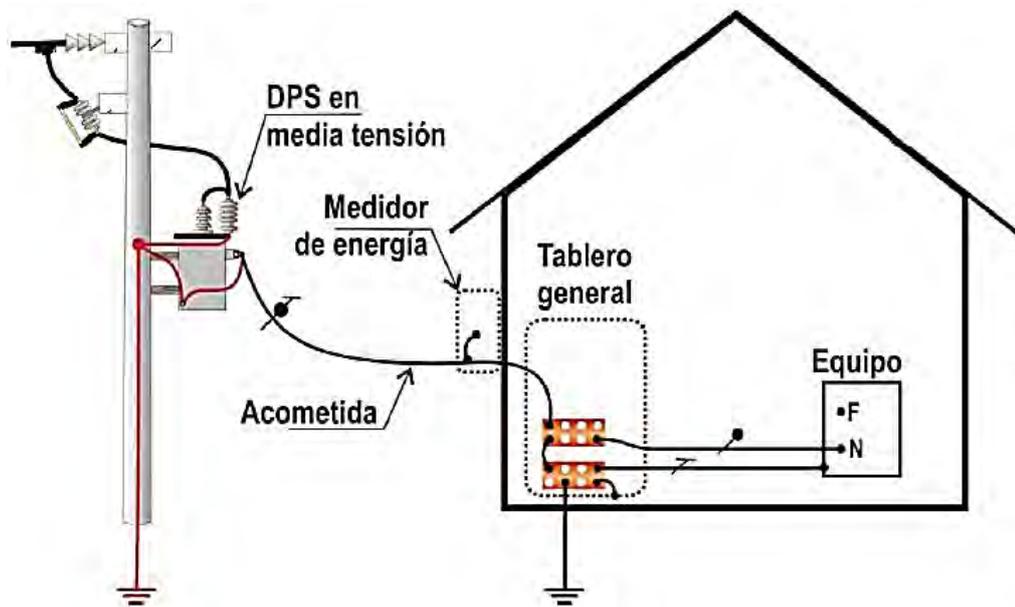


Figura No. 3.52 Esquema general de una acometida eléctrica aérea residencial.

Fuente: Tipo de cable para acometida. (2019). Disponible:

<http://reparacioncasera.blogspot.com.co/2014/06/tipo-de-cable-para-acometida.html>.

- **Acometida subterránea:** son más utilizadas para el caso de tendidos de alta tensión, previendo los riesgos de descargas eléctricas sobre lo que a traviese por debajo de ellas. Sin embargo también se utiliza para tendidos de baja tensión. El tendido se hace desde el transformador de distribución, ya sea de tipo poste o de tipo pedestal o de tipo bóveda, de la empresa suministradora de energía, por debajo de tierra a través de tubos P C y de cámaras (bóvedas) de instalación e inspección, hasta el inicio de la red interna de la residencia o edificio (contador). En la figura No. 3.53 se muestra un esquema general de una acometida eléctrica de tipo subterráneo.

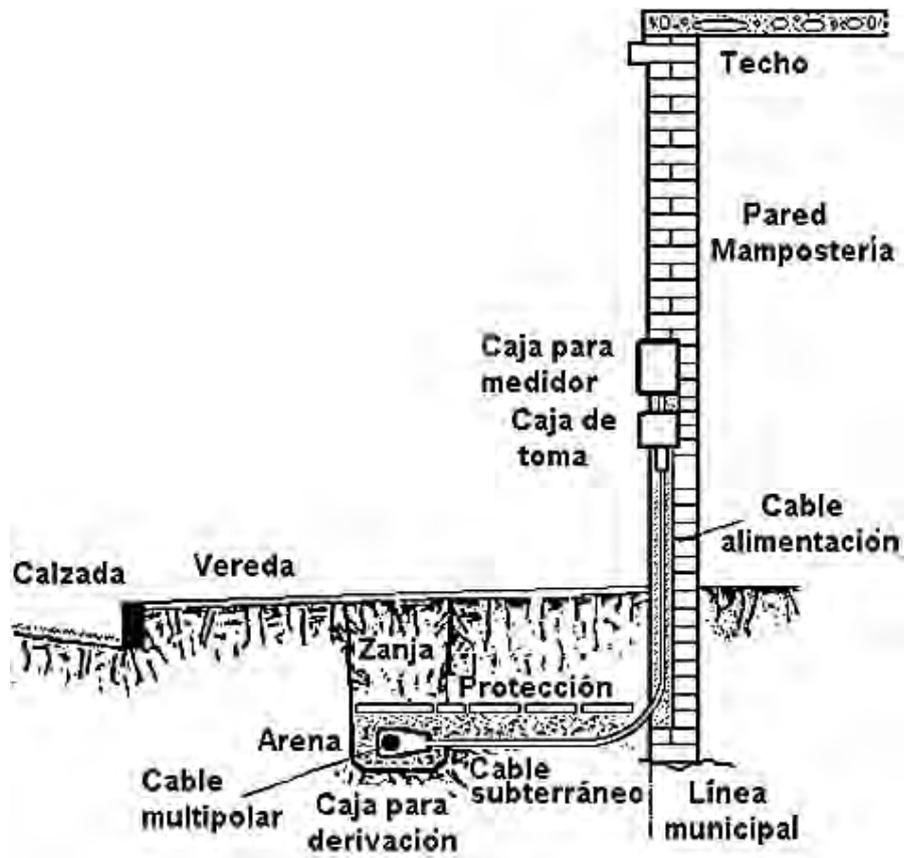
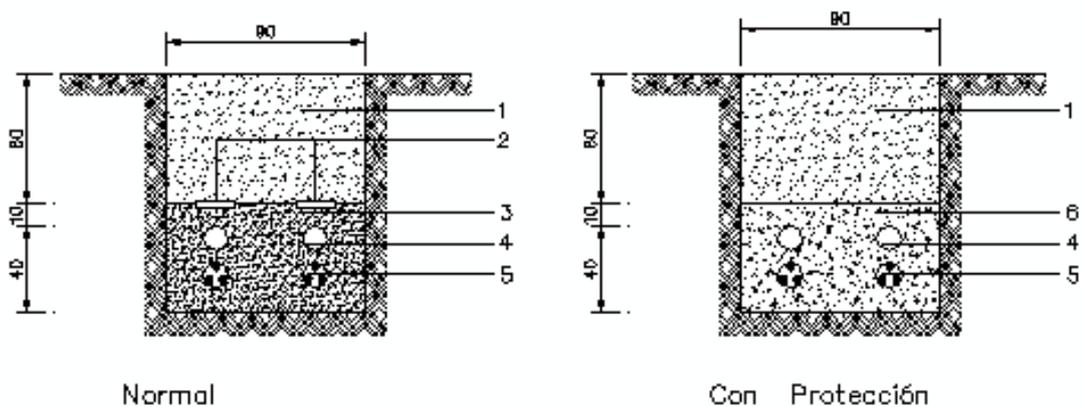


Figura No. 3.53 Esquema general de una acometida eléctrica de tipo subterráneo.

Fuente: Acometida eléctrica. (2019). Disponible:

<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/3114/2/121753.pdf>.

En la figura No.3.54 se muestra unos esquemas de una bóveda normal y otra con protección, comúnmente empleadas en el caso de las acometidas eléctricas, especialmente para baja tensión.



1: Relleno compacto 2: Ladrillo o cinta de señalización

3: Arena o tierra cribada 4: Tubo de P C

Figura No. 3.54 Esquemas de una bóveda normal y otra con protección.
 Fuente: Instalaciones eléctricas. (2019). Disponible: <http://portalbloques.com> imagenes 2-
 instalaciones electricidad electricidad 01.gif.

En la tabla No. 3.6 se relacionan el calibre de los conductores de fase y el diámetro de la tubería que se recomienda utilizar para acometidas tipo subterráneo de baja tensión, para diferentes sistemas eléctricos.

Sistema Eléctrico	Calibre del conductor de fase	Diámetro interno de la tubería
Monofásico bifilar	No. 8	3/4"
	No. 6	1"
Monofásico trifilar (bifásica trifilar)	No. 8	1"
	No. 6	1"
	No. 4	1 1/2"
Trifásica tetrafilar	No.8	1"
	No. 6	1 1/2"
	No.4	1 1/2"

Tabla No. 3.6 Calibres de conductores de fase y diámetro interno de la tubería para acometidas tipo subterráneo de baja tensión, para diferentes sistemas eléctricos.

Fuente: Reglamento electrotécnico para baja tensión instrucciones técnicas complementarias (itc)bt 01 a bt 51, 2018.

3.4.5.4 Cableado eléctrico

El tipo de cables eléctricos para las redes internas residenciales, así como para cualquier otra instalación eléctrica, depende del consumo que vaya a atender. En la tabla No.3.7 se relacionan la sección que debe tener los cables eléctricos, como mínimo, para soportar los consumos máximos ahí indicados.

Sección del cable mm ²	Intensidad máxima	Potencia máxima en 12 Vcc	Potencia máxima en 24 Vcc	Potencia máxima en 48 Vcc	Potencia máxima en 220 Vcc
1.5	11 A	132 W	264 W	528 W	2.420 W
2.5	15 A	180 W	360 W	720 W	3.300 W
4	20 A	240 W	480 W	960 W	4.400 W
6	25 A	300 W	600 W	1.200 W	5.500 W
10	34 A	408 W	816 W	1.632 W	7.480 W
16	45 A	540 W	1.080 W	2.160 W	9.900 W
25	59 A	708 W	1.416 W	2.832 W	12.980 W

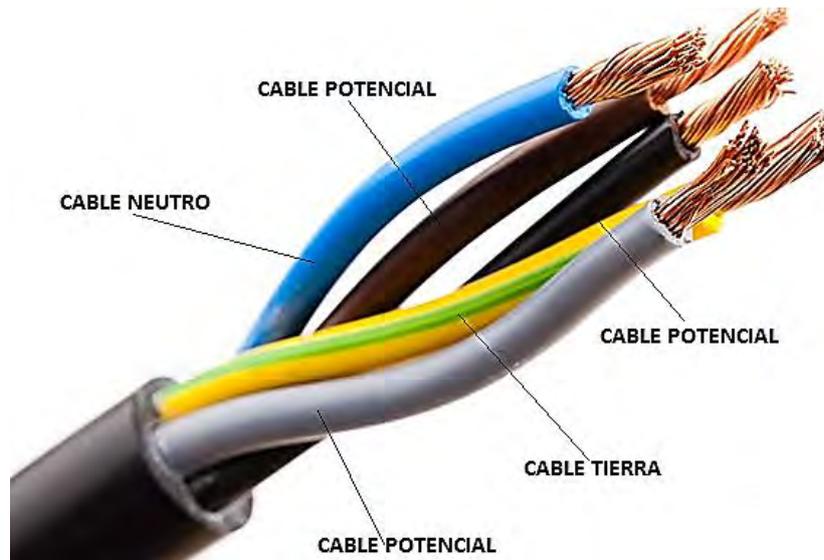
Tabla No. 3.7 Sección mínima de los cables eléctricos en función del consumo máximo a soportar.

Fuente: Diseño eléctrico residencial. (2019). Disponible:

<http://.monografias.com/trabajos100/diseño-electrico-casa/diseño-electrico-casa.shtml>

En la figura No. 3.55 se hace una representación de unas imágenes donde se muestra uno de los tipos de ductos (flexibles) y de unos tipos de cables eléctricos, tanto monofásicos como trifásicos, para los tendidos de las redes eléctricas internas de consumidores de baja tensión (edificios y residencias, entre otros).





a.) Tubo flexible

b.) Línea monofásica

c.) Línea trifásica

Figura No. 3.55 Tipo de tubos y de cables para las redes eléctricas internas de consumidores de baja tensión.

Fuente: Catálogo Normalización: Colores de los cables eléctricos en las instalaciones eléctricas. Faradayos, 2018..

3.4.5.5 Puesta a tierra

Todas las normas y manuales de instalaciones eléctricas en cualquier espacio, incluyendo el de los edificios y residencias, contemplan la necesidad de instalar sistemas de *puesta a tierra*, como protección contra contactos con los elementos activos de las respectivas redes eléctricas.⁽¹⁸⁾

En el caso de los edificios y residencias se instalan sistemas de puesta a tierra, asociados de *interruptores diferenciales* de alta sensibilidad, para asegurar la protección de las personas.

La *puesta a tierra* consiste en la conexión directa de todas las partes metálicas de una red eléctrica residencial, incluyendo las de los equipos y elementos que se interconecten a la red, con uno o varios electrodos enterrados en el suelo. El propósito fundamental de la *puesta a tierra* es disminuir la posibilidad de la existencia de tensiones entre los diferentes materiales metálicos y entre éstos y el suelo, superiores a 24 voltios para sitios húmedos o 50 voltios para sitios secos. Estos valores son los máximos que puede soportar el cuerpo humano sin peligro de lesiones graves. En la figura No. 3.56 se muestra el detalle de una arqueta puesta a tierra, donde el espesor del electrodo *copper eld* generalmente es de 5/8" y de 3 metros de longitud.

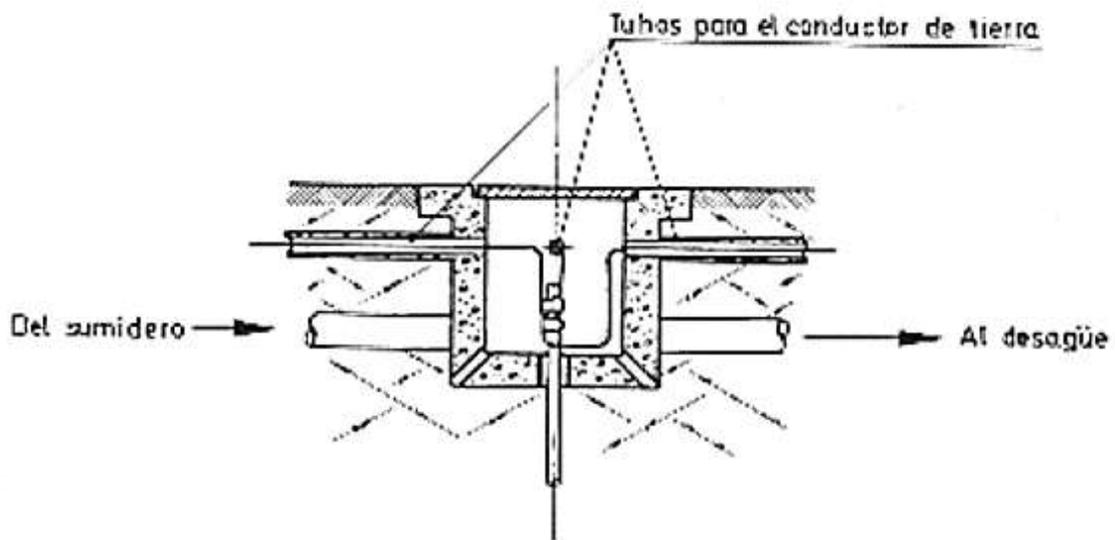
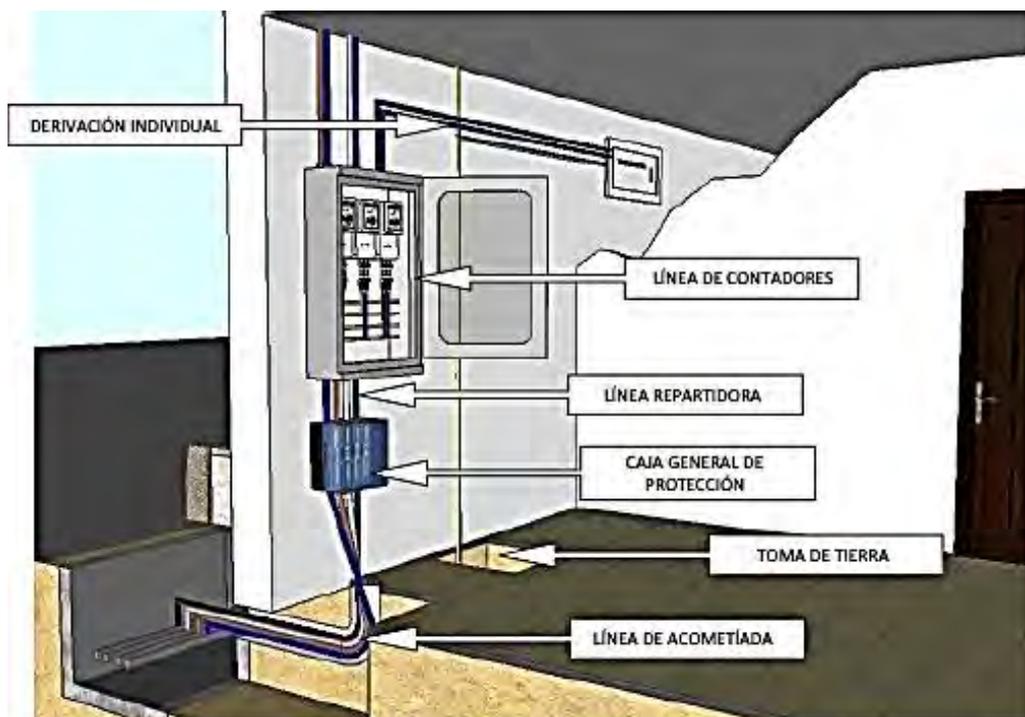


Figura No. 3.56 Muestra en detalle de una arqueta puesta a tierra,
 Fuente: Static electricity: Loading and Unloading of road tankers. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. 2018.

3.4.5.6 Tendido global de una red eléctrica residencial

Con propósito de tener una visión global de la estructura de la entrada y del tendido interior que podría tener una red eléctrica de una residencia, en la figura No. 3.57 se ilustra unos bosquejos de estas instalaciones. En la parte superior se muestra la red de entrada y en la inferior el tendido interior de la red eléctrica residencial.



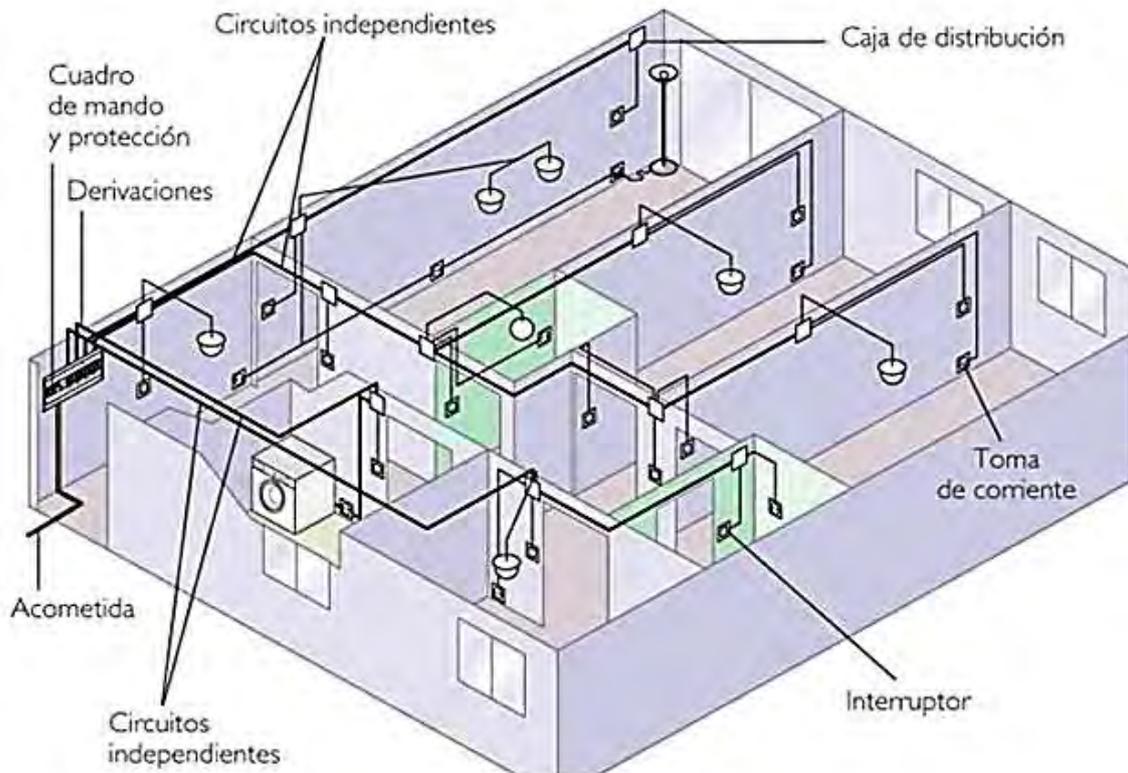


Figura No. 3.57 Estructura típica de la entrada y del tendido interior que podría tener una red eléctrica de una residencia.

Fuente: Diseño eléctrico residencial. (2019). Disponible:

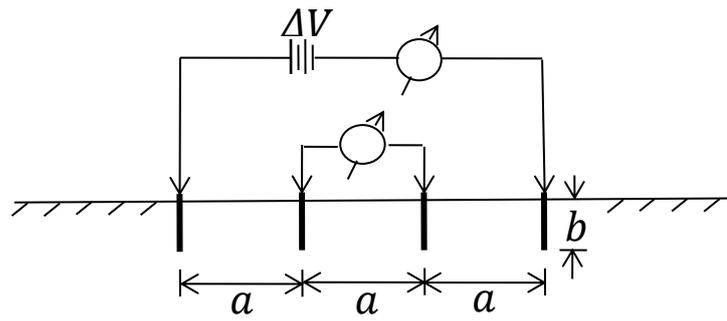
http: .monografias.com trabajos100 diseno-electrico-casa diseno-electrico-casa.shtml ixzz4alnc0N8a.

3.5 Resistividad del terreno

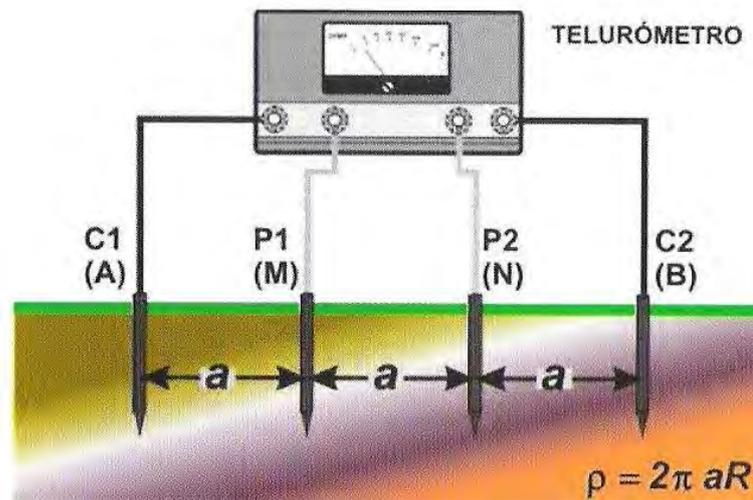
Para realizar la *puesta a tierra*, en cualquiera de los casos, es importante escoger un terreno cuya naturaleza presente la menor resistividad posible, lo cual permitirá mejorar la conductividad del sistema de tierra.

Existen diferentes formas para medir la resistividad del suelo, siendo una de ellas el método tetraelectródico de enner, el cual consiste en enterrar cuatro electrodos, de igual longitud y de manera lineal, con similar distancia entre sí, y la realización del siguiente procedimiento (ver figura No. 3.58):

- Se aplica una diferencia de tensión entre los dos electrodos exteriores, mediante una batería o una fuente de tensión DC.
- Se mide la tensión existente entre los electrodos intermedios () y la intensidad de corriente que circula entre los dos electrodos exteriores(I), mediante un *Telurómetro*.



a.) Diagrama de medición



b.) Imagen montaje de medición

Figura No. 3.58 Montaje de medición de la resistividad del suelo.

Fuente: Mediciones Resistividad.(2019). Disponible: <http://medicionresistividad.blogspot.com.co>

Con las dimensiones y las mediciones de voltaje y corriente obtenidas se calcula la resistividad del suelo correspondiente mediante la ecuación 3.2.⁽¹⁹⁾

$$(3.2) \eta = \frac{4\pi aR}{\left[1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}\right]}$$

Dónde:

η : resistividad del suelo ($\Omega.m$)

a : distancia entre electrodos adyacentes (m)

b : profundidad de enterrado de los electrodos (m)

R : resistencia eléctrica : V / I (Ω)

En el caso de que $a \gg b$, entonces

$$\langle 3.3 \rangle \rho \approx 2\pi a R$$

Con el propósito informativo, en la tabla No. 3.8 se relacionan el rango de los valores de resistividad que presentan algunos de los terrenos típicos según su naturaleza.

Características del Terreno (Naturaleza)	Resistividad (Ohmios. Metro)
Pantanosos	Menor de 30
Limo	20 a 100
Humos	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y Arcillas compactas	100 a 200
Margas del Jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3.000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 5.000
Suelo pedregoso desnudo	1.500 a 3.000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1.000 a 5.000

Calizas agrietadas	500 a 1.000
Pizarras	50 a 300
Roca de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedente de alteración	1.500 a 10.000
Granito y gres muy alterado	100 a 600

Tabla No. 3.8 Resistividad de los terrenos según su naturaleza.

Fuente: Unidad didáctica 10 *puesta a tierra de las instalaciones*, Marcombo, 2018, p.271.

3.6 Resistencia puesta a tierra

Para calcular la resistencia puesta a tierra, para el caso del sistema de tierra tipo malla, generalmente se aplica la fórmula de Svera, la cual se indica en la ecuación 3.4. ⁽²⁰⁾

$$(3.4) R_T = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Donde:

R_T : resistencia puesta a tierra (Ω).

ρ : resistividad del terreno (uniforme) ($\Omega.m$).

L_T : longitud total de los cables conductores enterrados (m).

A : área total abarcada por la malla (m^2).

h : profundidad de entierro de la malla de tierra (m).

Como se puede observar de la expresión indicada en la ecuación 3.4, a medida que la cantidad de cable conductor se aumenta, se reduce sustancialmente la resistencia puesta a tierra y en buena parte, también, cuando el área de cubrimiento de la malla y o la profundidad de entierro de la malla se incrementan.

Ejemplo No. 3.1

Calcular la *resistencia puesta a tierra* de un sistema de tierra tipo malla, para una subestación eléctrica de mediano potencial, con las siguientes características estructurales y dimensionales:

- Longitud de la malla: 45 m.
- Ancho de la malla: 15 m.
- Espacio entre los cables conductores: 5m (uniforme).
- Profundidad de enterramiento: 0.8m
- Resistividad del terreno: 350 (ohmios-metro).

Solución:

Configuración de la malla, propuesta inicialmente (ver figura No. 3.59):

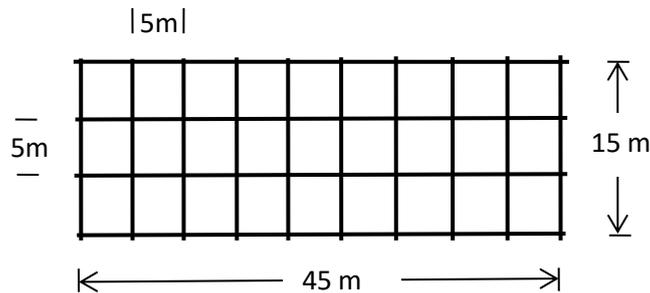


Figura No.3.59 Configuración de la malla con las condiciones iniciales

Se aplica la ecuación 3.4:

$$R_{\Gamma} = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right]$$

Longitud total de los cables conductores enterrados:

$$L_T = (10)(15 \text{ m}) + (4)(45 \text{ m}) = 330 \text{ (m)}$$

rea total de la malla:

$$A = (15 \text{ m})(45 \text{ m}) = 675 \text{ (m}^2\text{)}$$

Reemplazando valores:

$$R_{\Gamma} = 350 \left[\frac{1}{300} + \frac{1}{\sqrt{20(675)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.8\sqrt{20/675}} \right) \right] \approx 6.81 \Omega$$

Este valor de la resistencia puesta a tierra se encuentra por fuera de los valores recomendados para un sistema de tierra de una subestación de mediano potencial

eléctrico (1 a 5 ohmios). Para lograr reducir este valor calculado existen varias opciones, entre ellas la de aumentar la longitud del tendido del cable conductor enterrado si variar el área de cubrimiento, para lo cual habría que reducir la separación entre los cables conductores, por ejemplo a 3 metros, lo que daría 16 cables conductores posesionados en forma vertical y 6 en forma horizontal. Entonces:

$$L_T = (16)(15 \text{ m}) + (6)(45 \text{ m}) = 510 \text{ (m)}$$

$$R_T = 350 \left[\frac{1}{510} + \frac{1}{\sqrt{20(675)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.8\sqrt{20/675}} \right) \right] \approx 6.34 \Omega$$

No fue suficiente el incremento de la longitud de los cables conductores enterrados con la sola reducción del distanciamiento entre ellos. Considérese la incrementación del área de cubrimiento de la malla con separación de 3 metros entre los cables. Supóngase un área de 51 metros de longitud y 21 de ancho. Así mismo se incrementa la profundidad del enterrado a 1.2 metros.

$$L_T = (18)(21 \text{ m}) + (8)(51 \text{ m}) = 786 \text{ (m)}$$

$$A = (21 \text{ m})(51 \text{ m}) = 1.071 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$R_T = 350 \left[\frac{1}{786} + \frac{1}{\sqrt{20(1.071)}} \left(1 + \frac{1}{1 + 1.2\sqrt{20/1.071}} \right) \right] \approx 4.88 \Omega$$

Este valor ya se encuentra dentro del rango recomendado del valor de la resistencia puesta a tierra que debe tener el sistema de tierra para una subestación eléctrica. Como se puede concluir, son diversas las alternativas a considerar para poder determinar las características estructurales y dimensionales de un sistema puesta a tierra que cumpla con las normas mínimas de seguridad, dependiendo de las disponibilidades y factibilidades de espacio y demás requerimientos que demande la implementación de dicho sistema.

En la figura No. 5.60 se representa la estructura final de la malla para poder lograr una resistencia puesta a tierra menor de los 5 ohmios calculados, para el suelo considerado.

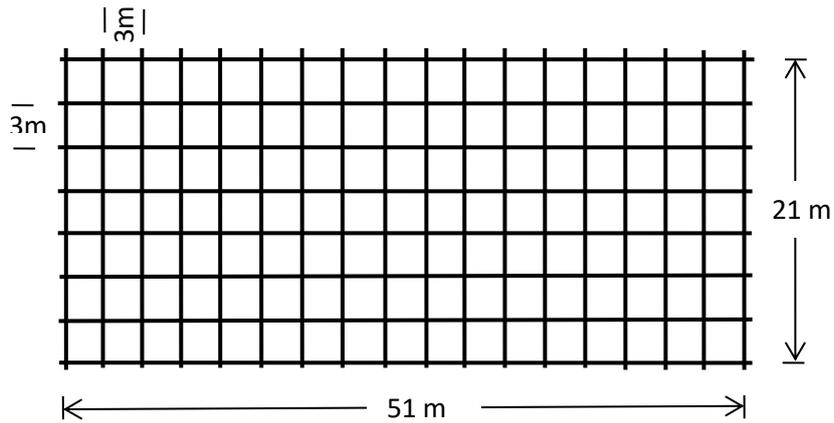


Figura No. 5.60 Estructura final de la malla requerida.
 Fuente: EPM, *Resistencia a puesta a Tierra*, 2018, p. 5.

Para el caso de que el sistema puesta a tierra sea un *puesta a tierra*, en función de la resistividad del terreno y de las características estructurales del electrodo que se utilice. y de su posicionamiento en el terreno.

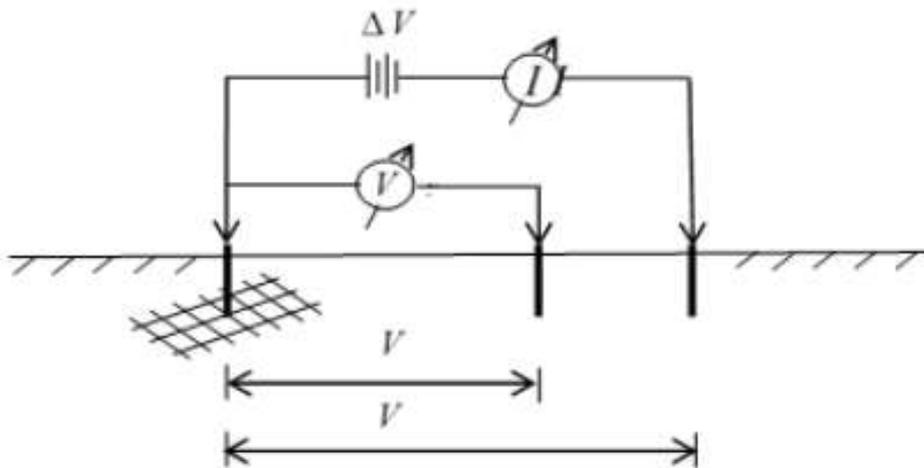
En la tabla No. 3.9 se indican estas formulas.

Tipo de electrodo	Resistencia de tierra (R en Ohmios)
Placa enterrada	$R = 0.8 \frac{\eta}{P}$
Pica vertical	$R = \frac{\eta}{L}$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = 2 \frac{\eta}{L}$
<p>η : Resistividad del terreno (Ohmios.metro)</p> <p>P : Perimetro de la placa (m)</p> <p>L : Longitud de la placa o del conductor (m)</p>	

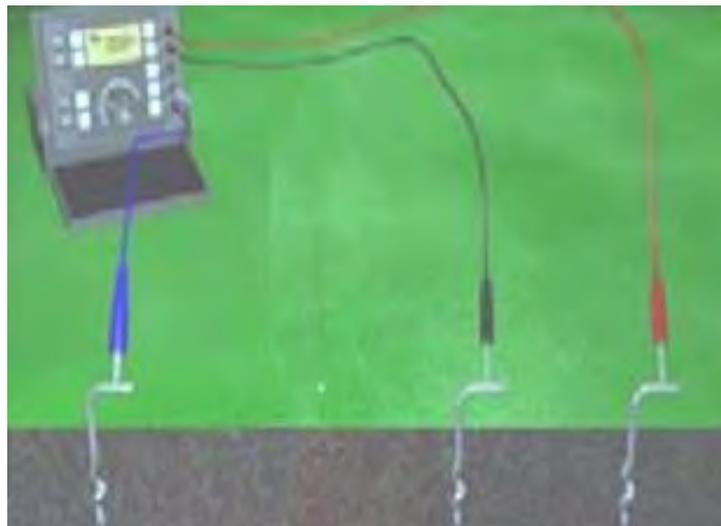
Tabla No. 3.9 Formulas para calcular de la resistencia de la puesta a tierra.
 Fuente: Unidad didáctica 10 *puesta a tierra de las instalaciones*, Marcombo, 2018, p.277.

3.7 Medición de la resistencia puesta a tierra

Antes de poner en funcionamiento una subestación eléctrica es indispensable constatar que la resistencia puesta a tierra, sea la indicada de acuerdo al nivel de potencial que esta maneje. Para la medición de la resistencia puesta a tierra, generalmente se utiliza el método denominado "caída de potencial", dado por el estandar IEEE 81, cuya estructura de montaje se indica en la figura No. 3.61. ⁽²¹⁾



a.) Diagrama de medición.



b.) Imagen de montaje de medición.

Figura. No. 3.61 Montaje para la medición de resistencia puesta a tierra.

Fuente: Puesta a tierra. (2019).

Disponibile:<http://li.inormas.micodensa.com> Norma lineas aereas urbanas distribucion puesta tierra la400 puestas tierra.

La distancia del electrodo auxiliar de voltaje (d_v) debe ser un 61.8 % de la distancia del electrodo auxiliar de corriente (d_c), para un terreno uniforme. Estos electrodos auxiliares deben estar colocados en la misma dirección con el electrodo de medición colocado a la malla. Además para reducir la influencia entre los electrodos auxiliares y la malla, el electrodo de corriente debe posesionarse a una distancia de por lo menos de 6 veces superior al dimensionamiento de la malla..

El procedimiento de la medición consiste en hacer fluir una corriente eléctrica entre la malla del sistema puesta a tierra y el electrodo auxiliar de corriente, al aplicarle una diferencia de tensión entre la malla y este electrodo. El valor de esta corriente y del voltaje existente, este último entre la malla y el electrodo auxiliar de voltaje, son medidos a través del equipo de medición de resistencia puesta a tierra. Se recomienda realizar varias mediciones (por lo menos tres) y sacar un promedio de las mismas.

En la figura No. 3.62 se muestra uno de los diferentes tipos de conjunto de dispositivos empleados para la medición de tierra puesta a tierra, así como algunos de los medidores existentes en el mercado.





Figura. No.3.62 Imágenes de medidores de resistencia puesta a tierra.
 Fuente: Manuales "Equipos para medición de la resistencia de puesta a tierra", Sonel Secom, 2018.

Las normas técnicas IEC 600364-4-442; ANSI IEEE 80; NTC 2050; NTC 4552, entre otras, han considerado como referencia, para diferentes aplicaciones, como valores máximos de la resistencia puesta a tierra los indicados en la tabla No. 3.10.

Aplicaciones	Valores máximos de la resistencia puesta a tierra
Estructuras de líneas de transmisión	20 ohmios
Subestaciones de alta tensión	1 ohmio
Subestaciones de mediana tensión	5 ohmios
Subestaciones de baja tensión	10 ohmios
Protección contra rayos	10 ohmios
Neutro de acometida de baja tensión	25 ohmios

Tabla No. 3.10 Valores máximos de la resistencia puesta a tierra según aplicación.

Fuente: Normas Técnicas RA6-015, "Medida de Resistencia a Puesta a Tierra", EPM, 2016, p. 5.

Existen varias fórmulas para hacer un estimativo de la resistencia de la *puesta a tierra*, en función de la resistividad del terreno y de las características estructurales del electrodo que se utilice. y de su posicionamiento en el terreno. En la tabla No. 3.11 se indican estas fórmulas.

Tipo de electrodo	Resistencia de tierra (R en Ohmios)
Placa enterrada	$R = 0.8 \frac{\eta}{P}$
Pica vertical	$R = \frac{\eta}{L}$
Conductor enterrado horizontalmente	$R = 2 \frac{\eta}{L}$
η : Resistividad del terreno (Ohmios.metro) P : Perimetro de la placa (m) L : Longitud de la placa o del conductor (m)	

Tabla No. 3.11 Formulas para calcular de la resistencia de la puesta a tierra.
Fuente: Unidad didáctica 10 Puesta a tierra de las instalaciones”, Marcombo, 2018, p.277.

3.8 Fuerza magnética entre cables eléctricos rectos paralelos

Sí se tienen dos cables conductores paralelos, que corresponden a una *línea de transmisión*, separados por una distancia: d uniforme entre ellos, por los cuales circula una corriente: I_1 e I_2 , respectivamente, como se indica en la figura No. 3.63, se va ejercer unas fuerzas magnéticas entre ellos, debido al campo magnético que generan las respectivas corrientes que fluyen por los mismos.

A continuación, se describe la forma de poder calcular estas fuerzas magnéticas, donde la longitud de los cables, que es afectada por los respectivos campos magnéticos, es de: L .⁽²²⁾

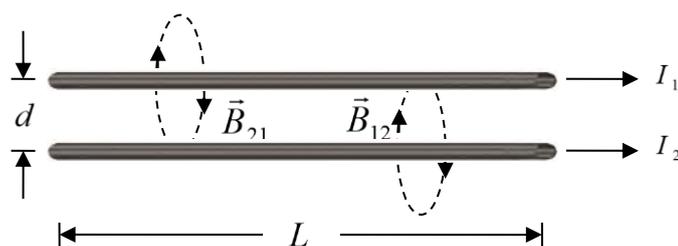


Figura 3.63 Fuerzas magnéticas entre dos cables rectos paralelos con corriente.

- Sea \vec{F}_{m21} la fuerza magnética sobre el conductor 2, debido al campo magnético (\vec{B}_{21}) producido por la corriente que pasa por el conductor: 1 y que afecta al conductor 2.

Aplicado la ecuación:

$$\langle 3.5 \rangle \vec{F}_m = I\vec{L} \times \vec{B}$$

Por lo tanto, la magnitud de \vec{F}_{m21} :

$$F_{m21} = |\vec{F}_{m21}| = I_2 |\vec{L}_2 \times \vec{B}_{21}| = I_2 L_2 B_{21} \text{sen} 90^\circ = I_2 L B_{21}$$

En los puntos donde el campo magnético afecta al cable, existe un ángulo entre este y la longitud de este de: 90° .

Aplicando la ley de Ampere:

$$\langle 3.6 \rangle B_{21} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

Entonces:

$$\langle 3.7 \rangle F_{m21} = \mu_0 L \frac{I_1 I_2}{2\pi d}$$

- Sea \vec{F}_{m12} la fuerza magnética sobre el conductor: 1 debido al campo magnético (\vec{B}_{12}) producido por la corriente que pasa por el conductor: 2 y que afecta al conductor 1

Por lo tanto, la magnitud de \vec{F}_{m12} :

$$F_{m12} = |\vec{F}_{m12}| = I_1 |\vec{L}_1 \times \vec{B}_{12}| = I_1 L_1 B_{12} \text{sen} 90^\circ = I_1 L B_{12}$$

Aplicando la ley de Ampere:

$$\langle 3.8 \rangle B_{12} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

Entonces:

$$(3.9) F_{m12} = \mu_0 L \frac{I_1 I_2}{2\pi d}$$

Si I_1 e I_2 tienen la misma dirección, existen unas fuerzas magnéticas de atracción.

Si I_1 e I_2 tienen la dirección opuesta, existen unas fuerzas magnéticas de repulsión.

Ejemplo No. 3.2

Para interconectar un generador de corriente con una carga, se utiliza una línea de transmisión conformada por dos cables conductores abiertos paralelos, por los cuales fluye una corriente: $I = 5 \text{ A}$, por cada uno de ellos, en sentido contrario (de ida y de retorno). Determinar la separación mínima que debe existir entre los cables, para que no exista más de: $50 (\mu\text{N}/\text{m})$ de fuerza magnética, por unidad de longitud, ejercida entre ellos.

Solución:

Aplicando la ecuación 5.9, suponiendo que los cables se encuentran en un tendido aéreo (aire):

$$\frac{F_{m21}}{L} = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi d} = (4\pi \times 10^{-7}) \frac{(5)(5)}{2\pi d}$$

$$d = \frac{50 \times 10^{-7}}{(50)(10^{-6})} = 10 \text{ cm}$$

Ejemplo No. 3.3

Se tiene una línea de transmisión trifásica, en el aire, conformada por tres conductores, cuya ubicación forma un triángulo equilátero como se indica en la figura No. 3.64. En un instante dado, los conductores: 1 y 2 conducen cada uno una corriente de 25 A en la dirección de: x y por el conductor 3 retorna esas dos corrientes. Determinar la fuerza magnética, por metro, que se ejerce sobre el conductor 3.

Solución:

Fuerza magnética sobre conductor 3:

$$\vec{F}_{m3} = \vec{F}_{m31} + \vec{F}_{m32}$$

Como la dirección de las corrientes va en sentido contrario, entonces las fuerzas magnéticas son de repulsión, sobre el plano donde se encuentran los conductores.

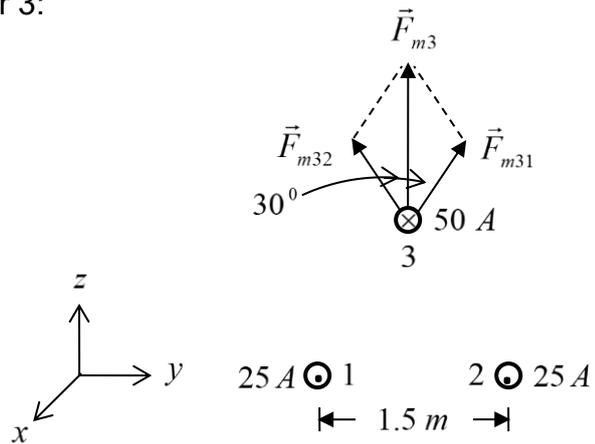


Figura No. 3.64 Fuerza magnética en un conductor de una línea de transmisión trifásica

Aplicando ecuación 5.7

$$F_{m31} = \mu_0 L \frac{I_1 I_3}{2\pi d} \Rightarrow \frac{F_{m31}}{L} = \mu_0 \frac{I_1 I_3}{2\pi d} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{(25)(50)}{2\pi \times 1.5} = 17 \times 10^{-3} \text{ (N/m)}$$

$$F_{m32} = \mu_0 L \frac{I_2 I_3}{2\pi d} \Rightarrow \frac{F_{m32}}{L} = \mu_0 \frac{I_2 I_3}{2\pi d} = 4\pi \times 10^{-7} \frac{(25)(50)}{2\pi \times 1.5} = 17 \times 10^{-3} \text{ (N/m)}$$

$$\frac{F_{m3}}{L} = \frac{F_{m31}}{L} \cos 30^\circ + \frac{F_{m32}}{L} \cos 30^\circ = 2(17 \times 10^{-3} \cos 30^\circ) = 2.94 \times 10^{-3} \text{ (N/m)}$$

$$\frac{\vec{F}_{m3}}{L} = \frac{F_{m3}}{L} \hat{a}_z = 2.94 \hat{a}_z \text{ (mN/m)}$$

3.9 Normas técnicas para las instalaciones eléctricas.

Son varias las instituciones y organizaciones que elaboran normas técnicas, en las cuales se contemplan algunas referentes a las de la resistencia puesta a tierra. Para el caso colombiano, una de las normas más referenciadas correspondientes a este tema, son las emitidas por el Ministerio de Minas y Energía, enmarcadas dentro el *Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas* (RETIE).

El objeto de este reglamento es *establecer las medidas tendientes a garantizar la seguridad de las personas, de la vida tanto animal como vegetal y la preservación del medio ambiente previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de origen eléctrico*, para lo cual establece las *exigencias y especificaciones que garanticen*

la seguridad de las instalaciones eléctricas con base en su buen funcionamiento la confiabilidad, calidad y adecuada utilización de los productos y equipos”, es decir, fija los parámetros mínimos de seguridad para las instalaciones eléctricas. ⁽²³⁾

Así mismo el RETIE, establece las responsabilidades que deben asumir *los diseñadores, constructores, interventores, operadores, inspectores, propietarios y usuarios de las instalaciones eléctricas, además de los fabricantes, importadores, distribuidores de materiales o equipos y las personas jurídicas relacionadas con la generación, transformación, transporte, distribución y comercialización de electricidad, organismos de inspección, organismos de certificación, laboratorios de pruebas y ensayos”.*

3.10 Redes Eléctricas Inteligentes

A partir de la primera década del siglo ^{XXI}, se ha venido fortalecido el interés del desarrollo e implementación de las denominadas *Redes eléctricas inteligentes* (REI) o *Smart grids*. Estas redes se fundamentan en los componentes de los sistemas eléctricos tradicionales, como son: generación, transmisión, distribución y consumo de la electricidad, adicionándole procedimientos de comunicaciones y control de funcionamiento. ^{(24), (25)}

Para este tipo de redes, la aplicación de procesamiento digital y comunicaciones se trasfiere a través del cableado de la misma red. El uso de redes eléctricas inteligentes implica la utilización de tecnología informática para la optimización de la generación y distribución de electricidad, con el fin de equilibrar mejor la oferta y la demanda entre productores y consumidores. Así mismo implica introducir tecnología en cada uno de los componentes de la red, lo que permite al usuario monitorear el comportamiento del suministro de energía, en tiempo real, y de esta forma conocer cualquier desvío de energía o falla y poder tomar las medidas o prevenciones respectivas. En la figura No. 3.65 se muestra la estructura básica de una Red Eléctrica Inteligente y en la figura No. 3.66 la imagen del panorama de una central de gestión de una RETIE. ^{(26), (27)}

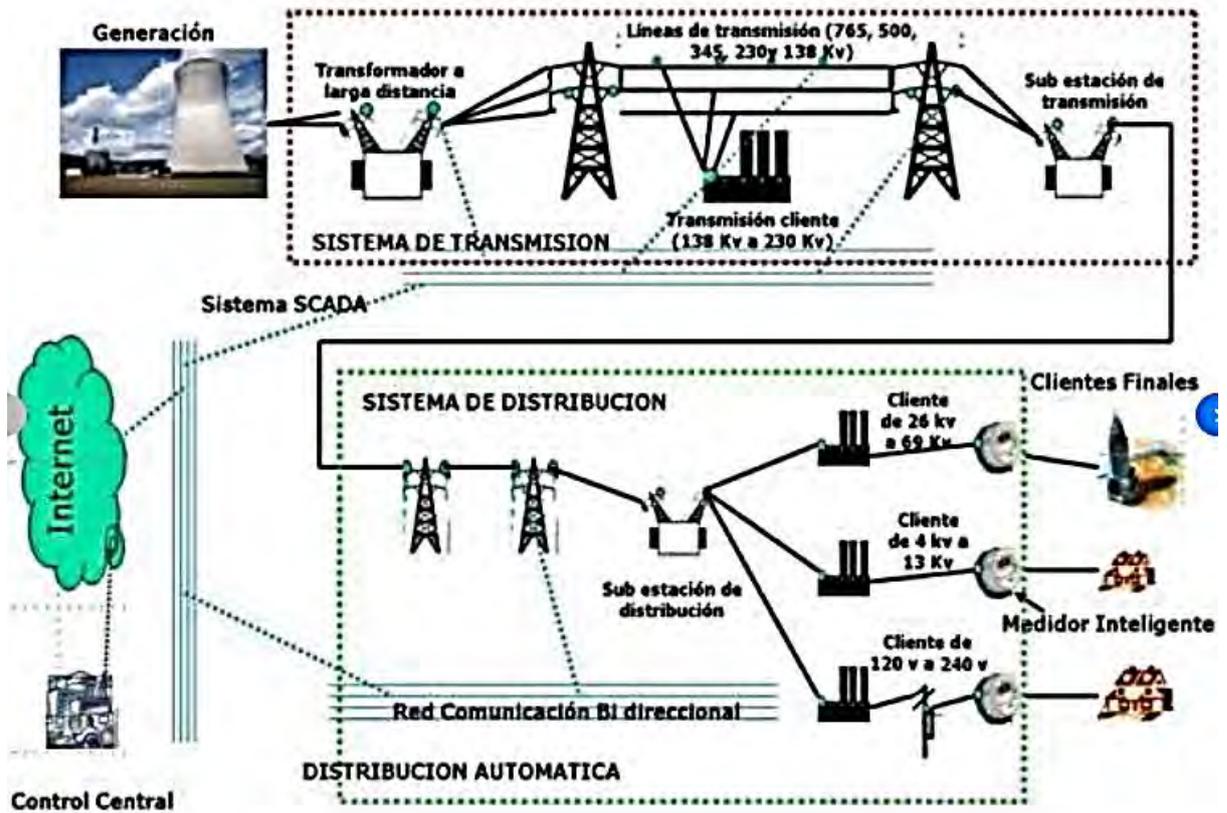


Figura No. 3.65 Arquitectura básica de una Red Eléctrica Inteligente.
 Fuente: Redes eléctricas inteligentes (REI) O Smart Grid-Monografias.com. Online . (2019).
 Disponible: <http://.monografias.com trabajos73 redes-electricas-inteligentes-smart-grid redes-electricasinteligentes-smart-grid.shtml>



Figura No.3.66 Panorama de una central gestión de una RETIE
Fuente: Electric Power Research Institute (EPRI). (2014). *Intelligent Grid Smart Grid Roadmap
Methodology and Lessons Learned*.

3.11 Redes de comunicación a través de líneas de potencia

3.11.1 Concepto y aspectos generales

Desde hace varias décadas ha existido el interés de globalizar el servicio de transmisión de datos a través de las líneas de las redes eléctricas, lo que se ha denominado las comunicaciones por líneas de potencia (PLC: *Power Line Communications*). En esencia lo que se pretende con los sistemas PLC, es transmitir datos simultáneamente con la señal AC a través de las mismas líneas conductoras de las redes eléctricas. Es decir, las redes PLC son, al mismo tiempo, redes de suministro eléctrico y de telecomunicaciones

En la década de los años 80, se incrementó los estudios de investigación relacionados con la utilización de las redes eléctricas como de transmisión de datos, en un solo sentido, en las bandas de frecuencias entre 5 Hz y 500 Hz, y a finales de los años 90, Suiza y Reino Unido, realizaron pruebas de transmisión de datos a través de las redes eléctricas en ambas direcciones.

Actualmente los desarrollos y las aplicaciones de esta tecnología PLC se ha limitado a servir áreas muy reducidas, tales como las de un edificio o un campus universitario, utilizando el cableado eléctrico de estos espacios como medio de transmisión de datos. Una de las sus aplicaciones más recurrentes consiste en la automatización del control de los dispositivos y equipos eléctricos y electrónicos, a través de la misma red eléctrica que están conectados.

Como se mencionó anteriormente, el principio de funcionamiento de las red PLC consiste en que por el mismo cable eléctrico se transmiten dos señales simultáneamente: una que corresponde a la de la energía eléctrica comercial con una tensión 220 o 120 a 50 o 60 Hz (norma europea o norma americana) y la otra a la de los datos que contienen la información, a muy bajas potencias desde los 3 Hz a los 500 Hz, para banda angosta y desde 1.6 MHz a los 30 MHz para banda ancha.

Para que los datos (señales digitales) se puedan transmitir en forma eficiente a través de las líneas de las redes eléctricas, estas se deben convertir en señales análogas, lo cual se logra modulándolas mediante métodos como: AS, FS y PS, para el caso de banda angosta, y para banda ancha empleando la técnica Espectro Ensanchado (SS: *Spread Spectrum*) o la de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)

Actualmente la tecnología más avanzada OFDM en PLC es la desarrollada por la Agencia Digital Creativa DS2, la cual permite alcanzar velocidades mayores de 200 Mbps y compatible con todas las tomas eléctricas residenciales. Adicionalmente con esta tecnología se puede lograr una alta seguridad en la información,

empleando encriptación dentro el propio chip 3DES, así como mejoramiento en la calidad de servicio (QoS)

Cuando son varios los dispositivos o equipos que se conectan al sistema PLC en un mismo espacio, su conexión equivale a la de una red de Ethernet, donde el medio de acceso es compartido, es decir se conectan a un concentrador, donde la velocidad de transmisión será repartida entre todos ellos sin que tenga necesariamente ser equitativa. ⁽²⁸⁾

3.11.2 Componentes básicos de la red interna PLC

Los principales componentes de la estructura de una red interna PLC residencial son los siguientes: ⁽²⁹⁾

- *Tramo de acceso o Back bone*: que corresponde al Centro de Servicios, donde se interconecta la Internet a un router IP, el cual a su vez está conectado al Servidor de la red y a los diferentes Centros de Transformación
- *Centro de transformación o instalación externa (outdoor)*: en el cual se transforma la intensidad de la señal eléctrica de la red, a través de un transformador, de media a baja tensión (220 V o 120 V). Este Centro dispone de un modem PLC de cabecera de alta velocidad, el cual convierte las señales de información (datos) en señales análogas que recibe de la Internet o del Servidor, para poder enviarlas por los cables de la red eléctrica de baja tensión a cada uno de los Pasarelas residenciales PLC. En el sentido contrario la conversión es de análoga a digital (datos).
- *Pasadera residencial o instalación interior (indoor)*: le corresponde servir a todos los espacios del edificio o residencias del área de cobertura (abonados), mediante la red eléctrica interna de cada uno de estos espacios donde se encuentran los abonados.
- *Modem de abonado*: el que dispone cada uno de los abonados de la red, el cual convierte las señales análogas de información, que recibe de la Pasadera, en señales de datos para ser entregadas al abonado digital. En el sentido contrario la conversión es de digital (datos) a análoga.

Con el propósito de complementar la ilustración, en la figura No. 3.67 se muestran dos vistas de la configuración básica de una red PLC residencial.

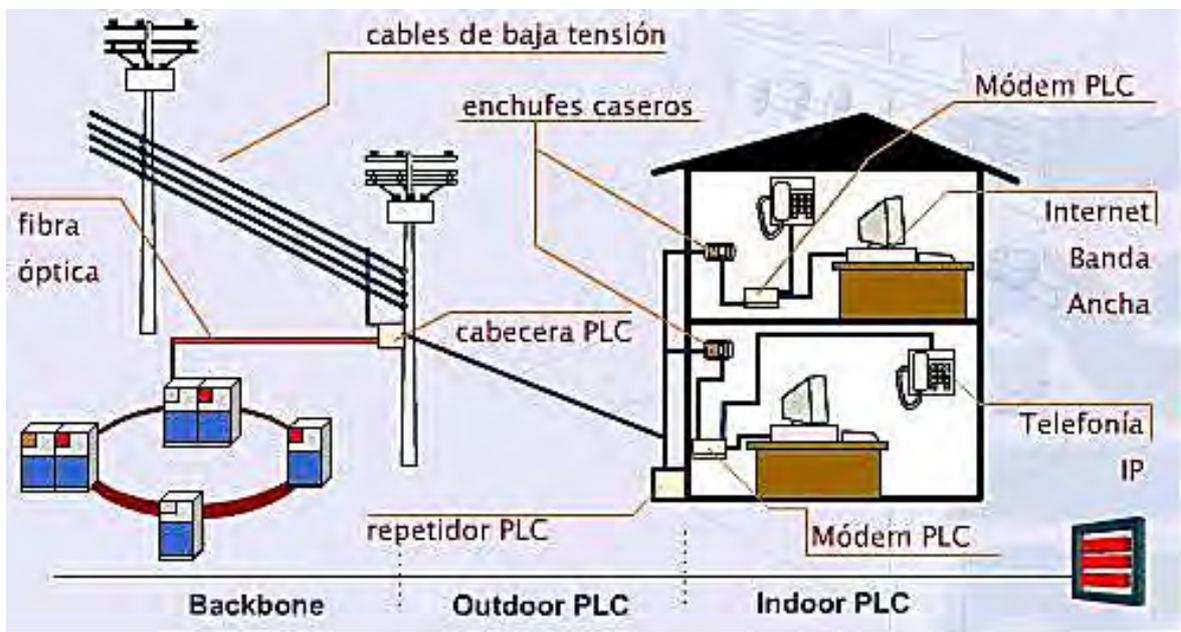
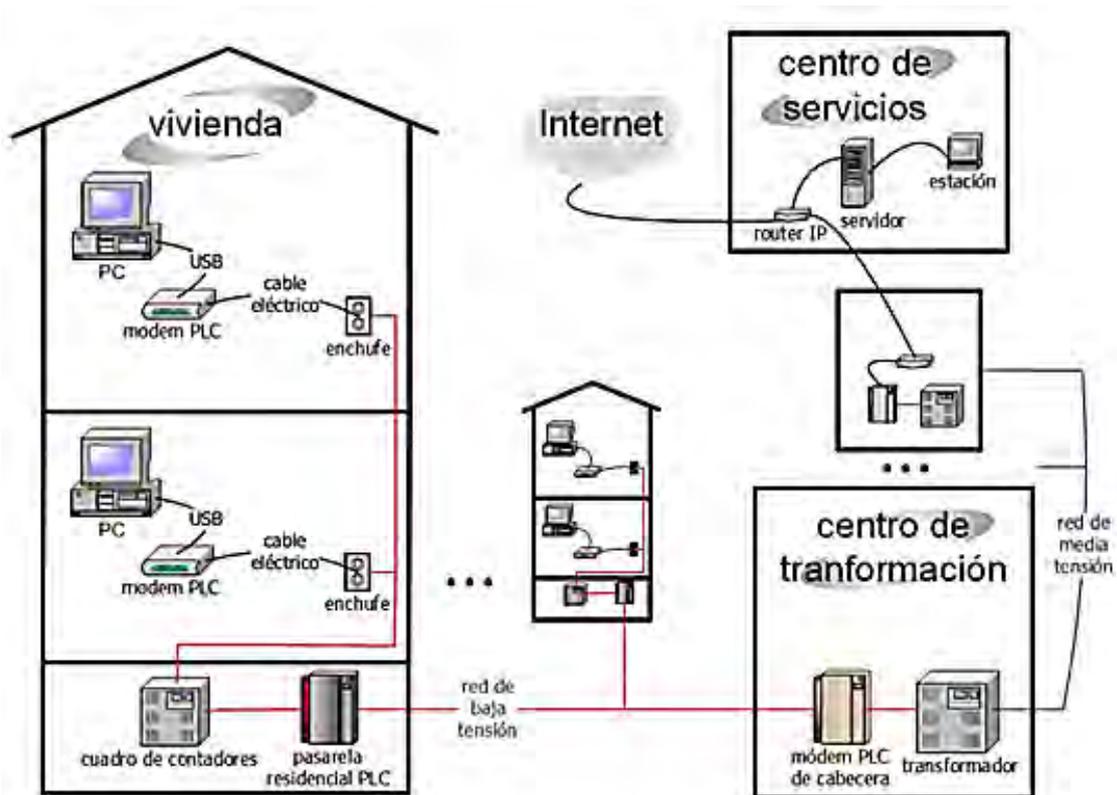


Figura No. 3.67 vistas de una Red PLC para servicio de Internet residencial

Fuente: Future Internet, IOT and cloud computing. (2020). Disponible: <https://blogs.salleurl.edu/es/net/or/ing-and-internet-technologies-interferencias-en-redes-plc-de-banda-ancha> Millán Tejedor, R., *Banda ancha en el enchufe*, Publicado en PC World 202, IDG Communications S.A., 2016.

En la figura No. 3.68 se muestra el esquema de interconexión de una red eléctrica interna residencial con tecnología PLC y la imagen de un adaptador PLC típico que se conecta a la toma de dicha red eléctrica

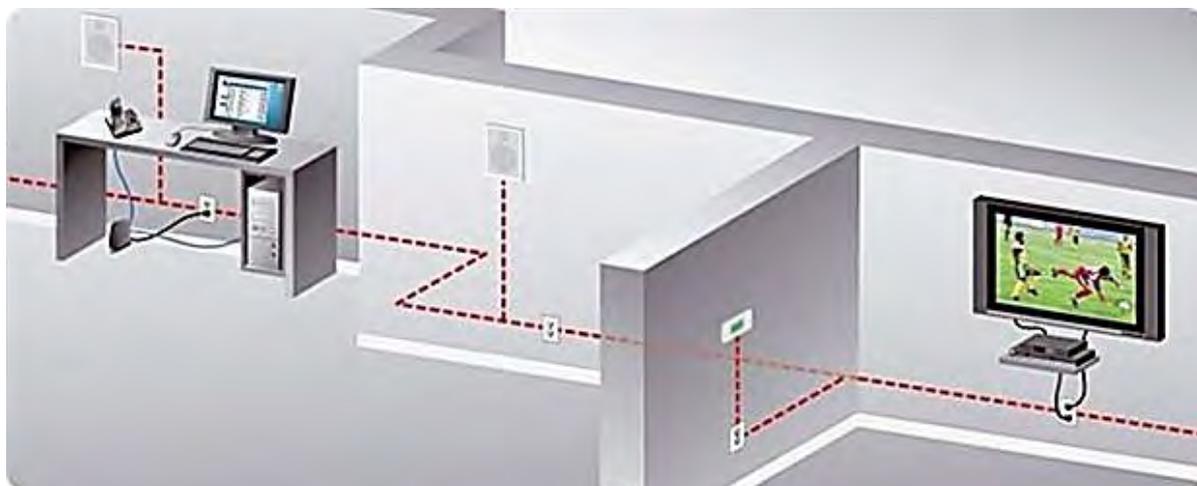


Figura No. 3.68 Esquema de interconexión de una red eléctrica interna residencial con tecnología PLC y la imagen de un adaptador PLC

Fuente: **Dispositivos PLC. (2020). Disponible:**

https://www.pcactual.com/noticias/actualidad/dispositivos--2_6415

3.11.3 Bobina de onda portadora

Estas bobinas, también conocidas como bobinas de bloqueo o de trampa de onda, son unos dispositivos que tienen una impedancia despreciable para las frecuencias bajas correspondiente a las de las señales eléctricas y una impedancia alta correspondiente a las de las señales de información (datos). De esta forma el propósito de estas bobinas es impedir las señales de comunicación sean derivadas en direcciones no deseadas, sin perjuicio de la transmisión de las señales

eléctricas. En la figura No. 3.69 se muestra una bobina de bloqueo donde se indica sus principales componentes.

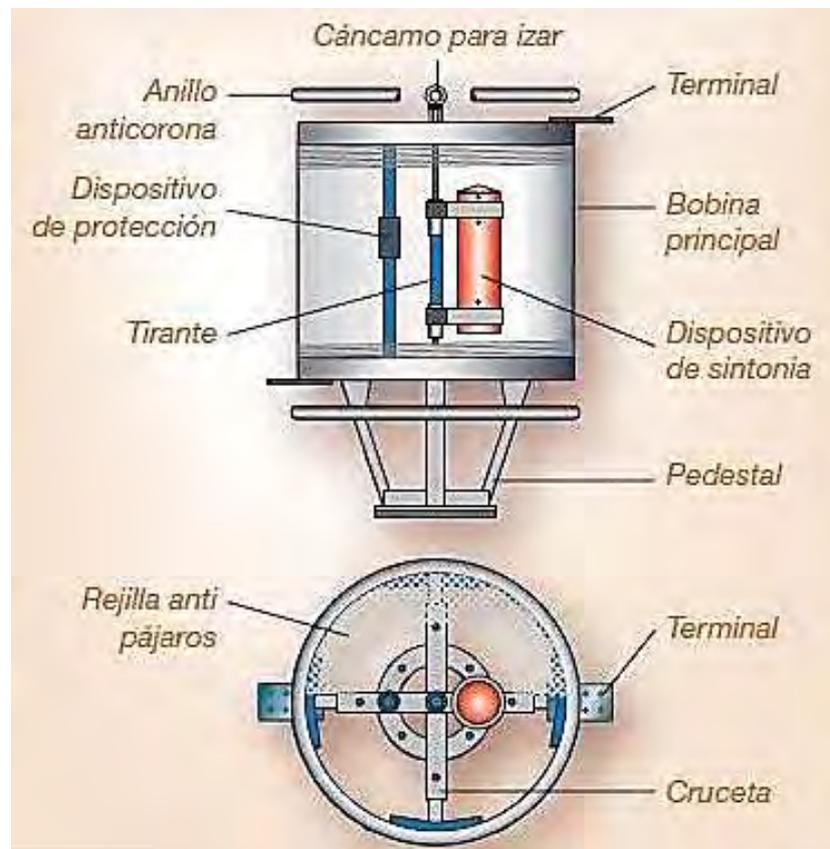


Figura No. 3.69 Principales componentes de una bobina de bloqueo
Fuente Bobinas de bloqueo - ICA T D. (2020). Disponible: <http://www.vicatyd.com.trampa.pdf>

Las bobinas de bloqueo las cuales se articulan en serie con las líneas de la red eléctrica deben ser dimensionadas, para que soporten las intensidades de corriente que circulan por las redes y además para las corrientes de corto circuito que se puedan presentar en estas. En la figura No. 3.70 se ilustran unas imágenes de las diferentes formas de montaje de estas bobinas.



Figura No. 3.70 Imágenes de las diferentes formas de montaje de bobinas de bloqueo

Fuente: Trampas de ondas. (2020). Disponible: <http://www.sectorelectricidad.com> 17005 lineas-de-transmision-como-canal-de-comunicacion-mediante-trampas-de-onda

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

CAPÍTULO 3

Preguntas:

1. En la figura No. 5.1 se indica la estructura básica de una red de distribución de energía eléctrica. Describir cada uno de sus componentes, relacionando sus características eléctricas de funcionamiento.
2. Uno de los criterios más utilizado para tipificar los *cables abiertos paralelos* corresponde a la cantidad de tensión que soportan o manejan estos cables. Relacionar los principales tipos de estos cables indicando la tensión que pueden manejar y su característica estructural de los mismos.
3. Cuál es el factor más relevante que influye en las características estructurales y los requerimientos de instalación y funcionamiento de las estaciones y tendidos de las redes eléctricas
4. Indique cuál es el tipo de cable muy utilizado en los tendidos de las redes eléctricas y describa por qué
5. ¿Qué se entiende por: a.) Cortacircuitos de potencia, b.) Catenaria y c.) Flecha, los cuales se presentan en los tendidos de la Redes Eléctricas
6. Cuál es la función principal de la Subestación y Red de reparto ¿qué intensidades de tensión maneja.
7. Cuál es la función principal de la Subestación y Red de distribución ¿qué intensidades de tensión maneja.
8. Relacionar los principales componentes que conforman las redes eléctricas denominadas de grandes consumidores e indicar su función esencial.
7. En la figura No. 5.43 se representa el esquema de la instalación de un circuito eléctrico sencillo de tipo monofásico, describir su estructuración.
8. Las redes eléctricas residenciales pueden ser de tipo monofásico o trifásico. Indicar como están conformadas cada una de ellas y que voltaje manejan en el caso colombiano
9. Cómo se le denomina y cómo se clasificar a la conexión entre el transformador de distribución correspondiente y la entrada eléctrica de la vivienda
10. En referencia a los valores relacionados en la tabla No. 5.7, determinar el significado de estos.
11. En qué consiste la puesta a tierra de una red eléctrica residencial y cuál es su propósito esencial de su instalación

12. Con propósito de tener una visión global de la estructura de la entrada y del tendido interior que podría tener una red eléctrica de una residencia, en la figura No. 5.57 se ilustra unos bosquejos de estas instalaciones. Describir en que consiste esta estructura.

13. Existen diferentes formas para medir la resistividad del suelo, siendo una de ellas el método tetraelectródico de Wenner, Explicar en qué consiste este método.

14. Para la medición de la resistencia puesta a tierra, generalmente se utiliza el método denominado *caída de potencia*, dado por el estandar IEEE 81, cuya estructura de montaje se indica en la figura No. 5.61. Explicar en qué consiste este método.

15.Cuál es la razón por lo cual se ejerce unas fuerzas magnéticas entre las líneas de transmisión de las redes de distribución eléctrica

16. Existen varias instituciones y organizaciones que elaboran normas técnicas, en las cuales se contemplan algunas referentes a las de la resistencia puesta a tierra. Para el caso colombiano, una de las normas más referenciadas correspondientes a este tema, son las emitidas por Ministerio de Minas y Energía, enmarcadas dentro el *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas* (RETIE). Hacer una descripción de los principales aspectos que contempla esta norma en lo referente a las de la resistencia puesta a tierra.

17. A partir de la primera década del siglo XXI, se ha venido fortalecido el interés del desarrollo e implementación de las denominadas *Redes Eléctricas Inteligentes* (REI) o *Smart Grids*. Describa en que consiste este tipo de redes y cual es su característica esencial.

18. Para que los datos (señales digitales) se puedan transmitir en forma eficiente a través de las líneas de las redes eléctricas PLC, estas se deben convertir en señales análogas, lo cual se logra modulándolas mediante métodos como: ASK, FSK y PSK, para el caso de banda angosta, describir en que consiste cada uno de estos tipos de modulación.

19. Para banda ancha, en transmisiones de tecnología PLC, se emplean la técnica Espectro Ensanchado (SS: *Spread Spectrum*) o la de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), describir en que consiste cada uno de estos tipos de modulación.

20. Describir cuál es la función esencial de las denominadas bobinas de bloqueo y como logran cumplir con este propósito.

Ejercicios:

1. Determinar la *resistencia puesta a tierra*, a ser instalada en una subestación eléctrica de mediano potencial, consistente en un sistema de tierra tipo malla, con las siguientes características estructurales y dimensionales:

- Longitud de la malla: 51 m.
- Ancho de la malla: 16 m.
- Espacio entre los cables conductores: 4.5 m (uniforme).
- Profundidad de enterramiento: 0.9 m
- Resistividad del terreno: 320 (ohmios-metro).

2. Se tienen dos alambres conductores paralelos, como se indica en la figura 5.63, por uno de ellos fluye una corriente: $I = 10 \text{ A}$ y por el otro esta corriente retorna. Determinar la fuerza magnética, por unidad de longitud, ejercida por cada uno de ellos sobre el otro, si se encuentran en el aire separados a una distancia de: $d = 1.0 \text{ m}$.

3. Determinar la separación mínima que debe existir entre dos cables abiertos paralelos, los cuales conforman una línea de transmisión de energía eléctrica, para que no exista más de: $45 (\mu\text{N}/\text{m})$ de fuerza magnética, por unidad de longitud, ejercida entre ellos, por los cuales fluye una corriente de 10 amperios, por cada uno de ellos, en sentido contrario.

4. En la figura 3.67 se muestra una línea trifásica, en el aire, conformada por tres conductores, cuya ubicación forma un triángulo equilátero. En un instante dado, los conductores: 1 y 3 conducen cada uno una corriente de 20 A en la dirección de: \mathcal{X} y por el conductor 2 retorna esas dos corrientes. Determinar la fuerza magnética, por metro, que se ejerce sobre el conductor 2.

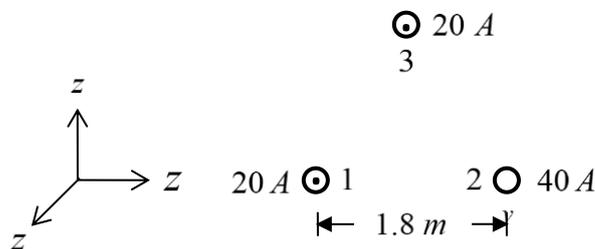


Figura No. 3.67 Fuerza magnética sobre un conductor de una línea de transmisión trifásica

5. En la figura No. 3.71 se hace una representación esquemática de los componentes básicos de la conformación típica de una Red Eléctrica, y en la tabla

No. 3.12 se relacionan algunos de los valores comunes que se manejan y o presentan en cada una de las redes, así como en la Central Eléctrica. Describir la razón de estos valores en esos componentes de la Red.

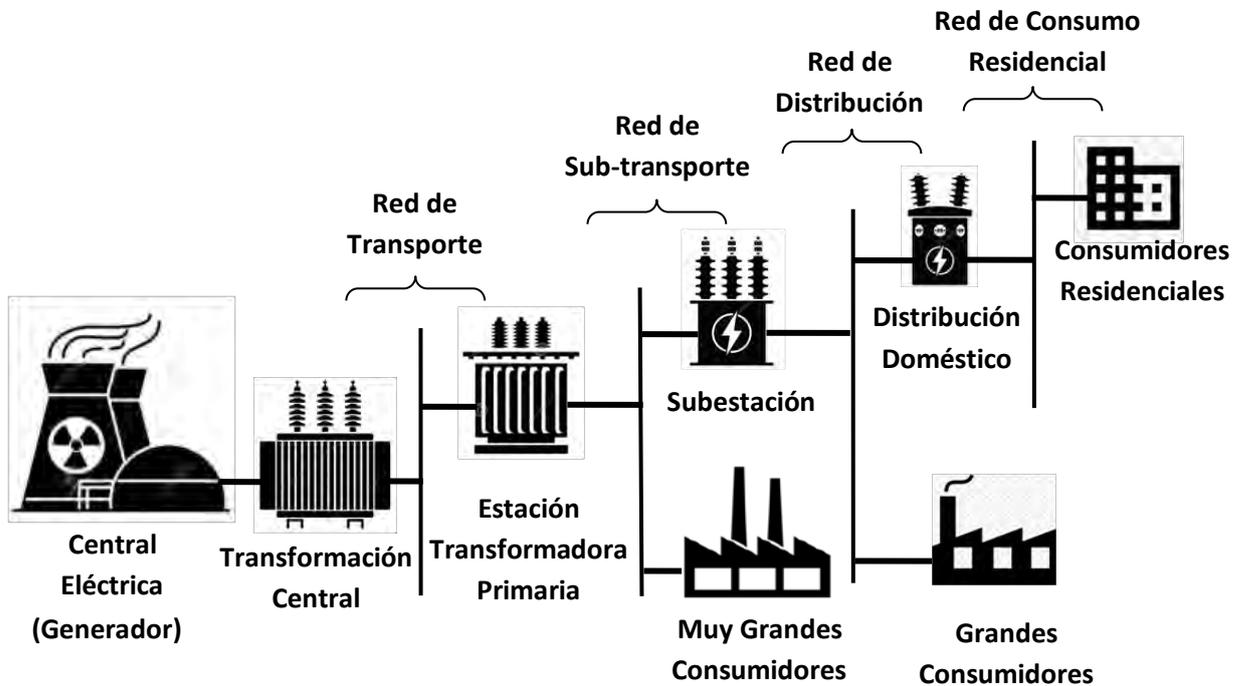


Figura No. 3.71 Composición básica típica de una Red Eléctrica.

Central	Red de Transporte	Red de Sub-transporte	Red de Distribución	Red de Consumo
100 a 1.000 MVA	100 a 1.000 MVA	30 - 100 MVA	3 - 15 MVA	0.5 - 2 MVA
	100 - 500 Km	20 - 100 Km	5 - 15 Km	100 - 500 m
10 - 30 KV	730 / 380 / 220 KV	132 / 66 / 45 KV	11 / 20 / 30 KV	380 / 220 V

Tabla No. 3.12 valores comunes que se manejan y o presentan en cada una de las redes

6. Para la instalación eléctrica de una residencia se necesitará el siguiente material. Determinar la carga total a soportar la instalación eléctrica. ⁽³⁰⁾

- 31 bombillos incandescentes de 100 .
- 1 lámpara incandescente de 75 .

- 2 lámparas incandescentes de 60
- 4 lámparas fluorescentes circular light de 32
- 15 contactos dobles de 300
- 12 toma corrientes de 15
- 1 Aire acondicionado de 1500
- 1 ventilador de techo de 125
- 1 Motor de hp (186.4249)

7. En la grafica No. 3.72 se ilustra un esquema de para varios usuarios con contadores en forma centralizada en undeterminado espacio de un edificio. Describir su estructura y funcionamiento.

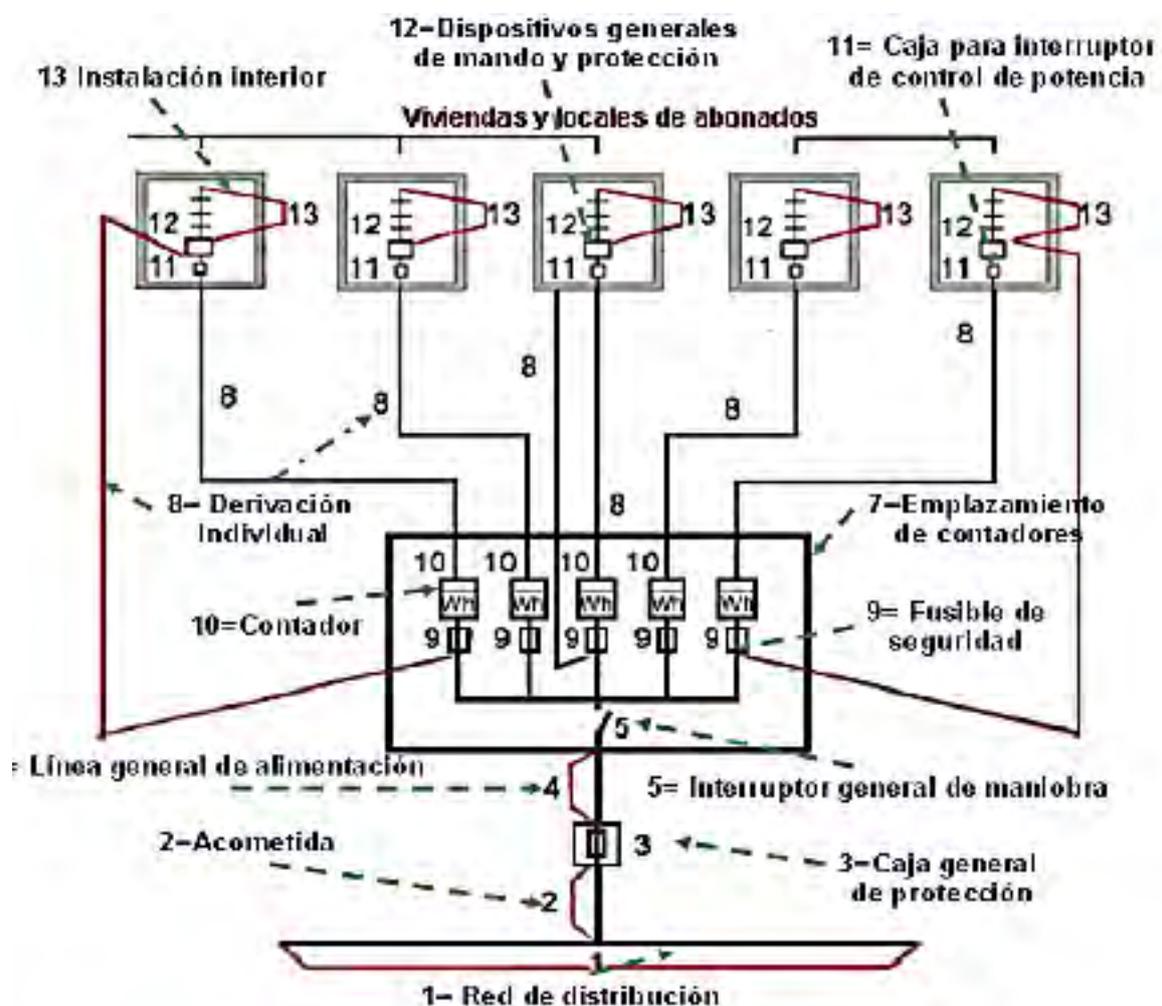


Figura No. 3.72 Esquema de contadores centralizados para varios usuarios
 Fuente: Diez Aznar, J.M. Blasco Espinosa P. A., "Principios de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión", Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2018.

8. En la figura No. 3.69 se indican los principales componentes de una bobina de bloqueo, utilizados en las redes PLC. Describir cuál es la función de cada uno de ellos.
9. En la figura No. 3.73 se muestra la estructura básica de una red PLC. Identificar sus principales componentes y describir el funcionamiento general de la red.

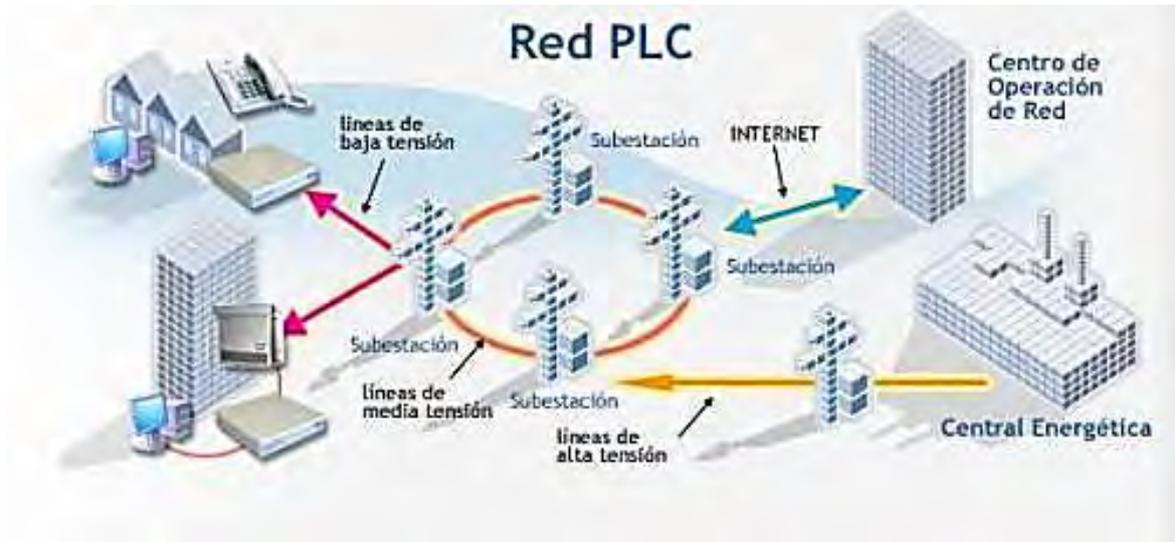


Figura No. 3.73 Estructura básica de una red PLC.

Fuente: Transmisión de datos a través de líneas eléctricas. (2020). Disponible:

<http://test.afinidadelectrica.com/?p=635>

10. En la figura No. 3.74 se indican dos muestras de curvas de respuestas de unas bobinas de bloqueo de núcleo de aire. Identificar para cada una de ellas para que sintonía de onda estas operando.

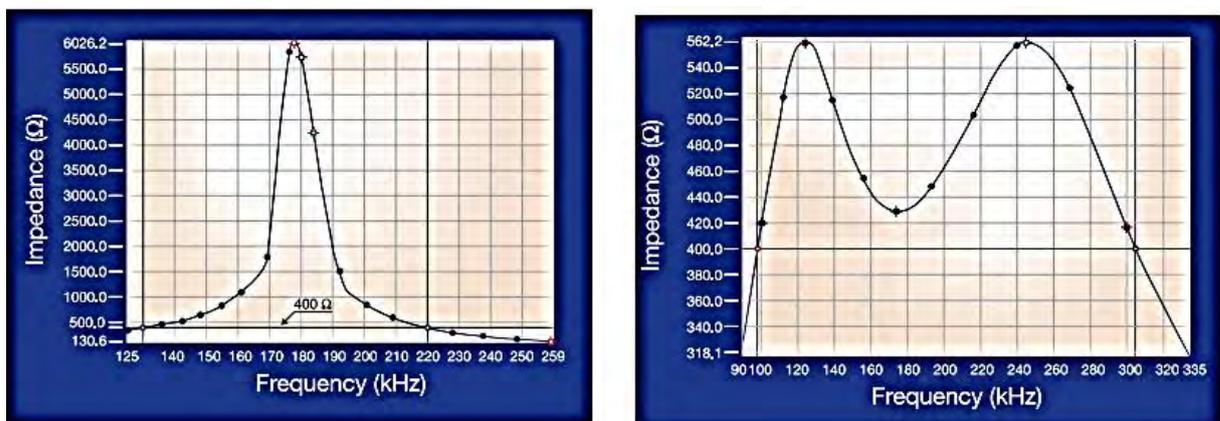


Figura No. 3.74 Muestras de curvas de respuestas de bobinas de bloqueo.

Fuente: Bobinas de bloqueo de núcleo de aire. (2020). Disponible:

<http://www.vicatyd.com/trampa.pdf>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 3

- (1) *Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión*, Boletín Oficial del Estado (BOE), España, 2018.
- (2) MacDonald, J., *Electric Power Substations Engineering*, Editorial McDonald, 2017, pp. 32-34.
- (3) Grigsby, L., *Electric Power Generation, Transmission and Distribution*, CRC Press, Third Edition, 2016, pp. 323-324.
- (4) Svera, J. G., *Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid: Part - a good is the present method* IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 1, pp.7-8.
- (5) Normas Técnicas RA6-015, *Medida de Resistencia a Puesta a Tierra*, EPM, 2016, pp. 3-4.
- (6) IEEE 80-2000 *Guide for Safety in AC Substation Grounding*
- (7) Calles, F. I. Chazaro, R., *Diseño de aislamiento de líneas de transmisión*, Universidad Veracruzana, 2016, pp. 41-42.
- (8) Centro de Investigación y transferencia tecnológica, *Cálculo mecánico: lectas y Tensiones*, Facultad de Ingeniería Eléctrica
- (9) Flórez, J., *Instalaciones eléctricas y Telefónicas en edificios*, Escuela Politécnica, Ecuador, 2018, pp. 37-38.
- (10) Manual de instalaciones de medidores de baja tensión, Codensa, 2018.
- (11) Instalaciones de enlace Derivaciones Individuales. ITC-BT-15. (2019). Disponible:
<http://www.tuveras.com/reglamentos/rebtic/itc-bt-15.htm>.
- (12) Florez, J., *Instalaciones eléctricas y Telefónicas en edificios*, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2017, pp. 15-16.
- (13) Fuertes, M., *Contadores inteligentes: todo lo que tiene que saber*, Nergiza, 2017, pp.11-12.
- (14) Pooler, J. R. H., *Electrical Power*. boonboon.com, 2018, pp.45-46

- (15) Guía técnica de aplicación: Instalaciones de enlace, *dispositivos generales e individuales de mando y protección, interruptor de control de potencia*", Ministerio de Industria y Energía, 2017, pp.10-11.
- (16) González, C., *Concepto generales de Redes eléctricas*", Inacap, Santiago Chile, 2016, pp. 3-4.
- (17) Diseño eléctrico de una casa. (2019). Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos100/disenoelectricocasa/disenoelectricocasa.shtml>
- (18) Gouveia, M. R.; Robba, E. J.; Belvedere, E. C.; Moreira, J.R.S. e Brunheroto, P. A, *Thermal Simulation for Distribution Transformers in Underground Vaults*", in *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, S, Nov. 2016, pp. 987-989.
- (19) Unidad didáctica 10 *puesta a tierra de las instalaciones*", Marcombo, 2017, pp. 271-272.
- (20) ASTM G5795a *Standard Test Method for field measurement of Soil Resistivity using the Wenner four electrode Method*".
- (21) Ramírez Castaño, S., *Redes de distribución de energía*". Universidad Nacional de Colombia, Tercera Edición Manizales, 2017 pp. 65-67.
- (22) IEEE 81 *Resistencia puesta a tierra*".
- (23) Ramírez Artunduaga, J. *Campos electromagnéticos, Conceptos Básicos y ejercicios Resueltos*", Universidad de San Buenaventura, 2014, pp. 307-308.
- (24) Resolución 9 0708 de agosto 30 de 2013: *Anexo general del Reglamento Técnico de instalaciones eléctricas: R T* ", Ministerio de Minas y Energía-Colombia.
- (25): *Redes eléctricas inteligentes (REI) O Smart Grid*-Monografias.com. Online . (2019). Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos73/redes-electricas-inteligentes-smart-grid/redes-electricasinteligentes-smart-grid.shtml>
- (26) Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie(ADEME). *Roadmap for smart grids and electricity systems integrating renewable energy sources.*". 2016
- (27) Mellon C. *Smart Grid Maturity Model*. Electric Power Research Institute (EPRI). *Guidebook for Cost Benefit Analysis of Smart Grid Demonstration Projects*. 2016, pp.76-77.
- (28) Cañete, J. Cortés Et al. *Modeling and valuation of T e ndoor o er ine Transmission Medium*". IEEE Communications Magazine, 2015.

(29) Baigy N. Gohar. *A discrete multitone transceiver at the edge of the physical layer of an in-home power line communication logical area network*. IEEE Communications Magazine, 2014.

(30) Diseño eléctrico de una casa. (2020). Disponible:

<https://www.monografias.com/trabajos100/disenio-electrico-casa/disenio-electrico-casa.shtml>.

CAPÍTULO 4.

CABLES DE PAR TRENZADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se relacionarán el concepto técnico de los cables de par trenzados, así como los principales tipos de los mismos, sus características estructurales y de funcionamiento básico, su aplicabilidad y demás aspectos que permitan identificarlos, conocerlos, manejarlos y utilizarlos de la manera más eficiente e idónea. Se hará mención, de la misma manera, de los principales parámetros y estándares que deben cumplir.

4.2 Concepto y características

El cable de par trenzado es otro de los *medios de transmisión guiados*, conformado por un grupo de pares trenzados, generalmente cuatro, cuyos conductores individuales se encuentran encapsulados por un material aislante. El entrelazado contribuye a disminuir, sustancialmente, las *interferencias* de fuentes externas y la *diafonía* producida por las comunicaciones transmitidas a través de los cables adyacentes. ⁽¹⁾

El cable de par trenzado es un tipo de cable denominado cable estructurado, cuya característica clave en su diseño es la torsión de pares de hilos. Por lo tanto, el cable de par trenzado sólo puede contener un número par de cables. El cable de teléfono es la configuración más sencilla, con dos cables. cable de red de datos es la forma más común de cable de par trenzado, y contiene ocho cables

Las características estructurales de los pares trenzados, se pueden compendiar en las siguientes:⁽²⁾

- Los conductores son de material de aluminio o de cobre recocido o estañado, y tienen un grosor entre el rango de 0.4 mm a 0.9 mm.
- La cubierta aislante de cada cable conductor es, por lo general, de polietileno de alta densidad.
- La longitud del trenzado es diferente, según la categoría del cable, para reducir los desequilibrios de capacidad y por lo tanto la diafonía entre pares. El rango de esta longitud se encuentra entre 5 cm y 15 cm.

- Los diferentes pares que conforman al cable, se disponen para formar capas concéntricas.
- A las hendiduras que se presentan entre los hilos del cable se les introduce petróleo, en algunos casos, para protegerlos de la humedad.
- Cada uno de los pares se identifica mediante un color específico: Par 1: Blanco-Azul; Par 2: Blanco-Naranja; Par 3: Blanco-verde; Par 4: Blanco-Marrón.
- La Impedancia Característica de los cables trenzados se encuentra entre el rango de 100 a 125 ohmios.
- El número de pares por cable son 4, 25, 50, 100, 200 y 300. Cuando el número de pares es superior a 4 se habla de cables multipares.

4.3 Reseña histórica

Según indicación histórica, la primera vez que se utilizó un par trenzado (par telefónico retorcido) fue en 1881, en las redes de telefonía en los Estados Unidos, para evitar la interferencia que le producía el cableado de las redes eléctricas, a los cables telefónicos, de forma paralela, que se utilizan por aquel entonces. Esto se agravaba ya que la estructura de los tendidos de las redes eléctricas era utilizada para las redes telefónicas. Esta implementación del par trenzado, en las redes telefónicas, se la confieren a Alexander Graham Bell, la cual en 1900 cubría toda la red americana.

El proceso histórico del desarrollo de este medio de transmisión, básicamente está relacionado con la categorización que se le ha establecido durante el tiempo debido a las características técnicas y funcionales que estos cables presentan. En 1890 se estableció la categoría 1 y así sucesivamente hasta la categoría 8 que se le asignó en el 2017. A partir de 2018 se encuentran en proceso de desarrollo e implementación las categorías 9 y 10.

Esencialmente el cable de par trenzado se originó como solución al problema de reducir la interferencia entre pares telefónicos adyacentes, que se presentaba en las conexiones con teléfonos, terminales y computadores.

4.4 Tipos de cables par trenzado

El criterio que se fundamentó la tipificación de los cables par trenzados consistió en si los mismos utilizaban o no apantallamiento y en qué forma este se implementaba. A continuación se relacionan los principales tipos de cable par trenzado se han identificado: ⁽³⁾

✓ **UTP** (*Unshielded Twisted Pair*) corresponde al cable trenzado donde los cuatro pares de hilos trenzados se encuentran sin ningún tipo de apantallamiento.

Son comúnmente utilizados para diferentes tecnologías de Redes de Área Local (LAN). Se caracterizan por ser de bajo costo y de fácil manejo, pero debido a su falta de apantallamiento, son muy propensos a ser afectados por el ruido externo, lo que reduce la calidad de la señal. Para grandes distancias requiere de procesos de regeneración de la señal.

✓ **FTP** (*Shielded Twisted Pair*): corresponde al par trenzado con pantalla global, donde todos los cuatro pares de hilos trenzados se encuentran apantallados en conjunto. Se considera que este tipo de cable es inmune al ruido externo, lo que hace que la relación de potencia señal a ruido sea lo bastante alta y por lo tanto pueden cubrir largas distancias sin necesidad de regenerar la señal. Se utiliza en redes de ordenadores como Ethernet o Token Ring. Es más caro que la versión no apantallada o UTP y menos flexible.

✓ **STP** (*Shielded Twisted Pair*): corresponde al par trenzado donde se apantalla cada uno de los cuatro pares de hilos trenzados en forma independiente. Lo que ofrece no solo protección del ruido externo, sino también a los efectos de diafonía entre los mismos pares. Cubren grandes distancias por su inmunidad al ruido pero son más costosos que los anteriores tipos y presenta mayor rigidez. Su mayor utilización es para redes LAN.

✓ **SSTP** (*Super Shielded Twisted Pair*) corresponde al par trenzado donde se apantalla cada uno de los cuatro pares de hilos trenzados y además tiene apantallamiento global. Este cable está destinado a la transmisión de datos de alta velocidad y de cubrimientos de largas distancias, debido a que prácticamente se encuentra inmune al ruido externo. Su mayor utilización es para redes LAN. Es el de mayor costo que existe en el mercado y además el que presenta mayor rigidez.

En la figura No. 4.1 se ilustran uno de los diferentes ejemplares de los principales tipos de cables trenzados.

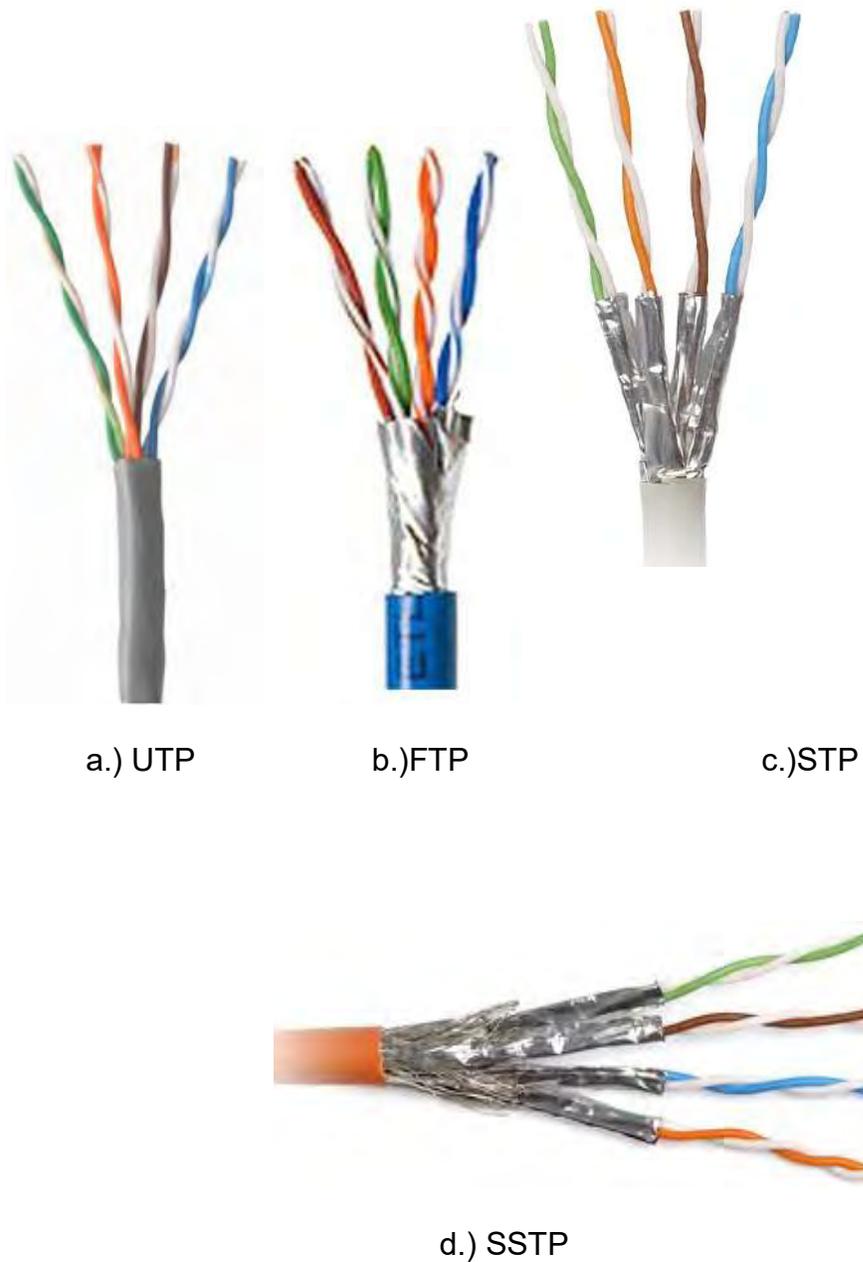


Figura No. 4.1 Ejemplares de los principales cables par trenzado
Fuente: Tipos de cables de par trenzado. (2019). Disponible: cgallego-smr.blogspot.com

4.5 Categorías de cables par trenzado

Las asociaciones: ANSI (*American National Standards Institute*), EIA (*Electronic Industries Alliance*) y TIA (*Telecommunications Industry Association*) de los Estados

Unidos, a través de las especificaciones 568A, categoriza a los cables par trenzado dependiendo, esencialmente, de la velocidad que permiten transmitir. A continuación se relacionan estas categorías: ⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾

✓ **Categoría 1:** corresponde al par de cable trenzado utilizado en las redes telefónicas. Trabaja con un ancho de banda de 1 MHz y la máxima velocidad que pueden ofrecer es de unos 4 Mbps. Su implementación se remonta a los años de 1890. Muy adecuado para transmisión de voz pero no es adecuado para las transmisiones de datos, debido a su baja capacidad de velocidad.

✓ **Categoría 2:** corresponde al cable de 4 pares trenzados de hilo de cobre, de tipo UTP. Trabaja con un ancho de banda de 4 MHz y una velocidad de transmisión un poco mayor a los 4 Mbps. Apareció en los años 1910. Cable para conexión de antiguos terminales como el IBM 3270.

✓ **Categoría 3:** corresponde al cable de 4 pares trenzados de hilo de cobre, por tres entrelazados por pie, de tipo UTP. Ofrece un ancho de banda de 4 MHz y una velocidad de transmisión alrededor de unos 16 Mbps. Con este tipo de cables se implementa las redes *Ethernet BaseT* y *Base-T*. Empezó a ser empleado a partir de 1990.

✓ **Categoría 4:** también corresponde al cable de 4 pares trenzados de hilo de cobre, de tipo UTP. Trabaja con un ancho de banda de 20 MHz y una velocidad de transmisión alrededor de unos 20 Mbps. Se emplea entre otras redes de computadores para las de tipo anillo como *Token Ring*. Empezó a ser empleado a partir de 1991.

✓ **Categoría 5:** como los anteriores consta de 4 pares trenzados de hilo de cobre, de tipo UTP. Ofrece un ancho de banda de hasta 100 MHz y soportar velocidades de transmisión de uno 100 Mbps. Su utilización es muy frecuente en redes LAN. Su implementación apareció a partir de los años 2.000. Con este tipo de cable se implementan las redes Ethernet 10BASE-T y 100BASE-T.

✓ **Categoría 6:** también corresponde al cable de 4 pares trenzados de hilo de cobre, de tipo UTP. Trabaja con un ancho de banda de unos 250 MHz, alcanzando velocidades de transmisión hasta 1 Gbps. Apareció en los años 2002. Se emplea para Ethernet 1000BASE-T.

✓ **Categoría 6a:** cable mejorado del de la categoría 6. Ofrece un ancho de banda de unos 500 MHz, alcanzando velocidades de transmisión de algunos Gbps. Apareció en los años 2008. Se emplea para Ethernet 10GBASE-T.

✓ **Categoría 7:** corresponde a una mejora de la categoría anterior. Es de tipo FTP. Trabaja con un ancho de banda de unos 600 MHz y velocidades de 10 Gbps. Se utiliza para servicios de telefonía, televisión por cable y Ethernet 1000BASE-T en el mismo cable. Empezó su implementación 2009.

- ✓ **Categoría 7a:** corresponde a cable apantallado S/STP de 4 pares trenzados. Trabaja con un ancho de banda de unos 1.200 MHz, alcanzando velocidades de transmisión de 10 Gbps. Como el de categoría anterior se emplea para servicios de telefonía, televisión por cable y Ethernet 1000BASE-T en el mismo cable. Su implementación se inició en el año 2010.
- ✓ **Categoría 8:** corresponde al cable S/STP de 4 pares. Descrito por las normas ANSI TIA-568-C.2-1 e ISO IEC 11801-1:2017. Ofrece un ancho de banda de 2.000 MHz y una velocidad de transmisión de 40 Gbps. También se emplea para Ethernet 40 GBASE-T o 1000BASE-T para servicios de telefonía, Televisión por cable y Ethernet en el mismo cable. Su implementación se inició en los años 2017.
- ✓ **Categoría 9:** corresponde al cable S/STP de 8 pares con Mylar y poliamida. Con ancho de banda 2.500 MHz. Se encuentra en proceso de desarrollo.
- ✓ **Categoría 10:** corresponde al cable S/STP de 8 pares con Mylar y poliamida. Con un ancho de banda de 2.500 MHz. Norma en creación por la G.e.r.a (Relationship Between Companies Anonymous) e IEEE. Se encuentra en proceso de desarrollo.

4.6 Conectores para cables par trenzado

Existe una gran variedad de tipos de conectores para ser utilizados en los cables de par trenzado, para redes de Ethernet, esencialmente. Entre los más comunes, que se encuentran en el mercado, se pueden resaltar los siguientes: ⁽⁶⁾

- ✓ **RJ11:** este conector es comúnmente utilizado para cableado de redes de telefonía. Corresponde a aquel que se conecta al cable telefónico. Posee 6 posiciones con 4 contactos centrales para los hilos del cable telefónico, aunque solo se utilizan los dos centrales. Los conductores que no son la punta central y el conductor de anillo se usan en la práctica para varias cosas: como terminal de tierra de llamada selectiva, como alimentación de bajo voltaje por un piloto luminoso o para soportar 4 vías de 2 cables telefónicos, entre otros usos. En la figura No. 4.2 se muestra este tipo de conector de manera independiente, así como ya instalado y las conexiones respectivas con el cable correspondiente.



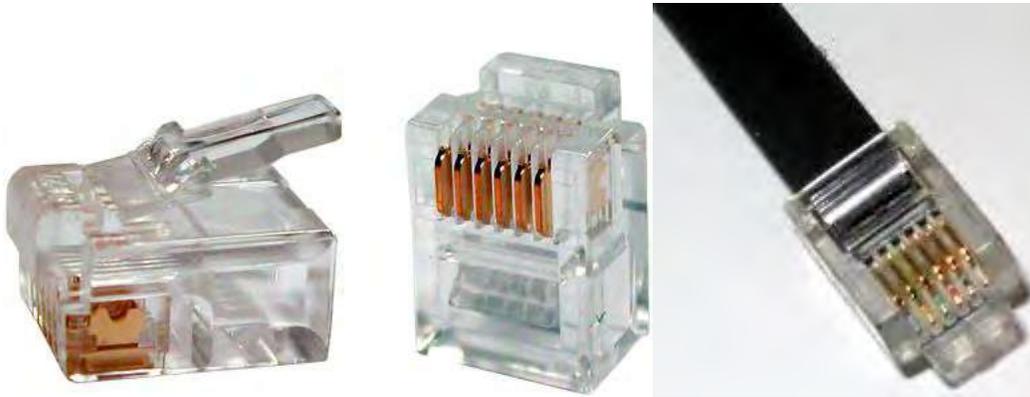
RJ11 (6P4C)



Figura No. 4.2 Conector tipo RJ11

Fuente: Cien conectores RJ11. (2018). Disponible: <http://smartel.com.uy> smartel es inicio 109-bolsa-de-100-conectores-rj11-de-6-pines.html Prolongador de cable telefónico de 4 hilos con RJ11. (2019). Disponible: <http://.cablematic.es> producto Prolongador-de-cable-telefonico-de-4-hilos-con-RJ11-con-duplicador-2 dot 1m

✓ **RJ12:** es un conector telefónico para ponchar en cable de 6 hilos. Dispone de 6 posiciones (lugar donde van alojadas las cuchillas) y 6 contactos (6P6C), lo que implica que se usen todos los contactos. Tiene las mismas dimensiones que un RJ11, la diferencia está en que en lugar de 4 cuchillas para ponchar tiene 6. En la figura No. 4.3 se muestra este tipo de conector de manera independiente, así como ya instalado y las conexiones respectivas con el cable correspondiente.



RJ12 (6P6C)

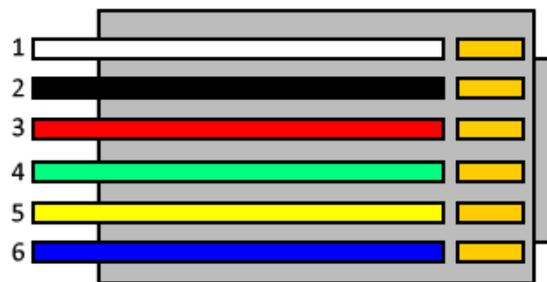


Figura No. 4.3 Conector tipo RJ11

Fuente: Cien conectores RJ11. (2018). Disponible: <http://smartel.com.uy> smartel es inicio 109-bolsa-de-100-conectores-rj11-de-6-pines.html Prolongador de cable telefónico de 4 hilos con RJ12. (2019). Disponible: <http://.cablematic.es> producto Prolongador-de-cable-telefonico-de-6-hilos-con-RJ12.

✓ **RJ45:** es un conector comúnmente utilizado para conectar redes de computadoras con cableado par trenzado (categorías 4, 5, 5e, 6 y 6a). Posee 8 pines o conexiones eléctricas, que normalmente se usan como extremos de cables de par trenzado (UTP). En la figura No. 4.4 se muestra este tipo de conector de manera independiente, así como ya instalado



Figura No. 4.4 Conector tipo RJ45

Fuente: Redes de computador: cable par trenzado. (2019). Disponible: <http://redes-del-computador-unerg.blogspot.com/2008/02/cable-par-trenzado.html>

Existen dos normas para la conexión de estos cables de par trenzado con los conectores RJ45: ⁽⁷⁾

- ✓ **norma T A:** ambos extremos del cable siguen el mismo código de color, lo que se denomina cableado directo. Se emplea generalmente entre la conexión de un equipo terminal con un Switch, un Hub u otro dispositivo intermedio de la red.
- ✓ **norma T B:** un extremo del cable sigue el código establecido con la norma T568A y el otro con el código de color de la norma T568B, Se emplea generalmente entre la conexión de los equipos terminales directamente uno al otro. Este tipo de conexión se le denomina cable crossover o cruzado.

En la figura No. 4.5, se ilustra el código de color de cada una de las dos normas relacionadas anteriormente, para conector RJ 45.

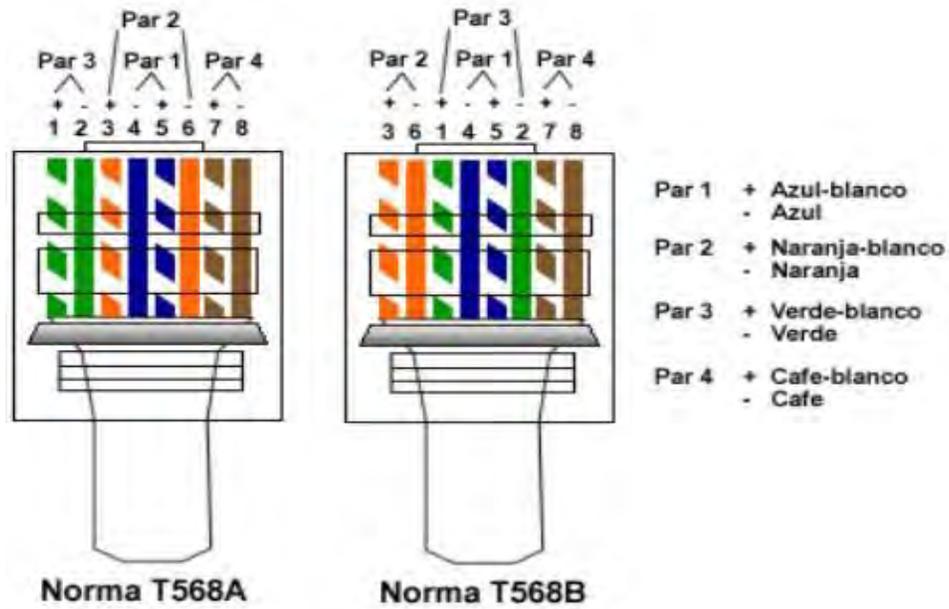


Figura No. 4.5 Código de color de las normas T568A y T568B.
 Fuente: Redes de computador: cable par trenzado. (2019). Disponible: <http://redes-del-computador-unerg.blogspot.com/2008/02/cable-par-trenzado.html>

En la tabla No. 4.1 se relacionan el código de colores correspondiente a cada uno de los pines del cable par trenzado, para las normas: T568A y T568B.

Pines	T568A	T568B
1	Blanco/Verde	Blanco/Naranja
2	Verde	Naranja
3	Blanco/Naranja	Blanco/Verde
4	Azul	Azul
5	Blanco/Azul	Blanco/Azul
6	Naranja	Verde
7	Blanco/Marrón	Blanco/Marrón
8	Marrón	Marrón
9	Masa	Masa

Tabla No. 4.1 Código de colores según las normas
 Cable de par trenzado GEE NETIC. (2019). Disponible:

[https://www.geenetic.es/Guia 54 Cable-de-par-trenzado.html](https://www.geenetic.es/Guia%2054%20Cable-de-par-trenzado.html)

En la figura No. 4.6 se muestran los diagramas del cableado directo y del cableado crossover o cruzado.

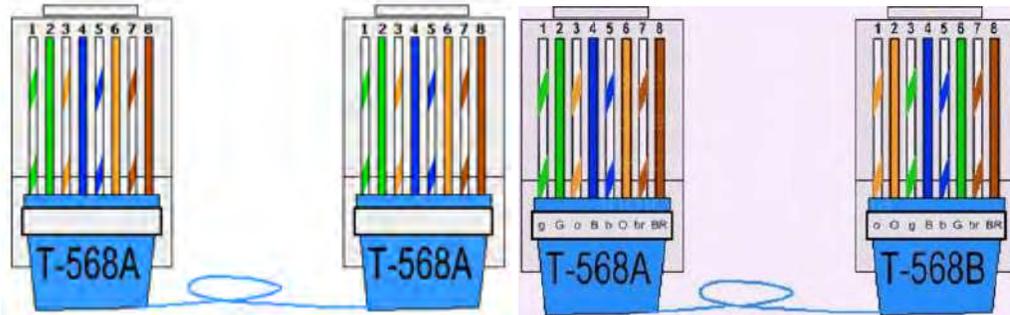


Figura No. 4.6 Diagramas del cableado directo y del cableado crossover o cruzado.

Fuente: Diferencia entre cable directos y cable crossover. (2019). Disponible: <https://marc92.wordpress.com/diferencia-cable-directo-y-cable-cruzado>

Existe una gran variedad de conectores para los cables par trenzados. En la figura No. 4.7 se ilustra un conjunto de estos conectores.



Figura No. 4.7 Conjunto de diversos conectores para cable par trenzado.

Fuente: vlans que son tipos y para que sirven. (2019). Disponible: <https://www.redeszone.net/2018/11/29/vlans-que-son-tipos-y-para-que-sirven>

4.7 Aplicaciones del cable par trenzado

Como se ha venido mencionando, el cable par trenzado ha tenido y tiene una amplia gama de aplicaciones, A continuación, se relacionan algunas de las aplicaciones donde el cable par trenzado ha tenido mayor presencia: ^{(8), (9)}

- *n las redes telefónicas:* tal como se mencionó anteriormente, en estas redes se ha venido empleado el cable UTP categoría 1. Su uso es esencialmente para transmisión de voz. Para el caso de transmisión de datos a través de este tipo de cable se requiere de un módem (DSL: Digital Subscriber Line).
- *n las redes informáticas:* en este tipo de redes es donde mayor presencia tiene la utilización de los cables de par trenzado. El cable UTP, categoría 2, 3 y 4, solo permiten velocidades de transmisión de 4 a 16 Mbps, siendo las redes de tipo To en Ring y las de Ethernet 10Base-T donde mayor presencia tienen estos cables. Para redes de datos de mayor velocidad, alrededor de 100 Mbps, se utilizan cable UTP categoría 5 a 7. Para el caso de velocidades superiores se están implementando redes con cable trenzado apantallados.
- *Transmisión de audio y video:* para este tipo de transmisión se está empleando cables UTP de categoría 5 y 6, especialmente. Para remediar el problema de latencia que estos cables presentan, las redes que realizan este tipo de emisión emplean transmisores de video especial y simetrizadores. Con los simetrizadores se puede transmitir señales de video de varias cámaras a través de un único cable UTP. En la figura No. 4.8 se muestra una imagen de un simetrizador con cuatro conectores BNC hembra de entradas para las cámaras y un conector tipo RJ45 hembra para el cable UTP. Las distancias promedio de transmisión es de unos 300 metros. Este tipo de instalación también se puede utilizar con cámaras de seguridad de circuito cerrado.



Figura No. 4.8 Imagen de un simetrizador de 4 entradas y una salida.
Fuente: [ideo vigilancia](http://ideovigilancia.com) - [ideosimetrizadores spy.es](http://ideosimetrizadores.com). (2019). Disponible: spy.es *Video Vigilancia Video simetrizadores*

- **Energía sobre Ethernet (PoE):** es una nueva tecnología (Energía sobre Ethernet) que permite transmitir corriente eléctrica de bajo voltaje a través de los cables UTP, categoría 5 y 6 principalmente.

En la figura No.4.9 se ilustra un diagrama que contiene la estructura básica de la red, con cable trenzado, de un sistema de control de vigilancia.

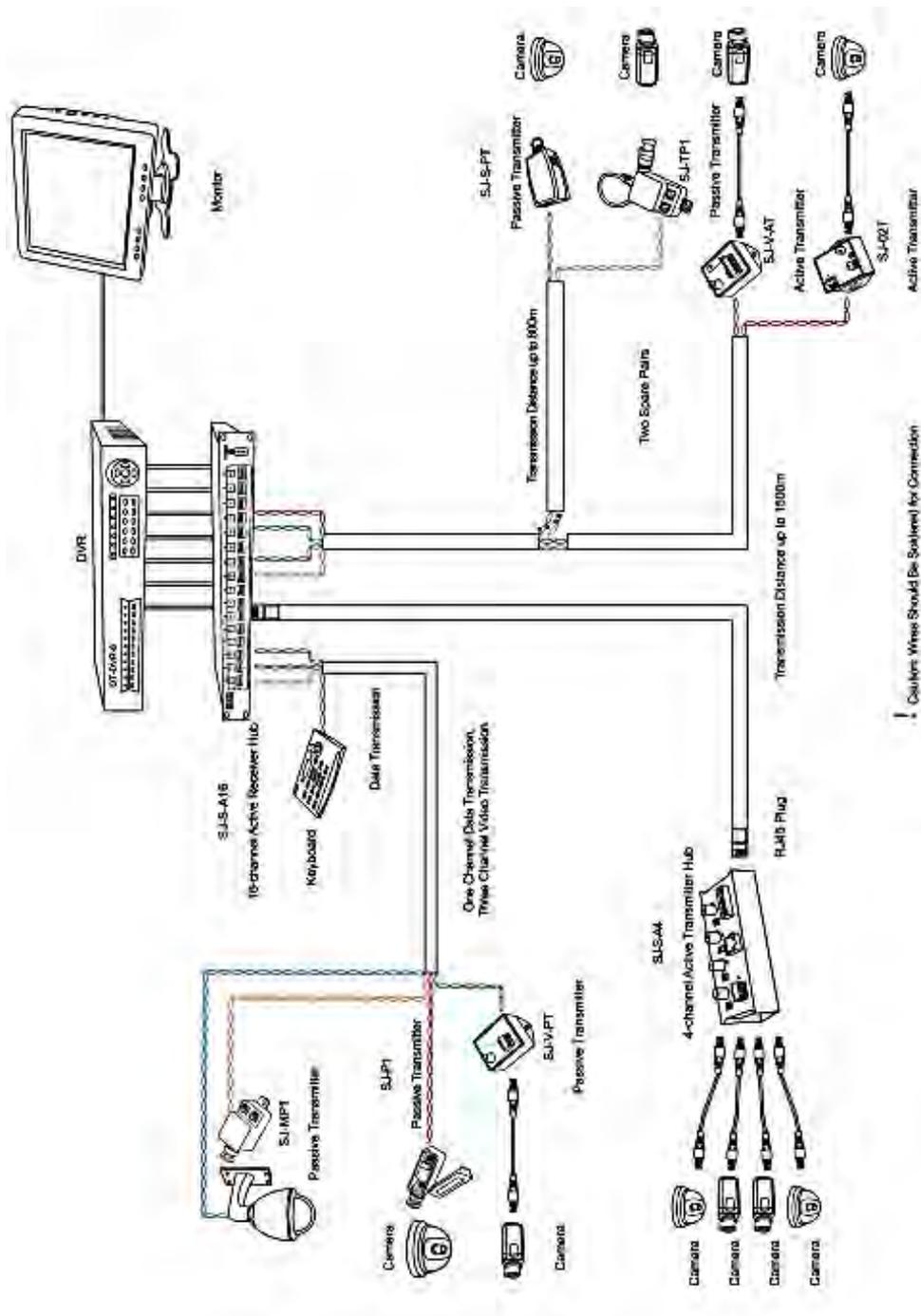


Figura No. 4.9 Diagrama de una red con cable par trenzado de un sistema de control y vigilancia.

The Advantages of the Twisted-pair transmission. Veilux. (2019). Disponibilidad: veilux.net/download/veilux-Twisted-pair-trans.pdf

4.8 Ventajas y desventajas

4.8.1 Ventajas

Entre las diversas ventajas que se les atribuyen a los cables par trenzado, se resaltan las siguientes: ⁽¹⁰⁾

- Bajo costo en su adquisición.
- Relativa facilidad en su implementación.
- Ofrece facilidades de compatibilidad con la mayoría de otros sistemas de redes principales y no requiere de conexión a tierra.
- En una red por cable de par trenzado, de categoría 7 por lo menos, se puede llegar a los 10 Gbps de velocidad de transmisión.
- Ofrece alto número de estaciones de trabajo por segmento de red.
- Permite, sin mayor inconveniente, el traslado del cableado de un lugar a otro.

4.8.2 Desventajas

Entre las desventajas que se le anotan a los cables par trenzado, se pueden resaltar los siguientes: ⁽¹¹⁾

- Para altas velocidades de transmisión presentan altas tasas de error.
- El ancho de banda, comparado con otros medios de transmisión, son relativamente moderados.
- Los cables UTP son susceptibles a las interferencias de radio frecuencias y a los ruidos electromagnéticos. Por esta razón sus tendidos deben realizarse fuera del alcance de las ondas generadas por los motores y de las redes eléctricas, así como de los sistemas de iluminación de tipo fluorescente.
- Con excepción de los cables STP y SSTP, son propensos a los efectos crosstal (diafonía).
- Los costos de los equipos que se requieren en las redes con cable par trenzado son relativamente costosos.
- El alcance de los enlaces es limitado (300 metros en el mejor de los casos), esto se debe a que la distancia entre los pulsos de la señal es más corta en los cables par trenzado, que para el caso de los cables coaxiales y de la fibra óptica.

4.9 Variaciones en el cable par trenzado

Recientemente se le vienen haciendo algunas variaciones a la estructura básica a los cables par trenzado, entre estos cambios se resaltan los siguientes: ⁽¹²⁾

- *ar tren ado cargado*: corresponde aquel cable que se le ha introducido inductores, conocidas como bobinas de carga, que contrarresten la característica de inductancia propia del cable, con el propósito de reducir los efectos de distorsión que presentan estos cables debido a esta característica, a las señales que a través de ellos se transmiten.
- *ar tren ado de cinta*: corresponde aquel cable trenzado dispuestos en forma plana en su terminación, equivalente a la típica técnica de cable de cinta de conector de desplazamiento de aislamiento” (IDC: Insulation-displacement technology termination). Este tipo de cable presenta ventajas de ahorro de espacio y peso frente a otros métodos de cableado y son ideales para el uso en ordenadores, periféricos y unidades de interfaz, equipo de audio y digital. En la figura No. 4.10 se muestra unas imágenes de este tipo de cable. Existen diferentes tamaños, siendo una de ellos el de 17 par trenzados.

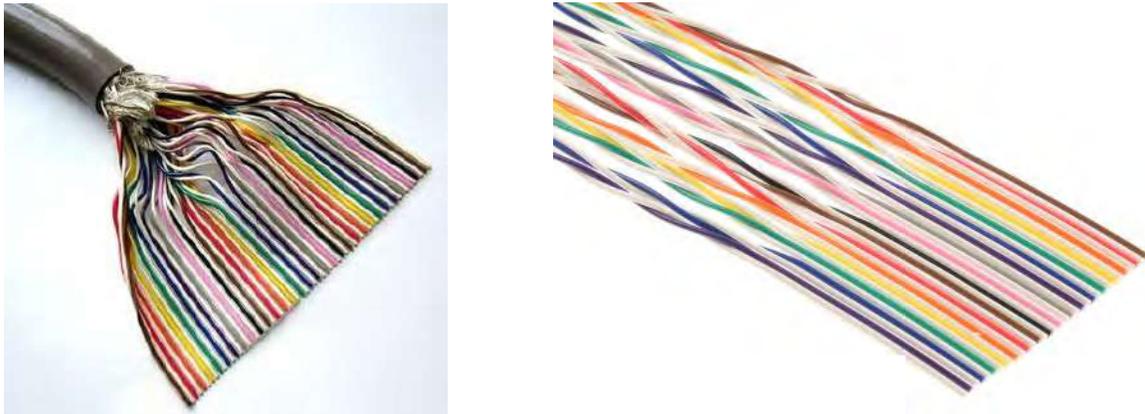


Figura No. 4.10 Imágenes de cable par trenzado de cinta.

Fuente: Arco Iris Par Trenzado Cable. (2019). Disponible: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/rainbo-17-pair-flat-ribbon-cable-with-2-54mm-idc-connector-60686534268.html>

4.10 Kit de herramientas para ponchar los cables par trenzado

Corresponde al conjunto de piezas que se requieren para la correcta instalación de los conectores a los respectivos cables par trenzado. Este kit consta esencialmente de 4 piezas:

- ✓ Un (1) pelador de cable.

- ✓ Una (1) ponchadora
- ✓ Una (1) crimpadora
- ✓ Un (1) probador de cable.

En la figura No. 4.11 se ilustra un kit de herramientas para ponchar los cables par trenzado.



Figura No. 4.11 Kit de herramientas para ponchar los cables par trenzado.

Fuente: A I TEC, Catálogo: Kit Intellinet Herramientas para Red. 2018.

El probador de cable permite comprobar los cables de la red de una manera relativamente fácil. Solo se debe conectar en cada uno de los extremos del cable, ya ponchado, cada una de las partes del tester, y al ponerse a operar, el probador indicara las posibles fallas que se puedan presentar en el cable. Puede detectar cortocircuitos, cables sin conectar, cruces de cables, entre otras falencias. En la figura No. 4.12 se muestra un par de testers de red conectado a un cable trenzado. Uno de ellos contiene en el mismo tester tanto la unidad de transmisión como la de recepción.



Figura No. 4.12 Tester de red conectado a un cable par trenzado.

Fuente: Tester de cables de red . (2019). Disponible: <https://www.xata.com/otros-tester-de-cables-de-red>.

4.11 Proceso para ponchar un cable par trenzado

A continuación, se relacionan los principales pasos que deben realizar para ponchar o crispar un cable par trenzado, para este caso un cable UTP categoría 5 con conectores RJ45.

- 1 Definir si el cableado es de tipo (estándar) directo o de tipo (estándar) cruzado, dependiendo para qué clase de conexión (utilización) se va a emplear.
2. Pelar los extremos de cada hilo del cable, quitándole la chaqueta unos 2 centímetros cada uno, mediante el pelador de cable.
3. Se organiza los hilos del cable, de cada uno de sus extremos, de acuerdo al tipo (estándar) escogido, organizándolos cuidadosamente, teniendo de presente que queden derechos y en el orden correcto según el estándar.
4. Cuando los hilos de los terminales del cable se encuentren en forma correcta, al estándar respectivo, se cortan con la ponchadora de forma uniforme y con la longitud requerida, para ser introducidos al conector (RJ45) los cuales deben quedar todos alineados.
5. Una vez alineados los hilos de manera correcta, se introducen en el conector (RJ45) teniendo en cuenta que los hilos no se desordenen.

6. Después de tener las puntas de los hilos en el interior del conector (RJ45) de forma correcta (ocupando totalmente el espacio respectivo), se coloca el cable en el orificio respectivo de la ponchadora y se presiona de forma fuerte hasta que la misma ponchadora indique en que momento el cable ha quedado completamente ponchado.

7. Revisado que se ha realizado correctamente el ponchado en uno de sus extremos, se hace lo mismo en con el otro extremo. En el caso que el tipo de cable sea directo se ponchara este extremo con el mismo orden del anterior, en caso que sea de tipo cruzado se utiliza el orden del código de colores del estándar correspondiente.

8. Se procede a probar si el cable quedo correctamente ponchado mediante el correspondiente tester. Si no se dispone de este probador, se puede realizar la prueba conectando el cable a un computador a un puerto Ethernet.

4.12 Cableado estructurado

Se entiende como *cableado estructurado*, el tendido de cables en el interior de un edificio, el cual corresponde a una red de área local (LAN). El tipo de cable generalmente es de par trenzado de cobre UTP STP, para redes de tipo IEEE 802.3. Sin embargo, puede utilizarse fibra óptica y o cable coaxial. La norma que involucra las características estructurales y funcionales de este tipo de cableado es la EIA TIA 568, emitida en 1991, cuyo propósito de este estándar es de ser universal para la prestación de servicios de: voz, imagen y mensajes en las redes LAN y AN, principalmente. ⁽¹³⁾

La concepción generalizada de *cableado estructurado*, es que corresponde a la red donde se realizan todas las comunicaciones de una empresa u organización, buscando de hacer más eficiente el flujo de información entre todas sus áreas y dependencias.

A este tipo de redes se conectan todos los dispositivos que captan, generen y manejen información: computadores, cámaras de seguridad, multimedia, equipos inalámbricos, oIP (*Voiceover*), PoE (*o erover t ernet*), entre otros. Por lo general existe un *site de comunicaciones*, desde donde se extiende la red hasta todos los puntos de las estaciones o salas de trabajo de la empresa.

El *cableado estructurado*, está conformado esencialmente por los siguientes componentes

4.12.1 Áreas de trabajo

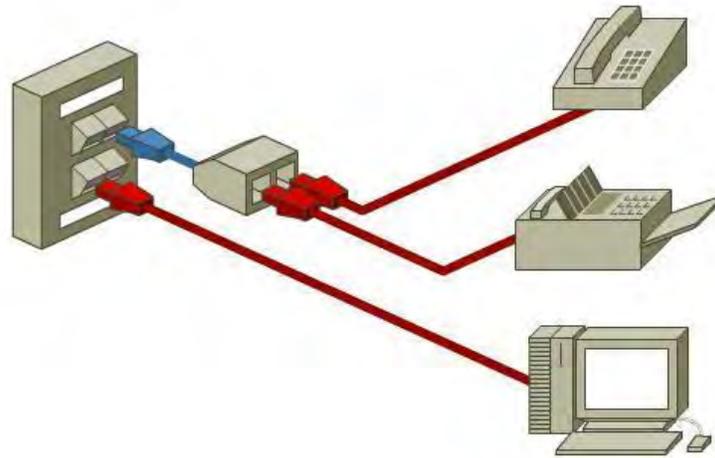
El área de trabajo (*Work Area*), está conformada, básicamente por la salida (toma o rack) de telecomunicaciones (OT), hasta la estación de trabajo (equipo). El cableado de esta sección debe ser relativamente simple de interconectar de manera tal, que permita ser removido, cambiado de lugar, o sustituido muy fácilmente. Los componentes en el área de trabajo son las PC s, teléfonos, fax, impresoras, módem, escáner y demás terminales que requiera los usuarios de la red. En la figura No. 4.13 se muestran algunos OT o *face plate* (tomadas) que se utilizan para conectar los equipos ⁽¹⁴⁾



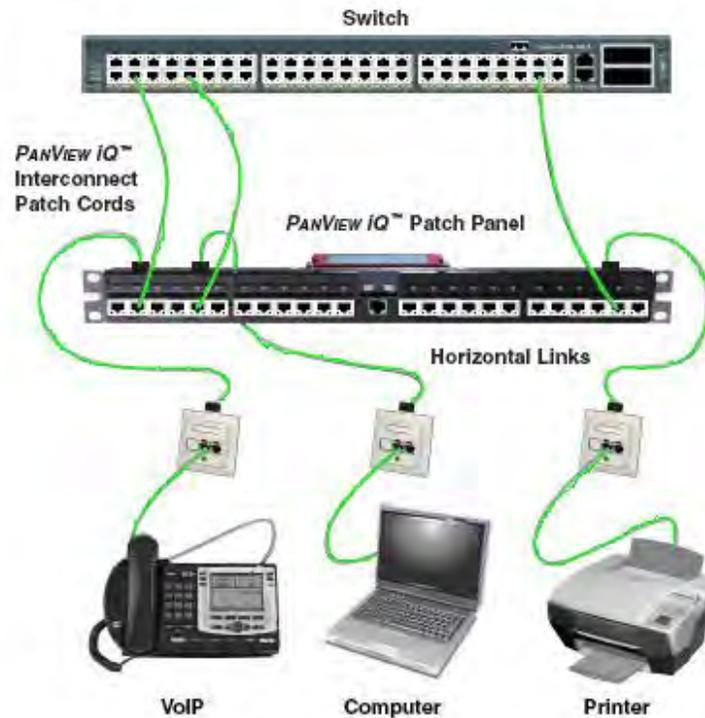
Figura No. 4.13 Imágenes de Face Place RJ 45 de 2 tomas.

Fuente: Digitus Roseta Empotrable. (2019). Disponible:
<https://www.pccomponentes.com/digitus-roseta-empotrable-cat6-2-x-rj45-angulo-hembra>

La conexión de los terminales (equipos) con la red se realiza, generalmente, de dos formas. Una de ellas es aquella donde los equipos se conectan directamente (interconnect) a la toma o rack (punto de conexión a la red) y la otra, denominada conexión cruzada (*crossconnect*), que corresponde a aquella donde los equipos no se conectan directamente al rack de conexión, sino que se encuentran conectados a la parte fija de un panel de parcheo intermedio. La conexión entre los dos paneles se hace a través de un cable que recibe el nombre de *latiguillo de parcheo* (patchcord o jumper). En la figura No. 4.14 se ilustran estos dos tipos de conexión.



a.) Interconnect.



b.) Crossconnect.

Figura No. 4.14 Componentes básicos de un área de trabajo del sistema de cableado estructurado y su tipo de conexión.

Fuente: Cableado estructurado. (2019). Disponible: <https://docplayer.es/31283702-Cableado-estructurado.html>

4.12.2 El cableado horizontal

Corresponde a la distribución del cableado en una misma planta del edificio. Conecta los diferentes sitios de trabajo con los correspondientes distribuidores o repartidores horizontales. No se permite empalmes ni uniones, con excepción de la presencia de un *punto de consolidación*. La distancia del cableado no debe superar los 90 metros y para el caso de los latiguillos (*patc -cords*) no es recomendable distancias superiores. ⁽¹⁵⁾

Los tipos de cableado horizontal, para el caso de par trenzado, es UTP de 4 pares categoría 5e, 6 y 6 , de 100 ohmios, o dos pares STP, de 150 ohmios. En el caso de fibra óptica se recomienda multimodo de 2 hilo (62,5 125 um). El cable coaxial ya no se aplica.

Cada conexión de salida del sitio de trabajo (*A: or Area*) se conecta directamente al correspondiente *Terminal de Conexión* (TC), de cada piso del edificio, por lo tanto, la topología del tendido del cableado horizontal es de forma estrella. Debe existir como mínimo un gabinete de TC por cada planta de la edificación o por cada 1.000 metros cuadrados. El espacio para el TC debe ser de total exclusividad.

Para conducir el cableado horizontal se emplean, generalmente, canaletas plásticas, las cuales se sobreponen en las paredes del interior o exterior de la planta correspondiente del edificio. En la figura No. 4.15 se muestran un par de estas canaletas, así como la canalización de cableado estructurado sobre techo.

El tendido del cableado horizontal y el dimensionamiento de las canaletas a utilizar depende por un lado de las disponibilidades que ofrezca la estructura del área correspondiente y por el otro lado al tipo y a la cantidad de cables a distribuir. Generalmente, como se indicó anteriormente, las canaletas se sobreponen en la parte inferior de las paredes, pero si existe cielo raso suspendido, se recomienda el empleo de las canales sobrepuestas sobre este techo. Ahora por cada dos cables UTP se recomienda canaletas de 1 pulgada como mínimo y para dos fibras ópticas 1 pulgada.



Figura No. 4.15 Canaletas para el tendido del cableado horizontal

Fuente: Canaletas para cableado estructurado. (2019).

Disponible: http://questinter.com/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=242

Cableado Estructurado. (2019). Disponible:

<https://cableadoestructuradofbb2.wordpress.com/tag/area-de-trabajo>

En la figura No. 4.16 se muestran imágenes del tendido de un cableado estructurado sobre techo y pared.





Figura No. 4.16 Tendido horizontal de un cableado estructurado, tanto en techo como en pared.

Fuente: The Basics of Structured Cabling Electrical Construction ... (2019). Disponible: <https://www.ecmweb.com/basics/basics-structured-cabling>

En el diseño de la distribución del cableado horizontal debe considerarse previamente que permita un fácil mantenimiento y la relocalización de áreas de trabajo. También debe tenerse en cuenta la posibilidad de incorporar otros sistemas de información del edificio, tales como: televisión por cable, control ambiental, seguridad, audio, alarmas y sonido, entre otros.

En el *cableado orientado* se presenta regularmente un *atc anel*, el cual es un dispositivo de interconexión a través del cual los tendidos de este cableado se pueden conectar con otros dispositivos de networking, tales como: hubs y repetidores. Está conformado por un arreglo de conectores RJ45, los cuales se emplean para realizar conexiones cruzadas entre los equipos activos y el *cableado orientado*. Se recomienda que la distancia máxima entre el *Terminal de Conexión* (TC) y el *atc anel* no deba sobrepasar los 100 metros. Así mismo tanto los *atc anel* y los *Terminales de Conexión* deben estar provistos de ventiladores y extractores de aire y disponer de adecuadas tomas de energía regulada.

Se debe buscar que, tanto el cableado horizontal como el cableado vertical, deben ubicarse lo más lejos posible de todas aquellas fuentes o dispositivos que generen radiofrecuencias, tales como: motores eléctricos, lámparas fluorescentes, balastos, aires acondicionados, líneas de alta tensión, entre otros.

Existe una gran variedad de accesorios, en plástico, para hacer el montaje requerido del *cableado orientado*, tales como: la T y el codo horizontales, así

como la junta para canaletas. En la figura No. 4.17 se muestran algunos de estos accesorios



a.) T- Horizontal



b.) Codo Horizontal



c.) Junta par canaletas

Figura No. 4.17 Accesorios para el tendido del cableado horizontal.

Fuente: T Horizontal para canaletas. (2019). Disponible: [https://www.incom.mx/producto/T-Horizontal-para-canaleta-\(2x2\)-marca-commscope-fgsmhtac](https://www.incom.mx/producto/T-Horizontal-para-canaleta-(2x2)-marca-commscope-fgsmhtac)

En la figura No. 4.18 se ilustran algunos de los diferentes gabinetes, donde se conectan los terminales del cableado estructurado horizontal (*Terminales de Conexión*).

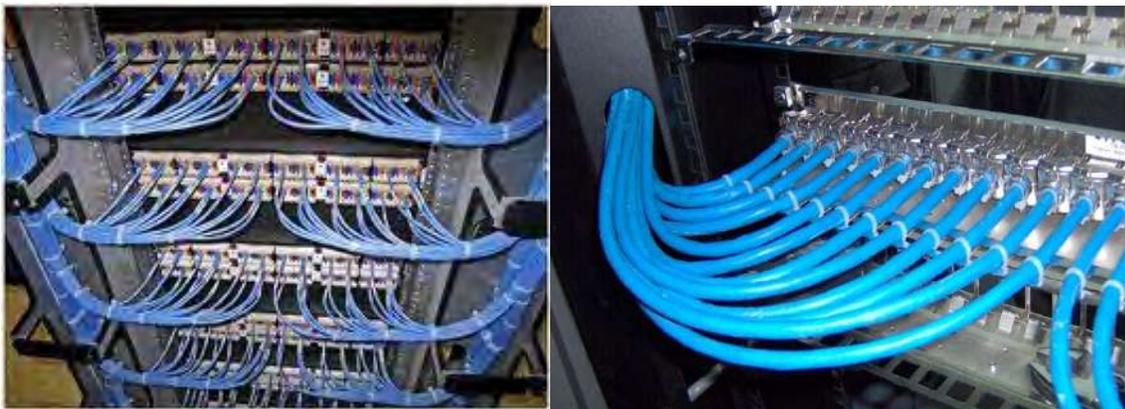


Figura No. 4.18 Gabinetes de conexión del cableado estructurado horizontal (terminales de conexión).

Fuente: Gabinete para cableado estructurado. (2019). Disponible: <http://aretic.com/index.php/cableado-estructurado>

Para el caso de redes de datos de gran tamaño, por lo general los *Terminales de Conexión* (TC) se identifican en dos: Servicio de Distribución Principal MDF (*Main distribute acility*) y Servicio de Distribución IntermedialDF (*ntermediate distribute acility*).⁽¹⁶⁾

En la figura No. 4.19 contiene un diagrama de bloques que indica la interconexión entre un MDF o POP (*oint of resence*) y varios IDF's .

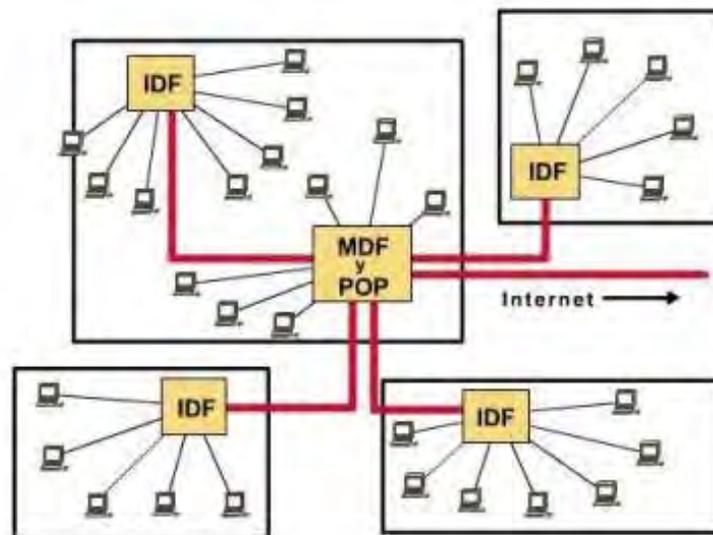


Figura No. 4.19 Interconexión entre un MDF o POP y varios IDF's.

Fuente: MDF, IDF, HCC, ICC. (2019). Disponible: <http://telecomunicacionesbyani.blogspot.com/2012/02/mdf-idf-hcc-icc.html>

El MDF (*Main distribute acility*), es una estructura de distribución de señales para conectar equipo de redes y telecomunicaciones a los cables y equipos que corresponden al proveedor de servicios de Telefonía, Internet, Redes Digitales de Servicios Integrados (ISDN), entre otros.

Generalmente el MDF cuenta con dispositivos de protección, tales como: disipadores de calor. Así mismo el MDF es considerado como un punto de prueba entre una línea telefónica y la oficina central. Dependiendo de su tamaño, la temperatura dentro del MDF debe ser controlada con un equipo de aire acondicionado, ya que, a mayor número de equipos se genera una mayor disipación de calor. En la figura No. 4.20 se muestra una imagen de un gabinete de un MDF, para el caso de redes de datos de gran tamaño.



Figura No. 4.20 Imagen de un terminal MDF

Fuente: MDF, IDF, HCC, ICC. (2019). Disponible:

<http://telecomunicacionesbyani.blogspot.com/2012/02/mdf-idf-hcc-icc.html>

El IDF (*intermediate distribute acility*), corresponde a una estructura de distribución de comunicación secundaria para un cableado horizontal que usa una topología de red en estrella. Esta interconectado al MDF correspondiente y por lo tanto los servicios que presta a los equipos o terminales del usuario de la red, dependen del distribuidor principal al cual esta interconectado. La cantidad de IDF's depende de cómo está distribuida físicamente las áreas de trabajo y del número de las mismas que existan en el espacio horizontal a cubrir. En la figura No. 4.21 se muestran las imágenes de dos tipos de gabinetes, de la gran variedad que existen de ellos, que son comúnmente utilizados en una terminal IDF. ⁽¹⁷⁾



Figura No. 4.21 Imagen de terminales IDF

Fuente: IDF. (2019). Disponible: <https://asoniaperezlopez1114.wordpress.com/2014/05/07/idf-intermediate-distribution-facility>

4.12.3 El cableado vertical

Corresponde a la interconexión entre los diferentes gabinetes (armarios) del *cableado oriental* y entre estos, a la sala central de equipamiento, así como a las diferentes entradas de servicios, incluyendo el cableado entre edificios. También se conoce cableado vertebral, troncal o *backbone*. Centraliza, en la sala central de equipamiento, todos los armarios de comunicaciones de cada piso mediante una topología de estrella. ⁽¹⁸⁾

Para el caso de transmisión de datos, el *cableado vertical* se implementa con cables UTP (800 metros en promedio para voz y 90 metros para datos), STP (700 metros en promedio para voz) y o con fibra óptica monomodo (3.000 metros en promedio para datos) o multimodo (2.000 metros en promedio para datos). En el caso de decidir utilizar UTP, el mismo será de categoría 5e, 6 o 6A, y se dispondrá un

número de cables desde cada gabinete al gabinete seleccionado como centro de estrella.

El cableado vertical para el edificio, que baja o sube a la planta baja o alta del edificio y se conecta con el cuarto de equipo ER (*quipment Room*) que está ubicado en un cubículo especial. En la implementación de un bac bone debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Que ofrezca un grado alto de flexibilidad para los servicios a soportar.
- ✓ Contar con una vida útil adecuada.
- ✓ Tamaño de la edificación y la población de usuarios a servir.
- ✓ No se pueden colocar más de dos niveles jerárquicos de cross-connects.
- ✓ No se debe utilizar Bridges
- ✓ La longitud del patch-cord del cross-connect principal e intermedio no puede ser mayor a 20 metros.

El polo a tierra debe cumplir con los requerimientos de definidos en la norma EIA TIA 607

En la figura No. 4.22 se ilustra una imagen, donde se puede apreciarla distribución del cableado vertical estructurado.

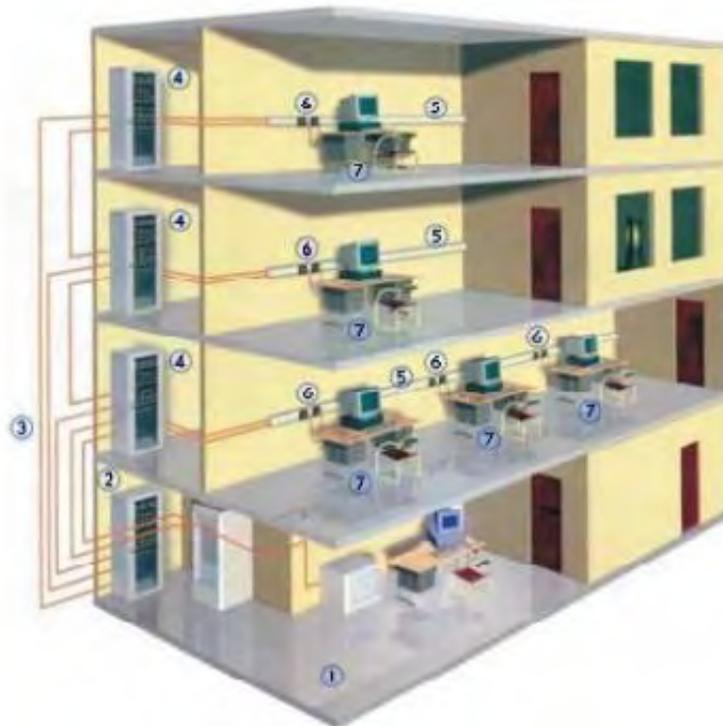


Figura No. 4.22. Distribución del cableado vertical estructurado.

Fuente: Solange Roffé, *Cableado estructurado*, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional del Nordeste, 2016

Como complementario a las imágenes de distribución horizontal y vertical referenciadas anteriormente, en la figura No. 4.23 se ilustran otras imágenes donde se puede apreciar la distribución completa de un *cableado estructurado*, de una red relativamente reducida, así como sus principales componentes.

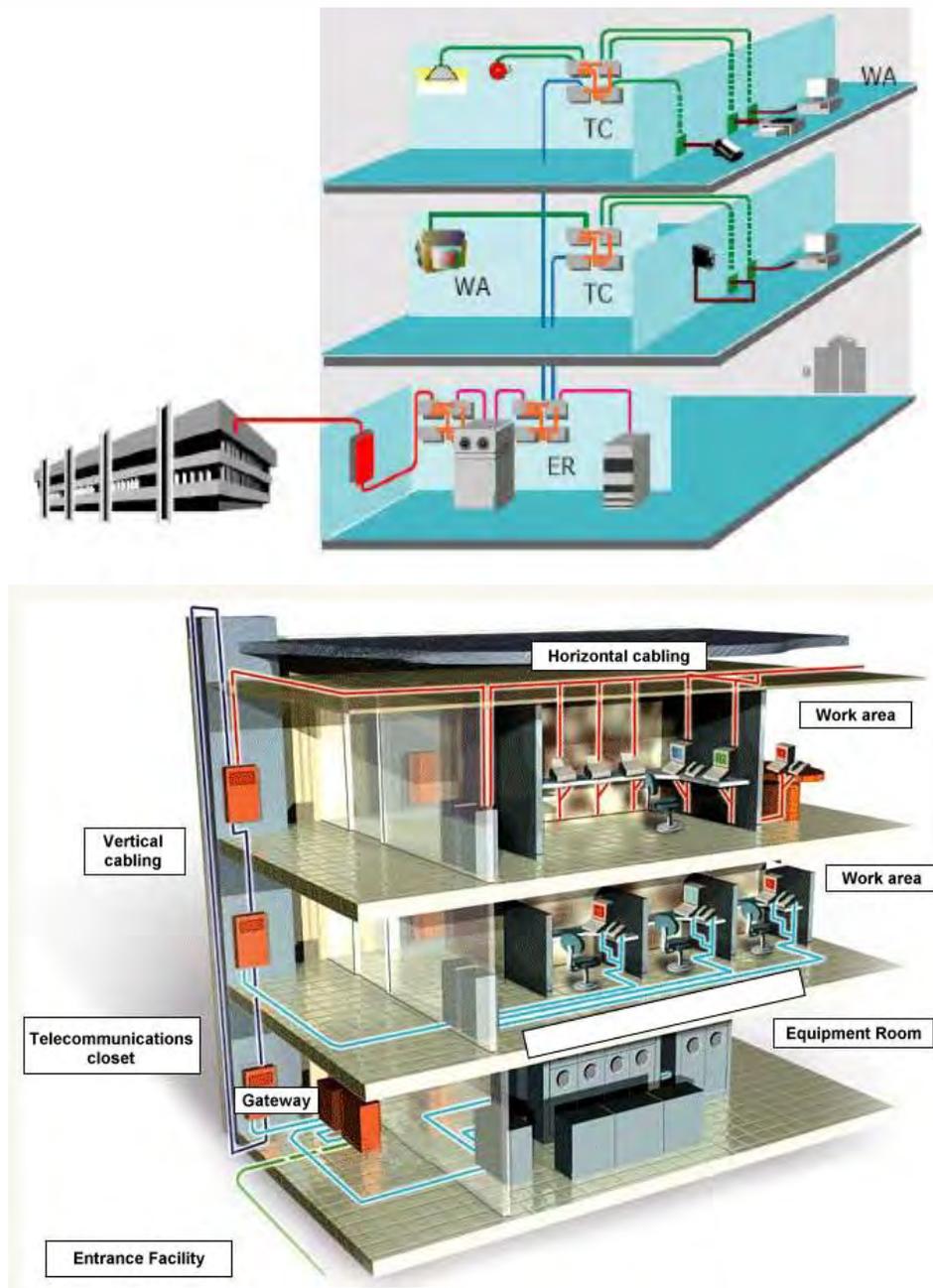


Figura No. 4.23 Imágenes de la distribución global de un cableado estructurado.
Fuente: S.C.E. (2019). Disponible: <http://www.instelsa.es/servicios/networking/s-c-e.html>
[/Cable bac bone. \(2019\). Disponible: http://www.cabletec.es/noticia-que-es-el-cableado-de-bac-bone-19](http://www.cabletec.es/noticia-que-es-el-cableado-de-bac-bone-19)

4.12.4 Cuarto de equipos (ER)

Corresponde al espacio destinado exclusivamente a albergar todos los equipos requeridos por la red, tales como: equipos de cómputo, routers, switch, repetidores, Hubs, módems, conmutador de video, central telefónica, equipos de soporte, entre otros, así como los paneles de conexión para el cableado estructurado de la red. La norma EIA TIA 569 es la que se aplica para el diseño del cuarto de equipos. ⁽¹⁹⁾

Este cuarto debe de tener la capacidad de albergar tanto el equipo físico como los cables sin ningún problema; su diseño debe de ser apto para la transmisión de voz y datos y la posible incorporación de otros sistemas como seguridad física y lógica, sistemas de Control de Acceso, el CCT (circuito cerrado de televisión), y todos aquellos que sistemas que se demande. Así mismo, el cuarto de equipos, debe disponer de espacio de trabajo, suficiente y adecuado, para el personal encargado del funcionamiento de la red. Todo edificio debe contar con un cuarto de equipos.

En la figura No. 4.24 se ilustran unas imágenes de las instalaciones de un cuarto de equipos para redes de *cableado estructurado*.

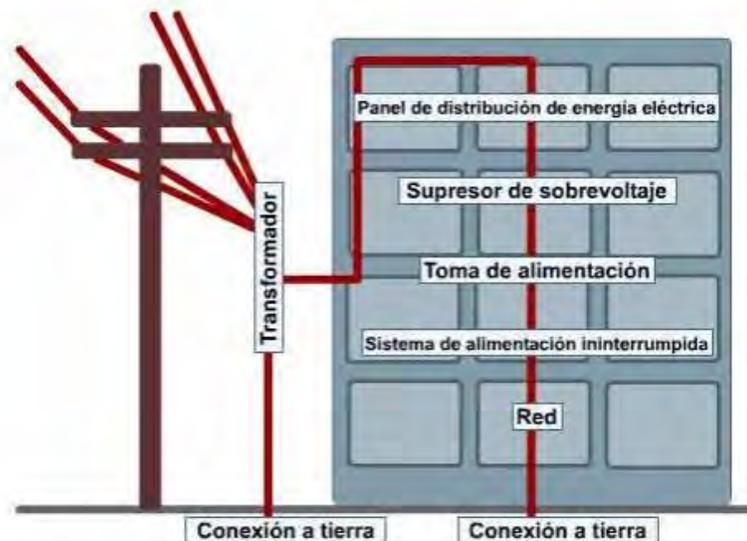


Figura No. 4.24 Imágenes de las instalaciones de un cuarto de equipos para redes de *cableado estructurado*.

Fuente: Cuarto de Telecomunicaciones. (2019). Disponible:
<http://estoesredes.blogspot.com> 2008 07 cuarto-de-telecomunicaciones.html.

4.12.5 Conexión a tierra

La conexión a tierra tiene como propósito establecer un circuito directo a tierra para todo voltaje que se presente en ella. En principio consiste en un electrodo de conexión a tierra conformado por una varilla de cobre (*copper eld*), de por lo menos 3 metros de longitud y pulgada de grosor, que se entierra en el suelo, que presente buen grado de conductividad. Está varilla debe enterrarse cerca de donde del sitio donde se implemente el sistema de electricidad del *cableado estructurado*. En la figura 4.25 se ilustra una figura donde se indica la estructura básica del sistema de electricidad que alimenta al *cableado estructurado*, así como la conexión a tierra. Antes de que se ponga en funcionamiento el sistema del *cableado estructurado*, hay que realizar las pruebas de funcionamiento de la conexión a tierra. ⁽²⁰⁾



FiguraNo. 4.25 Estructura básica del sistema de electricidad que alimenta al *cableado estructurado* y la conexión a tierra.

Fuente: Manual de Cableado Estructurado, Gobierno del Estado de Tabasco Tabasco cambia contigo Dirección General de Tecnología de la Información y Comunicaciones, 2017, p.23.

Las conexiones a tierra para el *cableado estructurado* se implementan, por lo general, para los siguientes espacios:

- Instalaciones de ingreso.

- Estaciones de trabajo.
- Cuarto de equipos.

En la figura No. 4.26 se ilustra un esquema donde se detalla el panel de servicio eléctrico y la conexión a tierra.

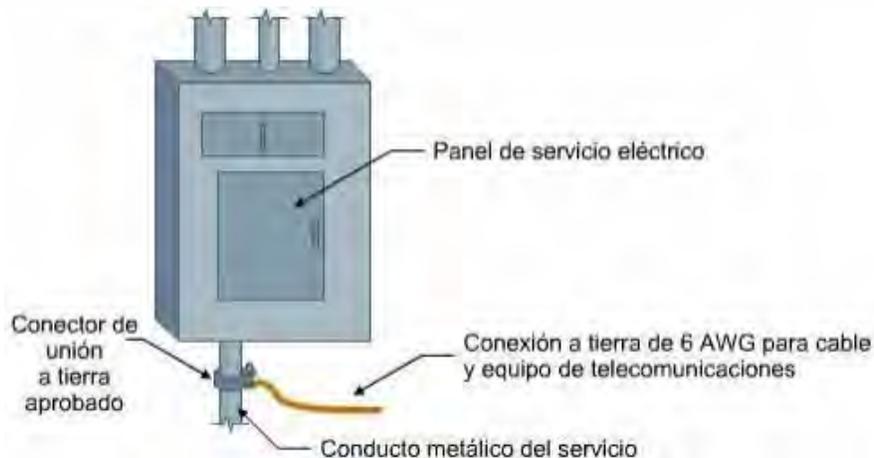


Figura No. 4.26 Panel de servicio eléctrico y la conexión a tierra.

Fuente: Manual de Cableado Estructurado, Gobierno del Estado de Tabasco Tabasco cambia contigo Dirección General de Tecnología de la Información y Comunicaciones, 2017, p.24.

En cada país existen normas nacionales para la implementación de los diferentes sistemas de conexión a tierra. En el caso colombiano, entre otras, se encuentra las establecidas por el Ministerio de Minas y Energía, en el *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas* (REITE), el cual es evaluado periódicamente.

En Estados Unidos existe el Código Nacional de Electricidad (NEC: *National Electrical Code*), establece los requisitos mínimos de seguridad que se deben tener en cuenta en la implementación de cualquier cableado eléctrico y conexión a tierra. Estas normas son evaluadas cada tres años. El NEC es muy tenido en cuenta en gran parte de naciones.

El Instituto de Nacional Americano (ANSI: *American National Standards*) la Asociación de la Industria de las Telecomunicaciones (TIA: *Telecommunications Industry Association*) la Asociación de Industrias Electrónicas (EIA-607: *Electronics Industry Alliance* -), han elaborado un documento que referencian el entorno de proveedores y productos múltiples de instalaciones eléctricas y de redes de

transmisión de información, a través de medios físicos. En este documento se encuentra los estándares de las prácticas de conexión a tierra, tanto en los puntos específicos de interfaz de un edificio, así como la configuración de la conexión a tierra para los equipos y los sistemas de telecomunicaciones.

El estándar TIA EIA-J-STD-607-A, fija los diferentes aspectos técnicos en lo que corresponde a la puesta a tierra y apantallamientos de cableado estructurado. A continuación se relacionan los principales aspectos que contempla este estándar.

(21)

- La pantalla de los cables ScTP deberá ser conectada a tierra en el distribuidor de cableado horizontal mediante unión a la barra de tierra del cuarto de telecomunicaciones.
-
- La conexión a tierra en el área de trabajo se logra mediante la propia conexión a tierra disponible en la conexión a la red eléctrica de los equipos de usuario. Para que esto sea posible, los latiguillos deben de ser también de tipo ScTP.
-
- En el área de trabajo la diferencia de tensión entre la toma de tierra de la red eléctrica y la pantalla de protección de los cables ScTP no debe de exceder de 1v eficaz. Si hubiera una tensión superior, debe de ser corregida la anomalía antes de proceder a usar el cable.
-
- En el cuarto de entrada de los servicios de telecomunicaciones deben de ser instaladas barras de cobre de un espesor de 1/4 de pulgada (6,3 mm), una anchura de 4 pulgadas (10 cm) y de longitud variable. En los cuartos de telecomunicaciones su anchura será de 2 pulgadas (5cm).
-
- Estas barras de cobre estarán perforadas a intervalos regulares y en dichos orificios se atornillaran las conexiones de tierra de racks, equipos activos de red y protectores contra sobretensiones.
-
- Las barras de cobre estarán unidas entre sí y con la tierra del edificio por un cable de color verde de al menos 6 AWG, siendo un valor recomendado 3 AWG.”.

En la figura No. 4.27 se ilustra un sistema de puesta a tierra para la instalaciones de cable estructurado, utilizando una red mallada bajo suelo.

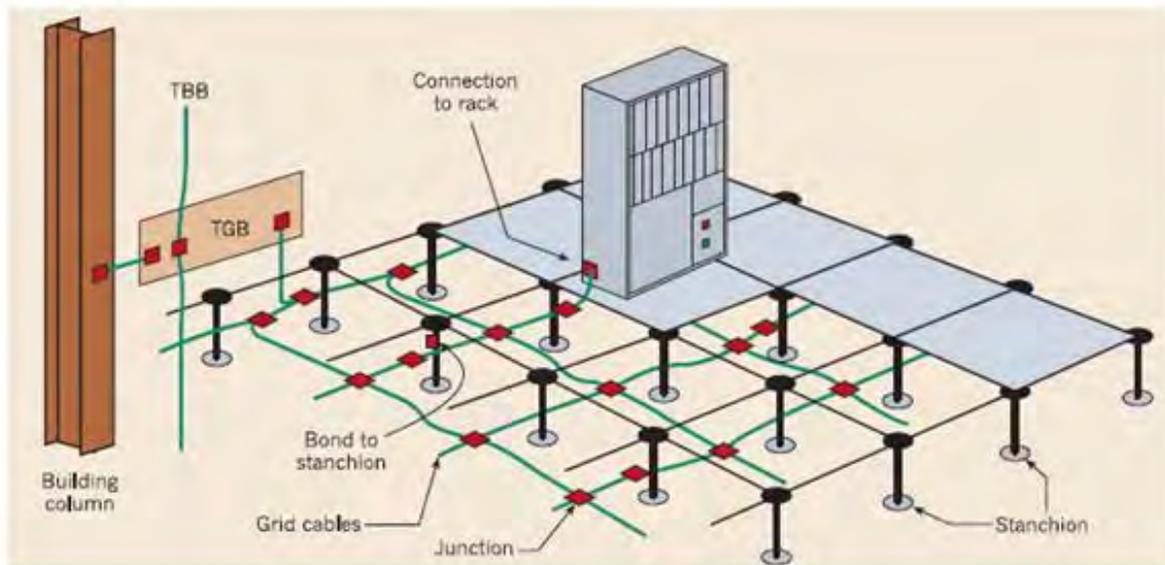


Figura No. 4.27 Sistema de puesta a tierra para la instalaciones de cable estructurado, utilizando una red mallada bajo suelo.

Fuente: Sistema de puesta a tierra para la instalaciones de cable estructurado. (2019). Disponible: <http://fibraoptica.blog.tartanga.eus> 2015 04 15 sistemas-de-puesta-a-tierra-en-las-instalaciones-de-cableado-estructurado

4.13 Aspectos generales para el diseño: Red de Cableado Estructurado

Entre las principales consideraciones que se deben tener presente para la elaboración y presentación de una red de *cableado estructurado*, se pueden destacar los siguientes aspectos: ⁽²²⁾

- Identificar completamente los servicios a ser prestados por la red, tales como: transmisión de datos, voz, video, entre otros, así como la estimación de la cantidad de información a ser manejada tanto actuales como futuras.
- Especificar, con precisión, los puntos donde se colocaran los diferentes tipos de servicio: actuales y de posible proyección.
- Definir las respectivas áreas de trabajo y la correspondiente de salida a ser implementado en cada una de está áreas.
- Determinar la estructura del *cableado estructurado*, para cada uno de los diferentes pisos del edificio a cubrir la Red. Así como el tipo, características y

dimensionamiento del cable a ser utilizado, y también el de las interfaces requeridas tanto con el *cableado vertical* (toma o rack de telecomunicaciones (OT)), como para cada una de las estaciones de trabajo a ser cubiertas. También el tipo y dimensionamiento de las canaletas a emplear y su respectivo fijamiento.

- Determinar la estructura del tendido del *cableado vertical* a ser empleado para interconectar los pisos del edificio que cubrirá la Red. Así como el tipo, características y dimensionamiento de cable a ser utilizado, y del tipo y dimensionamiento de las canaletas a emplear y su respectivo fijamiento.
- Definir las características estructurales y de requerimientos de preinstalaciones de los *Terminales de Conexión* (TC), así como el sitio de su ubicación, de tal forma que cumpla con la norma de no exceder de los 100 metros de longitud con los puntos finales de conexión.
- Diseñar el *cuarto de equipos* (ER), indicando los diferentes y cantidades de equipos a ser instalados (actuales y de posible proyección). Así mismo como las respectivas interfaces requeridas con el *cableado vertical* y con cada uno de los equipos requeridos en *cuarto de equipos* (estaciones o puestos de trabajo). También se debe determinar su sitio de ubicación.
- Especificar todos los requerimientos del suministro de energía eléctrica (voltajes, protecciones, tomas, entre otros) para todos los equipos y dispositivos.

4.14 Estructura Básica de un sistema de Cableado Estructurado

Con el propósito de simplificar la comprensión de la composición de un sistema de *cableado estructurado*, en la figura No. 4.28 se hace una representación esquemática de su estructura básica.

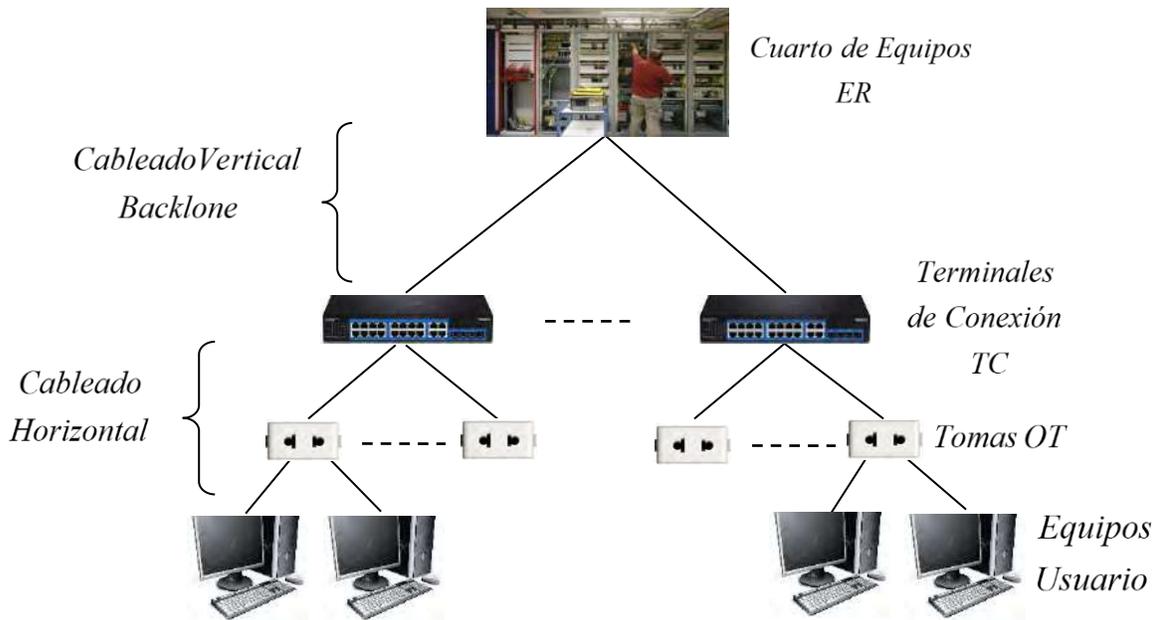


Figura No. 4.28 Estructura Básica de un sistema de *Cableado estructurado*

4.15 Organismos y estándares sobre cableado estructurado

4.15.1 Organismos

Entre los principales organismos internacionales que establecen normas sobre *cableado estructurado*, entre otros aspectos de los sistemas de servicios de telecomunicaciones, se pueden resaltar los siguientes:⁽²³⁾

- **ANSI** (*American National Standards Institute*). Es una organización privada sin fines de lucro fundada en 1918, la cual administra y coordina el sistema de estandarización voluntaria del sector privado de los Estados Unidos.
- **EIA** (*Electronic Industry Association*). Fue creada en 1924, la cual desarrolla normas y publicaciones sobre las principales áreas técnicas: los componentes electrónicos, electrónica del consumidor, información electrónica, y telecomunicaciones.
- **TIA** (*Telecommunications Industry Association*). Fue fundada en 1985, y dedicada a establecer normas de cableado industrial voluntario para muchos productos de las telecomunicaciones. Actualmente cuenta con más de 70 normas preestablecidas.

- **ISO** (*International Standards Organization*). Es una organización mundial, con más de 140 países, no gubernamental creada en 1947, la cual se encarga de establecer normas nacionales.
- **IEEE** (*Instituto de Ingenieros Eléctricos y de Electrónica*). Entre otros aspectos es principalmente responsable por las especificaciones de redes de área local como 802.3 Ethernet, 802.5 Token Ring, ATM y las normas de Gigabit Ethernet.

4.15.2 Normas del cableado estructurado

Entre los diversos estándares vigentes más referenciados respecto al *cableado estructurado*, se encuentran los siguientes: ⁽²⁴⁾

- **ANSI/TIA/EIA-568-B**: corresponde a estándares referentes al diseño e implementación de sistemas de *cableado estructurado* para edificios comerciales y entre edificios en entornos empresariales o universitarios u objetivo es definir los tipos de cables, distancias, conectores, arquitecturas, terminaciones de cables y características de rendimiento, requisitos de instalación de cable y métodos de pruebas de los cables instalados.
- **TIA/EIA 568-B1**: define los requerimientos generales del desarrollo e implementación de las redes de cableado estructurado.
- **TIA/EIA-568-B.2**: estos estándares se centran en los componentes de sistemas de cable de pares balanceados.
- **TIA/EIA 568-B.3**: se concentran en definir los componentes de sistemas de cable de fibra óptica.
- **ANSI/TIA/EIA-569-A**: normas que hace referencia a los recorridos y espacios de telecomunicaciones requeridos para el tendido del cableado estructurado en edificios comerciales.

4.16 Ejemplo de diseño de un sistema de cableado estructurado

Existe una inmensa variedad de ejemplos sobre procesos de diseño e implementación de sistemas de *cableado estructurado*, para diferentes tipos de espacios de infraestructuras físicas. Como una referencia se describe a continuación, de manera muy puntual, los principales aspectos técnicos que se tuvieron en cuenta en uno de ellos, que corresponde al *studio de actividad Técnica y económica para el diseño del Cableado estructurado en el edificio de la*

C T ubicado en la ciudad de Riobamba- Ecuador", elaborado por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Ecuador.⁽²⁵⁾

El edificio cuenta con 3 pisos y un mezanine. Los aspectos fundamentales que se tuvieron en cuenta para hacer la propuesta final del diseño de la red física del *cableado estructurado* en mención, fueron los siguientes:

4.16.1 Definición de los puntos terminales por piso

Fueron identificados 59 puntos terminales a ser cubiertos por la Red, los cuales se distribuyen en la siguiente manera:

- *iso primero*: Atención al Público (8) Recaudación (7) Servicio de Internet (5) Cabinas (6) Guardianía (2). Subtotal (28).
- *Me anine*: Oficinas (6).
- *iso Segundo*: Gerencia (1) Secretaría de Gerencia (1) Jefatura de Recaudación (1) Cuarto de Equipos (1) Oficina Técnica (9) Archivo y Bodega (1) Capacitación para Facilitadores (1). Subtotal (15).
- *iso Tercero*: Sala de Transmisores (2) Planta Externa (3) Sala de Fuerza y Climatización (1) Oficina de Planeación (1) Sala de Multiservicios (1) Oficina de Diseño de Acceso (1) Oficina de la Jefatura Técnica (1). Subtotal (10)

4.16.2 Identificación los requerimientos de la Red

Los requerimientos básicos identificados para la operación y funcionamiento de la Red fueron los siguientes:

- Administrar las diferentes áreas de trabajo, a través del usos de irtual LAN's (lan's).
- Segmentar la infraestructura física de la Red, mediante la implementación de las lan's.
- Dar seguridad a la Red de posibles ataques, mediante la implementación de dispositivos configurados de tal forma que permitan: limitar, cifrar o descifrar el tráfico entre los diferentes ámbitos de la Red (ire all)
- Determinar del ancho de banda a ser utilizado para el servicio de Internet.

- Asignar el o los cuartos de comunicaciones, donde finalizará el cableado de la LAN donde esta concentrado la asignación de los múltiples servicios a prestar la Red.
- Permitir la agilización y confiabilidad de la transferencia de información entre cada uno de las diferentes áreas de trabajo de la Red.

4.16.3 Identificación los requerimientos del usuario

Entre las principales expectativas que fueron tipificadas a ser demandadas por parte de los usuarios de la Red, se tuvieron las siguientes:

- que su *funcionalidad* garantice una óptima conectividad entre los usuarios y aplicaciones a una alta velocidad.
- que permita una excelente *escalabilidad*, de tal forma que soporte cualquier tipo de dispositivos informáticos que sea necesario instalar, para mejorar su funcionamiento, sin requerir demandas mayores de cambio en el diseño y estructura de la misma. .
- que su *adaptabilidad* admita la incorporación de más y o nuevas tecnologías y aplicaciones, sin mayores complicaciones (red convergente).
- que su operación y funcionamiento sea de *fácil administración*.

4.16.4 Determinación de los equipos y dispositivos

Teniendo como fundamento los estudios de requerimiento de servicios a prestarse por la red, se determinaron los siguientes equipos y dispositivos a ser implementados:

- Dos *Switches Catalys* de *puertos* en cada rack, lo que admitiría una comunicación entre ellos en gigabit Ethernet. Así mismo permitiría un manejo de las *LANs*, ofreciendo las características técnicas y funcionales indicadas en la tabla No. 4.2.

Tipo de dispositivo	Conmutador - 48 puertos - Gestionado - apilable
Tipo incluido	Montaje en bastidor - sobremesa - 1U
Puertos	48 x 10/100 + 2 x GBIC
Tamaño de tabla de dirección MAC	8K de entradas
Protocolo de gestión remota	SNMP, RMON
Método de autenticación	RADIUS, TACACS+
Características	Capacidad duplex, Encaminamiento IP, activable, apilable
Cumplimiento de normas	IEEE 802.3, IEEE 802.3u, IEEE 802.3z, IEEE 802.1D, IEEE 802.1Q, IEEE 802.3ab, IEEE 802.1p, IEEE 802.3x, IEEE 802.1w, IEEE 802.1x
Memoria RAM	64 MB - integrado
Memoria Flash	16 MB Flash
Dispositivos integrados	Panel led
Indicadores de estado	Actividad de enlace, velocidad de transmisión del puerto, modo puerto duplex, ancho de banda utilización %, alimentación, tinta OK
Expansión / Conectividad	
Interfaces	48 x 10Base-T/100Base-TX - RJ-45 - 48 1 x consola - RJ-45 - 1 - gestión 2 x GBIC
Alimentación	
Dispositivo de alimentación	Fuente de alimentación - interna
Voltaje necesario	CA 120/230 V (50/60 Hz)

Consumo eléctrico en funcionamiento	86 vatios
Características	Contector de sistema de alimentación redundante (RPS)
Cumplimiento de normas	UL, cUL
Características Estructurales y otras	
Anchura	41.3 cm
Profundidad	44.5 cm
Altura	4.5 cm
Peso	5.9 kg
Cables incluidos	Adaptador serie
MTBF (tiempo medio entre errores)	163,000 hora(s)
Cumplimiento de normas	Certificado FCC Clase A, CSA, UL, TUV GS, BSMI, cUL, EN 60950, EN55022, NOM, VCCI Class A ITE
Software / Requisitos del sistema	
Software incluido	Standard Multilayer Software Image (SMI)
Garantía del fabricante	
Servicio y mantenimiento	Garantía limitada de por vida
Detalles de Servicio y Mantenimiento	Garantía limitada - piezas y mano de obra - de por vida - introducir
Parámetro de Entorno	
Temperatura mínima de funcionamiento	0 °C

Temperatura máxima de funcionamiento	45 °C
Ámbito de humedad de funcionamiento	10 - 85%
Altitud máxima de funcionamiento	3 km

Tabla No. 4.2 Características técnicas y funcionales del S witchCatalys 3550
Fuente: Quiza, J.D., *Estudio de factibilidad Técnica y económica para el diseño del Cableado estructurado en el edificio de la C T - Riobamba- Ecuador*, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Facultad de Informática y Electrónica Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, en el año 2014, p. 80.

En la figura No. 4.29 se ilustra una imagen de un S witch Catalys de puertos.



Figura No. 4.29 S witchs Catalys 3550 de 48 puertos.

Fuente: Catálogo Cisco Catalyst 3550 Series Intelligent Ethernet S witches". 2018.

- *Fibra monomodo*, para el cableado vertical que interconectaría los puertos de los S witchs con los routers. La fibra monomodo ofrece mayor rendimiento, permitiendo cubrir mayores distancias cuando se utiliza como medio de backbone. En la figura No. 4.30 se muestra un tramo de fibra óptica monomodo.



Figura No. 4.30 Tramo de un cable de fibra óptica monomodo.

Fuente: Catálogo B T C-SM- Cable de fibra Monomodo m", iFi Pro. 2018.

- *Cable T categoría A*, para el cableado horizontal, con un ancho de banda de 1.2 GHz por par. Este tipo de cable permite el soporte simultáneo de varias aplicaciones desde un mismo conector, lo que implica tener 4 cables en 1 y por lo tanto demanda menos ductos o ductos de menor tamaño, reduciendo los costos de instalación. Así mismo proporciona el aislamiento necesario de ruido interno entre pares. En la figura No. 4.31 muestra un tramo de cable UPT categoría 7 A.



Figura No. 4.31 Tramo de cable UTP categoría 7 A.

Fuente: Cable UTP Categoría 7 Condumex. (2019). Disponible:
<https://listado.mercadolibre.com.mx/cable-utp-categoria-7-condumex>

- **Conector Tera:** definido en la norma ISO IEC 61076-3-104, correspondiente a un interfaz del tipo plug outlet. Viene provisto con una puerta abisagrada que impide el ingreso de partículas contaminantes. Posee una bota protectora que puede recortarse para satisfacer las necesidades de profundidad y radio de curvatura, cuenta con adaptadores para su montaje angulado en placas y cajas de salidas disminuyendo sus necesidades de profundidad.

Da mayor inmunidad a la interferencia electromagnética, ruido eléctrico, electricidad estática y fuentes de radiofrecuencia. Es fácil y rápido de instalar y es capaz de soportar Ethernet 40 Gb/s, especificada actualmente para fibra óptica por la norma IEEE 802.3ba. Ofrece un BER (*Bit Error Rate*) inferior a 10^{-12} (requerido por la norma IEEE 802.3an). Está estandarizado por la norma internacional IEC-61156-5. En la figura No. 4.32 se ilustra una imagen de un Conector Tera y de la unión al panel de conexión. ⁽²⁶⁾

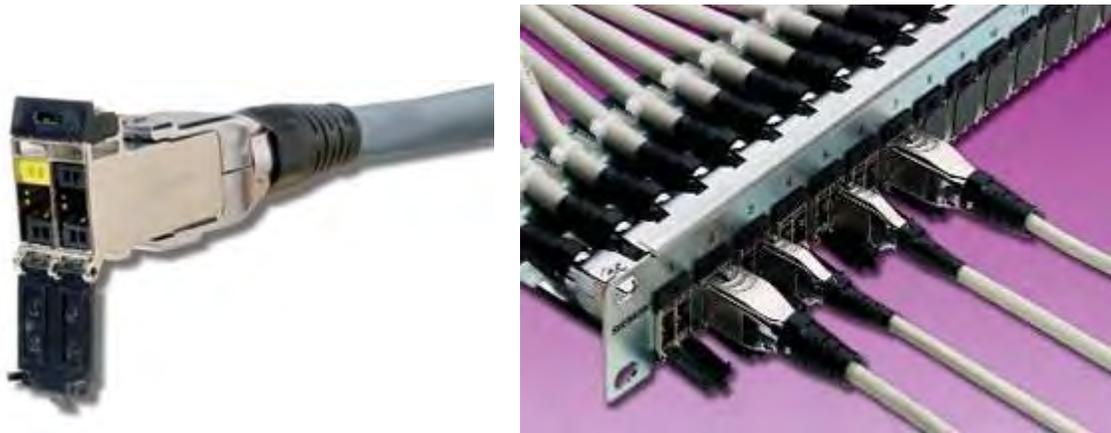


Figura No. 4.32 Conector Tera y Panel de Conexión (Patch Panel)

Fuente: Ventajas del sistema Tera. (2019). Disponible:
<https://www.siemon.com/white-papers/08-05-13-TERA.asp>

4.16.5 Definición de las Vlan's

Con el propósito de optimizar los recursos de la Red y de contar con una confiable conectividad de manera organizada entre cada uno de los usuarios y/o departamentos, dentro del proyecto en cuestión, se definió implementar las siguientes tres VLAN's:

- Administrativa
- rea Técnica.
- Servicios al cliente.

La conexión de hacia cada área de trabajo se realizara con cableado horizontal y con una topología estrella. En la figura No. 4.33 se muestra la estructura básica-global que tendría la Red

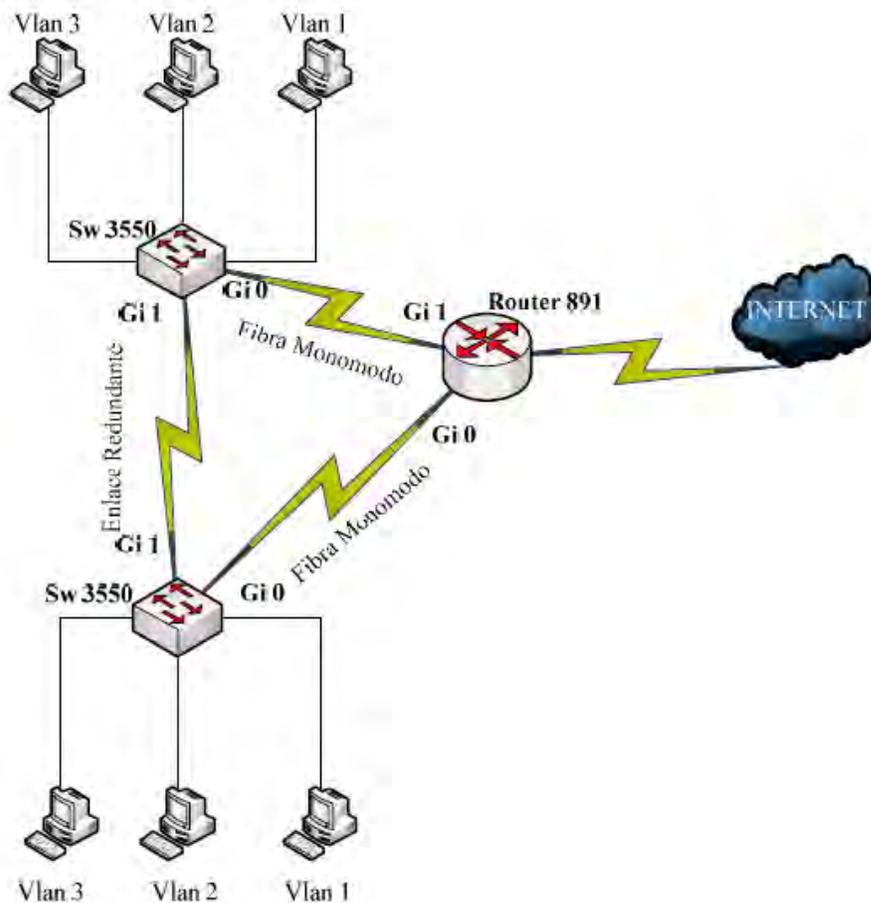


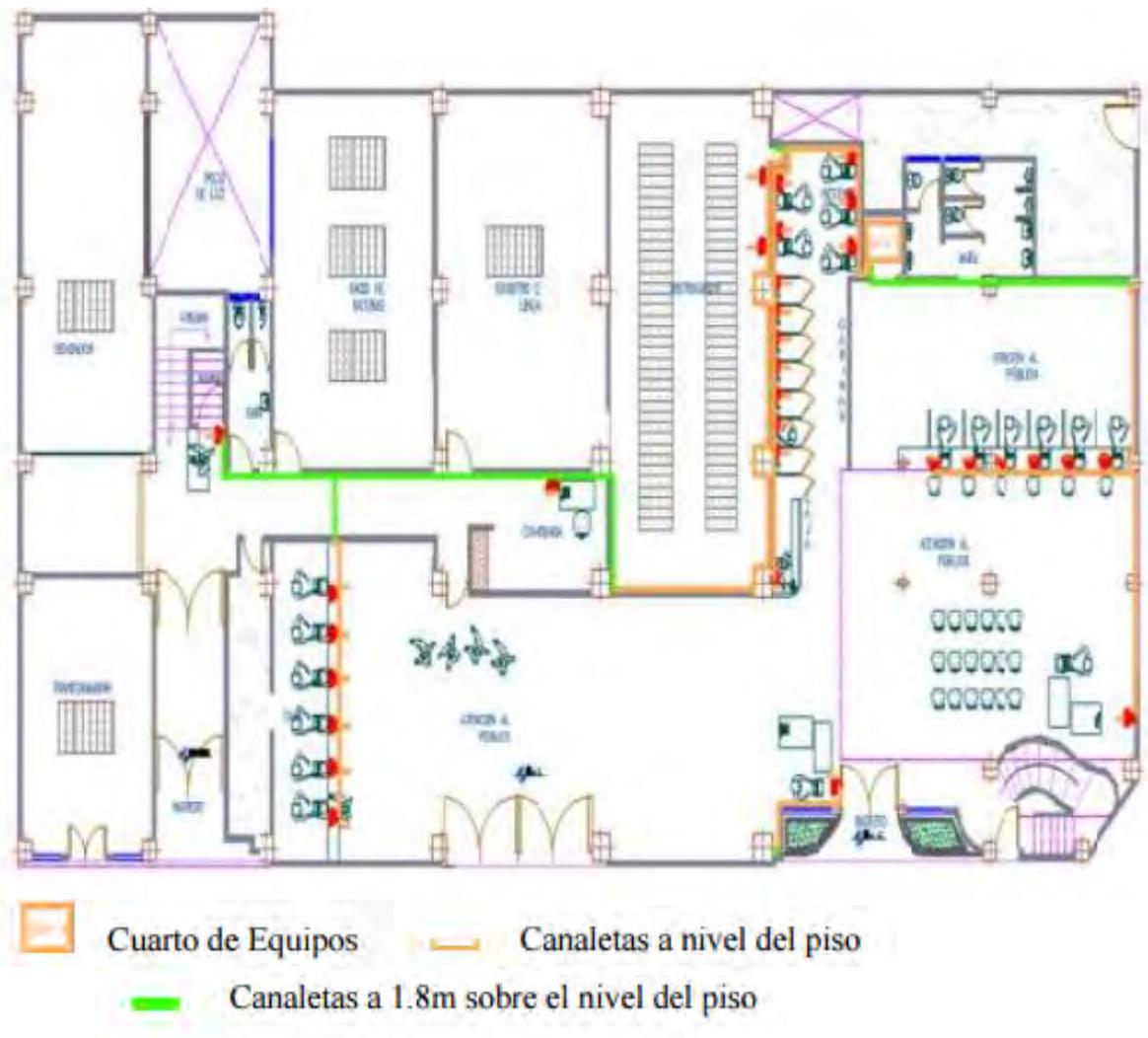
Figura No. 4.33 Estructura básica global de la Red.

Fuente: rquizo, .D., *studio de actibilidad Técnica y conómica para el iseño del Cableado estructurado en el edificio de la C T - Riobamba- cuador*, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Facultad de Informática y Electrónica Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, en el año 2015, p. 82.

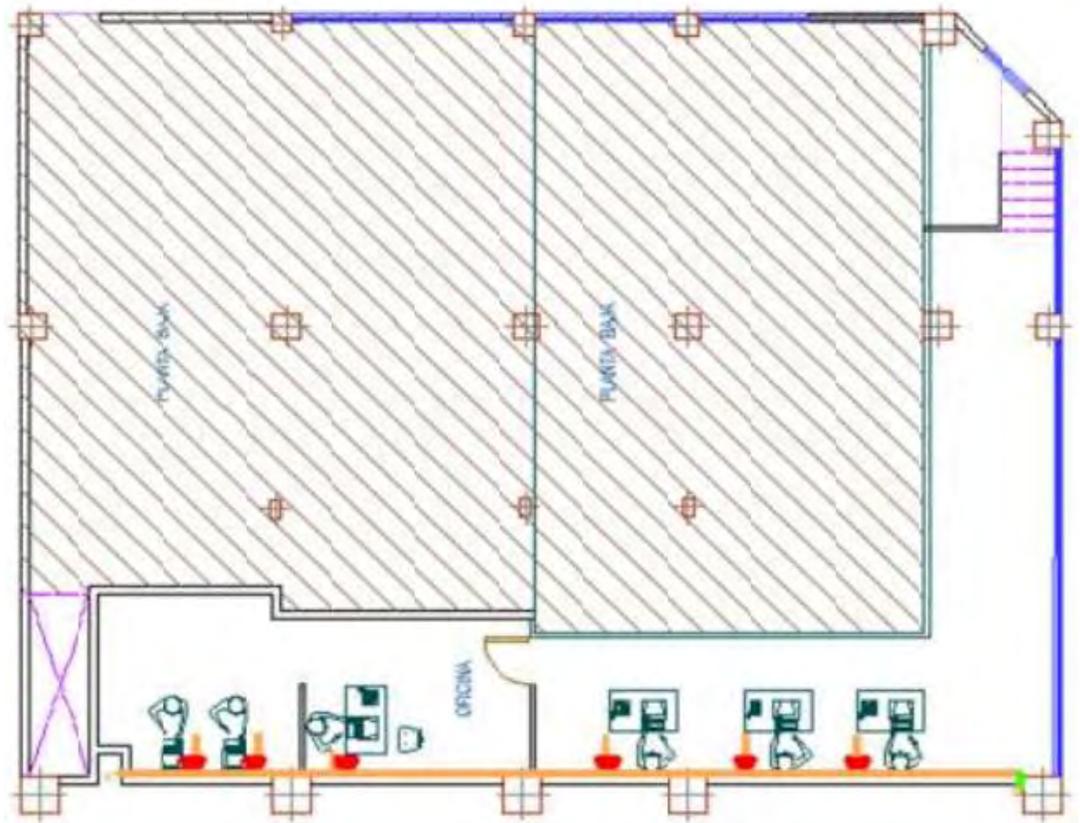
4.16.6 Estructura física de la Red

El tendido y distribución de la Red se indica en la figura No. 4.34, para cada uno de los pisos del edificio. Para cada uno de los pisos del edificio se determinó que el cableado horizontal se distribuirá por medio de canaletas P C, buscando aislar los cables de datos de los cableados de corriente, o cualquier otro sistema que se implemente en un futuro.

Se consideró conveniente ejecutar en primera instancia la realización de la segmentación de las lanchas y la eliminación de los dominios de colisión, antes de realizar la interconexión entre las estaciones de trabajo.



a.) Cableado Piso Primero



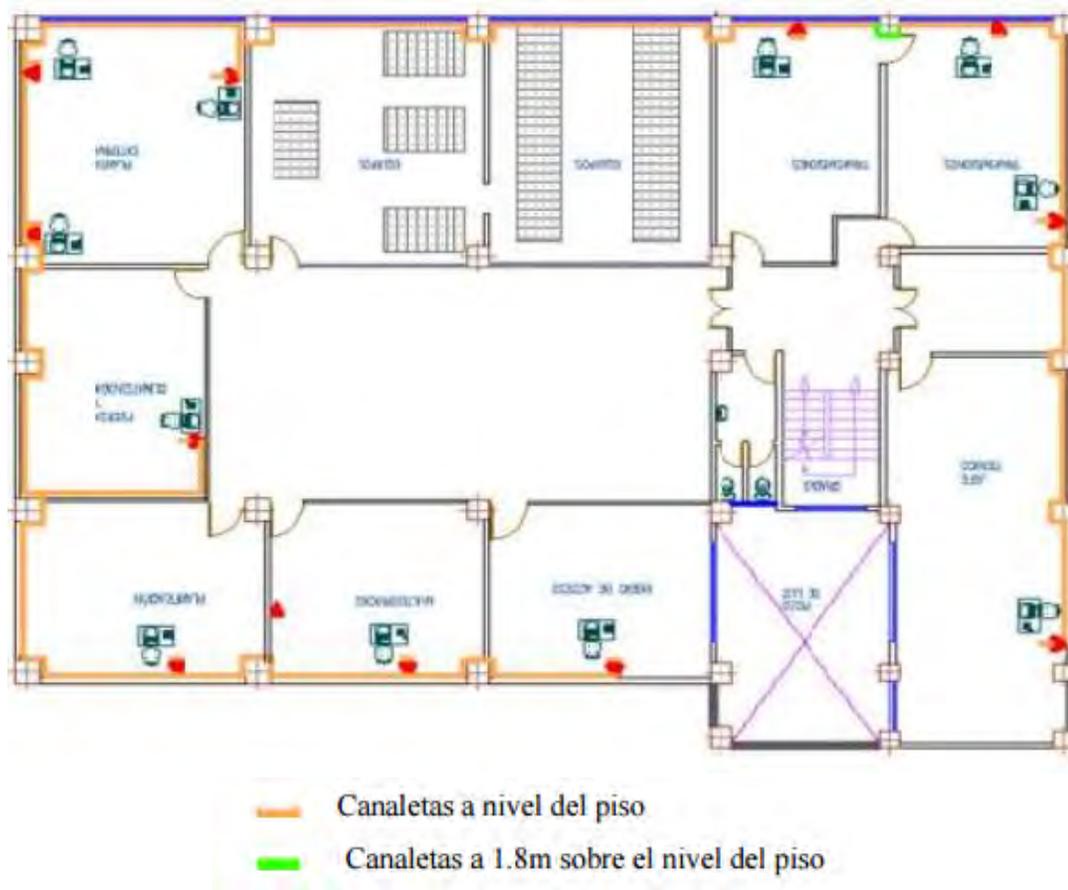
- Canaletas a nivel del piso
- Canaletas a 1.8m sobre el nivel del piso

b.) Cableado Mezanine



-  Cuarto de Equipos
-  Canaletas a nivel del piso
-  Canaletas a 1.8m sobre el nivel del piso

c.) Cableado Piso Segundo



d.) Cableado piso cuarto

Figura No. 4.34 Cableado Estructurado por piso del edificio de la CNT-EP
 Fuente: rquizo, J.D., *studio de actibilidad Técnica y conómica para el iseño del Cableado estructurado en el edificio de la C T - Riobamba- cuador*, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Facultad de Informática y Electrónica Escuela de Ingeniería Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, en el año 2015, Anexo 3, Anexo 4, Anexo 5 y Anexo 6..

4.16.7 Componentes del cableado estructurado

Se caracterizaron los componentes básicos del sistema del cableado estructurado de la siguiente manera.

- **Punto de Demarcación:** su ubicación fue definida en el segundo piso. La conexión de servicios al cliente se hará a través de este Punto de Demarcación.
- **Terminal de Conexión (TC):** denominada también como sala de telecomunicaciones (TR). Se decidió implementar un solo TC y ubicarlo en el

segundo piso buscando que la distancia a los puntos finales de conexión no excedieran a los 100 metros de longitud.

- **Cuarto de Equipamiento (ER):** se propusieron dos cuartos de equipamiento a ser ubicados uno en el piso primero y el otro en el piso segundo, los cuales dispondrían cada uno de un rack de 1,8 m de alto, 0.74 m de ancho y 0.66 m de profundidad, los cuales deberán ser empotrados al piso por seguridad y diseñados para alojar, cada uno, el correspondiente Switch Catalyst 3550 de 48 puertos.
- **Cableado Horizontal (HCC):** como ya se había mencionado, el cableado horizontal se realizaría empleando cable UTP categoría 7A, que se tiende a través de canaletas.
- **Cableado Vertical (VCC):** como también ya se había mencionado, se empleará fibra óptica monomodo, que irá conectando a cada Switch a través de conexiones Gigabit Ethernet mediante Patchcore de fibra SC LC hacia el Router.
- **Área de Trabajo (WA):** cada uno de los puntos terminales (Face Plate u OT) se conectará con el rack de la Área de Trabajo correspondiente. Desde cada uno de los racks se establece la conexión con el Terminal de Conexión (TC), que como ya se indicó no debe existir más de 100 metros de longitud. Entre cada punto terminal al equipo respectivo no debe existir más de 5 metros de longitud.

PREGUNTAS Y EJERCICIOS:

CAPÍTULO 4

Preguntas:

1. ¿Qué se entiende por cable par trenzado? Cuáles son sus principales características que lo caracterizan?
2. En el periodo del proceso de desarrollo e implementación del cableado par trenzado, se marcaron unos avances significativos. Señalar las principales evoluciones tecnológicas que se presentaron en estos avances.
3. Cuáles fueron los criterios en lo que se basó la tipificación de los cables par trenzado? Identificar los principales aspectos que caracterizan a cada uno de los principales tipos de cable par trenzado.
4. Relacionar las principales características de los cables par trenzado de acuerdo a la categoría a los cuales pertenecen.
5. Existe una gran variedad de conectores para los cables par trenzado. Relacione los principales conectores indicando con qué tipo de cable par trenzado se utilizan.
6. Los cables par trenzado tienen una amplia gama de aplicaciones. Identifique las aplicaciones más conocidas, indicando el porqué de estas utilidades.
7. En el numeral 7.8 de este libro se mencionan algunas ventajas y desventajas de los cables par trenzado. Argumente sus razones del porqué de estas ventajas y desventajas.
8. Recientemente se le vienen haciendo algunas variaciones a la estructura básica a los cables par trenzado, ¿cuáles son estas modificaciones?
9. Existe un conjunto de herramientas para ponchar los cables par trenzado. ¿Cuál es la principal función de cada uno de estos elementos?
10. Describa, en forma concreta, en qué consiste cada uno de los pasos que se realizan en el proceso de ponchar un cable par trenzado. ¿Cuál es el resultado final de este proceso?
11. ¿Qué se entiende por *cableado estructurado*? Identifique cuáles son los tipos de cables que pueden hacer parte de un cableado estructurado.

12. Cuáles son los principales elementos que conforma el área de trabajo en un sistema de *cableado estructurado*

13. Describa las diferentes formas que pueden existir en un tendido del cableado horizontal trabajo en un sistema de *cableado estructurado*

14. Para el caso de redes de datos de gran tamaño, por lo general los *Terminales de Conexión* (TC) se identifican en dos: Servicio de Distribución Principal MDF (*Main distribute acility*) y Servicio de Distribución Intermedia IDF (*ntermediate distribute acility*). Identifique las principales características estructurales y o funcionales de MDF e IDF.

15. En qué consiste el cableado vertical, en un sistema de *cableado estructurado*
De qué otras formas se denominan el cableado vertical

16. El cuarto de equipos (ER) Corresponde al espacio destinado exclusivamente a albergar todos los equipos requeridos por la red. Cuáles cree Usted que sean los criterios que se deben tener en cuenta para definir el sitio donde se debe ubicar el cuarto de equipo (ER) en un sistema de *cableado estructurado*

17. La conexión a tierra tiene como propósito establecer un circuito directo a tierra para todo voltaje que se presente en ella. En principio en qué consiste En qué puntos del sistema del *cableado estructurado* se debe colocar

18. alore, según su criterio, la valides de las principales consideraciones que se deben tener presente para la elaboración y presentación de una red de *cableado estructurado*, indicadas en el numeral 7.13 de este capítulo.

19. En la figura No. 7.27 se muestra la estructura básica de un sistema de *Cableado estructurado*. Indique cuales son las relaciones que deben existir entre cada uno de sus componentes.

20. Cuáles son las principales funciones que realizan cada uno de los principales organismos que tienen alguna relación con la normalización del *cableado estructurado*

21. Cuáles son los principales aspectos que rigen, de las normas más relevantes, sobre el *cableado estructurado*

22. En el numeral 7.16, de este capítulo, se relacionan los principales aspectos que se tuvieron en cuenta en el diseño del sistema de *cableado estructurado* que se realizó para el edificio de la CNTEP- Riobamba-Ecuador. Indique para cada uno de estos aspectos el objetivo que pretendían lograr.

23. El conector Tera, definido en la norma ISO IEC 61076-3-104, es el más recomendado en el caso del *cableado estructurado*. Relacione los principales beneficios que este conector ofrece.

Ejercicios:

1. En la figura No. 4.35 se muestra un diagrama de un enlace directo entre una unidad de servicio (HUB) y un terminal (Estación de Trabajo), a través de un par trenzado. Describir su composición, indicando la función principal de cada uno de sus componentes.

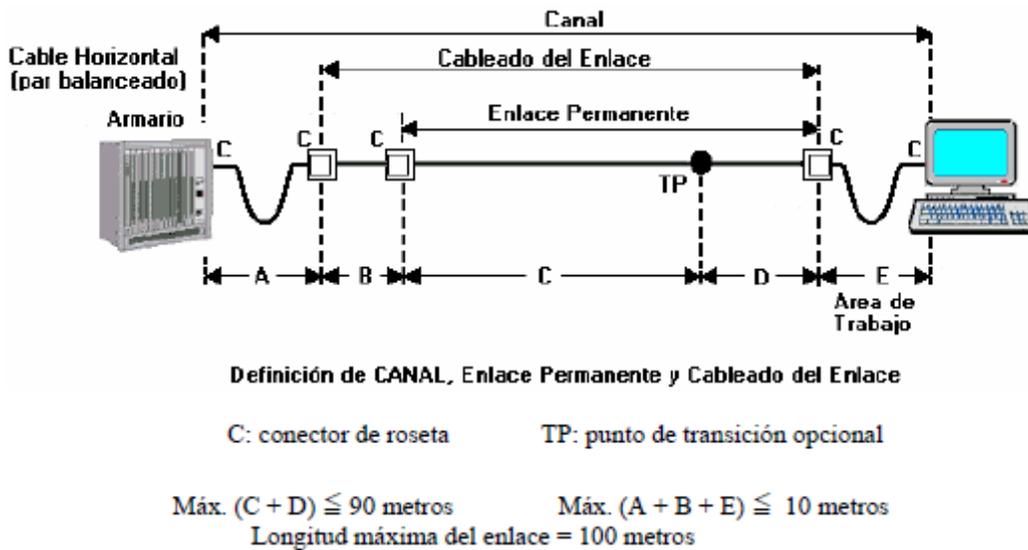


Figura No. 4.35 Estructura básica de un enlace directo mediante par trenzado..

Fuente: Pérez, P. F. *Mediciones y Certificaciones de enlaces T* ", U.T.N. - F.R.M. 2014, p.2.

2. En la figura No. 4.36 se representa un diagrama que indica la estructura básica para la prueba del enlace del ejercicio inmediatamente anterior. Describir su composición y el proceso de medición que se debe realizar.



Figura No. 4.36 Enlace básico para prueba de un enlace directo con par trenzado.

Fuente: Pérez, P. F. *Mediciones y Certificaciones de enlaces T* ", U.T.N. - F.R.M. 2014, p.3.

3. Con referencia al cable trenzado, ilustrado en la figura No. 4.36, indicar los colores de cada uno de los cables que lo conforman según la terminación mostrada y de acuerdo a la norma de conexión T568A.

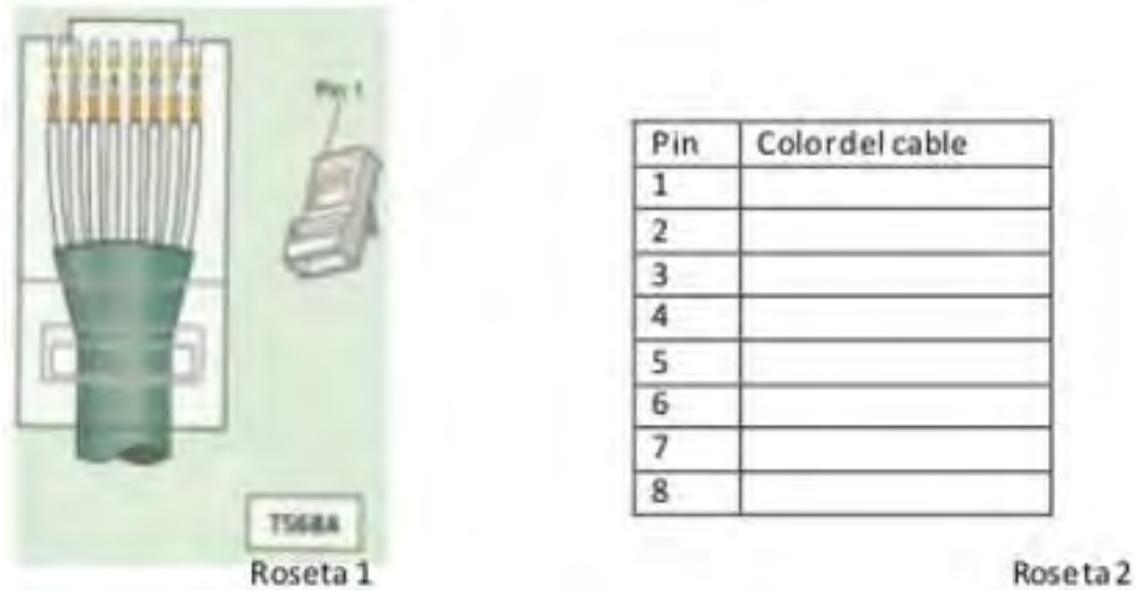


Figura No. 4.36 Cable par trenzado con conexión T568A

Fuente: Ejercicios cable par trenzado. (2019). Disponible: [es.slideshare.net elitefrea ejercicios-cable-par-trenzado](http://es.slideshare.net/elitefrea/ejercicios-cable-par-trenzado)

4. En la figura No. 4.37 se muestra la estructura de tres diferentes cables trenzados. Identificar cual es de tipo STP, UTP y FTP.

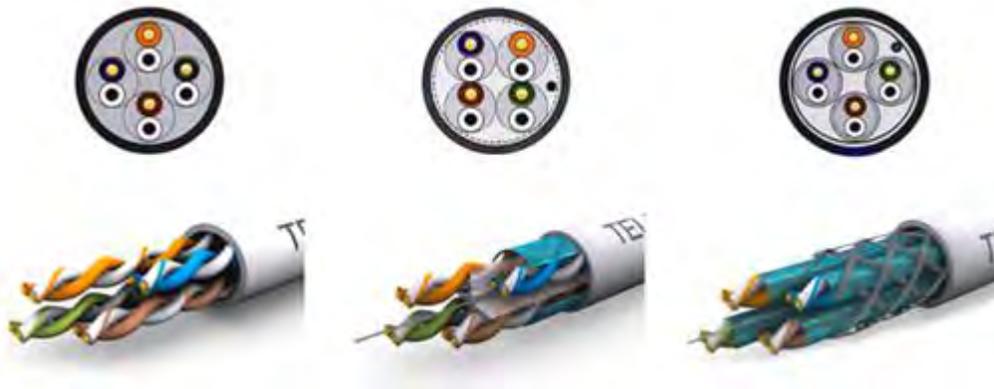


Figura No. 4.37 Estructura de tres tipos de cables trenzados. Fuente: Diferencias entre los cables de par trenzado UTP, STP y FTP. (2019). Disponible: [telecable.com blog diferencias-entre-cable-utp-stp-y-ftp](http://telecable.com/blog/diferencias-entre-cable-utp-stp-y-ftp/).

5. Relacionar el tipo de cable trenzado mas referenciado en cada una de las categorías de los mismos, indicando el ancho de banda que ofrecen y las velocidades que pueden soportar.

6. Los conectores RJ45 admiten dos formas de conexión con el cable que corresponden a unos estándares de la industria (TIA 568A y 568B). Determinar estas formas de conexión.

7. En la figura No. 4.38 se muestra la estructura de un cableado estructurado en un edificio, donde se enumeran sus principales componentes. Identificar cada uno de estos componentes.

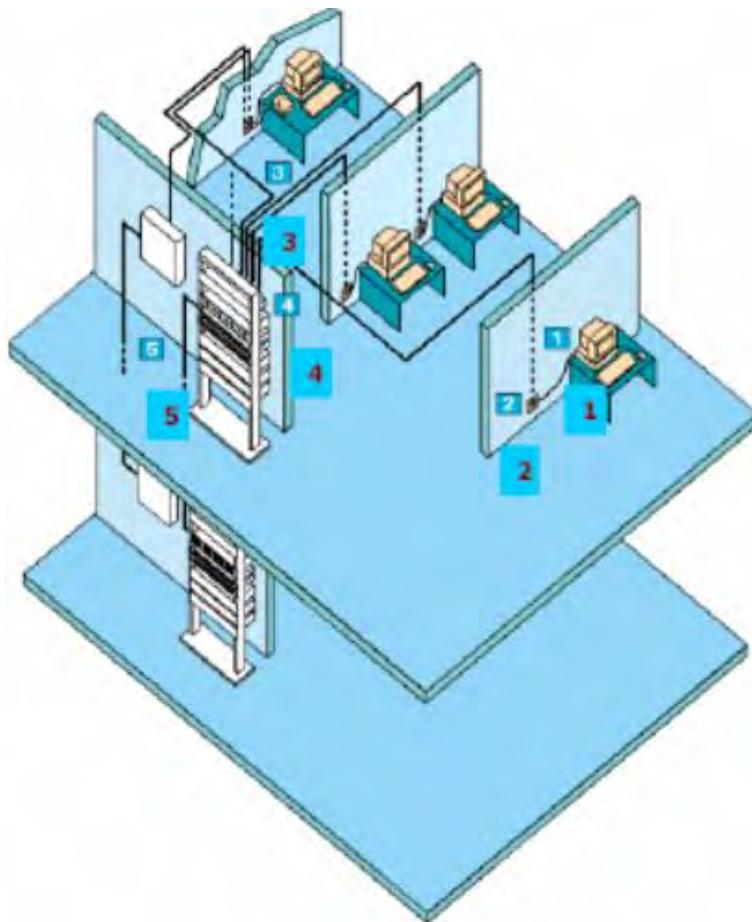


Figura No. 4.38 Estructura de un cableado estructurado. Fuente:
CABLEADO ESTRUCTURADO. (2019). Disponible:
materias.fi.uba.ar/6679/apuntes/CABLEADO_ESTRUC.pdf

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 4

(1) Andre S. Tanenbaum, A S., *Computer et or s*", México: Pearson Prentice Hall, ed. 2012.

(2) Características Técnicas de Par Trenzado. (2019). Disponible: <https://sites.google.com/site/cableadoredpartrenzado/home/caracteristicas-tecnicas-del-par-trenzado>

(3) T isted pair cable. (2019). Disponible: <http://www.learnabhi.com/tag/types-of-t-isted-pair-cable>

(4) Introduction to categories of t isted. (2019). Disponible: <http://www.fiber-optic-cable-sale.com/introduction-to-categories-of-t-isted-pair.html>.

(5) Parámetros comprobados en una certificación de red AD A Informática, Redes, Centralitas Telefonía IP, ilanova, Barcelona. (2019). Disponible: www.adqa.com.

(6) Tipos de conectores y todas sus características Live Bits (2019). Disponible: [livebits.blogspot.com tipos-de-conectores-y-todas-sus.html](http://livebits.blogspot.com/2019/08/tipos-de-conectores-y-todas-sus.html)

(7) Blog de TelecOcable: actualidad en cables y conexión electrónica. (2019). Disponible: <https://www.telecocable.com/blog>

(8) Barnett M. D. Jim D. G., *Cabling : t e complete guide to net or iring*" (4^a ed.), 2016, pp 11-13.

(9) Using UTP Cat5e vs. STP Cat5e Cable - Se ellDirect.com . [selldirect.com](http://www.selldirect.com), 2019.

(10) The Advantages of the T isted-pair transmission elux. (2019). Disponible: [veilux.net/download/veilux-T-isted-pair-trans.pdf](http://www.veilux.net/download/veilux-T-isted-pair-trans.pdf)

(11) Advantages Disadvantages T isted pair, Coaxial cable Optic fiber. (2019). Disponible: [nusolpunya.blogspot.com/2009/08/t-isted-pair-advantages-1.html](http://www.nusolpunya.blogspot.com/2009/08/t-isted-pair-advantages-1.html)

(12) Arco Iris Par Trenzado Cable. (2019). Disponible: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/rainbo-t-isted-pair-flat-ribbon-cable-with-2-54mm-idc-connector-60686534268.html>

(13) Castro Gil, M. A. Nuria, O. A., *Sistema de Cableado estructurado*, 2014, pp.123-1245.

(14) The Basics of Structured Cabling Electrical Construction ... (2019). Disponible: <https://www.ecmweb.com/basics/basics-structured-cabling>

(15) Stephen Roberts, *Telephone installation and book*, Elsevier, 2010, pp. 32-34.

(16) MDF, IDF, HCC, ICC. (2019). Disponible:

<http://telecomunicacionesbyani.blogspot.com/2012/02/mdf-idf-hcc-icc.html>.

(17) Guía de Trabajo en Cableado Estructurado. (2019). Disponible:

<https://itservicesd.com/blog/2018/05/07/elementos-del-cableado-estructurado>

(18) Structured Cabling: Backbone Cabling vs Horizontal Cabling. (2019). Disponible: <https://community.fs.com/.../horizontal-cabling-vs-backbone-cabl...>

(19) El cableado estructurado de una red de área local. (2019). Disponible: <https://www.adrformacion.com/no-ledge/administracion-de-sistemas-el-cableado-estructurado-de-una-red-de-area-local.html>

(20) Manual de Cableado Estructurado, Gobierno del Estado de Tabasco Tabasco cambia contigo Dirección General de Tecnología de la Información y Comunicaciones, 2016, pp.22-24.

(21) Sistemas de puesta a tierra en las instalaciones de cableado estructurado . (2019). Disponible: <http://fibraoptica.blog.tartanga.eus/2015/04/15/sistemas-de-puesta-a-tierra-en-las-instalaciones-de-cableado-estructurado>

(22) McBee, D. B. David Groth, J. *Cabling: the complete guide to net wiring*, (4rd ed.). San Francisco: S & B E .214 pp. 11-12

(23) Oliviero A. Goodard B. *Cabling: The Complete Guide to Copper and Fiber-optic Wiring*, John Wiley & Sons, 2015 pp 68-69

(24) Normas sobre cableado estructurado. (2019). Disponible: <https://unitel-tc.com/normas-sobre-cableado-estructurado>

(25) Quiroga, J.D., *Technical and economic feasibility Study for Structured Cabling design in the C T building- Riobamba- Ecuador*, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Facultad de Informática y Electrónica Escuela de Ingeniería

Electrónica en Telecomunicaciones y Redes, en el año 2015, pp. 79-84 Anexos 3-6.

(26) entajas del sistema Tera. (2019). Disponible:
<https://www.siemon.com/la-hite/papers/08-05-13-TERA.asp>.

CAPÍTULO 5

CONCEPTO, ESTRUCTURA Y APLICACIONES DEL CABLE COAXIAL

5.1 Introducción

A partir de este capítulo se hará referencia a cada uno de los principales *medios de transmisión guiados*, empezando por el *cable coaxial*, describiendo sus aspectos estructurales y funcionales básicos, sin pretender profundizar en estas características. Así mismo se indicarán los más frecuentes aplicativos de los mismos, y los procesos y técnicas de instalación y manejo.

Se complementara la descripción de estos *medios de transmisión guiados*, con algunos diagramas donde se hace resaltar la utilización de los mismos, indicando las más relevantes técnicas de su operación y desempeño, en tales aplicaciones.

5.2 Concepto y conformación

En esencia el *cable coaxial* es un medio de transmisión guiado que se usa para transportar señales eléctricas. También se les conoce como cables concéntricos. En su época de su creación, década de 1930, fue el medio más empleado para las *redes de transmisión de datos* y otras redes de comunicación, debido a su alta capacidad de transmisión y a que presenta un alto rechazo a las interferencias y ruidos externos.

La estructura de un cable coaxial está conformada fundamentalmente por dos conductores que comparten el mismo eje, donde el conductor externo es de tipo tubular, separado del conductor interno por una capa de material dieléctrico. A continuación se relacionan los principales componentes que conforman la estructura básica de los cables coaxiales:

- *cleo*: cable conductor central rígido o de varios filamentos enrollados entre sí (generalmente de cobre), por el cual se transfiere la señal eléctrica, esencialmente de información (generalmente a altas frecuencias). Se le conoce también como el cable vivo.
- *Malla*: conductor de aspecto tubular, el cual se encuentra posicionado en forma coaxial con respecto al núcleo. La malla (también denominada trenza o blindaje) sirve como referencia de tierra y de retorno de las corrientes.

Puede ser una lámina tubular corrugada o una malla trenzada conductora (generalmente de cobre o aluminio). Su función principal es servir como masa y de protector del núcleo del ruido eléctrico.

- *ieléctrico*: es una capa de material aislante (incluyendo el aire) que se encuentra entre el *n cleo* y la *mall*a. Del tipo de material del dieléctrico, depende en gran medida la calidad del cable.
- *C aqueta exterior*: corresponde a una cubierta aislante (plástico protector, generalmente de *poli*cloruro de *vinilo*, más conocido como PC , o de caucho) que recubre toda la longitud del cable coaxial, como protección a la intemperie. Más recientemente está cubierta es de *plenum*, material que es resistente al fuego, pero que hace menos flexible al cable en comparación con el que utiliza P C como cubierta.

Es de anotar, que además de los componentes referenciados anteriormente, los cables coaxiales disponen de otros componentes, especialmente capas superpuestas o anteriores a la *c aqueta exterior*, como blindaje de protección a interferencias y o ruidos, blindaje de protección a roedores, blindaje de protección a la humedad (instalaciones subterráneas o marítimas), blindaje de protección a tensiones y presiones mecánicas externas, entre otros. En la figura No. 5.1, se muestra la conformación básica de un cable coaxial, de la inmensa variedad que existen en el mercado.

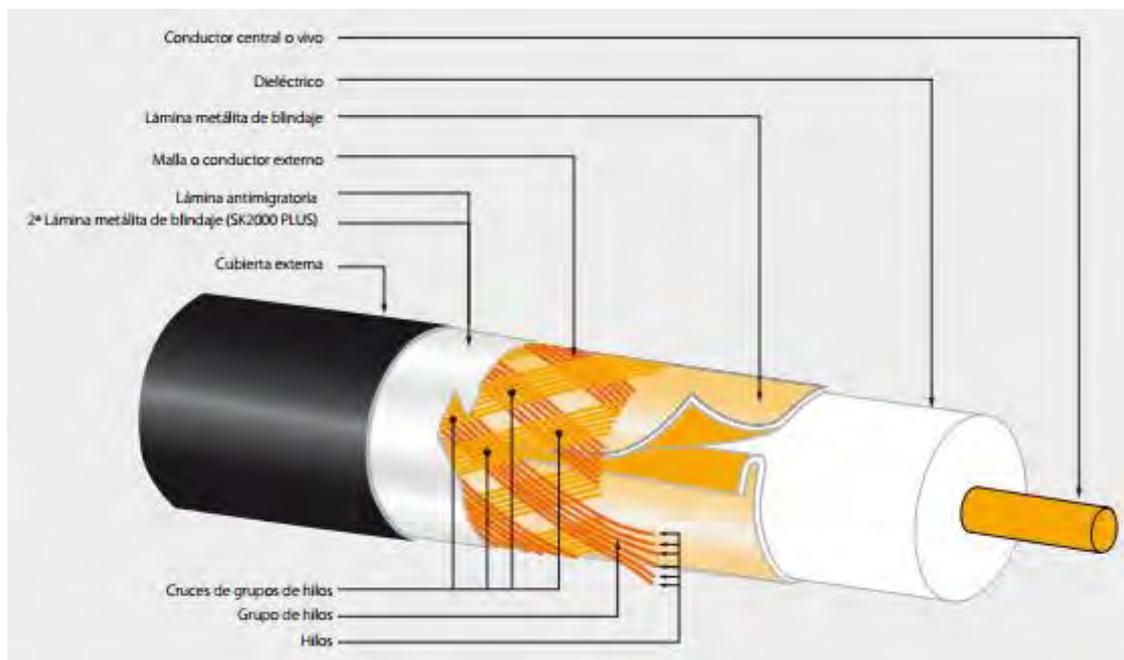


Figura No. 5.1 Estructura básica de los cables coaxiales.

Fuente: Manual *Cable Coaxial*". Televes, 2018

Como se indicó anteriormente la *malla* de los cables coaxiales, por si misma, además sirve de apantallamiento, ofreciéndole al cable central (núcleo), que lleva la señal, protección respecto a las interferencias y ruidos externos, lo cual implica que el cable coaxial es una buena opción para transmisión de datos.

En los cables coaxiales los campos electromagnéticos, presentes entre los dos conductores (*núcleo* y *malla*), generados por el flujo de las cargas en cada uno de ellos (corrientes en sentido contrario), se anulan entre sí, ya que se contraponen entre ellos. Los cables coaxiales se pueden asegurar a postes o a edificaciones mediante cables mensajeros, para mantenerlo tensionado (rígido) sin alterar las características del mismo. En la figura No. 5.2 se ilustra una variedad de tipos de cables coaxiales con sus respectivos conectores terminales.



Figura No. 5.2 Diferentes tipos de cables coaxiales con sus conectores terminales.

Fuente: Catálogo *Redes y cables*" Teleflex-RF, 2018.

5.3 Características eléctricas

Las características eléctricas de los cables coaxiales dependen, esencialmente, del tipo y calidad del material, tanto de los conductores como del dieléctrico que los conforman, así como del diámetro total del cable coaxial. A continuación se relacionan sus principales características técnicas: ⁽¹⁾, ⁽²⁾

5.3.1 Impedancia característica

Como cualquier impedancia, corresponde a la aplicación de la ley de Ohm, que para este caso es la relación existente entre la tensión aplicada y la corriente suministrada al cable coaxial de longitud infinita. Es conveniente anotar que la impedancia característica de los cables coaxiales no depende de la frecuencia de la señal que deba transmitir ni de su longitud. Entre los valores típicos nominales de la impedancia característica de estos cables están: 50, 75, 93 ohmios, entre otros.

Para que los cables coaxiales trabajen a su máxima eficiencia, debe cumplirse que la impedancia de salida del generador de las señales de información y la de la entrada del receptor que las recibe, sean iguales a la del respectivo cable coaxial que los conecta y que sean, todas estas, solamente resistivas. De esta forma existe la máxima transferencia de potencia, carente de reflexiones de la señal, en las correspondientes conexiones. De la misma manera para el caso de las conexiones, con cable coaxial o cualquier otro medio guiado, del transmisor con su respectiva antena transmisora y de la antena receptora con su respectivo receptor.

Para calcular la impedancia característica de un cable coaxial se emplea la ecuación 5.1, indicada en la figura No. 5.3. Para el caso de que el dieléctrico sea aire o gaseoso, la constante dieléctrica es igual a uno ($\epsilon = 1$).

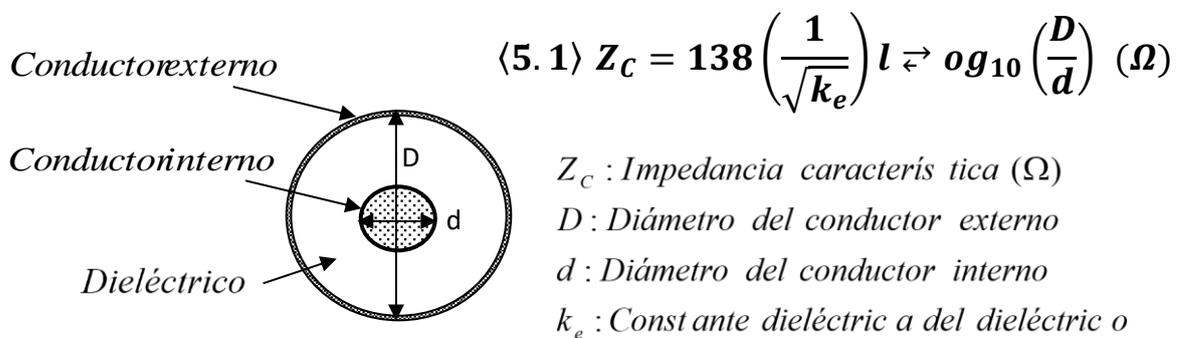


Figura No. 5.3 Impedancia característica del cable coaxial.

Ejemplo No. 5.1

Determinar la relación de los diámetros de los conductores que debe tener un cable coaxial: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón, para que su impedancia característica sea de 50 ohmios.

Solución:

a.) La constante dieléctrica del aire es: $k_e \approx 1$, entonces aplicando la ecuación 5.1 se tiene que:

$$50 = 138 \left(\frac{1}{\sqrt{k_e}} \right) \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right) = 138 \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$\log_{10} \left(\frac{D}{d} \right) = \frac{50}{138} \Rightarrow \frac{D}{d} = 10^{50/138} = 2.29$$

b.) La constante dieléctrica del teflón es: $k_e \approx 2.1$, entonces:

$$50 = 138 \left(\frac{1}{\sqrt{k_e}} \right) \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right) = 138 \left(\frac{1}{\sqrt{2.1}} \right) \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right) = 138 (0.69) \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)$$

$$95.22 \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right) = 50 \Rightarrow \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right) = 0.525 \Rightarrow \frac{D}{d} = 10^{0.525} = 3.35$$

En la tabla No.5.1 se indican algunos de los diferentes tipos de cables coaxiales de más frecuente uso como medio de transmisión guiados, en las diferentes aplicaciones de redes o interconexiones, con su respectiva impedancia característica. Hay que tener presente que las características eléctricas de los cables coaxiales, y en general de todos los medios de transmisión guiados, varían con la temperatura a que son sometidos los cables. Los valores que aparecen en las diferentes tablas, dados por los fabricantes, son valores nominales a 20⁰ centígrados de temperatura.

Tipo Cable	Impedancia característica (ohmios)	Tipo Cable	Impedancia característica (ohmios)	Tipo Cable	Impedancia característica (ohmios)
RG-6 U	75	RG-59	75	RG-213 U	50
RG-6 U	75	RG-62 U	92	RG-214 U	50
RG-8 U	50	RG-62A	93	RG-218	50
RG-9 U	51	RG-174 U	50	RG-223	50
RG-11 U	75	RG-178 U	50	RG-316 U	50
RG-58	50	RG-179 U	75		

Tabla No. 5.1 Impedancia característica de algunos tipos de cables coaxiales.

Fuente; Catálogo "Cables Coaxiales" Condumex Cables, 2018.

5.3.2 Conductancia

Esta conductancia hace referencia a la del dieléctrico del cable, la cual se conoce también como *mpedancia de Transferencia* dada en mho metro o en

siemens metro (S m), la cual determina el grado de aislamiento eléctrico que el dieléctrico ofrece entre los dos conductores del cable coaxial. Esta característica es de tipo distribuido a lo largo de la longitud del cable coaxial.

Se busca que la conductancia de los cables coaxiales sea lo más pequeña que sea posible, para de esta manera reducir la posibilidad de que exista fugas de corriente entre sus conductores y también para proteger al conductor interno de señales eléctricas externas. Para calcular la conductancia del dieléctrico de un cable coaxial se emplea la ecuación 5.2.

$$\langle 5.2 \rangle G = \frac{2\pi g}{\ln(D/d)} \quad (S/m)$$

G: Conductancia del cable (S/m)

g: Conductividad del dieléctrico (S/m).

D: Diámetro del conductor externo

d: Diámetro del conductor interno

Ejemplo No. 5.2

Para el caso del cable coaxial del ejemplo No. 5.1, determinar la conductancia distribuida, tanto para: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón.

Solución:

a.) Con dieléctrico de aire (aplicando la ecuación 5.2) y teniendo en cuenta que la conductividad del aire es aproximadamente:

$$g \approx 120 \times 10^{-6} \quad (S/m)$$

$$G = \frac{2\pi g}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi(120 \times 10^{-6})}{\ln(2.29)} \approx 0.0009 \quad S/m$$

b.) Con dieléctrico de teflón (aplicando la ecuación 3.2), teniendo en cuenta que la conductividad del teflón es aproximadamente:

$$g \approx 977 \times 10^{-6} \quad (S/m)$$

$$G = \frac{2\pi g}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi(977 \times 10^{-6})}{\ln(3.35)} \approx 0.00518 \quad S/m$$

5.3.3 Capacitancia

Debido a que los cables coaxiales están conformados esencialmente por dos conductores (en este caso poseionadas en forma coaxial), separados por un dieléctrico, entonces tienen características estructurales similares a la de los capacitores, lo que implica que presentan conductancia, distribuida a lo largo de su longitud, dada en faradios metro. Los valores de esta capacitancia son relativamente muy pequeños (del orden de los picofaradios metro).

El valor de esta capacitancia depende principalmente del tipo y calidad del material del dieléctrico, así como del dimensionamiento transversal del cable. También se busca reducir al máximo esta capacitancia, para disminuir la posibilidad de distorsión de las señales de información que por el cable se transmiten, especialmente si son de tipo digital. Esto se debe a que la capacitancia genera señales espectrales que pueden alterar el espectro propio de las señales de información transmitidas. Para calcular la capacitancia de un cable coaxial se emplea la ecuación 5.3.

$$\langle 5.3 \rangle C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/d)} \quad (F/m)$$

C: Capacitancia del cable (F/m)

ε: Permitividad eléctrica del dieléctrico (F/m).

D: Diámetro del conductor externo

d: Diámetro del conductor interno

Ejemplo No. 5.3

Para el caso del cable coaxial del ejemplo No. 5.1, determinar la capacitancia distribuida, tanto para: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón.

Solución:

a.) Con dieléctrico de aire (aplicando la ecuación 5.3), teniendo en cuenta que la permitividad del aire es aproximadamente:

$$\epsilon \approx 8,854 \times 10^{-12} \quad (F/m)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi(8,854 \times 10^{-12})}{\ln(2.29)} \approx 67.14 \text{ pF/m}$$

b.) Con dieléctrico de teflón (aplicando la ecuación 6.3) y teniendo en cuenta que la permitividad eléctrica del teflón es aproximadamente:

$$\varepsilon \approx 17.71 \times 10^{-12} \text{ (S / m)}$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi(17.71 \times 10^{-12})}{\ln(3.35)} \approx 91.96 \text{ pF / m}$$

Ejemplo No. 5.4

El conductor interno de un cable coaxial tiene un radio de 0.220 mm y su conductor externo un radio de 0.720 mm. El dieléctrico empleado es de poliestireno, determinar la capacitancia total del cable para una longitud de 920 metros.

Solución:

Aplicando la ecuación 5.3 y teniendo en cuenta que la constante dieléctrica del poliestireno es de $k_e = 2.6$:

$$k_e = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 2.6 \Rightarrow \varepsilon = (2.6)\varepsilon_0 = (2.6)(8,854 \times 10^{-12}) = 23.02 \times 10^{-12} \text{ (F / m)}$$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(D/d)} = \frac{2\pi(23.02 \times 10^{-12})}{\ln(0.720 / 0.220)} \approx 121.96 \text{ pF / m}$$

$$C(920 \text{ m}) = (121.96 \times 10^{-12} \text{ F / m})(920 \text{ m}) = 112.2 \text{ nF}$$

5.3.4 Inductancia

a que al circular señales eléctricas (información: análoga o digital) sobre los conductores del cable coaxial, se produce inducción magnética presentándose efectos de inductancia en el mismo. Para calcular la inductancia de un cable coaxial se emplea la ecuación 5.4.

$$\langle 5.4 \rangle L = \frac{\mu}{2\pi} \ln(D/d) \text{ (H/m)}$$

L : Inductancia del cable (H/m)

μ : Permeabilidad magnética del dieléctrico (H/m).

D : Diámetro del conductor externo

d : Diámetro del conductor interno

Ejemplo No. 5.5

Para el caso del cable coaxial del ejemplo No. 6.1, determinar la inductancia distribuida, tanto para: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón.

Solución:

a.) Con dieléctrico de aire (aplicando la ecuación 5.4) y teniendo en cuenta que la permeabilidad magnética del teflón es muy similar a la del aire, aproximadamente:

$$\mu \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H / m)}$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln(D/d) = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \ln(2.29) \approx 16.57 \text{ } \mu\text{H / m}$$

b.) Con dieléctrico de teflón (aplicando ecuación 3.3) y teniendo en cuenta que la permeabilidad magnética del teflón es aproximadamente:

$$\mu \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H / m)}$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln(D/d) = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \ln(3.35) \approx 29.2 \text{ } \mu\text{H / m}$$

5.4 Velocidad de propagación

Sea cual sea el medio de propagación, toda señal, incluyendo las eléctricas, se desplazan a una velocidad determinada dependiendo de las características eléctricas del medio de transmisión que utilicen. Para calcular la velocidad de propagación que ofrece los cables coaxiales a las señales eléctricas que se desplazan por los mismos, se emplea la ecuación 5.5.

$$\langle 5.5 \rangle v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

En la tabla de características de los principales cables coaxiales del anexo No. 1, se indica el factor de velocidad que ofrecen dichos tipos de cables. Este factor es referenciado respecto a la velocidad de la luz.

Ejemplo No. 5.6

Para el caso del cable coaxial del ejemplo No. 5.1, determinar la velocidad de propagación de la señal, tanto para: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón.

Solución:

a.) Con dieléctrico de aire (aplicando la ecuación 5.4) y teniendo en cuenta que la inductancia y la capacitancia del mismo fueron determinadas en los ejemplos inmediatamente anteriores, se tiene:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(16.57 \times 10^{-6})(67.14 \times 10^{-12})}} \approx 0.2998 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

b.) Con dieléctrico de teflón (aplicando la ecuación 5.4) y teniendo en cuenta que la inductancia y la capacitancia del mismo fueron determinadas en los ejemplos inmediatamente anteriores, se tiene:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(29.2 \times 10^{-6})(91.96 \times 10^{-12})}} \approx 0.1929 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

3.5 Atenuación

En términos generales la atenuación corresponde a la disminución de la amplitud y distorsión de una señal a lo largo de una línea de transmisión, incluyendo al cable coaxial. Esencialmente los dos principales factores que originan estas atenuaciones son:

- Las características conductivas del material del núcleo y de la malla del cable, por efectos de disipación (calentamiento). A medida que estos materiales sean más conductivos menor disipación se produce.
- Las características conductivas del dieléctrico del cable. Se requiere dieléctricos de muy mala conductancia (muy buen aislamiento) para evitar pérdidas por fugas de corriente.

Además del tipo de material empleado por los componentes del cable coaxial, estas pérdidas también dependientes de su geometría transversal, de su longitud, así como por la frecuencia de la señal que se transmite por cable. La atenuación que sufren las señales, en los cables coaxiales, son proporcionales a la frecuencia de las mismas, tal y como sucede en cualquier otro tipo de medio de transmisión de señales. La atenuación de todos los medios de transmisión se expresan en dB por unidad de longitud. ⁽³⁾

En el anexo No. 1 se adjuntan unas curvas mediante las cuales se pueden determinar, de manera aproximada, las pérdidas que presentan algunos de los diferentes tipos de cable coaxial por cada 100 pies. Como se puede deducir, de la observación de estas curvas, la atenuación de los cables aumenta a medida que la frecuencia a la cual va a ser utilizado el cable sea mayor, y para aquellos cables con mayor diámetro la atenuación es menor.

En la figura No. 5.4 se exponen las curvas de atenuación de algunos de los diferentes tipos de cables coaxiales, en función de la frecuencia de operación. Tal como se mencionó anteriormente, se puede observar en las curvas de atenuación, que a medida que la frecuencia aumenta se incrementa la atenuación.

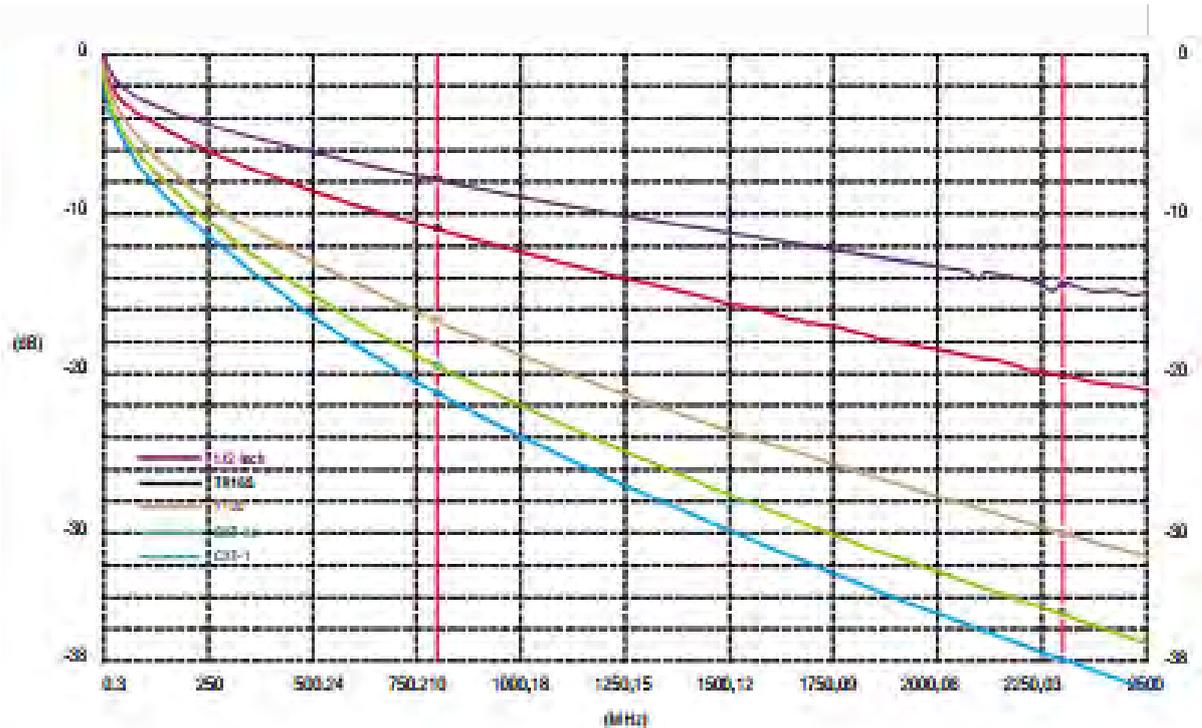


Figura No. 5.4 Curvas de atenuación de diferentes tipos de cable coaxial en función de la frecuencia de operación.

Fuente: Catálogos cable coaxial. (2019). Disponible:

http://.televes.com/sites/default/files/catalogos/10.cable_coaxial.pdf.

La atenuación (o pérdidas totales) que se presenta en todo medio de transmisión guiado, incluyendo desde luego la de los cables coaxiales, se determina mediante la medición de la relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida y se expresa en dB. En la figura No. 5.5 se muestra una imagen de uno de los diferentes medidores de atenuación de los cables coaxiales.



Figura No. 5.5 Medidor de atenuación de los cables coaxiales.

Fuente: Características técnicas de los cables coaxiales. (2019). Disponible:

<http://.videovigilancia.eu.com/blog/guias-de-cctv/caracteristicas-tecnicas-de-los-cables-coaxiales>.

En la tabla No. 5.2 se dispone de una información referencial sobre la atenuación, en dB, que se produce por cada 100 m de tendido de algunos de los diferentes cables coaxiales, dependiendo del valor de la frecuencia de la señal que transporte. Así mismo se indican las características eléctricas y estructurales básicas de los mismos, a una temperatura ambiente de 20°C.

Características de los Cables Coaxiales													
Coaxial	Ohm	Factor Veloc	Aislan. Dieléct.	Tensión MáxRMS	pF Por Metro	Atenuación en decibelios por cada 100 mts							
						10 Mhz	50 Mhz	100 mhz	200 Mhz	400 Mhz	1 Ghz	3 Ghz	Diam. en mm
RG-5	50	0,66	Esp PE	-----	93,50	2,72	6,23	8,85	13,50	19,40	32,15	75,50	8,30
RG-6	75	0,66	Esp PE	-----	61,60	2,72	6,23	8,85	13,50	19,40	32,15	75,50	8,50
RG-8	52	0,66	PE	4.000	97	1,80	4,27	6,23	8,86	13,50	26,30	52,50	10,30
RG-9	51	0,66	PE	4.000	98	2,17	4,92	7,55	10,80	16,40	28,90	59,00	10,70
RG-10	52	0,66	-----	-----	100	1,80	4,25	6,25	8,85	13,50	26,30	52,50	12,00
RG-11	75	0,66	Esp PE	4.000	67	2,18	5,25	7,55	10,80	15,80	25,60	54,00	10,30
RG-12	75	0,66	PE	4.000	67	2,18	5,25	7,55	10,80	15,80	25,60	54,00	12,00
RG-13	74	0,66	-----	-----	67	2,18	5,25	7,55	10,80	15,80	25,60	54,00	10,70
RG-14	52	0,66	-----	-----	98,40	1,35	3,28	4,60	6,55	10,20	18,00	41,00	13,90
RG-17	52	0,66	PE	11.000	67	0,80	2,05	3,15	4,90	7,85	14,40	31,10	22,10
RG-18	52	0,66	-----	-----	100	0,80	2,05	3,15	4,90	7,85	14,40	31,10	24,00
RG-19	52	0,66	-----	-----	100	0,55	1,50	2,30	3,70	6,05	11,80	25,30	28,50
RG-20	52	0,66	-----	-----	100	0,55	1,50	2,30	3,70	6,05	11,80	25,30	30,40
RG-21	53	0,66	-----	-----	98	14,40	30,50	47,70	59,00	85,30	141,00	279,00	8,50
RG-34	75	0,66	-----	-----	67	1,05	2,79	4,60	6,90	10,80	19,00	52,50	15,90
RG-35	75	0,66	-----	-----	67	0,80	1,90	2,80	4,15	6,40	11,50	28,20	24,00
RG-55	53,50	0,66	PE	1.900	93	3,94	10,50	15,80	23,00	32,80	54,10	100,00	5,30

RG-58	50	0,66	PE	1.900	93	4,60	10,80	16,10	24,30	39,40	78,70	177,00	5,00
RG-59	73	0,66	PE	600	69	3,60	7,85	11,20	16,10	23,00	39,40	87,00	6,20
RG-74	52	0,66	-----	-----	98	1,35	3,28	4,59	6,56	10,70	18,00	41,00	15,70
RG-122	50	0,66	-----	-----	-----	5,58	14,80	23,00	36,10	54,10	95,10	187,00	4,10
RG-142	50	0,70	PTFE	1.900	96	3,60	8,85	12,80	18,50	26,30	44,25	88,60	4,90
RG-174	50	0,66	PTFE	1.500	101	12,80	21,70	29,20	39,40	57,40	98,40	210,00	2,60
RG-177	50	0,66	-----	-----	-----	0,70	2,03	3,12	4,92	7,85	14,40	31,20	22,70
RG-178	50	0,69	-----	-----	-----	18,40	34,50	45,90	63,30	91,90	151,00	279,00	1,90
RG-179	75	0,69	-----	-----	-----	17,40	27,90	32,80	41,00	52,50	78,70	144,00	2,50
RG-180	95	0,69	-----	-----	-----	10,80	15,10	18,70	24,90	35,50	55,80	115,00	3,70
RG-187	75	0,69	-----	-----	-----	17,40	27,90	32,80	41,00	52,50	78,70	144,00	2,80
RG-188	50	0,69	-----	-----	-----	19,70	31,50	37,40	46,60	54,80	102,00	197,00	2,80
RG-195	95	0,69	-----	-----	-----	10,80	15,10	18,70	24,90	35,40	55,80	115,00	3,90
RG-196	50	0,69	-----	-----	-----	18,40	34,50	45,20	62,30	91,90	151,00	279,00	2,00
RG-212	50	0,66	-----	-----	-----	2,72	6,23	8,86	13,50	19,40	32,20	75,50	8,50
RG-213	50	0,66	PE	5.000	101	1,80	4,30	6,25	8,85	13,50	26,30	52,50	10,30
RG-214	50	0,66	PE	5.000	101	2,15	4,95	7,55	10,80	16,40	28,90	59,00	10,80
RG-215	50	0,66	PE	5.000	101	1,80	4,30	8,20	8,85	13,50	26,30	52,50	10,30
RG-216	75	0,66	PE	5.000	67	2,15	5,25	7,55	10,80	15,80	25,60	54,10	10,80
RG-217	50	0,66	-----	-----	-----	1,35	3,30	4,60	6,55	10,20	18,00	40,50	13,80
RG-218	50	0,66	-----	-----	96	0,80	2,05	3,10	4,90	7,85	14,40	31,20	22,10
RG-219	50	0,66	-----	-----	-----	0,80	2,05	3,10	4,90	7,85	14,40	31,20	24,00
RG-220	50	0,66	-----	-----	96	0,55	1,50	2,30	3,70	6,10	11,80	25,50	28,50
RG-221	50	0,66	-----	-----	-----	0,55	1,50	2,30	3,70	6,10	11,80	25,50	30,40
RG-222	50	0,66	-----	-----	-----	14,40	30,50	42,70	59,10	85,30	141,00	279,00	8,50

RG-223	50	0,66	PE	1.900	101	3,95	10,50	15,80	23,00	32,80	54,10	100,00	5,40
RG-302	75	0,69	-----	-----	-----	1,50	4,00	10,80	15,40	22,60	41,90	85,25	5,30
RG-303	50	0,69	-----	-----	-----	3,61	8,86	12,80	18,50	26,30	44,30	88,60	4,30
RG-316	50	0,69	-----	-----	-----	19,70	31,50	37,40	46,60	54,80	102,00	197,00	2,60
NOTAS	PE = Polietileno												
	Esp.PE = Espuma de Polietileno												
	PTFE = Teflón (Politetrafluoroetileno)												
	RG-214 y RG-223 = Con doble protección (Doble apantallado)												

Tabla No. 5.2 Características eléctricas y estructurales de algunos de los principales cables coaxiales y la atenuación que presentan dependiendo de la frecuencia, a una temperatura ambiente de 20°C

Fuente: Tabla cable coaxial. (2019). Disponible:

<https://www.electronicafacil.net/tutoriales/Tabla-cable-coaxial.php>

5.6 Potencial eléctrico

En la figura No. 5.6 se ilustra el corte transversal de un cable coaxial, en donde se indican la presencia, tanto, del campo eléctrico como la intensidad magnética que se presenta dentro del cable, cuando se le aplica un potencial eléctrico entre sus conductores y fluye por el mismo una corriente.

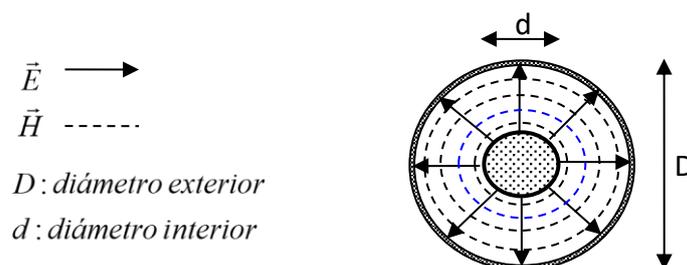


Figura No. 5.6 Corte transversal de un cable coaxial

El potencial eléctrico en un cable coaxial, se aplica entre el conductor interno al externo, considerándose éste último como la tierra del cable. Para determinar este potencial, se emplea ya sea la ecuación de Poisson o la de Laplace, dependiendo del modo que este distribuida la carga en este cable, la cual se asocia al potencial existente dentro del mismo.

El proceso para determinar el potencial eléctrico, producido por cualquier distribución de cargas, es el siguiente:

1.) Definir si se emplea la ecuación de Poisson o la de Laplace.

Para este caso se emplea la de Laplace ya que las cargas se encuentran distribuidas sobre la superficie de los conductores y por lo tanto no existe densidad volumétrica de carga ($\rho_V = 0$). La ecuación de la Laplace está dada por la siguiente expresión:

$$\langle 5.6 \rangle \nabla^2 V = 0$$

2.) Selección del sistema de coordenadas a emplear.

Debido a que la estructura del cable es de tipo cilíndrico, implica que la distribución de cargas es del mismo tipo, entonces lo apropiado es emplear coordenadas cilíndricas. Por lo tanto la ecuación de Laplace se expresa según lo indicado en la ecuación 5.7.

$$\langle 5.7 \rangle \nabla^2 V(\rho, \varphi, z) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial V(\rho, \varphi, z)}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 V(\rho, \varphi, z)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V(\rho, \varphi, z)}{\partial z^2} = 0$$

3.) Definición de las variables cilíndricas de las cuales depende el potencial.

Para cualquier punto radial, entre los conductores del cable coaxial, el potencial eléctrico solo depende de la variable: ρ (radio del cilíndrico), ya que este cambia de valor a medida en que el punto vaya variando de posición radial entre los dos conductores del cable y no varía de valor si ese punto gira a la misma distancia ρ alrededor del eje del cable, sobre su plano transversal (variable: ϕ), ni tampoco cambia si a esa misma distancia se desplaza paralelo al eje del cable.

$$\text{Entonces: } V \rightarrow V(\rho)$$

4.) Determinación de la ecuación final.

a qué el potencial solo depende de la variable ρ , la ecuación final sería la indicada a continuación. La derivada se expresa en forma completa ya que la función (el potencial en este caso) solo depende de una variable.

$$\langle 5.8 \rangle \nabla^2 V(\rho) = \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left[\rho \frac{dV(\rho)}{d\rho} \right] = 0$$

5.) Solución genérica.

La solución a la ecuación 5.8 es la siguiente:

$$\langle 5.9 \rangle V(\rho) = a \ln \rho + b$$

Dónde: a y b : son las constantes de integración, cuyos valores se determinan considerando las condiciones fronterizas del problema.

6.) Solución específica.

Se determinan las constantes de integración:

Para: $\rho = d/2$, tenemos:

$$\langle 5.10 \rangle V(d/2) = V_0 = a \ln(d/2) + b$$

Donde V : corresponde al voltaje aplicado al cable coaxial (en el conductor interno)

Para: $\rho = D/2$, tenemos:

$$\langle 5.11 \rangle V(D/2) = 0 = a \ln(D/2) + b$$

De la ecuación 5.10: $b = V_0 - a \ln(d/2)$.

Reemplazando este valor en la ecuación 5.11:

$$0 = a \ln(D/2) + V_0 - a \ln(d/2) \Rightarrow a [\ln(D/2) - \ln(d/2)] = -V_0.$$

$$a = \frac{-V_0}{\ln(D/d)}$$

Ahora reemplazando este valor en la ecuación 3.10, tenemos:

$$b = V_0 - \left[\frac{-V_0}{\ln(D/d)} \right] \ln(d/2) = V_0 + \left[\frac{V_0}{\ln(D/d)} \right] \ln(d/2).$$

Por lo tanto la solución específica, reemplazando en la ecuación 5.9, es:

$$\langle 5.12 \rangle V(\rho) = \frac{-V_0}{\ln(D/d)} \ln \rho + V_0 + \left[\frac{V_0}{\ln(D/d)} \right] \ln(d/2)$$

$$V(\rho) = V_0 + \left[\frac{V_0}{\ln(D/d)} \right] \ln(d/2) - \frac{V_0}{\ln(D/d)} \ln \rho$$

$$V(\rho) = V_0 \left[+1 - \frac{\ln \rho}{\ln(D/d)} + \frac{\ln(d/2)}{\ln(D/d)} \right] = V_0 \left[1 + \frac{-\ln \rho + \ln(D/d) + \ln(d/2)}{\ln(D/d)} \right]$$

$$V(\rho) = V_0 \left[1 + \frac{\ln(D/d) - \ln(\rho d/2)}{\ln(D/d)} \right] = V_0 \left[1 + \frac{\ln((d/2)/\rho)}{\ln(D/d)} \right]$$

Finalmente:

$$\begin{aligned} \langle 5.13 \rangle V(\rho) &= V_0 \left[\frac{\ln(D/d) + \ln((d/2)/\rho)}{\ln(D/d)} \right] = V_0 \left[\frac{\ln((D/2)/\rho)}{\ln(D/d)} \right] \\ &= V_0 \frac{\ln(\rho/(D/2))}{\ln(d/D)} \end{aligned}$$

La ecuación 5.13 expresa el potencial en función de los diámetros. También se puede dar en función de los radios:

Si $\rho_1 = d/2$: radio interno y $\rho_2 = D/2$: radio externo

Entonces:

$$\langle 5.13 \rangle V(\rho) = V_0 \frac{\ln(\rho/(D/2))}{\ln(d/D)} = V_0 \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)}$$

Ejemplo No. 5.7

Comprobar la validez de la ecuación 3.13, la cual indica la forma de calcular el potencial eléctrico dentro de un cable coaxial.

Solución:

Se tiene que la ecuación 5.13 está dada por:

$$V(\rho) = V_0 \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)}$$

Se utilizan las condiciones fronterizas para determinar su validez:

- Para:

$$\rho = \rho_1 \Rightarrow V(\rho_1) = V_0 \frac{\ln(\rho_1/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)} = V_0$$

que corresponde al potencial en el conductor interno

- Para:

$$\rho = \rho_2 \Rightarrow V(\rho_2) = V_0 \frac{\ln(\rho_2 / \rho_2)}{\ln(\rho_1 / \rho_2)} = V_0 \frac{\ln 1}{\ln(\rho_1 / \rho_2)} = 0$$

que corresponde al potencial en el conductor externo

Ejemplo No. 5.8

A un cable coaxial RG-8U, se le aplica un voltaje de 20 voltios entre el conductor interno y el conductor externo. Determinar el potencial eléctrico (voltaje) en el punto medio del área transversal del mismo.

Solución:

Según lo indicado en la tabla No. 5.10, los radios del cable coaxial RG-8U son 2.17 mm y 10.3 mm (interno y externo respectivamente).

El punto medio del área transversal es:

$$\frac{2.17 + 10.3}{2} = 6,235 \text{ mm}$$

Aplicando la ecuación 3.13:

$$V(6,235) = 20 \frac{\ln(6,235 / 10.3)}{\ln(2.17 / 10.3)} \approx 6.4 \text{ V}$$

5.7 Distribución de los campos electromagnéticos

Conocido el potencial eléctrico en el cable coaxial, se puede determinar cómo se distribuyen los campos electromagnéticos dentro del mismo.

a. Campo eléctrico transversal

Se aplica la expresión indicada en la ecuación 5.14

$$\langle 5.14 \rangle \vec{E}_t = -\vec{\nabla} V$$

En las coordenadas cilíndricas el gradiente de una función (para este caso la del potencial eléctrico), está dado por la expresión indicada en la ecuación 5.15:

$$\langle 5.15 \rangle \vec{E}_t = -\vec{\nabla}V = -\left[\frac{\partial V}{\partial \rho} \hat{a}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial V}{\partial \varphi} \hat{a}_\varphi + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{a}_z\right]$$

Como para este caso el potencial solo depende del radio del cable, entonces la ecuación se reduce a la siguiente expresión

$$\langle 5.16 \rangle \vec{E}_t = -\vec{\nabla}V = -\frac{dV}{d\rho} \hat{a}_\rho$$

Con derivada completa ya que el potencial solo depende de una variable. Entonces:

$$\begin{aligned} \langle 5.17 \rangle \vec{E}_t = -\vec{\nabla}V &= -\frac{dV(\rho)}{d\rho} \hat{a}_\rho = -\frac{d}{d\rho} \left[V_0 \frac{\ln(\rho/\rho_2)}{\ln(\rho_1/\rho_2)} \right] \\ &= -\frac{V_0}{\ln(\rho_1/\rho_2)} \frac{d[\ln(\rho/\rho_2)]}{d\rho} = -\frac{V_0}{\ln(\rho_1/\rho_2)} \frac{1}{\rho} \hat{a}_\rho \\ \vec{E}_t &= \frac{V_0}{\ln(\rho_2/\rho_1)} \frac{1}{\rho} \hat{a}_\rho \text{ (V/m)} \end{aligned}$$

b. *ntensidad magnética transversal*

$$\begin{aligned} \langle 5.18 \rangle \vec{H}_t &= \frac{1}{\eta} [\hat{a}_z \times \vec{E}_t] \\ [\hat{a}_z \times \vec{E}_t] &= \begin{bmatrix} \hat{a}_\rho & \hat{a}_\varphi & \hat{a}_z \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{V_0}{\ln(\rho_2/\rho_1)} \frac{1}{\rho} & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{V_0}{\ln(\rho_2/\rho_1)} \frac{1}{\rho} \hat{a}_\varphi \\ \vec{H}_t &= \frac{1}{\eta} \frac{V_0}{\ln(\rho_2/\rho_1)} \frac{1}{\rho} \hat{a}_\varphi \text{ (A/m)} \end{aligned}$$

Donde $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$: *pérdidas dieléctricas* (Ω)

μ : *permeabilidad del dieléctrico* (H/m)

ε : *permitividad del dieléctrico* (F/m)

Como podemos apreciar: el campo eléctrico es radial al eje del cable coaxial y la intensidad magnética gira alrededor del mismo. Esto significa que estos campos son ortogonales entre sí, tal y como se indican en la figura No. 5.6.

5.8 Potencia transmisible

Corresponde a aquella potencia máxima que puede transmitir los cables coaxiales, a una frecuencia determinada, sin que se afecte el funcionamiento de los mismos. La temperatura presente en los cables es proporcional a la potencia que transmiten, la cual si es excesivamente alta, no solamente disminuye la eficiencia de funcionamiento de los mismos, sino que se puede deteriorar su estructura e incluso quemarse.

A continuación se relacionan los principales pasos que se utilizan en el proceso de deducción de la expresión que se emplea para calcular la potencia que transmite un cable coaxial, al aplicarle un potencial eléctrico V :⁽⁴⁾

- Se tiene que la potencia transmitida equivale a la integral de superficie de la densidad de potencia radiada que atraviesa el área de dicha superficie (en este caso del área transversal del cable coaxial).
- La densidad de potencia radiada corresponde a la parte real del vector de Poynting, el cual está dado por la expresión indicada en la ecuación 5.18.

$$\langle 5.19 \rangle \vec{\phi} = \vec{E}_t \times \vec{H}_t \text{ (W/m}^2\text{)} = \vec{\phi}_{rad} + j\vec{\phi}_{reac}$$

- Densidad de potencia radiada (transmitida):

$$\langle 5.20 \rangle \vec{\phi}_{rad} = \frac{1}{2} \Re[\vec{E}_t \times \vec{H}_t^*] \text{ (W/m}^2\text{)}$$

- Densidad de potencia reactiva (disipada en calentamiento):

$$\langle 5.21 \rangle \vec{\phi}_{reac} = \frac{1}{2} \Im[\vec{E}_t \times \vec{H}_t^*] \text{ (W/m}^2\text{)}$$

- Entonces la potencia transmitida estada por la ecuación 5.22:

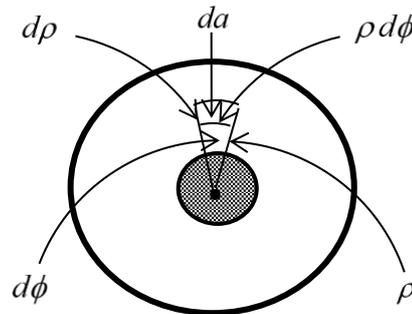
$$\langle 5.22 \rangle P_T = \int_S \vec{\phi}_{rad} \cdot \vec{n} da = \frac{1}{2} \int_S [\Re(\vec{E}_t \times \vec{H}_t^*) \cdot \vec{n} da] \text{ (W)}$$

$$\vec{E}_t = \frac{V_0}{\ln(\rho_2/\rho_1)} \frac{1}{\rho} \hat{a}_\rho \text{ (V/m)} \quad \vec{H}_t^* = \frac{1}{Z_c} \frac{V_0}{\ln(\rho_2/\rho_1)} \frac{1}{\rho} \hat{a}_\phi \text{ (A/m)}$$

$$\vec{E}_t \times \vec{H}_t^* = \left(\frac{V_0}{\ln(\rho_2/\rho_1)\rho} \right) \left(\frac{1}{\eta \ln(\rho_2/\rho_1)\rho} \right) \hat{a}_\rho \times \hat{a}_\phi$$

$$= \left(\frac{V_0^2}{\eta \ln^2(\rho_2/\rho_1)} \right) \frac{1}{\rho^2} \hat{a}_z = \Re(\vec{E}_t \times \vec{H}_t^*)$$

$$\vec{n} = \hat{a}_z \text{ y } da = (\rho d\phi)d\rho = \rho d\rho d\phi$$



- Al reemplazar en la ecuación 5.22:

$$\langle 5.23 \rangle P_T = \frac{1}{2} \int_S \left\{ \left[\left(\frac{V_0^2}{\eta \ln^2(\rho_2/\rho_1)} \right) \frac{1}{\rho^2} \right] \hat{a}_z \cdot \hat{a}_z \rho d\rho d\phi \right\}$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \left\{ \left(\frac{V_0^2}{\eta \ln^2(\rho_2/\rho_1)} \right) \frac{1}{\rho} d\rho d\phi \right\} = \frac{\pi V_0^2}{\eta \ln(\rho_2/\rho_1)} \text{ (W)}$$

Ejemplo No. 5.9

Determinar la potencia que transmite el cable coaxial RG-8U del ejemplo No.5.8, sí se le aplica un voltaje de 20 voltios entre el conductor interno y el conductor externo, teniendo en cuenta que el dieléctrico del cable es aire.

Solución:

Se aplica la ecuación 3.22 y teniendo en cuenta los datos del ejemplo No.5.8:

$$P_T = \frac{\pi V_0^2}{\eta_0 \ln(\rho_2 / \rho_1)} = \frac{\pi 20^2}{120 \pi \ln(10.3 / 2.17)} = 2.14 \text{ (W)}$$

Dónde :

$$\text{Pérdidas dieléctricas del aire : } \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \pi \text{ (\Omega)}$$

En el anexo No. 2 se adjuntan unas curvas, mediante las cuales se pueden determinar, de manera aproximada, las potencias máximas que pueden transmitir algunos de los diferentes tipos de cable coaxial. Como se puede deducir, de la observación de estas curvas, la potencia máxima que resisten estos cables disminuye a medida que la frecuencia, a la cual va a ser utilizado el cable, sea mayor. Para aquellos cables con mayor diámetro la potencia que resisten es mayor.

Ejemplo No. 5.10

Utilizando las curvas contenidas en los anexos: 1 y 2, para el cable coaxial de cobre corrugado, con dieléctrico de aire, de 50 ohmios y un diámetro 1⁵⁸ de pulgada, calcular para una frecuencia de operación de 300 MHz.

- a.) Las pérdidas (atenuación) para un tendido de 60 metros.
- b.) La potencia transmisible que puede resistir.

Solución:

a.) Pérdidas:

De acuerdo a las curvas No 1 del anexo No. 2, se tiene que la atenuación es de 3.6 dB 100 pies (aproximadamente).

La longitud del cable en pies sería: 60 0.3048 196.85.pies

Por lo tanto las pérdidas totales serían de unos:

$$(3.6 \text{ dB } 100 \text{ pies}) \quad 196.85 \text{ pies} \quad 7.09 \text{ dB.}$$

b.) Potencia transmisible:

De acuerdo a las curva No. 1 del anexo No. 3, se tiene que la potencia máxima que resiste es de unos: 7.8 ilovatios.

5.9 Pérdida por retorno estructural

Estas pérdidas (SRL: *Structural Return loss*), denominadas simplemente como pérdidas por retorno, son ocasionadas por la falta de uniformidad en la construcción de los cables coaxiales (variación de los parámetros dimensionales) y también por las que se presentan en los materiales empleados, variaciones que producen una alteración localizada de impedancia, provocando un *rebote* de la señal con la consiguiente inversión parcial de la misma

5.10 Aplicaciones comunes de los cables coaxiales

Se considera que el cable coaxial se puede usar en todas aquellas aplicaciones que se requiera transmitir señales eléctricas a alta velocidad y que sea protegidas de interferencias de otras señales espurias. Es por lo anterior que la gran mayoría de la utilización del cable coaxial este orientada a la transmisión de señales de información (análogas o digitales), entre las cuales se puede resaltar las siguientes.

5.10.1 Instalación individual entre antenas y televisor

Corresponde a la conexión convencional entre una o varias antenas y los receptivos televisores residenciales. A continuación se relacionan los componentes o elementos fundamentales para estas instalaciones.

- *Medio de transmisión:* inicialmente la conexión entre la antena y el televisor se conectaban a través de cables bifilares de 300 ohmios, especialmente en la época de la televisión en blanco y negro. Posteriormente se reemplazó por cable coaxial, el cual es más eficiente debido a su sistema de protección que le ofrece el apantallamiento (blindaje original) producido por la misma *malla* del cable. La impedancia característica de estos cables es de 75 ohmios, impedancia igual a la de la entrada de los televisores actuales. Los tipos de *cables coaxiales* más utilizado para esta conexión son: RG-6 o RG-59. Se prefiere más los cables RG-6, debido a que ofrecen mayor ancho de banda (casi el doble que el de RG-59) y son menos propensos a producir distorsión. En la figura No. 6.7 se expone una imagen donde se indica la estructura básica de un cable coaxial RG-6. ⁽⁵⁾

•

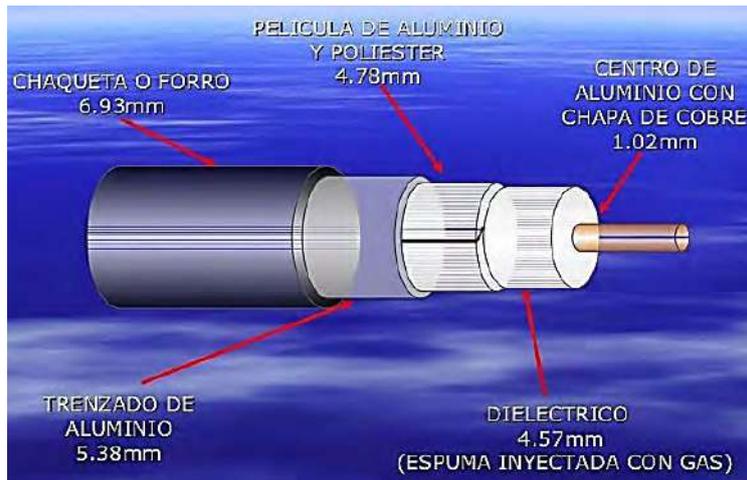


Figura No.5.7 Estructura básica de un cable coaxial RG-6.

Fuente: Cable coaxial. (2019). Disponible: Es.slideshare.net Maynorporoj cable-coaxial.

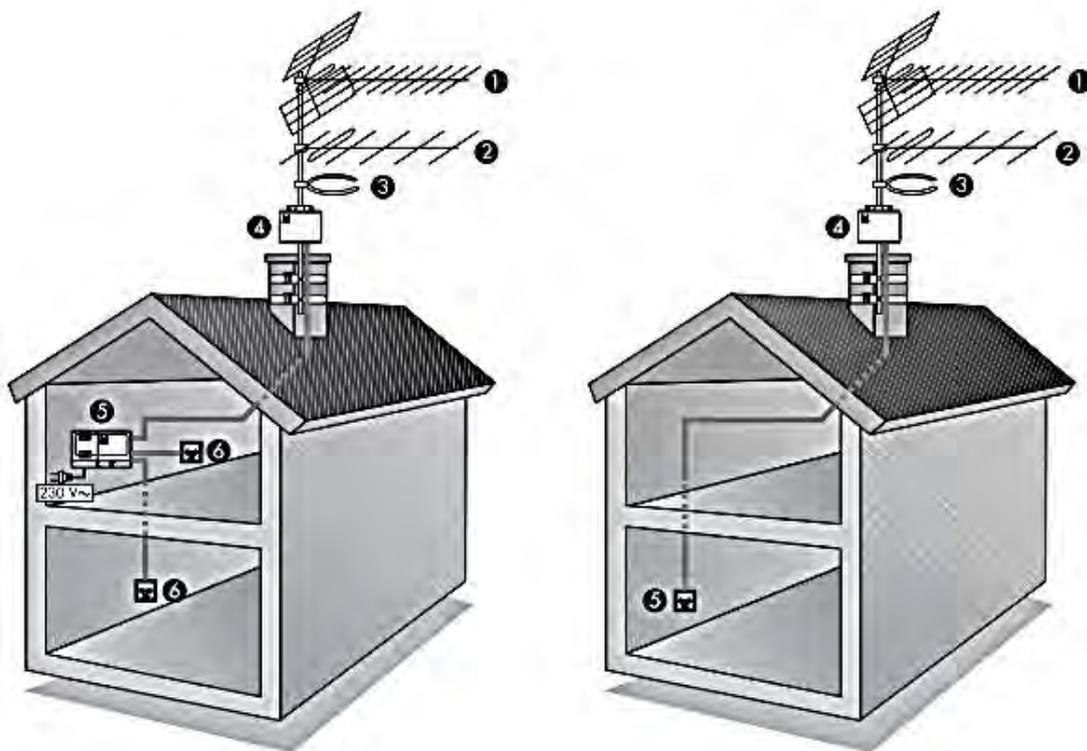
En la tabla No. 5.3 se indica la atenuación nominal que presenta el cable coaxial RG-6 a 20⁰ centígrados, de acuerdo a algunos de los canales de televisión abierta que estén transfiriendo desde la antena receptora al televisor. La atenuación de los cables coaxiales es proporcional a la temperatura a que estén sometidos los mismos. Para este caso por cada grado centígrado que varíe la temperatura, variará de la misma forma la atenuación en un 0.18 .⁽⁶⁾

Canal	Frecuencia (MHz)	Atenuación / 100 m	Canal	Frecuencia (MHz)	Atenuación
	5	1.87	53	400	13.12
2	55	4.94	61	450	14.04
13	211	9.43	71	500	14.80
28	250	10.22	78	550	15.62
31	270	10.63	86	600	16.34
36	300	11.25	116	750	18.44
42	330	11.84	135	870	19.99
45	350	12.20		1.000	21.46

Tabla No. 5.3 Atenuación cable coaxial RG-6 para diferentes canales de T abierta.

Fuente: Cable coaxial. (2019). Disponible: es.slideshare.net Maynorporoj cable-coaxial.

En la figura No. 5.8 se ilustran dos instalaciones individuales de T con amplificador de mástil, con dos tomas la primera instalación y con una toma la segunda instalación. Para elevar el nivel de la señal captada por cada una de las tres antenas (para este caso), se emplea un amplificador de mástil de alta ganancia, y si hay varias tomas de T, se requiere de una fuente la cual entrega a cada toma la señal de televisión sintonizada por el televisor respectivo. Para las instalaciones indicadas en la figura en mención, existen tres antenas, cada una para captación de emisiones diferentes: una para T -UHF, otra para T -HF y otra para radiodifusión sonora FM.



(1): Antena T -UHF; (2) Antena T - HF; (3) Antena FM; (4) Amplificador de mástil; (5) Fuente (para instalación con dos tomas) y Toma (para instalación con una toma); (6) Tomas (para instalación con dos tomas).

Figura No. 5.8 Instalaciones individuales con amplificador de mástil, para dos tomas y para una sola toma.

Fuente: Catálogo *Recepción y distribución TV* ALCAD, 3ª edición, 2017, p.65.

Para un poco más de claridad y complementación, en la figura No. 5.9 se expone unas imágenes que muestran en una de ellas al amplificador de mástil y la fuente, y en la otra imagen se representa la instalación individual con una sola antena y una sola toma de televisión. En este caso aparece la fuente,

considerando la instalación de posible toma adicional. Las ganancias de los amplificadores de mástil (*boosters*) están entre un rango típico de 25 a 40 dB. ⁽⁷⁾



Figura No. 5.9 Instalación individual con amplificador de mástil.

Fuente: Mártony, J., *Antenas receptoras para la TV digital*, CUE Ltda. 2017, p 40.

Las separaciones entre las antenas, cuando se ubican en un mismo mástil, deben ser lo más distanciadas posibles. En la figura No. 5.10 se hace una representación de la separación mínima, para el caso de tres antenas, para bandas de frecuencia diferentes.

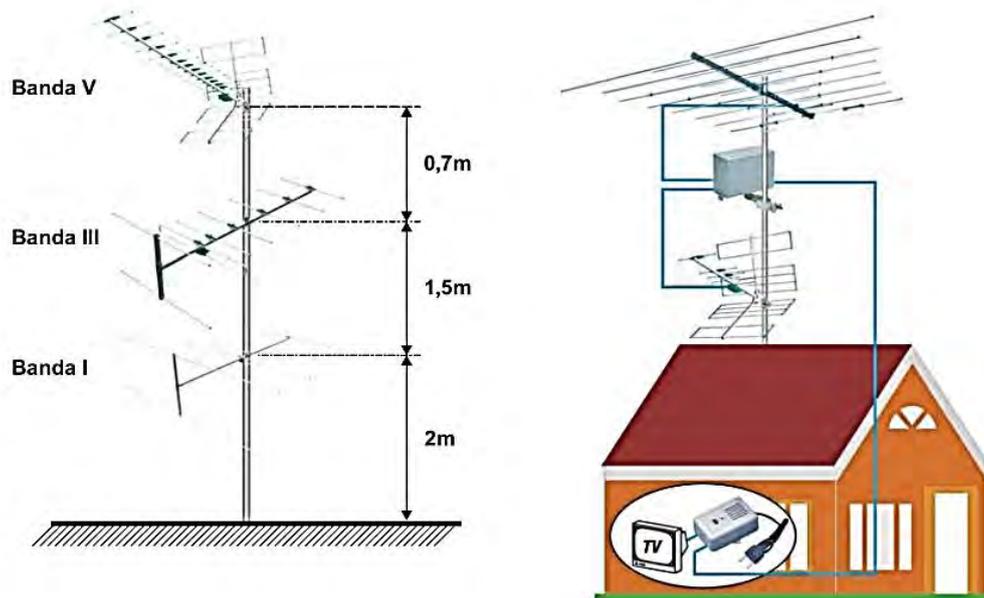


Figura 5.10 Distanciamiento típicos de instalación de tres antenas para canales diferentes en un mismo mástil.

Fuente: Mártony, J., *Antenas receptoras para la TV digital*, CUE Ltda. 2017, p.41.

En la figura No. 5.11 se muestra el esquema simplificado de la instalación individual, con cuatro antenas de entrada y dos tomas de salida.

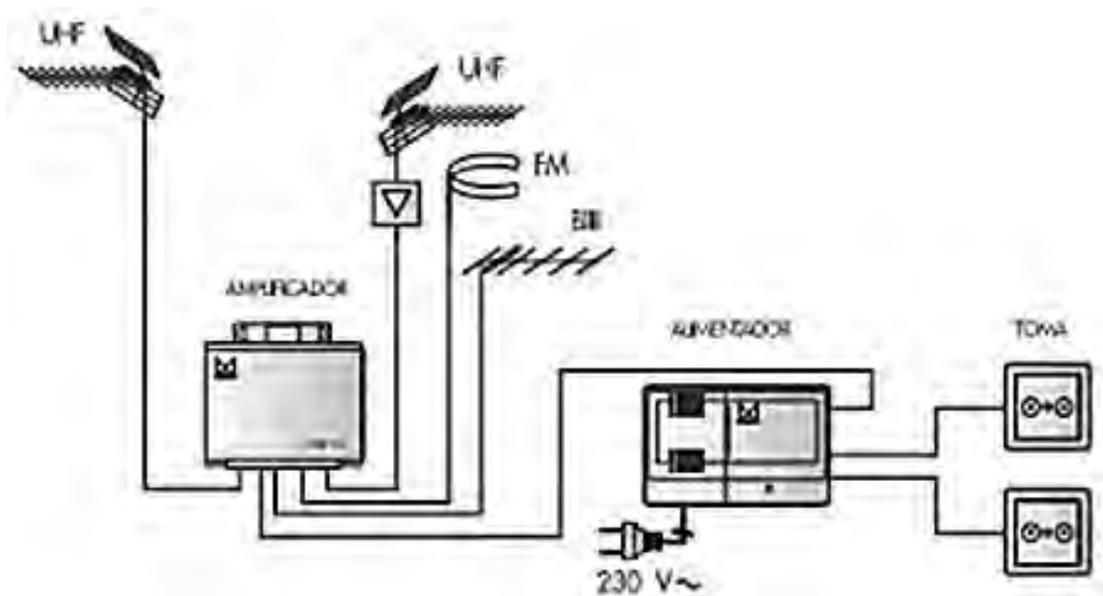


Figura No. 5-11 Instalación individual con cuatro antenas de entrada y dos tomas de salida.

Fuente: Catálogo *Recepción y distribución TV* ALCAD, 3ª edición, 2017, p.65.

Para balancear la conexión entre las líneas abiertas (línea balanceada), que se conectan a los dos terminales de la antena, con el cable coaxial (línea desbalanceada) se utiliza un dispositivo denominado *balun* (ver figura No. 5.12).



Figura No. 5.12 Imagen de un balun y su conexión a los terminales de una antena.

Fuente: Antenas receptoras para la tv digital. (2019).
 Disponible: <http://www.tvd.gub.uy/download.php?m=63>.

- **Conectores, divisores y acopladores** : el conector más empleado en cada extremo de los cables RG-6 o RG-59 es el conector F, el cual tiene una impedancia de 75 ohmios hasta 1 GHz y dispone de un ancho de banda de varios GHz. En la figura No.5.13 se ilustran algunos tipos del conector F, tanto de terminal macho como de terminal hembra. ⁽⁸⁾



Figura No.5.13 Conectores F: machos y hembras.

Fuente: Catálogo "Adaptador conector coaxial Recto tipo", Sodial, 2018.

Para la bifurcación de la señal de T se utilizan divisores (*splitters*) de 75 ohmios de 2, 3 y 4 salidas principalmente. Estos divisores producen unas pérdidas por inserción. En la figura No. 5.14 se exponen algunos de los diferentes divisores y acopladores utilizados para el cable coaxial RG-6.



a.) Divisores (splitters)



b.) Acopladores

Figura No. 5.14 Divisores y acopladores para cable coaxial RG-6.

Fuente: Cable coaxial. (2019). Disponible:es.slideshare.net Maynorporoj cable-coaxial.

En la tabla No. 3.4 se indica las pérdidas por inserción de algunos divisores de 2 salidas y de 3 salidas, así como algunas otras características de los mismos, en el rango de 5 a 1.000 MHz.

Característica	Splitter 2 salidas	Splitter 3 salidas
Pérdida por inserción	4.0 dB	4.0 dB 7.5 dB
Aislamiento	20 dB	20 dB
Pérdida de retorno	20 dB	20 dB
Exactitud	1.5 dB	1.5 dB
Fusible	10 Amp	10 Amp
Potencia de paso	10 A 60	10 A 60

Tabla No. 5.4 Características de funcionamiento de Splitters con 2 y 3 salidas, dentro el rango de 5 a 1.000 MHz.

Fuente: Cable coaxial. (2019). Disponible:[http://es.slideshare.net Maynorporoj cable-coaxial-11542255](http://es.slideshare.net/Maynorporoj/cable-coaxial-11542255).

- *Tomas*: la variedad de los tipos de tomas T depende, esencialmente, al número de salidas que estas dispongan. En la figura No. 5.15 se muestran algunos tipos de estas tomas.

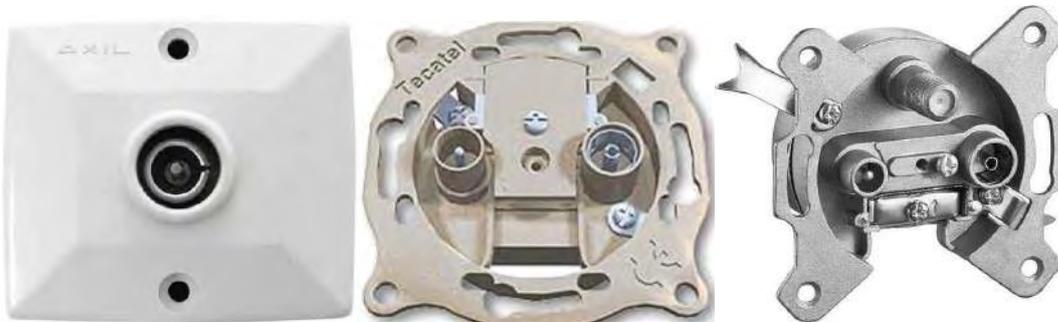


Figura No. 5.15 Tipos de tomas T .
 Fuente: Catálogo *Tomas TV*, Diesl.com, 2018.

5.10.2 Instalación de antenas comunitarias

Estas instalaciones constituyen un sistema de telecomunicaciones conformado por una serie de dispositivos y elementos, tales como: antenas, equipo de cabecera (conjunto de receptores), repartidor principal, divisores (derivadores), amplificadores, cableado, puntos de tomas, entre otros. El propósito de estos sistemas es que varios usuarios de un edificio o conjunto residencial puedan compartir las señales de televisión terrestre y o satelital, así como de radiodifusión sonora. ⁽⁹⁾

En la figura No. 5.16 se indica un diagrama general de la conformación de la instalación de antenas comunitarias, para señales de televisión digital terrestre (TDT), a partir del repetidor principal, relacionando las correspondientes longitudes del cableado respectivo, para una instalación determinada.

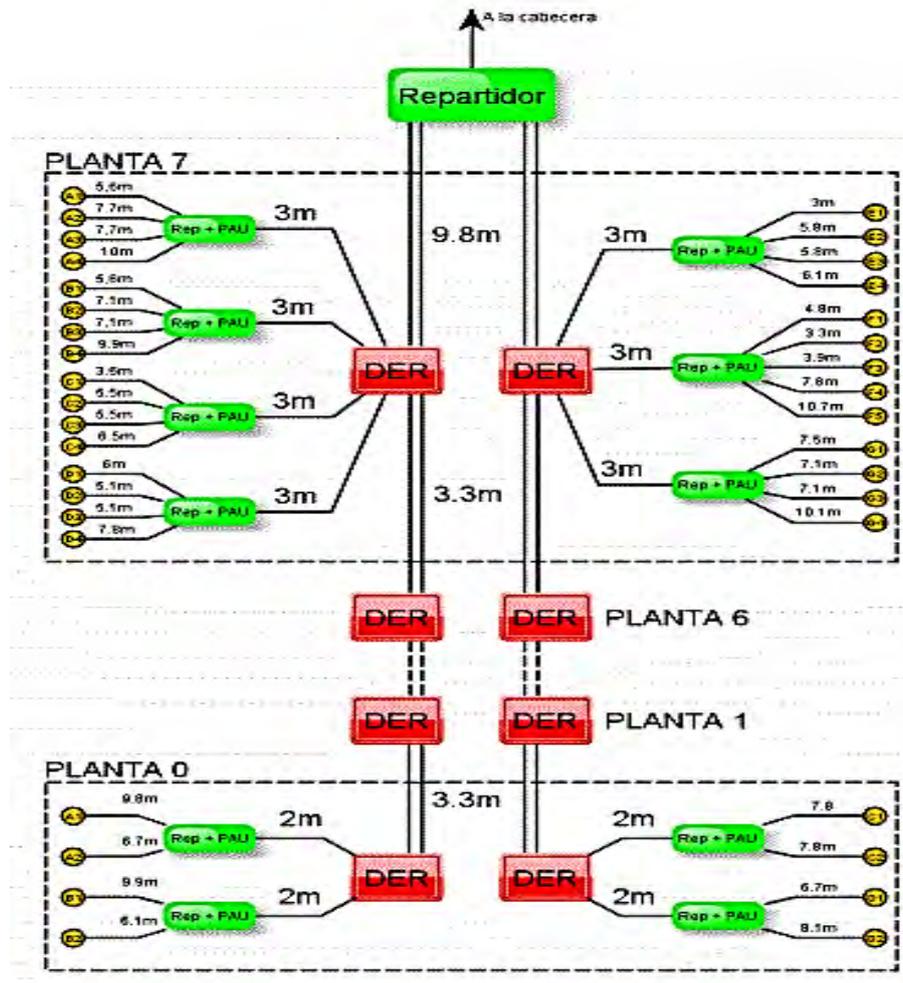


Figura No. 5.16 Diagrama general de la distribución de una instalación determinada de antenas comunitarias para TDT.
Fuente: Catálogo "Antenas Comunitarias", Tecatel, 2018.

El *equipo de cabecera*, es un sistema modular conformado por receptores, los cuales reciben, cada uno, un canal de TDT. Para el caso de que los televisores de los usuarios sean análogos, estos receptores de la cabecera convierten la señal T digital a T análoga, teniendo de presente que cada canal de TDT contiene varios programas (alrededor de 5). En la figura No. 5.17 se ilustra la conformación de una cabecera de un sistema comunitario de TDT. ⁽¹⁰⁾



Figura No. 5.17 Cabecera de un sistema de T comunitaria.
Fuente: Manual de Instalaciones, Alcad, TDT, 2018, p.10

El *repartidor* recibe las señales del *equipo cabecera* y las remite a los *derivadores* de cada uno de los niveles del sistema de instalación y estos las envía al *amplificador* de cada uno de los usuarios que, por lo general, disponen los diferentes puntos de toma de T. Los *repartidores*, para compensar las pérdidas producidas por el cableado de conexión con el *equipo cabecera*, disponen de ganancia ecualizada, garantizando el nivel de la señal en la repartición (repartidores activos). En la figura No. 5.18 se muestran unas imágenes de unos repartidores activos.



Figura No.5.18 Imágenes de repartidores activos.
Fuente: Manual "Distribución de la señal de TV", Televés, 2018.

Los *derivadores* (divisores), ubicados en cada uno de los compartimientos (pisos, plantas, niveles) de la infraestructura a cubrir el sistema de antenas comunitarias, les corresponden distribuir la señal a cada una de las tomas de los

usuarios, a través de los amplificadores que dispone cada punto de servicio final. En la figura No. 5.19 se ilustran dos tipos de *derivadores*, de la gran variedad existentes en el mercado.



Figura No. 5.19 Tipos de derivadores.

Fuente: Manual "Equipos de imagen", CFGM Equipos Electrónicos. 2018.

Estos *derivadores* presentan ciertas pérdidas y aislamientos, entre los que se pueden resaltar los que se relacionan en la tabla No. 3.5.⁽⁹⁾

Pérdidas / Aislamientos	Rango de frecuencia		
	5 a 40 MHZ	40 a 1.000 MHZ	1.000 a 2.400 MHZ
Pérdidas por derivación	12 dB	12 dB	12 dB
Pérdidas de paso	4.2 dB	4.5 dB	6.6 dB
Aislamiento entre salidas	23 dB	22 dB	21 dB

Tabla No. 5.5 Pérdidas y aislamientos típicos de los derivadores.

Fuente: Manual "Equipos de imagen", CFGM Equipos Electrónicos. 2018.

Los *amplificadores* además de amplificar las señales, evitan la presencia de intermodulación entre canales adyacentes, debido a su alto grado de selectividad con que cuentan. Estos equipos se encuentran dispuestos también en forma modular y por lo general cuentan con una ganancia de unos 40 dB o mayor, así mismo incorporan autoseparación de las señales a su entrada. En la figura No. 5.20 se exponen dos conjuntos de *amplificadores*, de la gran variedad que existen en el mercado.



Figura No. 5.20 Conjuntos de amplificadores.
Fuente: Manual *distribución de la señal de TV*, Televés, 2017.

El *cableado* que con mayor frecuencia se utiliza, en las redes de estas instalaciones de antenas comunitarias, es el *cable coaxial*, entre los que se destaca el Platinum 6.8 mm blanco o el cabe Mini- UHF. En la figura No. 5.21 se muestran las imágenes de estos cables coaxiales.



Figura No. 5.21 Imagen de cable coaxial Platinum 6.8 mm blanco Mini-UHF
 Conexión a una antena yagi.

Fuente: Catálogo Coaxial Cable (75 ohm, class A)", Triset, 2018.

Las principales características eléctricas de un cable coaxial Platinum 6.8 mm blanco, se relacionan en la tabla No. 5.6.

Características Eléctricas	
Impedancia característica	75 ohm
Radio de curvatura máxima	35 mm
Diámetro exterior	6.8 mm
Velocidad de propagación	0.85 C
Eficiencia apantallamiento	85 dB
Atenuación (dB 100 m) para 50 MHz	4.2
Atenuación (dB 100 m) para 200 MHz	8,5
Atenuación (dB 100 m) para 470 MHz	13.0
Atenuación (dB 100 m) para 800 MHz	17.0
Atenuación (dB 100 m) para 1.000 MHz	19.4
Atenuación (dB 100 m) para 1.750 MHz	25.7
Atenuación (dB 100 m) para 2.150 MHz	29.0
Atenuación (dB 100 m) para 2.300 MHz	30.3

Tabla No. 5.6 Principales características eléctricas de un cable coaxial Platinum
 6.8 mm blanco.

Fuente: Manual CCTV Camera Suppliers", ataca, México, 2018.

Con el propósito de dar una idea de los diferentes casos de la instalación de *antenas comunitarias*, en las figuras No. 5.22 y No 3.23 se ilustran dos de estos eventos: el primero corresponde a la instalación de dos antenas comunitarias para TV digital, una *satelital* y otra *terrestre*, para diferentes usuarios, y el segundo a la instalación de todo un sistema de *antenas comunitarias* para un solo usuario con dos tomas de salida.

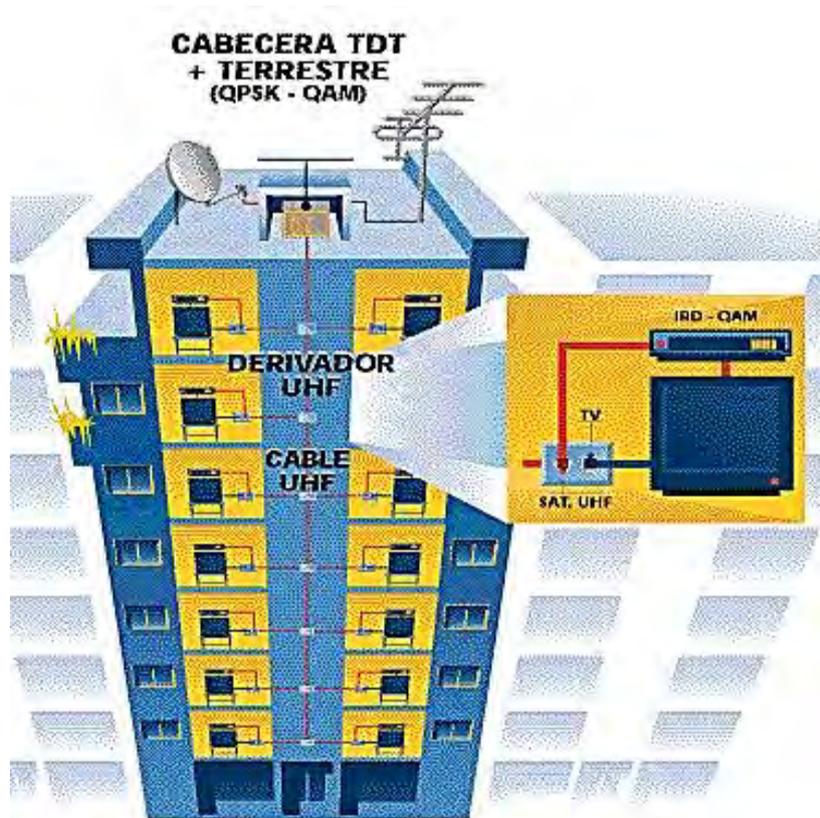


Figura No. 5.22 Instalación de antenas comunitarias para varios usuarios (edificio).

Fuente: Fuente: Manual *istribución de la señal de TV*", Televés, 2018.

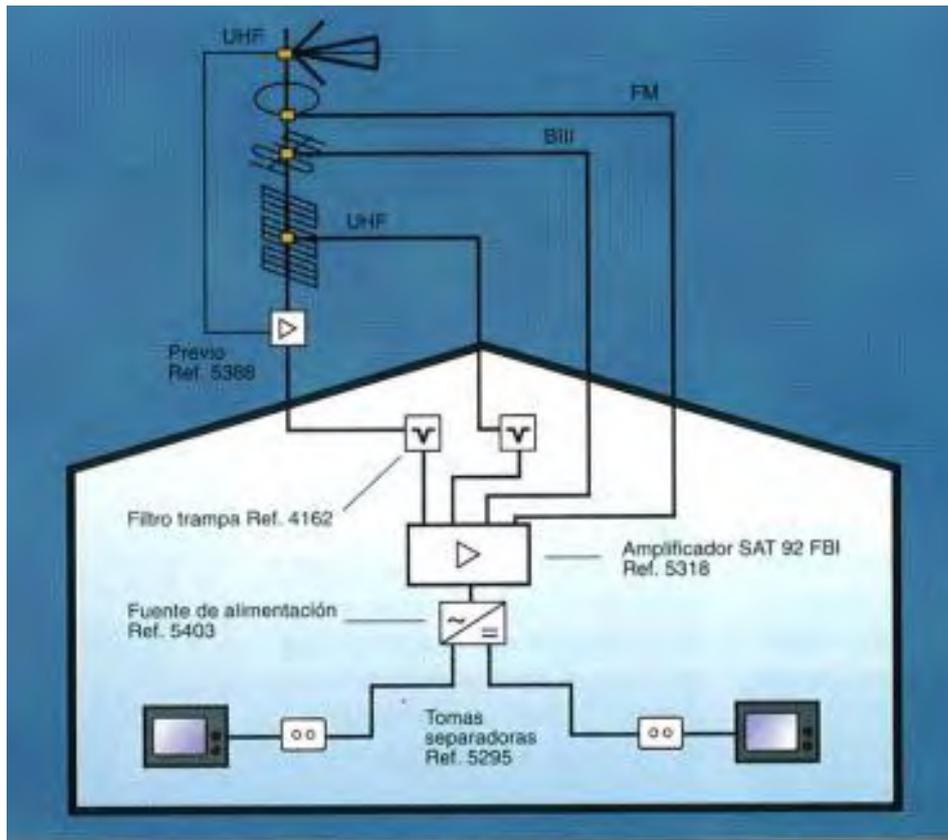


Figura No. 5.23 Instalación de un sistema de antenas comunitarias para un solo usuario, con dos tomas de salida.

Fuente: Manual "Distribución de la señal de TV", Televisión, 2018.

En la figura No. 5.24 se muestra un diagrama donde se indica las conexiones principales entre una *antena comunitaria* y los correspondientes receptores del *equipo de cabecera*.

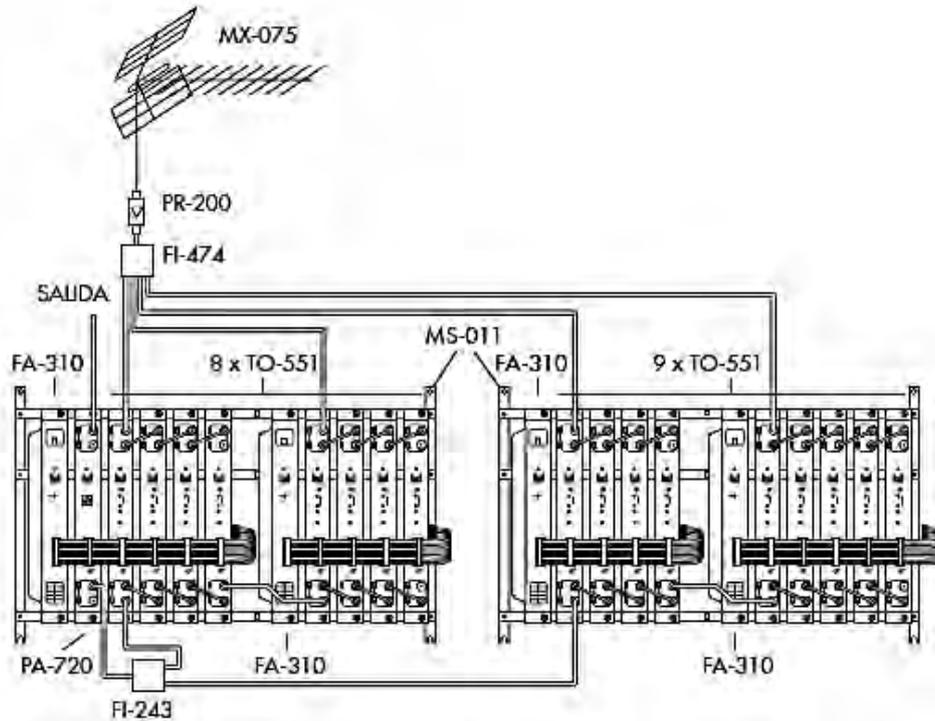


Figura No. 5.24 Conexiones entre una antena comunitaria y el equipo cabecera.

Fuente: Manual "Equipos de imagen", CFGM Equipos Electrónicos. 2018.

A manera de complementación, en la figura No. 5.25 se ilustra un esquema de la distribución de la señal de T a diferentes sitios residenciales, donde se puede apreciar los componentes principales de este sistema de antena comunitaria, cuyo cableado de la red es de cable coaxial, con tendido subterráneo.

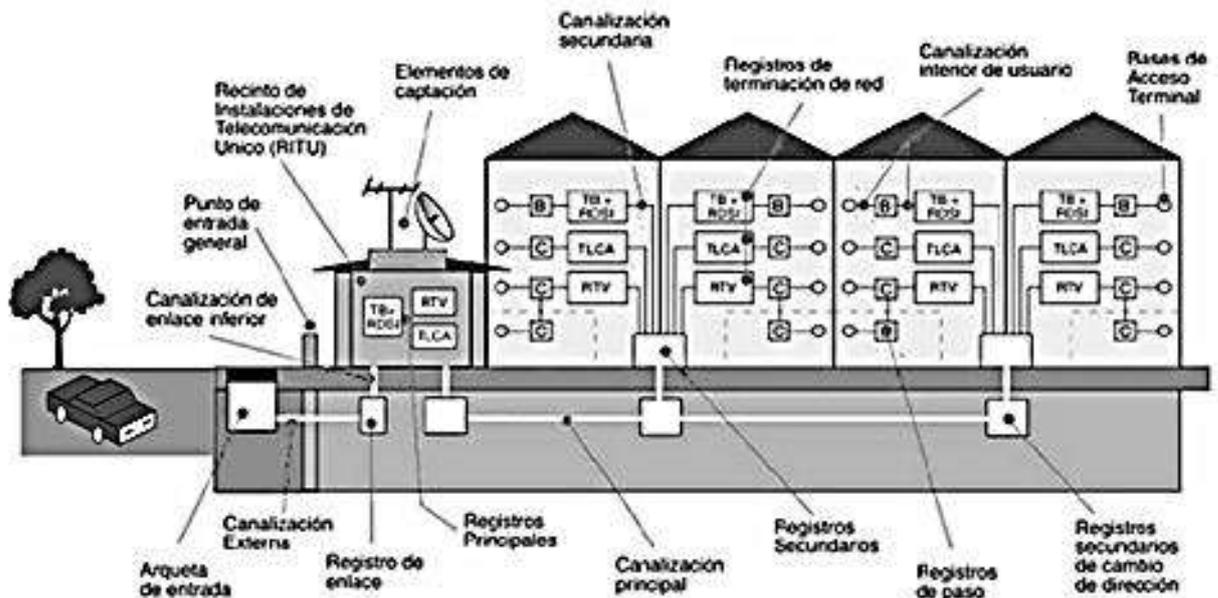


Figura No. 5.25 Esquema de la distribución de una antena comunitaria a través de cable coaxial con tendido subterráneo.

Fuente: Arela, M. López, D. Díaz, J. A., *Televisión analógica digital* 2017

En figura inmediatamente anterior se puede apreciar, como se ha venido referenciando, los componentes básicos de estos sistemas:

- La cabecera: conformado esencialmente por antenas colectivas (terrestres y o satelitales), amplificadores, mezcladores de señal terrestre y de satelital, entre otros dispositivos.
- Red de distribución: conformado por cable coaxial, derivadores y distribuidores de planta, así como puntos de acceso del usuario: la red interna del edificio, hasta las bases de toma (mínimo dos).

Estas redes, generalmente, permiten la transmisión de señales de televisión en un rango de frecuencias relativamente amplio: entre 47 MHz a 2.15 GHz.

5.10.3 Instalación a antenas transmisoras y/o receptoras

Para interconectar los equipos de transmisión y o recepción con sus correspondientes sistemas de radiación (antenas), se utiliza generalmente cable coaxial, especialmente para emisiones con frecuencias por debajo de las microondas. Existe una gran variedad de casos donde se presenta esta situación, tales como: estaciones terrenas para los radioenlaces satelitales (en frecuencias no tan altas), estaciones radio base de los sistemas de telefonía móvil, estaciones de radioenlaces terrestre (no de microondas), transmisores de radiodifusión sonora AM o FM, transmisores de radiodifusión de T, radiocomunicaciones de carácter público y o privado, entre muchos otros casos.

Para radioenlaces con frecuencias relativamente altas, especialmente de 2.5 GHz en adelante, no es aconsejable la utilización de los cables coaxiales, debido a las altas pérdidas que le presentan a las respectivas señales. Como alternativa se utilizan las guías de ondas, las cuales para estos rangos de frecuencia, algunas de ellas, presentan menores pérdidas y además resisten señales de altas potencias. En la figura No. 5.26 se ilustra las curvas de atenuación de algunos tipos de guías de ondas, comparadas con las de algunos tipos de cables coaxiales. En los anexos No. 1 y No. 3 se puede apreciar estas curvas, pérdidas de los cables coaxiales y pérdidas de las guías de onda, respectivamente, de manera más completa.

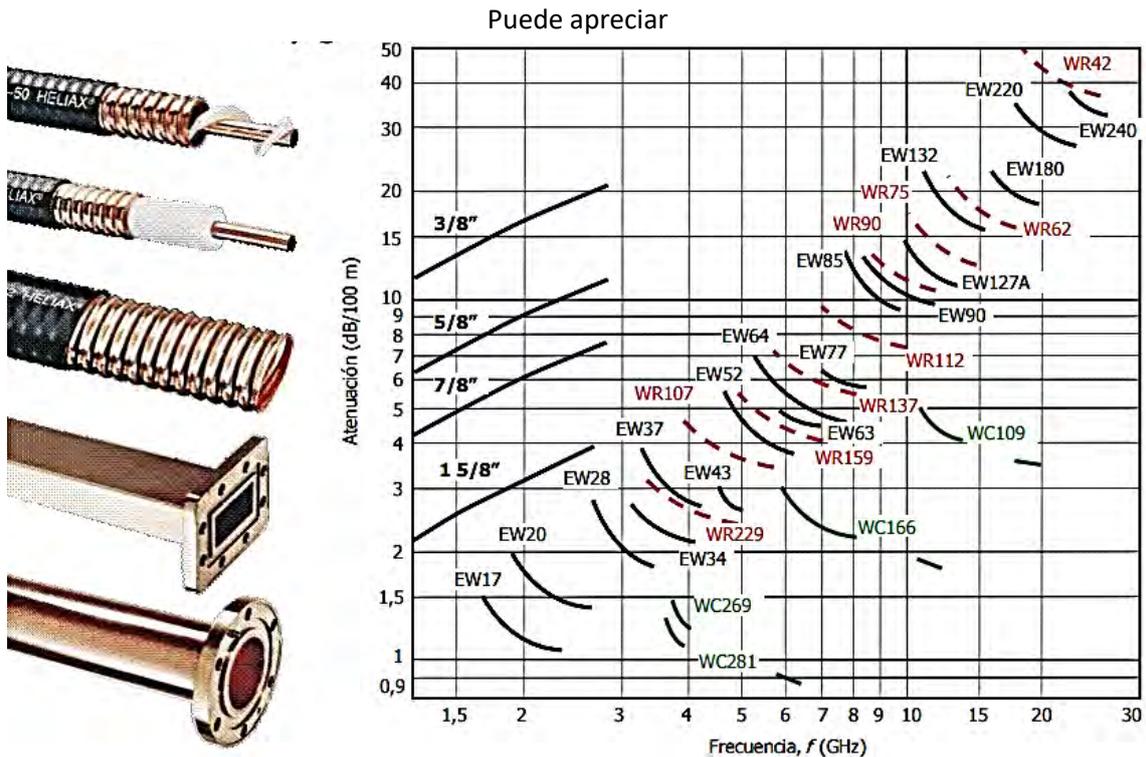


Figura No. 5.26 Curvas comparativas de atenuación de algunos de los cables coaxiales con respecto a algunas guías de ondas.

Fuente: Radioenlaces, IAC, Universidad Politécnica de Madrid, 2017, p.23.

Ejemplo No. 5.11

Teniendo en cuenta las curvas indicadas en el diagrama de la figura No. 3.25, determinar el rango de frecuencias en el cual se pueden utilizar las siguientes guías de onda:

- Guía de onda circular tipo C166.
- Guía de onda rectangular tipo R159.
- Guía de onda elíptica tipo E 85.

Solución:

- C166: 6 GHz a 8GHz
- R159: 4.9 GH a 7 GH
- E 85: 7.8 GH a 8.8 GH

Es recomendable no emplear una frecuencia de operación muy cerca de los límites del rango espectral de las guías. Sí está muy cerca de la frecuencia inferior del rango (frecuencia de corte), es posible que la señal no se propague

(se quede revotando) y sí sobre pasa la frecuencia superior del rango, las pérdidas crecen exponencialmente.

El tipo de cable coaxial que se utiliza para las conexiones entre el equipo de radio (transmisor receptor) y su correspondiente antena, para sistemas de radiocomunicación, tienen como denominador común, en su generalidad, de tener una impedancia característica de 50 ohmios. Esto requiere que la impedancia de salida entrada del equipo de radio y la de los terminales finales de la antena, deben también ser de 50 ohmios, para lograr un perfecto acople de impedancias en las respectivas conexiones con el cable, y de esta forma no exista onda reflejada, y así se logre la máxima transferencia de potencia en dichas conexiones. Si existe onda reflejada, no solo la señal a transferirse pierde intensidad, sino que, en el caso de transmisión, el equipo puede sufrir daños sino está protegido contra ondas reflejadas.

Dependiendo, especialmente, de la potencia a que va a ser sometido el cable y de la longitud de su tendido, se recomienda el tipo de cable coaxial a ser utilizado en los respectivos sistemas de radiocomunicación. No hay que olvidar que, por lo general, la impedancia debe ser de 50 ohmios. Como se referencia se debe tener presente que, para un mismo tipo de cable coaxial y a una misma frecuencia, a medida que su diámetro aumenta, disminuye la atenuación que le genera a la señal que a través del mismo se está transfiriendo y al mismo tiempo resiste mayor potencia.

La experiencia ha establecido que para tendidos cortas (10 metros o menos) se recomienda el cable speedflex 375 o LMR 400 y para tendidos largas (mayores de 10 metros) el cable LMR 400 o alguno mejor como: Heliac 1 2", Heliac 3 8", Heliac 7 8", Heliac 15 8" o superior, dependiendo de la potencia a que va a ser sometido el cable.

El cable LMR 400 tiene una impedancia característica de 50 ohmios y una velocidad de propagación del 85 (0.85C). A manera de referencia en la tabla No. 5.7 se indican las atenuaciones y la potencia transmisible del cable LMR 400, para diferentes frecuencias de operación.

Pérdidas / Potencia	Frecuencia (MHz)								
	30	50	150	220	450	900	1.500	2.000	2.400
Pérdidas (dB 100 pies)	0.7	0.9	---	1.5	2.7	---	---	---	6.6

Potencia transmisible ()	2.1	1.7	1.0	0.83	0.55	0.38	0.29	0.25	---
---------------------------	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	-----

Tabla No. 5.7 Atenuación y potencias transmisible del cable coaxial LMR 400.

Fuente: Catálogo "MR coaxial cable", Universal Radio inc., 2018

En la figura No. 5.27 se muestra la conformación de un cable coaxial LMR 400, el conector tipo macho y el adaptador que se emplean para su instalación.



a.) Cable LMR 400 b.) Conector PL-259 c.) Adaptador UHF

Figura No. 5.27 Cable coaxial LMR 400, conector PL-259 y adaptador UHF.

Fuente: LMR-400. (2019). Disponible: www.fairviewmicro.com LMR-400.

Para el caso de tendidos largos los cables (LRM 400 o Heliax) generalmente terminan en conectores tipo N macho, mientras que la mayoría de los equipos de radios utilizan conectores más pequeños (tipo SMA o RP-TNC hembra). Para poder realizar la conexión, se emplean una extensión (cable coaxial de pequeña longitud, generalmente LMR 195 o LMR 100, denominada *igtail*) con conexión RP-SMA hembra a N macho, en el extremo a conectarse al cable y con conector RP-TNC macho en el otro extremo a conectarse al equipo. En la figura No. 5.28 se ilustra este tipo de conectores. ⁽¹¹⁾



Figura. No. 5.28 Conectores RP-TNC macho RP-SMA hembra.

Fuente: RF-TNCconnector. (2019). Disponible: http://es.aliexpress.com/store/product/RF-TNC-connector-adapter-RP-SMA-female-to-RP-TNC-male_90772.

El tendido del cable coaxial, así como el de la guía de onda, entre la estación de los equipos y la torre donde se encuentran las antenas, se realiza, generalmente, a través de canaletas o mediante soporte de cables aéreos si son unos pocos. Sobre la torre el tendido se hace con sujeción a la misma estructura de la torre. En la figura No. 5.29 se ilustra unas imágenes tanto del tendido de los cables sobre canaletas como su atadura en la torre.

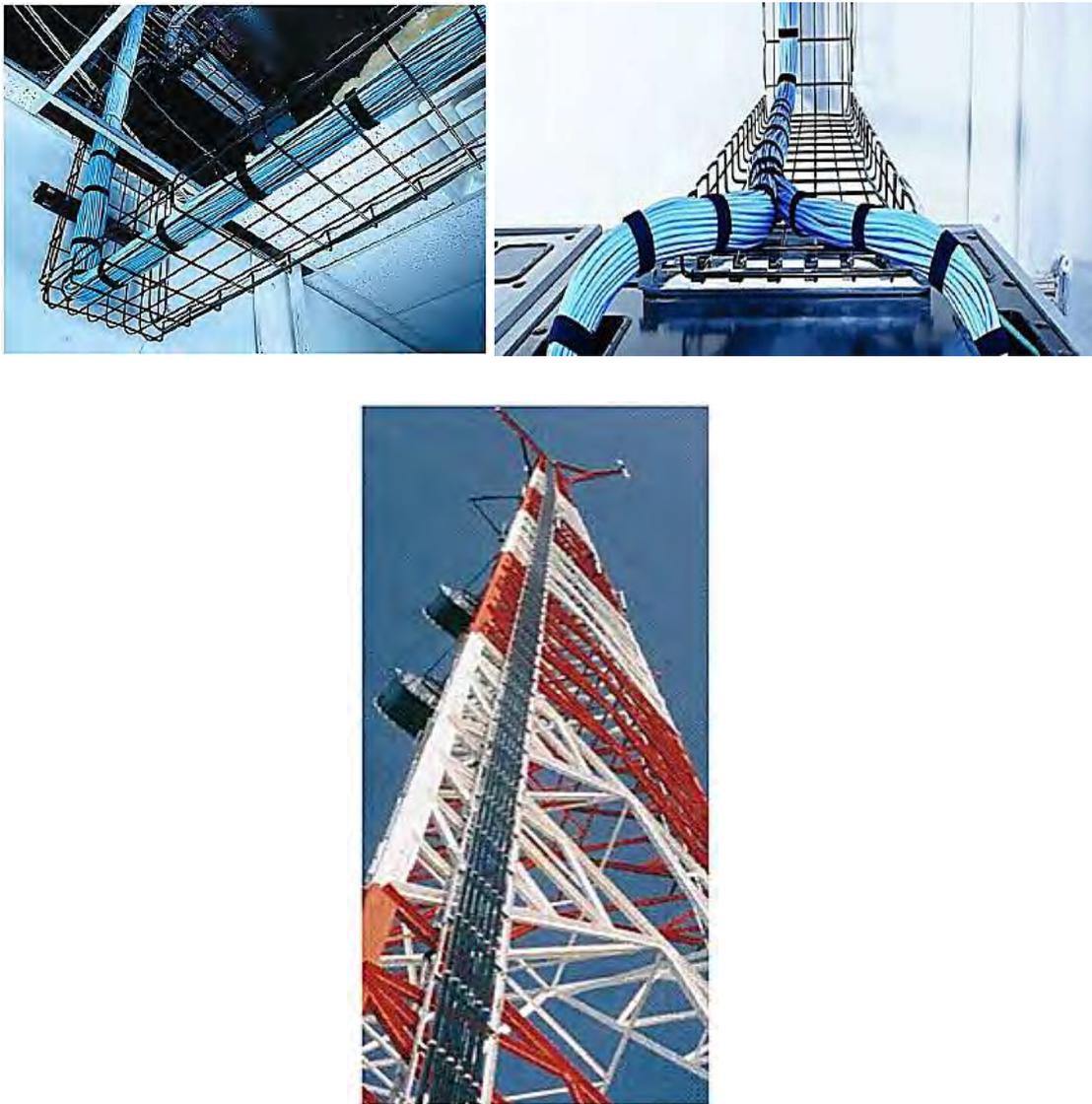


Figura. No. 5.29 Tendido de cables coaxiales y guías de ondas en una torre de radiocomunicaciones.

Fuente:Radioenlaces, IAC, Universidad Politécnica de Madrid. (2019).
Disponible:<http://.rrhnet.com> cableado-estructurado , p. 23.

Para el caso de la conexión de los transmisores de altas potencias de las estaciones de radiodifusión sonora AM con su respectiva torre radiadora, se hace ya sea con cable coaxial robusto o a través de cintas conductoras planas a la vista, generalmente sobre soportes de material dieléctrico. En la figura No. 1.17 se hace una representación de este tendido, donde el cable coaxial o las cintas planas llegan al circuito acoplador de impedancia, el cual se encuentra en un gabinete protector (ver figura No. 5.30).

Del circuito acoplador la conexión a la torre radiadora se hace con cable coaxial o con cintas planas, según sea la potencia a transmitir. Si es con cable coaxial el vivo del cable (conductor interno se conecta a la torre y la malla (conductor externo) a la tierra del radiador. En el caso de cintas planas una (polaridad positiva) se conecta a la torre y la otra al sistema de tierra.



Figura No. 5.30 Gabinete de un *acoplador de antena* para un caso real de una *emisora AM* y su conexión a la antena radiador.

Fuente: LBA Group. Acopladores de Antenas AM (ATU), 2017 López Tafur ,M. *Antenas para nda Media AM*) EE525M UNI - FIEE 2017-, p. 26.

Tanto el cable coaxial como las cintas planas deben soportar las potencias suministradas por los correspondientes transmisores cuyos valores pueden llegar al orden de los cientos de vatios. Para potencias mayores se recomienda las cintas planas, debido a que disponen de mayor superficie de circulación de la corriente lo que permite mayor disipación de calentamiento.

Los tipos de cable coaxial para estas conexiones pueden ser HCC 300-50j de 3" (10 cm o menor) y HCC312-50j de 3 1/2", con dieléctrico de aire de 50 ohmios y de cobre corrugado su conductor externo.

Ejemplo No. 5.12

Determinar la potencia con que llega la señal a los terminales de entrada del sistema de radiación (antena) de una *stación Radio Base*, si la potencia de salida del transmisor, del canal correspondiente a 450 MHz, es de 30 W y el cable es un LMR 400, con longitud de 300 pies entre el transmisor y la antenna, teniendo de presente que existe un perfecto acople de impedancias, entre la conexión del transmisor y el cable y de esta con los terminales de la antenna.

Solución:

$$P_{in} = P_{TX} - \text{Pérdidas atenuación cable coaxial}$$

Según tabla No.3.7

$$\text{Pérdidas cable coaxial} = 2.7 \times 3 = 8.1 \text{ dB}$$

$$P_{TX} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} (30 \text{ W}) = 14.77 \text{ dB}$$

$$P_{in} \text{ (dB)} = 14.77 - 8.1 = 6.67 \text{ dB}$$

$$P_{in} \text{ (W)} = 10^{6.67 / 10} \approx 4.65 \text{ W}$$



Fuente: SSSGroup T eets

5.10.4 Instalación en redes de transmisión de datos

Tal como se mencionó en el capítulo 1, las *redes de transmisión de datos* corresponden al conjunto conformado por equipos y medios físicos y lógicos que permiten la intercomunicación de información, en formato digital, entre diferentes usuarios de la red.

Como se ha venido mencionado, el cable coaxial, por su diseño, presenta un blindaje contra las interferencias externas que puede recibir la señal de datos. Por ello se utiliza para transmitir a grandes distancias con una buena velocidad de transmisión. Es por esta razón que también el cable coaxial, como el par trenzado y la fibra óptica, se utiliza para las redes de transmisión de datos, especialmente para redes LAN relativamente grandes.

Entre los principales tipos de cables que se utilizan para redes de datos se tienen los siguientes, entre otros: ⁽¹²⁾, ⁽¹³⁾

- *Cable estándar Ethernet*, conocido como cable coaxial grueso, con impedancia característica de 50 ohmios y el conector que utiliza es el de tipo N, conforme a las normas IEEE 802.3 10 BASE 5 (ver figura No. 5.31).



Figura No. 5.31 Cable coaxial estándar Ethernet con conector tipo N.

Fuente: Tipos de cable coaxial. (2019).

Disponible: <http://thegeniuszone.blogspot.com.co/2017/09/tipos-de-cable-coaxial.html>.

- *Cable coaxial Ethernet delgado*, conocido como RG-58, con impedancia característica de 50 ohmios y el conector que utiliza es el tipo BNC (ver figura No. 5.32).



Figura No. 5.32 Cables coaxiales tipo RG-58, con conectores BNC.

Fuente: Tipos de cable coaxial (2019). Disponible:

<http://thegeniuszone.blogspot.com.co/2017/09/tipos-de-cable-coaxial.html>.

- *Cable coaxial RG-62* - , frecuentemente utilizado por los equipos 3270 de IBM y por la red ACRNET (*Attac edResourceComputer T or*), con impedancia característica de 93 ohmios y con conector BNC (ver figura No. 5.33).



Figura No. 5.33 Cable coaxial RG-62 con conector BNC.

Fuente: Estudios, Sistemas y Teleprocesos. (2019).

Disponible: [.uazuay.edu.ec/estudios_sistemas_teleproceso ...1cabcoax.htm](http://www.uazuay.edu.ec/estudios_sistemas_teleproceso...1cabcoax.htm).

- *Cable coaxial RG-59* - , usualmente utilizado en la red ANGNET (*Red ang abotories, nc.*), con una impedancia característica de 75 ohmios y utiliza conectores DNC y TNC (ver figura No. 5.34).



Figura No. 5.34 Cable coaxial RG-59, con conector TNC.

Fuente: Conectores TNC. (2019). Disponible:

[http: .eldtec.com.br/celular/cabos_descida_rge58tnc](http://www.eldtec.com.br/celular/cabos_descida_rge58tnc).

A manera de ilustración en la figura No. 5.35 se muestra una imagen de la estructura de un espacio organizacional de una oficina, donde se indica una red típica de transmisión de datos de cobertura reducida.



Figura No. 5.35 Estructura típica de una red de transmisión de datos de cobertura reducida.

Fuente: Díaz Ángel, G., *Clasificación de las redes*, Google FriendConnect. 2017.

Como ya se ha mencionado, una de las topologías más comunes para redes de datos de cubrimiento reducido es la denominada *Bus*. En la figura No. 5.36 se representa un diagrama de este tipo de red con cable coaxial RG-8. La conexión del cable coaxial de la red a los equipos (host de red), se hace a través de la tarjeta de red del equipo mediante conector BNC en T. En los extremos del tendido del cable coaxial se colocan unos tapones terminales (conectores consumidores de energía), con el propósito de que las señales que llegan a estos extremos sean consumidas por los mismos y de esta forma evitar la presencia de señales reflejadas, debido al circuito abierto que estos extremos presentan sin la existencia de dichos tapones.

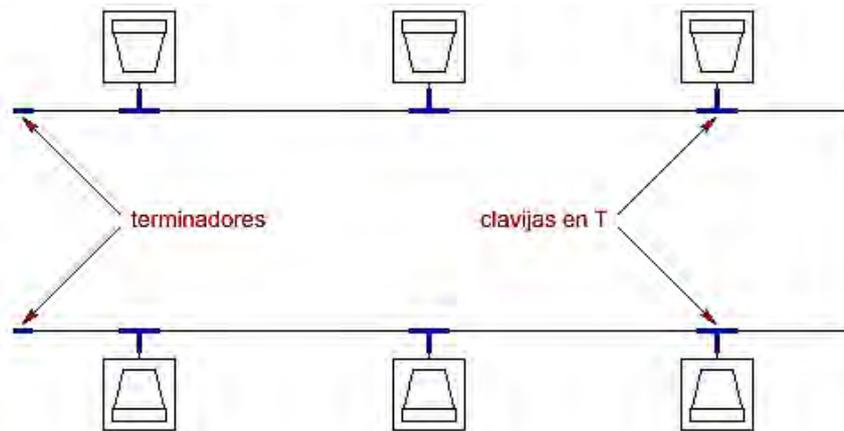


Figura No. 5.36 Estructura básica de una red de cable coaxial de topología bus.
 Fuente: Un white Paper Conceptos Básicos de Ethernet e Internet or ing”, Trinexus, 2017.

En la figura No. 5.37 se ilustra la interconexión de dos terminales de una red de topología en Bus.



Figura No. 5.37 Conexión de dos terminales de una red de transmisión de datos en topología de Bus.

Fuente: Tutoriales. (2019).

Disponible: http://www.consulintel.es/html/Tutoriales_Trinexus_internet_or_ing.htm.

En la figura No. 5.38 se muestra, en la parte superior, la imagen de una tarjeta de interfaz de red del equipo (host), para interconectarse a una red de datos en una topología tipo bus con cable coaxial, y en la parte inferior el diagrama de conexión respectivo.

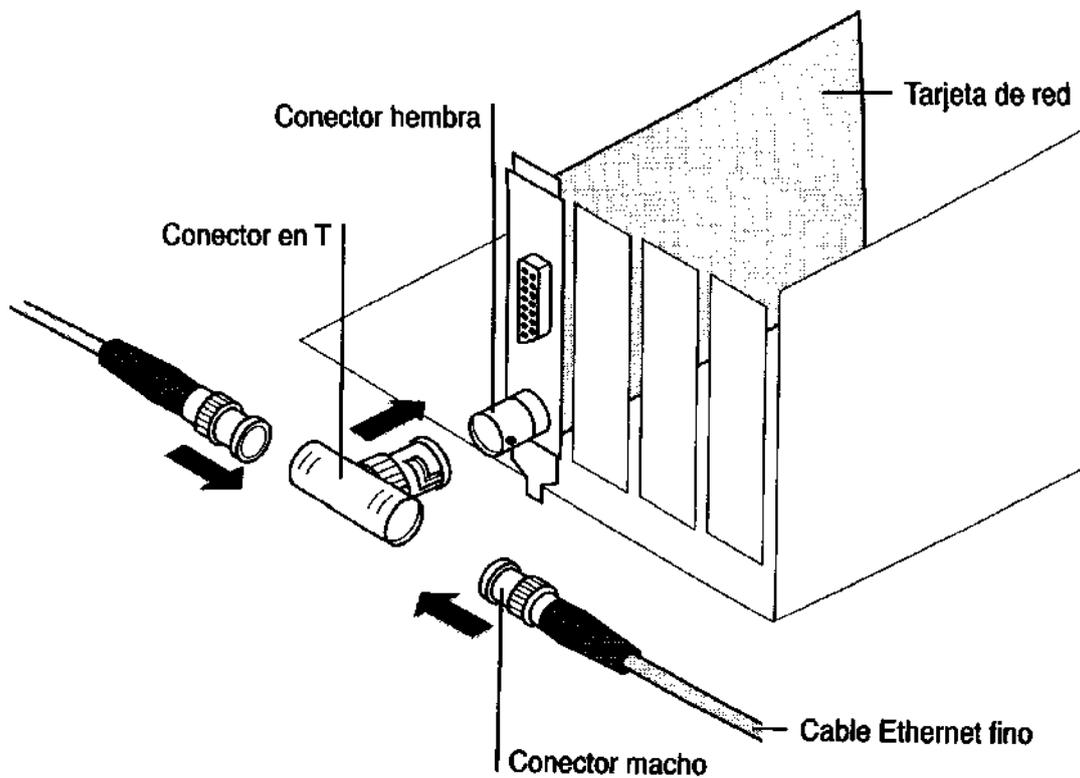


Figura No. 5.38 Imagen de una tarjeta de interfaz de red (NIC) y el diagrama de conexión a la red del cable Ethernet fino.

Fuente: Topología de red CCM. (2019). Disponible: es.ccm.net Enciclopedia Redes Red.

En la figura No. 5.39 se ilustra las imágenes del conector tipo T, utilizado para interconectar los nodos a la red de cable coaxial RG-58 de topología *Bus*, así como el conector terminal que sirve de tapón disipador en los terminales del tendido del cable coaxial.



Figura No. 5.39 Conector BNC en T y conector terminador BNC RG-58 de 50 ohmios.

Fuente: [Cables y Conectores. \(2019\). Disponible: http://cables.y.conectores.com](http://cables.y.conectores.com) .videovigilancia.com cables.htm.

5.10.4.1 Red de Área Local (LAN)

Como se ha venido mencionando, una LAN es una red de transmisión de datos de poca cobertura y o pocos componentes. Para la interconexión de un equipo a la red, se requiere básicamente de:

- Una tarjeta de interfaz de red (NIC: Net or Interface Card).
- Un hardware para la conexión de la NIC a la LAN.

Existen dos formas principales de hardware empleadas para la conexión de la NIC a la LAN, lo que ha dado a considerarse dos tipos de LAN: ⁽¹³⁾

a.) *Base*, cuya composición básica de su hardware, es la siguiente:

- Un tendido de cable coaxial grueso, preferiblemente que no sea mayor a 500 metros de longitud.
- Un conector terminal en cada extremo del cable coaxial, para proporcionarle carga eléctrica al tendido del cable coaxial en sus terminales.
- Transceptor de tipo "tap" (transmisor activado por portadora), que recibe los datos de la red y los transfiere al equipo y transferirá los datos a la red que le envía el equipo.
- Un cable AUI (*Attachment Interface*) para la conexión entre la NIC del equipo y el transceptor respectivo.
- Una tarjeta de interfaz de red tipo 10Base 5 para cada equipo.

En la figura No. 5.40 se ilustra un hardware 10Base5, donde se pueden identificar sus principales componentes de su estructura básica.

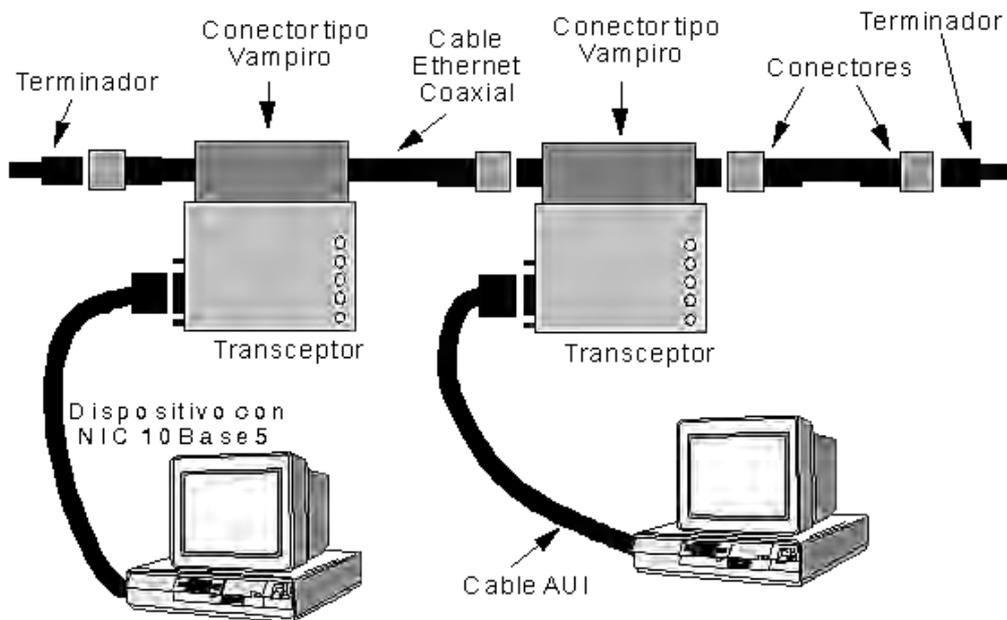


Figura No. 5.40 Configuración básica del hardware Base .

Fuente: Transmisión de datos. Cableado. (2019). Disponible: <http://es.ccm.net/contents/685-transmision-de-datos-cableado/>.

b.) Base , cuya composición básica de su hardware, es la siguiente:

- Un tendido de cable coaxial delgado, preferiblemente que no sea mayor a 200 metros de longitud.
- Un conector terminal en cada extremo del cable coaxial, para proporcionarle carga eléctrica al tendido del cable coaxial en sus terminales.
- Conectores tipo "T" para interconectar al equipo con el cable coaxial.
- Una tarjeta de interfaz de red tipo 10Base2 para cada equipo.

Para las redes de datos con topología Bus, 10Base2, donde los equipos se interconectan con la red mediante conectores tipo "T", cuando se desconecta un lado de alguno de estos conectores que se unen al cable coaxial de la red, se interrumpe la comunicación en toda la red. Pero si se desconecta solo el extremo del conector "T" que une al equipo a la red, solamente queda sin comunicación este equipo.

En la figura No. 5.41 se ilustra un hardware 10Base2, donde se pueden identificar sus principales componentes de su estructura básica.

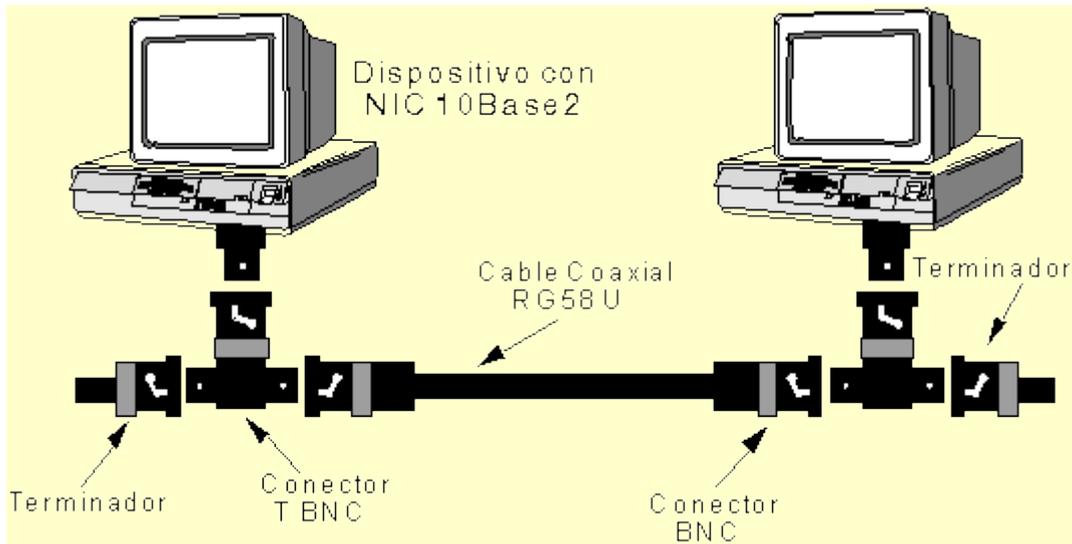


Figura No. 5.41 Configuración básica del hardware 10Base2.

Fuente: Red de Área Local. (2019). Disponible: <http://es.slideshare.net/barriosb/construccion-de-una-red-de-area-local-de-cero>.

5.10.4.2 Red de Área Amplia (WAN)

Como se mencionó en el capítulo 1, una red de área amplia, WAN, (*Wide Area Network*), básicamente es una red de computadores que une a varias redes locales (LAN), distribuidas, por lo general, en diferentes partes de una región o de un país. En muchos casos las WAN son construidas por organizaciones o empresas para su uso privado, otras son instaladas por los proveedores de internet (ISP: internet service provider) para proveer conexión a sus clientes. En la figura No. 3.42 se muestra un esquema típico de una red de área amplia (WAN).

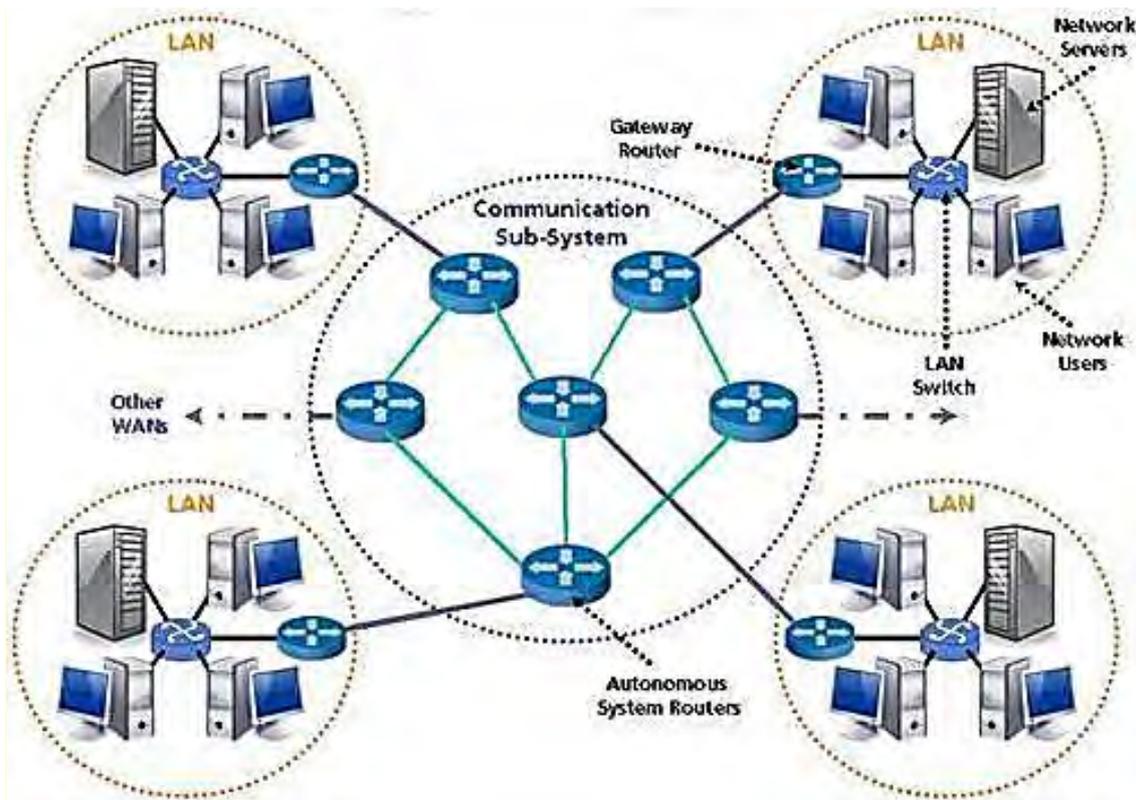


Figura No. 5.42 Estructura típica de una red de datos de área amplia típica.

Fuente: ué es una an . (2019). Disponible: <http://.adsifaqs.com.ar> que-es-una- an .

En muchas de las numerosas aplicaciones de interconexión de estas redes, se encuentra la utilización de cables coaxiales de tipo RG58 y RG174, con impedancia característica de 50 ohmios, con conectores de interfaz BNC, los cuales son los tipos de conectores más comunes en estas redes. En la figura No. 5.43 se expone unas imágenes donde se muestra la estructura básica de un cable coaxial RG58 y del conector BNC.

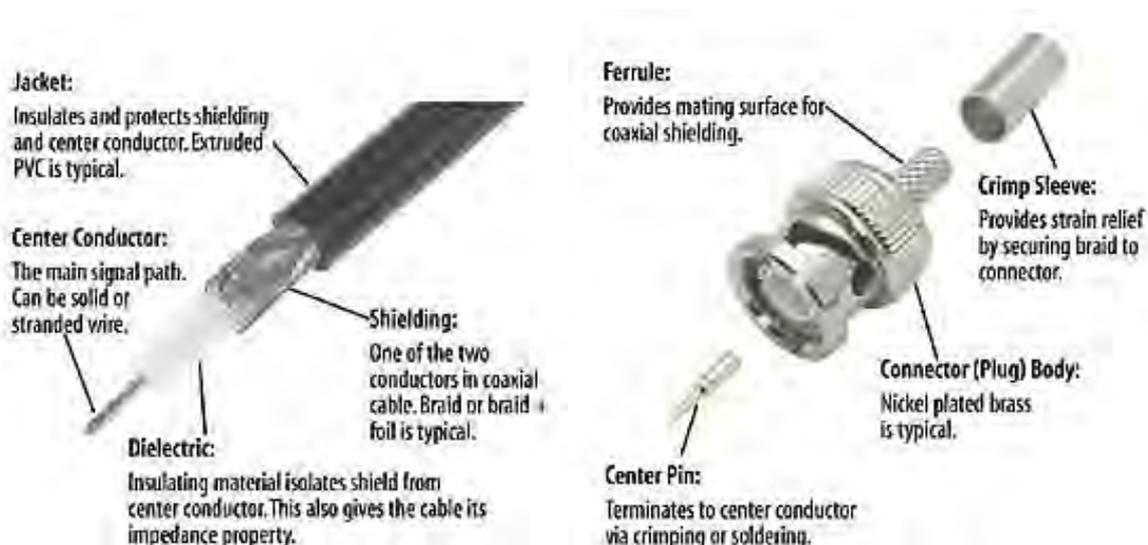


Figura No. 5.43 Estructura básica de un cable coaxial RG58 y del conector BNC.

Fuente: Coaxial Cabling Strip Coax Cable. (2019). Disponible: <http://www.ihon.com.com/content/Coaxial-Cabling-Tutorial.html>. <http://www.ihon.com.com/Strip-Coax-Cable>.

5.10.5 Redes telefónicas

Tal como se mencionó en el capítulo 1, las redes telefónicas conmutadas se crearon dentro de un modelo jerárquico, cuyo nivel inferior está conformado por un conjunto de *centrales locales* que conectan a los abonados de los usuarios de sus correspondientes coberturas. Cada uno de los niveles superiores está conformado por centrales enlazadas entre sí, hasta llegar al nodo central de administración y gestión de la red total. En la figura No. 5.44 se representa la estructura de la conformación básica de una red telefónica.

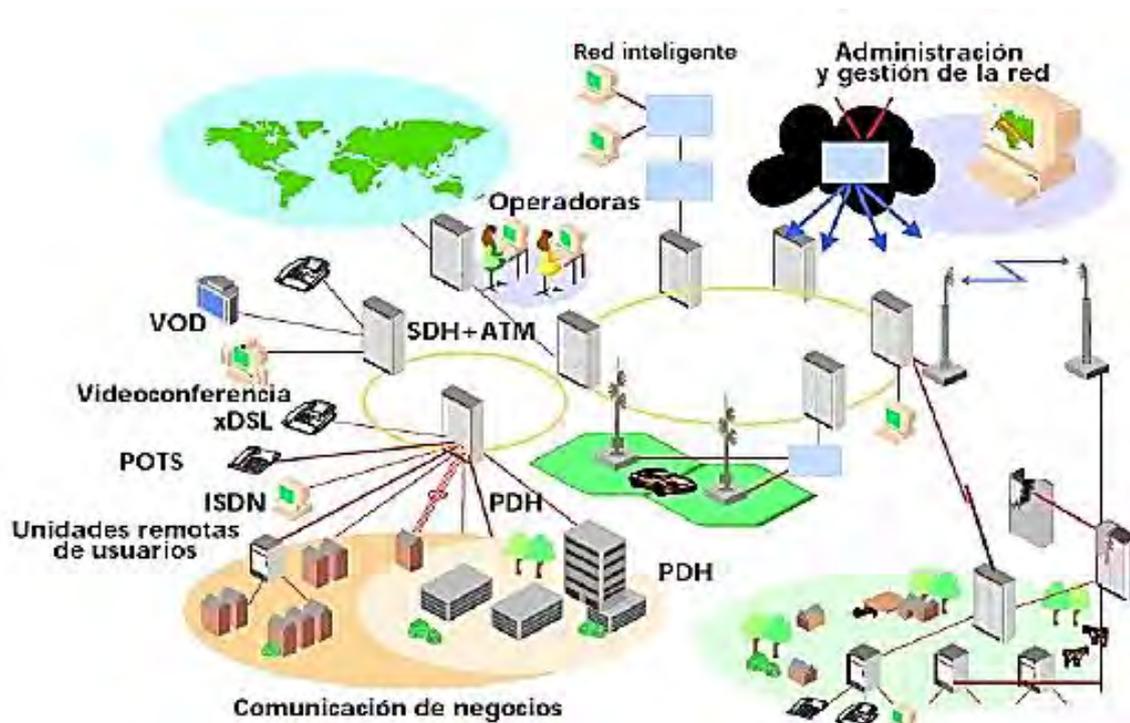


Figura No. 5.44 Estructura de la conformación básica de una red telefónica.

Fuente: Escobar Cristiani, M. J., *Telefonía y Conmutación*, Red Tercer Milenio, 2018.

A partir de los años 70, las nuevas tecnologías de cables coaxiales permitieron a las correspondientes redes aumentar el soporte de llamadas simultáneas, logrando actualmente tener, estas redes, una capacidad de más de 200.000

conversaciones simultáneas, en distancias entre países, sin tener pérdidas ni interferencias.

El proceso de la realización de una llamada se puede concretar en los siguientes pasos puntuales: ⁽¹⁴⁾

- Al levantar el abonado el usuario solicitante, la central local a la cual está conectado, lo identifica y le envía tono de marcar.
- El usuario solicitante marca el número del abonado destinatario, el cual es transferido a la central a la cual pertenece dicho abonado. Dependiendo donde se encuentre el abonado destinatario, esta transferencia puede pasar por varias centrales intermedias. La central a la cual pertenece el abonado destinatario, lo identifica y le envía tono de llamado. Si este está ocupado, entonces esta central remite señal de advertencia de ocupado al abonado solicitante. El enrutamiento entre el abonado solicitante y el destinatario, corresponderá a aquel que presente mayor disponibilidad de los recursos de la red en este enlace, cuya selección está a cargo de todas las centrales que intervengan en el mismo. En el caso de que el abonado destinatario pertenezca a la misma central del solicitante, todo lo anterior se realiza desde esta misma central local.
- Al contestar el usuario del abonado destinatario, se establece la llamada solicitada, ocupando una serie de recurso de la red (cableado y o enlaces de radio, puertos de las centrales intervinientes en la llamada, entre otros), los cuales quedaran ocupados, para esta llamada, durante el tiempo que está dure. Una vez terminada la llamada y colgados los abonados (en especial el del solicitante), los componentes del circuito por donde se estaba realizando la llamada quedan nuevamente disponible.

El cable coaxial no es apropiado para ser utilizado como línea telefónica del abonado final (teléfono), su empleo es más adecuado para las redes telefónicas interurbanas. Estos cables coaxiales tienen impedancia característica de 75 ohmios. El tendido de estos cables coaxiales se puede realizar en forma aérea, subterránea o submarina.

5.10.5.1 Tendido aéreo

Los cables coaxiales tendidos en forma aérea van asegurados a postes o edificaciones, sostenidos a través de cables mensajeros, evitando de esta forma que sufran tensiones mecánicas y por lo tanto posibles alteraciones de sus características eléctricas. En los cables coaxiales para redes aéreas generalmente viene incorporado el cable mensajero, y uno de ellos es el cable-500.

Para el caso de los tendidos aéreos de las redes de telefónicas de cables coaxiales, que utilizan la misma infraestructura de postes que la red eléctrica de mediana y o baja tensión, se recomienda una separación mínima entre ellas como se indica en la figura No. 5.45. Así mismo en esta figura se muestra las alturas mínimas que estas redes deben tener con respecto a la superficie terrestre.

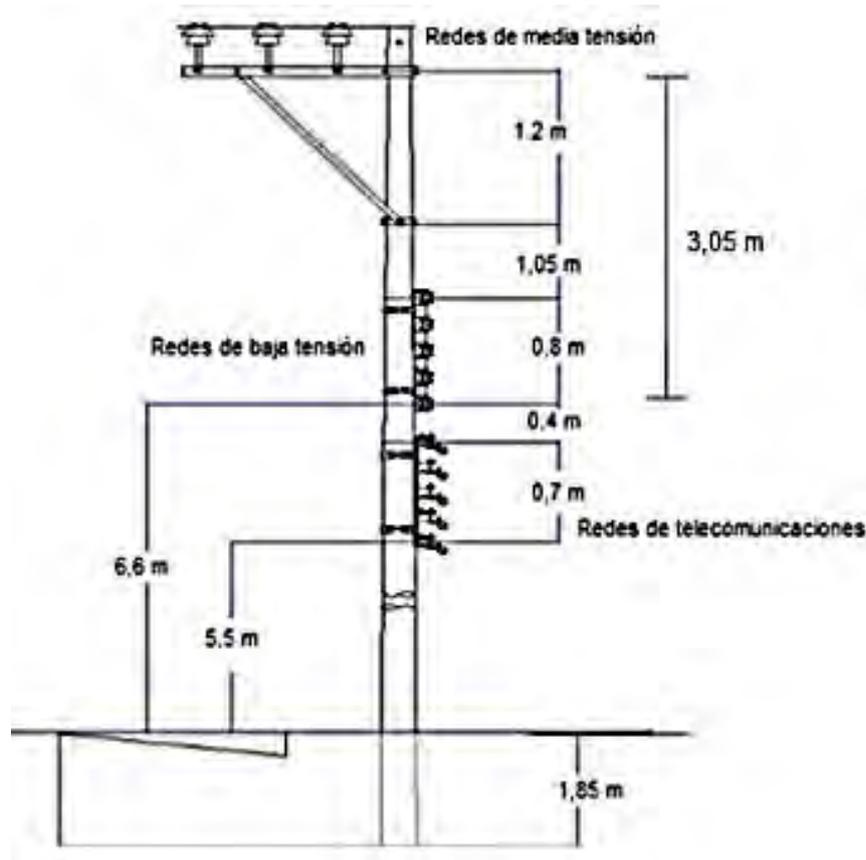


Figura No. 5.45 Distanciamiento mínimos entre los tendidos de las redes eléctricas de mediana y baja tensión, y las redes de telecomunicaciones.

Fuente: Inducción a redes. (2019).

Disponibile: <http://www.monografias.com/trabajos99/induccin-redes-hfc/induccin-redes-hfc.shtml> ixzz48y8olRcr.

En la figura No. 5.46 se muestra una imagen de un tendido aéreo, tanto de redes eléctricas como telefónica, a través de postes, y así mismo la de un tipo de cable coaxial (cable-500 de 75 ohmios), para red aérea, con el cable mensajero incorporado.



Figura No. 5.46 Tendido aéreo de redes eléctricas y telefónicas a través de postes y cable-500.

Fuente: Técnicas de instalaciones eléctricas. (2019). Disponible:

<http://www.construmatica.com> construpedia Instalaciones Telefónicas.

5.10.5.2 Tendido subterráneo

El cable coaxial utilizado en tendidos subterráneos deben estar protegidos contra esfuerzos de tracción y presión, por lo que además de los aislantes propios del cable, deben llevar un armado exterior, generalmente, de acero.

También para el caso de los tendidos subterráneos de las redes telefónicas de cable coaxiales, se utiliza generalmente tubos P C de 2 pulgadas (en promedio), a través de los cuales se extenderá el cable coaxial (usualmente el cable-500 para redes subterráneas). En la figura No. 5.47 se ilustra unos tendidos de los tubos y un tipo de cable-500 (de 75 ohmios) para redes subterráneas.



Figura No. 5.47 Tendido de los ductos para redes de cable coaxial subterráneo e imagen de un cable-500.

Fuente: Tendidos subterráneos. (2019). Disponible:
http://.guafa.com/costos_escrt.html.

Se recomienda que a través de los ductos utilizados para el tendido de los cables coaxiales subterráneos, no se emplee para ningún otro tipo de red de cableado de servicio diferente. También es recomendable que la canalización del tendido de los ductos telefónicos, sean exclusivas para las redes de los cables coaxiales subterráneos de servicio telefónico.

En cada región o país existen unas normas para el diseño y construcción de canalizaciones telefónicas (NDCCT), las cuales contemplan todos los aspectos técnicos, de obra civil, de seguridad, de montaje, legales y demás que se deben cumplir para poder implementar este tipo de redes. En el caso colombiano estas normas son establecidas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC).

5.10.5.3 Tendido submarino

El primer cable coaxial submarino que se instaló fue un año después de terminada la segunda guerra mundial (1946), entre Inglaterra y Alemania, con un tendido de 464 kilómetros, el cual permitía transmitir 5 canales telefónicos, utilizando un repetidor intermedio.

La primera red de cable coaxial submarino trasatlántico fue implementada a finales de la década de los 50, entre Escocia y Canadá (1956). Inicialmente el número de canales telefónicos análogos ofrecidas por esta red estaba en el orden de los 1.800, suficiente para la demanda de esa época. El cable coaxial utilizado

en esta red telefónica submarina transatlántica, fue de tipo SD (*Standard definition*), de una distancia de 3.885 m, con 80 repetidoras bidireccionales y una capacidad cerca de más de 80 canales telefónicos. ⁽¹⁵⁾

En los años 1970 se instala otra red telefónica trasatlántica con cable coaxial tipo SF (Semi-Flex), entre Estados Unidos y España, de capacidad de 845 canales y con 361 repetidoras. De esta manera, alrededor de esa época se prolifera, en el mundo, los tendidos de redes submarinas con cables coaxiales para servicios telefónicos, esencialmente.

La estructura de los cables coaxiales submarinos contiene más elementos, con respecto a los utilizados en el espacio exterior de la superficie terrestre, haciéndola mucho más robusta. Esto se debe a que estos elementos adicionales le permiten, esencialmente, a los cables coaxiales resistir la enorme presión que le ejerce el peso del agua marítima. En la figura No. 5.48 se ilustra la estructura básica de un cable coaxial submarino.

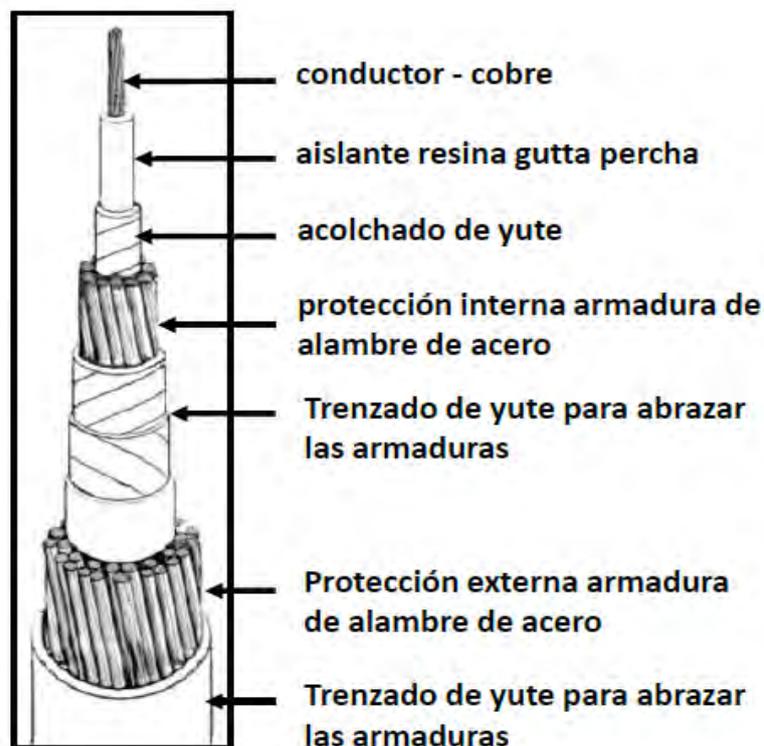


Figura No. 5.48 Estructura básica de un cable coaxial submarino.

Fuente: Cables submarinos. (2019). Disponible:

<http://almadeherrero.blogspot.com.co/2014/10/cables-submarinos.html>.

El proceso de instalación del tendido de los cables submarinos, ya sean de tipo coaxial, par trenzado, fibra óptica o de cualquier otro tipo, reviste un alto grado de complejidad. Estos tendidos se hacen sobre el lecho marítimo, empleado robots sumergibles. En la figura No. 5.49 muestran unas imágenes de estos robots, en el momento que van a hacer sumergidos en el mar. Estos robots no

solamente son utilizados para el tendido de los cables, sino también para la inspección y la recuperación de los mismos. ⁽¹⁶⁾



Figura No.5.49 Imágenes de robotsumergibleempleadosparalainstalación de redes submarinas.

Fuente: Issue Date *Acerca de cables submarinos de telecomunicaciones*”, International Cable ProtectionCommitteeLtd., 2018, p. 105.

El proceso de instalación y mantenimiento de los cables submarinos (cable coaxial, cables eléctricos, par trenzado, fibra óptica, entre otros) se realiza mediante barcos con características especiales, comúnmente conocidos como barcos cableros.

5.10.6 Redes de televisión por cable: CATV

Las redes CAT (*Community Antenna Television*), es un servicio de televisión por *suscripción* que se ofrece a través de redes de cable coaxial y o fibra óptica.

Estas redes se iniciaron en Estados Unidos, donde su cableado era en su gran mayoría de cable coaxial y actualmente se ha extendido por todo el mundo, donde el cableado es tanto fibra óptica como cable coaxial, conociéndose como red CAT HFC (*ybrid iberCoax*). El empleo del cable coaxialRG-6 de 75 ohmios es más frecuente en la cabecera, para las líneas de bajada de las antenas receptoras terrestres y o satelital, y para interconexión de las cámaras locales de televisión. Así mismo el cable coaxial, para estas redes, se emplea en las interconexiones internas de los centros de distribución y las terminaciones de la red óptica (TRO) en las conexiones hacia los abonados de los suscriptores. En el resto de la red se emplea fibra óptica. En la figura No 5.50 se muestra una arquitectura típica de una red CAT HFC, donde se puede también apreciar en que partes de la red se emplea cable coaxial y en cuales fibra óptica.

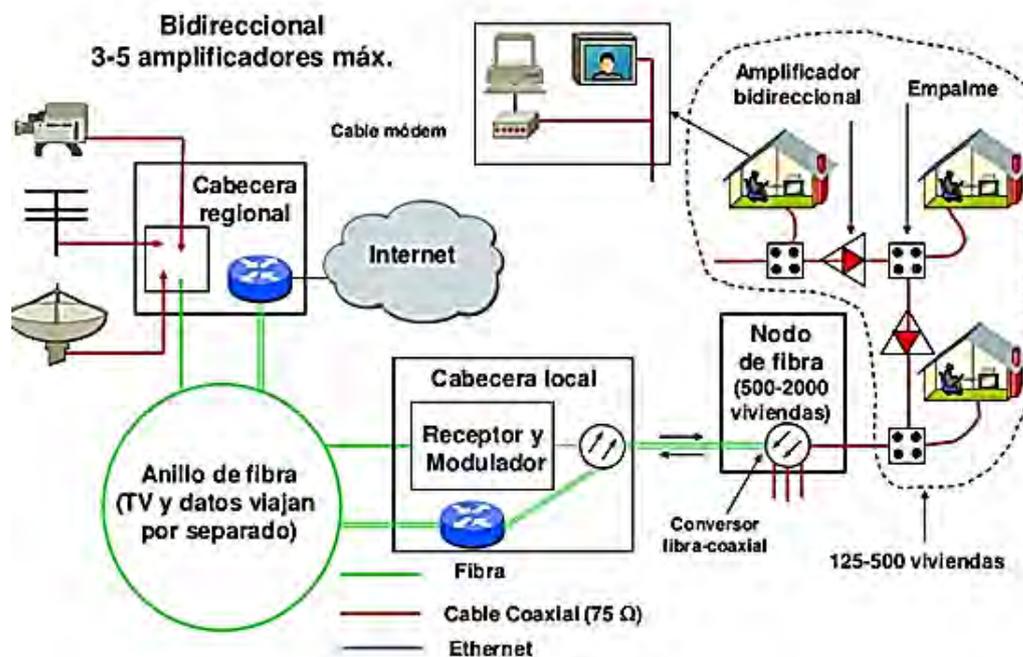


Figura No. 5.50 Arquitectura típica de una red CAT HFC
 Fuente: Consuegra, H., *Community Antenna Television: CATV*, 2018, p.9.

Estas redes CAT HFC, en gran parte de su tendido está conformada por fibra óptica y en menor parte por cable coaxial. Su implementación revisten la particularidad de ser redes bidireccionales, pudiendo esencialmente enviar señales de TV, Internet, Telefonía IP, entre otras y recibir en retorno señales de Internet y de Telefonía IP, principalmente. Dispone de un alto ancho de banda y de velocidades de: 55 Mbps de cabecera a usuario y de 10 Mbps de usuario a cabecera. Como se ha venido mencionando su composición básica esta conformada por:

1. *na cabecera*: donde se capta y o se genera toda la información a ser difundida a través de la red.
2. *na red troncal*: que interconecta a la cabecera con los nodos principales de distribución. Generalmente esta red está conformada por fibra óptica en su gran mayoría.
3. *odos principales*: que distribuyen a los nodos secundarios las señales mediante la red de distribución.
4. *Redes de distribución*: que interconecta a los nodos principales con los secundarios. En su gran mayoría es de fibra óptica.

5. *odos secundarios*: que corresponden a los puntos de distribución de la red de abonado.

6. *Redes de abonado*: que corresponden a aquellas que llegan a las tomas finales de los abonados de los usuarios. Estas redes en su gran mayoría son de cable coaxial.

En la figura No. 5.51 se ilustra un esquema en el cual se hace una representación de la estructura básica de un sistema de CAT HFC, donde se puede identificar sus principales componentes, así también en que partes de la red se utiliza fibra óptica y que otras se utiliza cable coaxial.

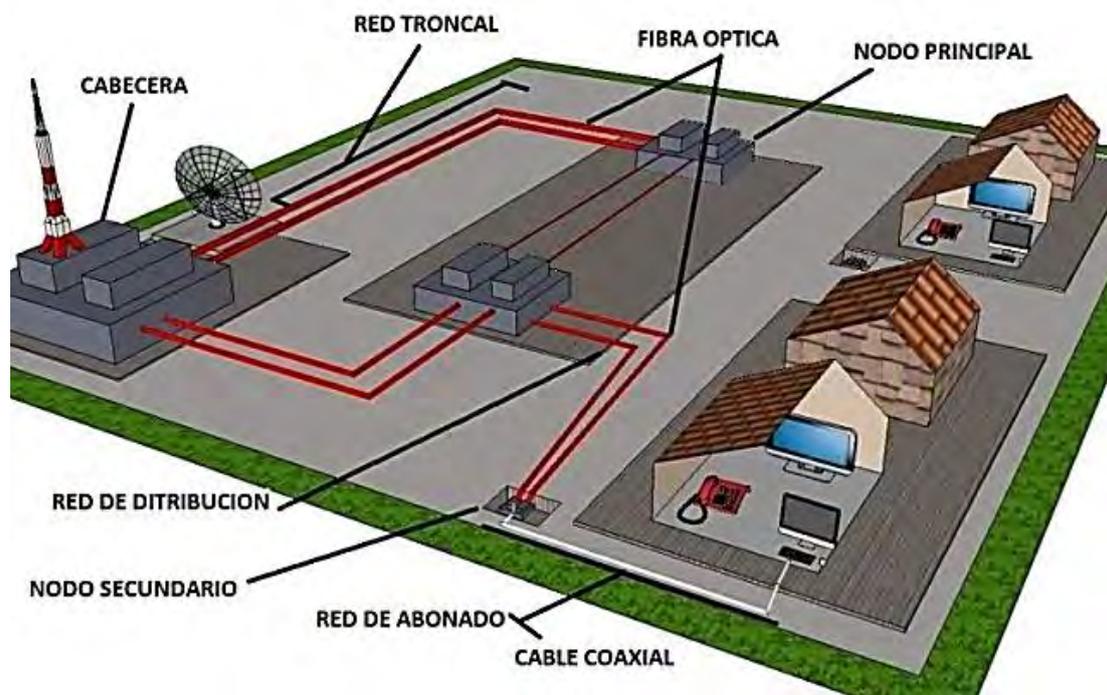


Figura No. 5.51 Descripción del tendido de una red de CAT HFC.

Fuente: CAT HFC. (2019). Disponible: <http://redeseduges.blogspot.com.co>.

Como se mencionó anteriormente estas redes CAT HFC, son bidireccionales y cuyas características esenciales de funcionamiento son las siguientes: ⁽¹⁷⁾

a.) *Información de bajada*:

- Canal de T a 8 MHz o 6 MHz.
- Opera en la banda alta de frecuencias asignada para este servicio.
- Velocidades de transmisión de datos hasta 55 Mbps.

b.) *Información de subida*:

- Canal de diversas anchuras (típico 3,2 Hz).
- Opera en la banda baja de frecuencias asignadas para este servicio
- velocidades de transmisión de datos hasta 10 Mbps.

En la tabla No. 5.8 se hace una discriminación de las velocidades binarias, para el caso del canal de bajada y el de subida (retorno), dependiendo del ancho de banda y del tipo de modulación empleados por las señales correspondientes, en las redes CAT HFC.

Bajada (<i>downstream</i>) en Mbps			Subida (<i>upstream</i>) en Mbps			
				QPSK	16-QAM	64-QAM*
	64-QAM	256-QAM	0,2 MHz	0,32 (0,3)	0,64 (0,6)	1,28 (1,2)
			0,4 MHz	0,64 (0,6)	1,28 (1,2)	1,92 (1,7)
			0,8 MHz	1,28 (1,2)	2,56 (2,3)	3,84 (3,4)
			1,6 MHz	2,56 (2,3)	5,12 (4,6)	7,68 (6,8)
			3,2 MHz	5,12 (4,6)	10,24 (9,0)	15,36 (13,5)
			6,4 MHz*	10,24 (9,0)	20,48 (18,0)	30,72 (27)
6 MHz	30,34 (27)	42,88 (38)				
8 MHz	40,44 (36)	57,20 (51)				

Tabla No. 5.8 velocidades binarias de bajada como de subida, de acuerdo al ancho de banda y modulación empleada en las redes CAT HFC

Fuente: Redes eduges. (2019). Disponible: <http://redeseduges.blogspot.com.co> .

5.10.6.1 Dispositivos pasivos de las redes CATV

Además del cable respectivo, las redes CAT requieren de una serie de dispositivos pasivos para su tendido y distribución, tales como: conectores, repartidores, acopladores direccionales, derivadores y ecualizadores. A manera de complementación, a continuación se relacionan algunos dispositivos pasivos que se utilizan en el tendido y distribución de estas redes, así como en los puntos de conexión final de las mismas.⁽¹⁸⁾

- **Conectores:** de rosca 5/8", los cuales van roscados en receptáculo de los equipos, sirviendo de masa, la cual es transferida al conductor exterior del cable coaxial; de empalme, los cuales permiten la ligación de cables coaxiales del mismo diámetro; BNC, los cuales se utilizan para la interconexión con los equipos o módulos; los de tipo F; las cargas de 75 ohmios, para cargar las salidas de los equipos no utilizados en las líneas de tronco y de distribución. En la figura No. 5.52 se ilustran algunos de los ejemplares de estos tipos de conectores.



a.) Conector de rosca 5 8"



b.) Conector de empalme



c.) Conector BNC



d.) Conector tipo F



e.) Cargas de 75 ohmios

Figura No. 5.52 Algunos tipos de conectores para el tendido y distribución de la red CAT .

Fuente: Conectores y Adaptadores. (2019). Disponible:
<http://.electronicabf.com/adaptadores-bnc-2341-carga-bnc-75-ohm.html>
.cenva.es/conectores-conexcon-20PDF-20bis-2710.pdf .

El conector BNC (*Bayonet eill Concelman*) fue concebido para conexión y desconexión rápida, utilizado para cable coaxial. El conector tipo F, por lo general para cable coaxial RG-59 y actualmente RG-6, para uso, además de CAT , de televisión por satélite y de los cablemódems.

- *Repartidores o divisores Splitter* : de varias salidas (típico: dos o tres salidas), para bandas de frecuencias entre 5 y 860 MHz, con conectores de 5 8" en las conexiones de distribución y paso. Algunos proveedores ofrecen este dispositivo con mecanismo de sujeción del conductor central del cable coaxial, con posibilidades de rotar 90°, lo cual permite varias posibilidades de

instalación. En la figura No. 5.53 se muestran unas imágenes de dos repartidores, uno para interior y el otro para exterior, de 3 salidas con 10dB de pérdidas de inserción con conectores tipo 5/8”.



Figura No. 5.53 Imágenes repartidores: para interior y para exterior de 3 salidas.

Fuente: Distribuidores. (2019). Disponibles: <http://www.diesl.es> distribuidores.

- **Acopladores direccionales:** son dispositivos pasivos que acoplan parte de la potencia transmitida a través de una línea de transmisión hacia otro puerto. Por lo general emplean dos líneas de transmisión, posicionadas de tal forma que la energía que circula por una de las líneas se acople a la otra. Las pérdidas que presentan estos dispositivos esta alrededor de los 10 dB y a menudo utilizan conectores tipo N. En la figura No. 5.54 se muestra una imagen de un tipo de acoplador direccional y su correspondiente diagrama estructural



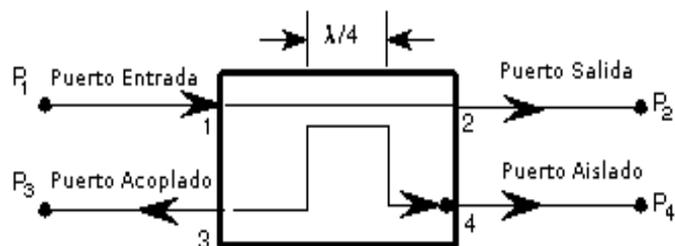


Figura No. 5.54 Imagen y diagrama de un acoplador direccional.

Fuente: *lectronics arefare and Radar Systems ngineering andboo* ". Avionics Department of the Naval Air arefare Center eapons Division.2017.

Los acopladores tienen 4 puertos: el primero de entrada, el segundo de salida, el tercero de acoplado y cuarto de aislado. A la línea que une el puerto de entrada con el de salida, generalmente, se le denomina: *línea principal*. Para algunos acopladores direccionales, la línea principal está diseñada para operar en alta potencia (grandes conectores), mientras que el puerto acoplado puede usar un conector pequeño SMA (*Sub-Miniatureversion A*). Al puerto aislado se le conecta una carga adaptada, interna o externa (frecuentemente de 50 ohms).

La función esencial de los acopladores, en el lado del usuario, es la de poder desbalancear la señal de radio frecuencia de entrada para la acometida domiciliaria y poder acoplar un dispositivo de valor agregado como ser el *cable modem* en la salida atenuada, siendo de esta manera la salida directa enviada hacia los televisores para evitar la atenuación de la señal de video hacia los televisores, esta configuración además cumple con las normas especificadas por DOCSIS para un rango de los CM desde 15 a 15 dBm .

Las características más exigidas de los acopladores, para su utilización, son: ancho de banda amplia, alto aislamiento, buen acoplamiento, alta directividad, una impedancia en cada uno de sus puertos que se acoplen a los cables coaxiales que les conecta. A continuación se relacionan las formas de calcular estas características. ⁽¹⁹⁾

a.) *Aislamiento*: corresponde a la diferencia en niveles (dB) entre la potencia del puerto de entrada (P_1) y la potencia del puerto aislado (P_4), siempre y cuando los otros dos puertos estén conectados a cargas adaptadas (ver ecuación 5.24).

$$\langle 5.24 \rangle I_{4,1} = 10 \log_{10}(P_1) - 10 \log_{10}(P_4) = -10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_1} \right) \text{ dB}$$

El aislamiento debe ser lo más alto posible, para que el acoplador direccional pueda combinar señales y alimentar una sola línea hacia un receptor para realizar pruebas de recepción de dos tonos. En la práctica los acopladores

no ofrecen un aislamiento completo. Por lo general presentan alguna señal de RF. Los acopladores direccionales de guía de onda son los que prestan mejor aislamiento.

b.) *actor de acoplamiento*: es la característica principal de los acopladores direccionales y el cual varía con la frecuencia, aunque los acopladores actuales reducen esta variación, no se ha podido lograr una independencia total de la frecuencia. Este factor corresponde a la diferencia en niveles (dB) entre la potencia del puerto de entrada (P_1) y la de la potencia del puerto acoplado (P_3) (ver ecuación 5.25)

$$\langle 5.25 \rangle C_{3,1} = 10 \log_{10}(P_1) - 10 \log_{10}(P_3) = -10 \log_{10} \left(\frac{P_3}{P_1} \right) \text{ dB}$$

Los acopladores direccionales frecuentemente son planteados para trabajar dentro de un ancho de banda determinada, con un cierto margen de variación dentro de este ancho de banda. Un caso típico es un acoplador de 10 dB con una variación de ± 0.1 dB, lo que significa que tendrá un acoplamiento de 9.6 - 0.1 dB hasta 10.4 ± 0.1 dB, dentro del rango de frecuencia del ancho de banda determinada.

c.) *irectividad*: no se puede medir directamente, pero se puede calcular mediante la diferencia entre las medidas de aislamiento y acoplamiento (ver ecuación 5.26)

$$\begin{aligned} \langle 5.26 \rangle D_{3,4} &= I_{4,1} - C_{3,1} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_1} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_3}{P_1} \right) \\ &= -10 \log_{10} \left(\frac{P_4}{P_3} \right) \text{ dB} \end{aligned}$$

Siempre se busca que los acopladores direccionales operen con la más alta directividad posible. Los acopladores direccionales de guía de onda son los que más alta directividad ofrecen.

d.) *érdidas de inserción*: corresponde a la diferencia en niveles (dB) entre la potencia del puerto de entrada (P_1) y la potencia del puerto de salida (P_2) (ver ecuación 5.27)

$$\langle 5.27 \rangle L_{i2,1} = 10 \log_{10}(P_1) - 10 \log_{10}(P_2) = -10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ dB}$$

La mayor parte de estas pérdidas se debe a la potencia que se desvía hacia el puerto acoplado (puerto 3). A estas pérdidas se le denominan pérdidas por acoplamiento (ver ecuación 5.28)

$$\begin{aligned} \langle 5.28 \rangle L_{c2,1} &= 10 \log_{10}(P_1) - 10 \log(P_1 - P_3) \\ &= -10 \log_{10} \left(1 - \frac{P_3}{P_1} \right) \text{ dB} \end{aligned}$$

Para el caso ideal, las pérdidas por inserción y las pérdidas por acoplamiento deben ser iguales. Las pérdidas por inserción se deben esencialmente a pérdidas de: acoplamiento, dieléctricas, del conductor y por ROE (razón de onda estacionaria). Cuando existe un acoplamiento igual o superior a 15 dB, se considera que las pérdidas por acoplamiento son despreciables. En la figura No. 5.55 se indica unos valores y una gráfica mediante los cuales se puede determinar, teóricamente, la relación entre las pérdidas por inserción (dB) y el factor de acoplamiento (dB). Como se puede apreciar: a medida que el factor de acoplamiento aumenta las pérdidas por inserción disminuyen.

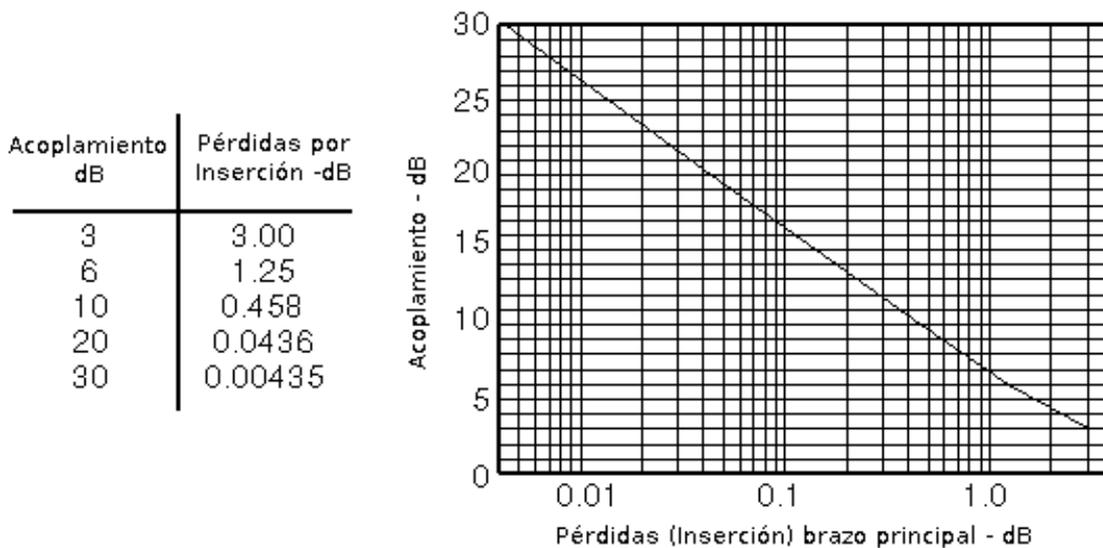


Figura No. 5.55 Relación entre pérdidas por inserción y acoplamiento.

Fuente: *lectronics arefare and Radar Systems ngeineering andboo* ", Avionics Department of the Naval Air arefare Center eapons Division, 2018.

- **Base de conexión de abonado:** la toma final de las instalaciones CAT , especialmente las que están dotadas con vía de retorno, Deben de disponer de un filtro, dentro todo el margen de frecuencias de 5 a 870 MHz, que separe la señal de T y la señal de retorno. En la figura No. 5.56 se muestran unas

imágenes de los componentes básicos de uno de los diferentes tipos de tomas en los abonados de las redes CAT bidireccional.



Figura No. 5.56 Imágenes de los componentes básicos de una toma de abonado CAT bidireccional.

Fuente: Catálogo *Elementos para la instalación de Redes de SCATV*, Televisión, 2018, p. 37.

Ejemplo No. 5.13

Determinar la potencia de salida de un acoplador direccional si la intensidad de una señal a la entrada es de 200 microvatios y las pérdidas por inserción es de 0.458.

Solución:

Según la curva y la tabla indicadas en la figura No. 3.54 para unas pérdidas por inserción de 0.458 el factor de acoplamiento del acoplador direccional es de 10 dB.

De acuerdo a la ecuación 5.9

$$L_{i,1} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ dB} \Rightarrow 10 \text{ dB} = -10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 0.1 \Rightarrow P_2 = 0.1 P_1 = 0.1(200) = 20 \mu\text{W}$$

Ejemplo No. 5.14

Una red de CAT , al llegar al punto de un vecindario la señal se divide en varios trayectos, mediante cable coaxial (uno por cada usuario), a través de un divisor

(*splitter*). Supóngase que el divisor no genera pérdidas y que la señal entrante se distribuye uniformemente entre los diferentes cables coaxiales de salida. ⁽²⁰⁾

a.) Determinar cuántos decibelios cae la señal, en cada una de las salidas del *splitter*.

b.) Calcular la potencia en dB_w en cada una de sus salidas del *splitter*.

c.) Si la potencia de entrada es de 80 dBm , cuál la potencia de salida para los divisores uniformes de 2 y de 3 salidas, en dBm .

Solución:

a.) Decibelios de caída por salida:

Teniendo como condición que la potencia de la señal de entrada $P_e(w)$ se distribuye en forma uniforme entre las n diferentes salidas del *splitter*, entonces la potencia de salida, en cada una de ellas, será igual a:

$$P_{Sn}(dB_w)$$

Por lo tanto la ganancia por salida será de (caída de la señal en dB):

$$G_n(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{Sn}}{P_e} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_e / n}{P_e} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \right) = -10 \log_{10}(n)$$

b.) Potencia en la n -ésima salida del *splitter*:

$$P_{Sn}(w) = \frac{P_e(w)}{n}$$

$$P_{Sn}(dB_w) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_e(w)}{n} \right) = 10 \log_{10}(P_e(w)) - 10 \log_{10}(n)$$

$$P_{Sn}(dB_w) = P_e(dB_w) + G_n(dB)$$

c.) Potencia de salidas en dBm , en cada una ellas, para:

- Divisor de 2 salidas:

$$P_{Sn}(dB_w) = P_e(dB_w) + G_n(dB)$$

$$P_{S1}(dB_w) = P_{S2}(dB_w) = P_e(dB_w) + G_2(dB)$$

$$= 80\text{ dBm} - 10 \log_{10}(2) = 80\text{ dBm} - 3\text{ dB} = 77\text{ dBm}$$

- Divisor de 3 salidas:

$$P_{S_n}(dBm\ w) = P_e(dBm\ w) + G_n(dB)$$

$$P_{S_1}(dBm\ w) = P_{S_2}(dBm\ w) = P_{S_3}(dBm\ w) = P_e(dBm\ w) + G_3(dB)$$

$$= 80\ dBm - 10\log_{10}(3) = 80\ dBm - 4.77\ dB = 75.23\ dBm$$

5.10.6.2 Servicios complementarios de las redes CATV

Tal como se ha venido referenciando, las redes CATV, además de prestar el servicio de distribución de la señal de televisión, también prestan simultáneamente servicios de distribución de otros tipos de señales, tales como de: voz y datos, entre otras.

Para el caso de transmisión de T y de telefonía, por la misma red CATV, se emplean básicamente tres tipos de sistemas: ⁽²¹⁾

- *Arquitectura overlay*: le corresponde a aquellas redes donde las señales de CATV y las señales telefónicas se distribuyen a los abonados de los respectivos usuarios, mediante dos redes independientes superpuestas.
- *a R hasta la acera*: las señales telefónicas se transportan en el espectro de RF de la red HFC hasta un nodo telefónico, denominado *erb*. Este nodo toma la señal telefónica convirtiéndola a su formato digital en banda base de 64 kbps y la envía a la toma del abonado del usuario correspondiente, a través de un par trenzado.
- *a R hasta la toma del abonado*: tanto la señal CATV como la telefónica comparten el espectro de RF de la red HFC, hasta la toma del abonado del usuario correspondiente, donde la señal telefónica es convertida a su formato digital en banda base de 64 kbps, mediante un dispositivo que se encuentra instalado en el sitio del respectivo abonado y el cual hace la función de interfaz con dicho abonado.

En la figura No. 5.57 se muestra un diagrama que esquematiza la estructura básica de los tres sistemas relacionados anteriormente.

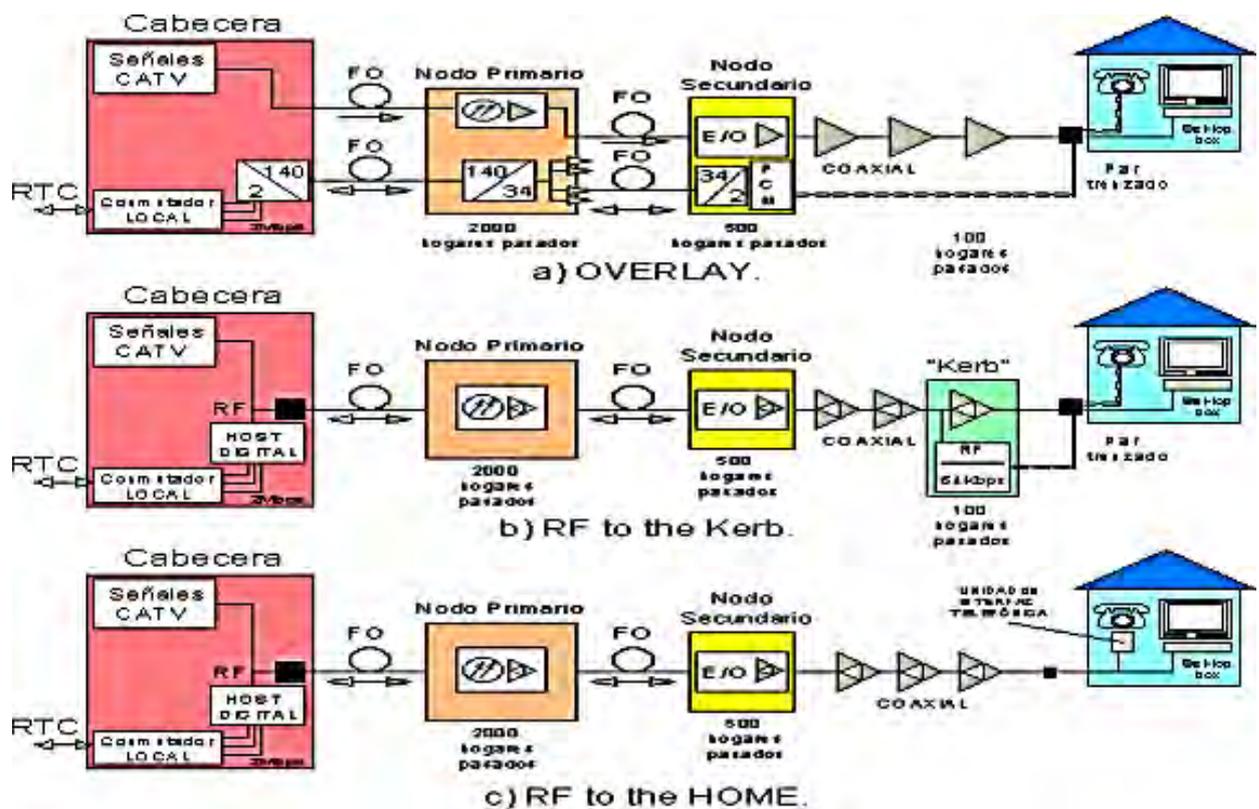


Figura No. 5.57 Arquitectura básica de los tres sistemas para caso de transmisión de T y de telefonía, por la misma red CATV ,

Fuente: Sistemas de televisión por cable. (2019). Disponible: <http://es.slideshare.net/arlimarvila/sistema-televisioncable-50986478>, p.12.

5.10.6.3 Red de acceso a CATV

Corresponde a la red del cableado que interconecta los puntos de terminación de red de los MultiTaps con cada acometida de los correspondientes usuarios, incluyendo todas las interconexiones, con sus dispositivos, con que cuentan los usuarios. En la figura No. 5.58 se indica la interconexión a la acometida de los subscribers. (22)

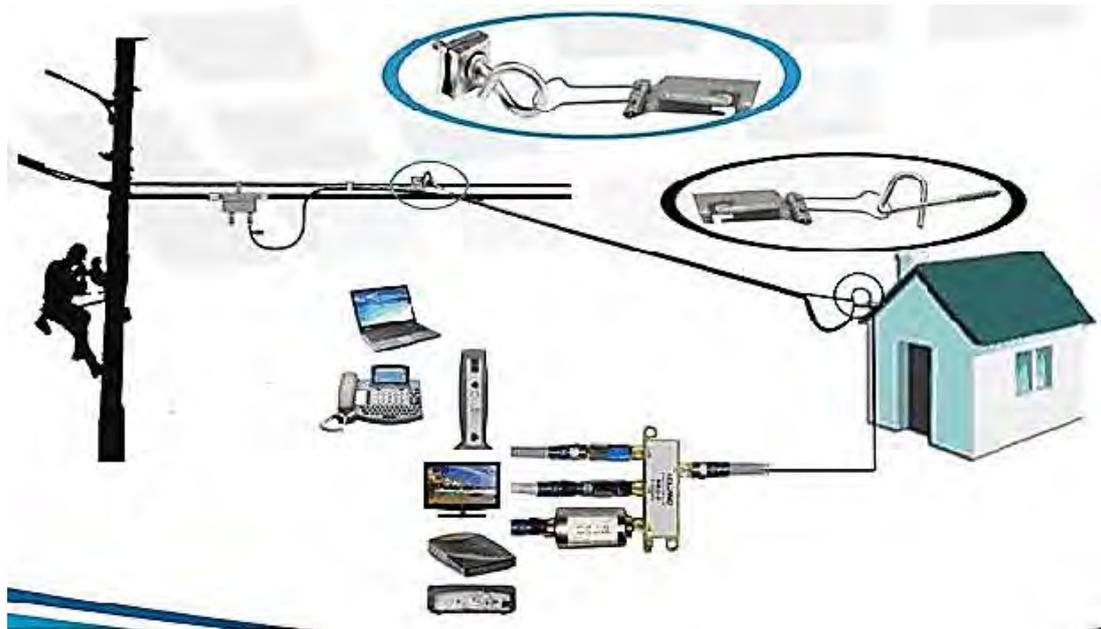


Figura No. 5.58 Interconexión a la cometa de un usuario.

Fuente: Cometa a usuario. (2019).

Disponible: <http://portal.clarochile.cl/portal-cl-pc-personas-todo-claro-02-arma-tu-play>

También, como se mencionó, a una red de acceso le corresponde las instalaciones de los equipos con que cuenta el suscriptor, tales como: cable módems, decodificadores, así como los diferentes dispositivos que son requeridos para tal fin, como: splitters, filtros y cable coaxial. En la figura No. 5.59 se expone una imagen de una posible instalación, en el sitio del usuario, para servicios de televisión, Internet y telefonía.

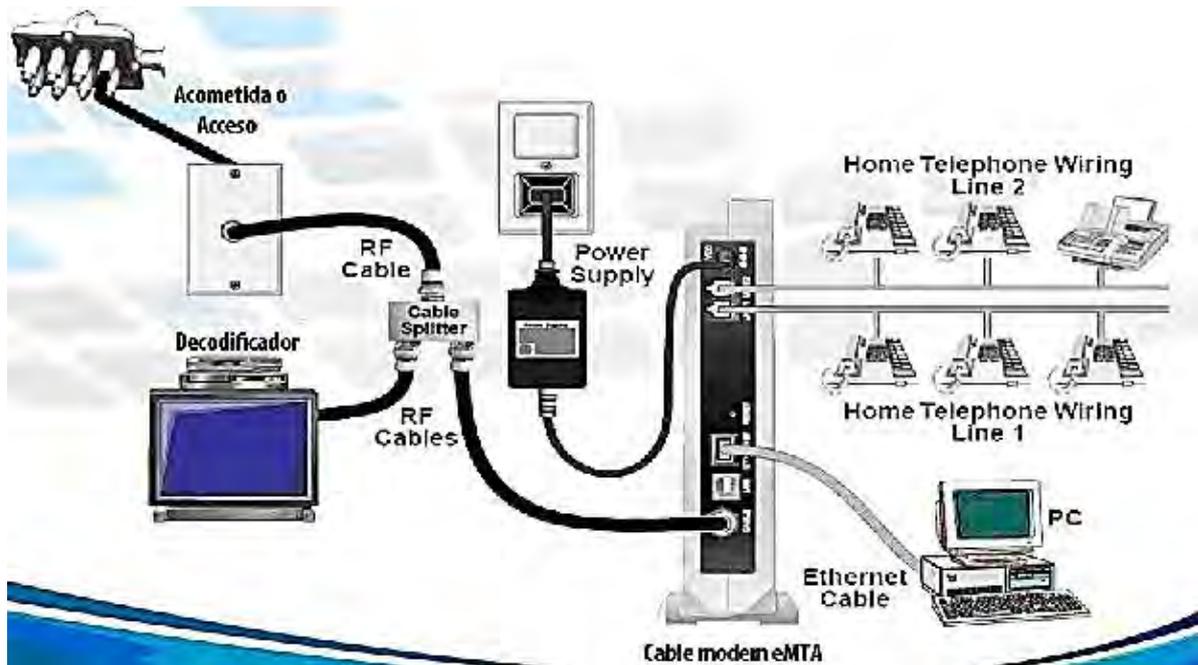


Figura No. 5.59 Instalaciones en el usuario para servicios de televisión, Internet y telefonía

Fuente: Cometicada a usuario. (2019). Disponible:

<http://portal.clarochile.cl/portal/cl/pc/personas/todo-claro/02-arma-tu-play>

En la figura No. 5.60 se ilustra el acceso a una red CAT de cada acometida de los correspondientes usuarios, incluyendo las principales interconexiones, con sus dispositivos, con que cuentan la red.

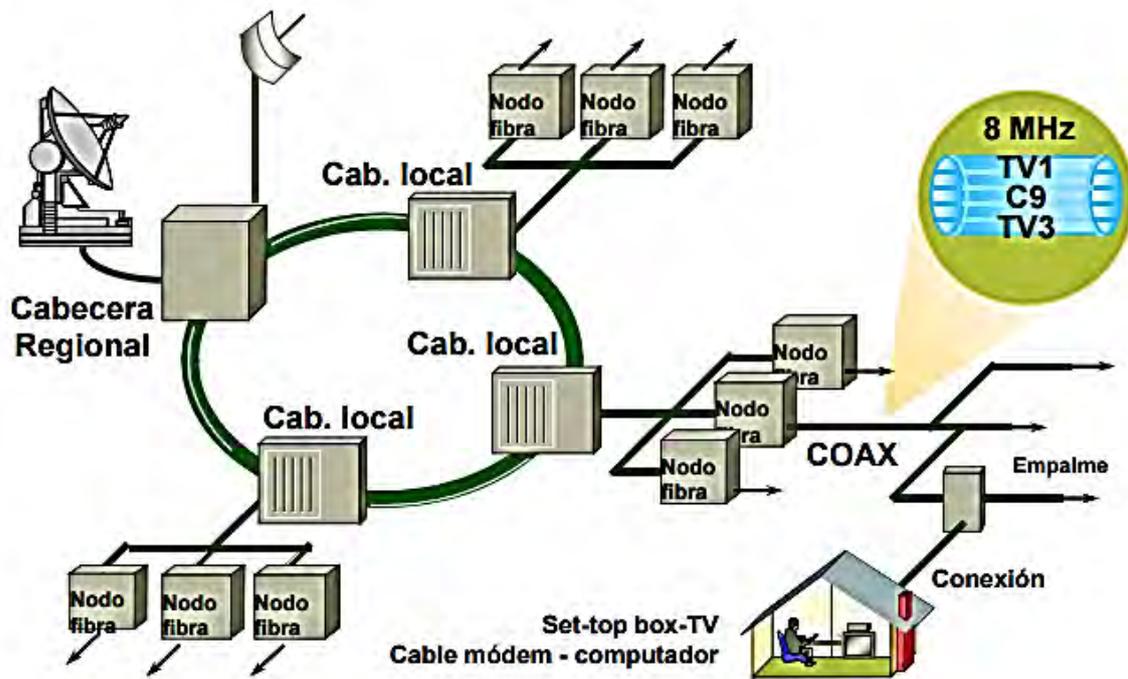


Figura No. 5.60 Estructura básica del acceso a una red CAT .
Fuente: Pignatarolle, N., *Redes de Acceso ijas*, 2018

5.10.7 Redes de circuitos cerrados de televisión

A continuación se hace una descripción de la concepción, estructuración y funcionamiento básicos de las redes de *circuitos cerrados de televisión* (CCT), así como de sus principales componentes que los conforman, sus elementos esenciales de instalación y los tipos de cableados que con mayor frecuencia se emplean. Así mismo se complementará sobre los aspectos esenciales de los cables coaxiales, en la utilización de estas redes.

5.10.7.1 Conformación y funcionamiento

Como se ha referenciado anteriormente, estas redes básicamente están orientadas a prestar un servicio de *video-vigilancia*, cuya estructura y funcionamiento han sido diseñadas e implementadas para supervisar una diversidad de ambientes y actividades, inicialmente en lugares concretos, para advertir sobre robos, atracos y toda actividad anómala que se presente en los lugares monitoreados por estos sistemas.

Posteriormente este servicio ha venido teniendo aplicación para áreas extensas de una ciudad o región, especialmente implementado por instituciones gubernamentales encargadas de la seguridad ciudadana y o control de movilidad. Los sistemas que prestan este servicio se apoyan tanto en redes de

cableado, como en redes inalámbricas, esencialmente las de servicio de telefonía móvil celular, y últimamente en los sistemas TCP IP y de posicionamiento global (GPS).

La utilización del cable coaxial para este tipo de redes se centra básicamente en las conexiones a las cámaras y en los centros de monitoreo. Para el resto del tendido de la red, se emplea fibra óptica radio par trenzado. En la figura No. 5.61 se hace una representación, en forma simplificada, de la conformación de una red de CCT para un área amplia



Figura No. 5.61 Esquema simplificado de la conformación de una red de CCT para un área amplia.

Fuente: Catálogo *Solución de Video Vigilancia* ", 2018, I OTE

En la figura No. 5.62 se ilustra la sala de un centro de monitoreo de una red de CCT para un área amplia.



Figura No. 5.62 Imagen de la sala de un centro de monitoreo de una red de CCT para un área amplia.

Fuente: Central de una red CCT . (2019). Disponible: <http://slideplayer.es/slide/1062172> .

En la figura No. 5.63 se muestra un tramo de cable coaxial que es frecuentemente utilizado para interconexión con las cámaras de vigilancia en seguridad D R, con sus correspondientes conectores, para video BNC y para la alimentación de las cámaras, en sus respectivos extremos



Figura No. 5.63 Tramo de cable coaxial para interconexión con cámaras D R

Fuente: Cable coaxial: Interconexión con cámaras D R. (2019).
Disponible: .seguridadesos.com.ar dvr ..

En la figura No.5.64 se expone un diagrama donde se ilustran las respectivas interconexiones a una cámara de vigilancia: por el lado de la cámara el *plug* de alimentación (DC) y el conector BNC de video y por el otro lado la conexión a la red eléctrica y la conexión con BNC directamente al T o a su equipo D R.



Figura No. 5.64 Interconexiones a la cámara de vigilancia en seguridad DR .
Fuente: ideo Po er Cable. (2019). Disponible: http: .ebay.com itm 4-Ne -100ft-BNC-
CCT - ideo-Po er-Cable-CCD-Security-Camera-D R- ire-Cord.

Existe una inmensa variedad de cámaras exteriores que son empleadas en las redes de CCT para cubrimiento de áreas extensas, en la figura No. 5.65 se muestran algunos de estos tipos de cámaras.



Figura No. 5.65 Tipos de cámaras exteriores para redes CCT en áreas extensas.

Fuente: Circuito Cerrado de Televisión. (2019). Disponible:
[http: .trazaingenieria.cl](http://.trazaingenieria.cl) [img cctv](http://img.cctv) [http: sicomatel.com](http://sicomatel.com) cctv-circuito-cerrado-de-television.html

5.10.7.2 Consideraciones técnicas para la implementación de un sistema integrado de CCTV.

Son muchas las instituciones encargadas de la vigilancia y seguridad ciudadana, así como de las empresas que diseñan e implementan sistemas integrados de video-vigilancia, que han establecido ciertas recomendaciones o consideraciones técnicas que sirven de referencia para la implementación de estos sistemas, las cuales se podrían resumir en los siguientes puntos: ⁽²³⁾

1. Estos sistemas den disponer de una plataforma abierta unificada de tipo modular, con niveles de alta compatibilidad, entre sí.

2. Los protocolos como las interfaces deben ser abiertos y estandarizados, tanto para video, audio y transmisión, enmarcados dentro de los estándares internacionales, como de la industria.

3. Disponer de dispositivos de protección, de gestión de ancho de banda y de bajo retorno de transmisión de alto grado de eficiencia.

4. Contar con mecanismos que permitan detectar y grabar en forma automática todas aquellas contravenciones y o anomalías que se presente, registrando los entes infractores de las mismas.

5. Permitir la integración de sistemas que puedan complementar, ampliar y o mejorar el servicio de vigilancia y monitoreo, tales como el sistema de posicionamiento global (GPS) y el sistema georeferencial (GIS), entre otros, que permitan la ubicación de los hechos mediante mapas georeferenciados.

6. Contar con la tecnología de almacenamiento en nube y sistemas de computación que garantice un almacenamiento confiable y de una búsqueda rápida y efectiva.

7. El sistema debe disponer, de manera permanente, de un centro integrado que concentre el monitoreo de control y vigilancia de toda su zona de cobertura.

8. La red que interconecta todos los componentes y dispositivos del sistema, deberá hacerse a través de enlaces de cableado (cable coaxial, fibra óptica y o par trenzado) o de microondas, según sean los trayectos correspondientes. En términos muy generales, los tipos de medios de transmisión empleados, según sea la parte del tendido de la red, son los que a continuación se relacionan, teniendo de presente que en algunos de esos trayectos puede presentarse una utilizan híbrida de los mismos, dependiendo de los requerimientos técnicos de funcionamiento del sistema o topográficos de la zona del enlace o cubrimiento:

- Para distancias relativamente reducidas, distancias iguales o menores de los 200 metros se emplea *cable coaxial*, cuyos tipos más referenciados son: RG-59 RG-6 RG-11(75 ohmios). Generalmente estos tendidos corresponden a la parte de conexión de las cámaras y a la de las conexiones en el centro de control

- Para distancias mayores a los 200 metros se recomienda la utilización de *par tren ado* UTP de 100 ohmios. Esta alternativa se debe a que en el caso de los cables coaxiales, debido a su característica de línea no balanceada, son más propensos a la afectación del ruido y a las interferencias. Esta situación se reduce en los *pares tren ados*, donde estas señales que llegan a ambos conductores se cancelan, debido a que estos medios de transmisión admiten señales de distinta polaridad en cada uno de sus dos conductores. Los conductores de los pares trenzados se encuentran balanceados con respecto a la

masa. Por lo tanto para trayectos de larga distancia se requiere de amplificadores de video, los cuales además de amplificar a esta señal también amplifican los ruidos e interferencias, situación más notoria con los *cables coaxiales* que para el caso de los *pares trenados*.

- Para largas distancias (algunos kilómetros), es comúnmente utilizado enlaces inalámbricos en la banda de las microondas (1 a 10 GHz). También se acostumbra el empleo de enlaces inalámbrico en frecuencia más bajas, radiofrecuencias: 900 MHz a 2.4 GHz, para el caso de enlaces de 100 metros o menos, cuando por algún motivo se complica para estos casos la instalación de cableado.

- Para grandes extensiones, los sistemas integrados de CCT se apoyan en otras redes que prestan servicios de comunicaciones, tales como las redes de *fibra óptica*, las redes de los *sistemas de telefonía móvil celular*, los GPS, los GIS, entre otros.

- Principalmente para cubrimiento universal, los sistemas integrados de CCT incorporan los servicios de las redes de la *internet* de un operador determinado, mediante lo cual desde un PC ubicado en cualquier parte del mundo se puede hacer el monitoreo en tiempo real, para lo que debe disponer de las claves de acceso y *password* correspondientes.

9. Se recomienda tener de presente la aplicación de las siguientes consideraciones para los tendidos en cable: ⁽²⁴⁾

- Evitar que los tendidos en cable estén muy cerca de los de las redes de corriente eléctrica (igual o menor a 20 cm), ya que pueden a ser interferidos por las aducciones de las señales de la red eléctrica.

- Para el caso de los tendidos con cables conductores (*cable coaxial* y o *par trenado*), evitar que estos tendidos sean de tipo aéreo, ya que estos cables son propensos a atraer descargas atmosféricas, las cuales además de perjudicar la señal de video, pueden causar destrucción en los mismos cables y o en los dispositivos conectados a ellos.

En la figura 5.66, se muestra un esquema de la estructura básica de una red de un sistema integrado de CCT .

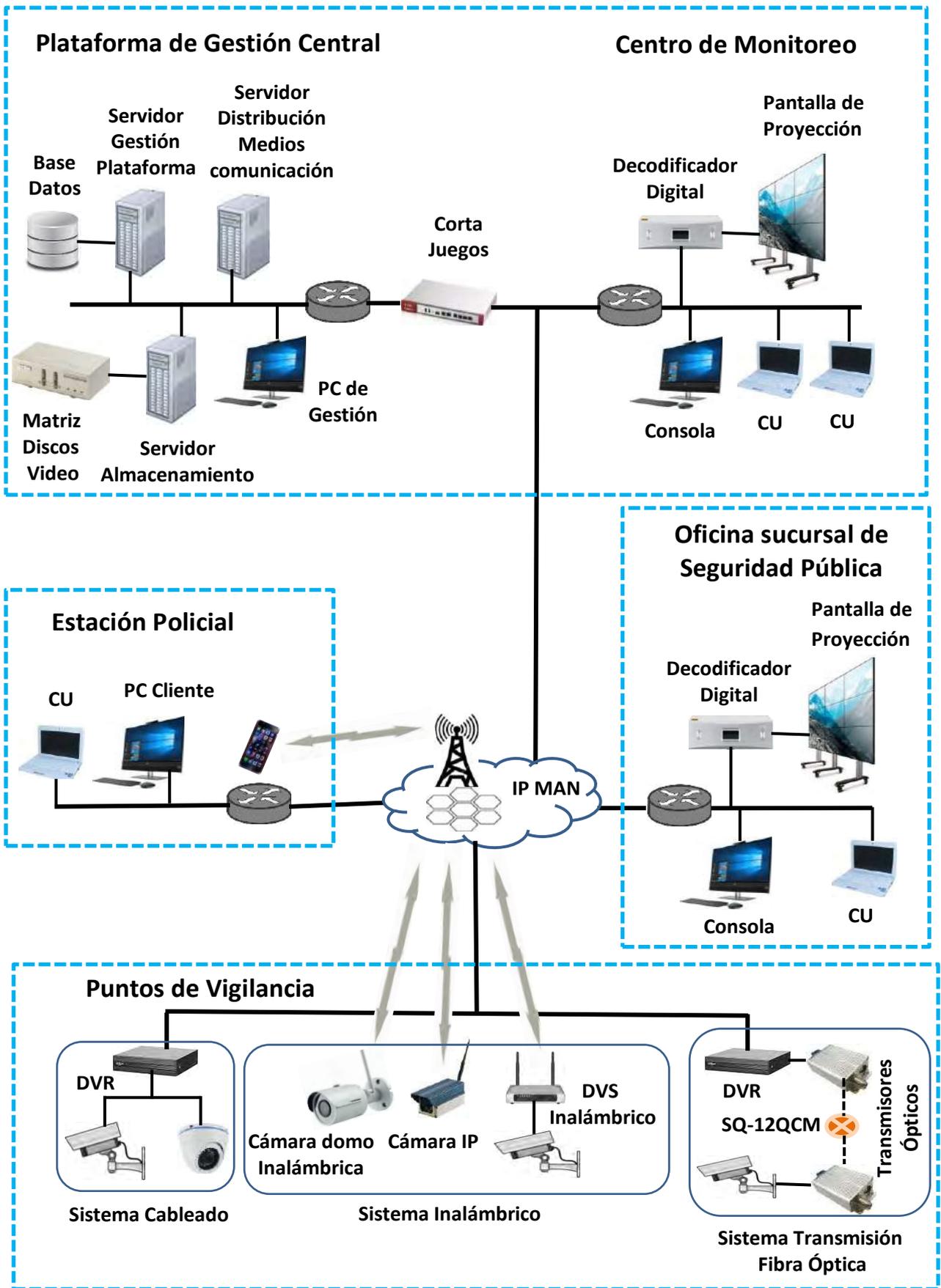


Figura No. 5.66 Esquema de la estructura básica una red de un sistema integrado de CCT .

Fuente: Hua ei (I S. Universitat Politècnica de Valencia. 2019).

5.10.8 Redes de distribución de señal de televisión personalizada

Itimamente, se ha venido extendido la utilización de distribución de señal de televisión en circuitos localizados, como es el caso de hoteles, hospitales, centros comerciales, centros educativos, centros de convenciones, espacios públicos, aeropuertos, centros deportivos, estadios, casinos, centros corporativos, bares, entre otros. Por lo general las redes de estos sistemas están conformadas por cable coaxial. En la figura No. 5.67 se ilustra un esquema simplificado de estos sistemas. La figura mostrada hace referencia al modelo de mostrar las páginas web, incluyendo servicios de T digital satelital, y de radio, y T digital almacenada (Modelo de visitas web en vivo)



Figura No. 5.67 Red de distribución de señal de televisión personalizada

Estos sistemas les ofrecen a los usuarios canales locales o satelitales o de cable, incluyendo películas, música, publicidad, noticias, avisos informativos, entre otros servicios. Para usuarios huéspedes, como es el caso de los hoteles y hospitales, el servicio es interactivo, el cual ofrece video a la carta, juegos de video, aplicaciones a Internet, televisión por internet, alquiler de películas, solicitudes de atención, entre otros.

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de estos sistemas utilizan en sus redes cable coaxial, lo cual dificulta la aplicación de los sistemas de televisión basados en la plataforma IP. Para remediar esta situación se está empleando en estas redes *par tren ado* UPT. Sin embargo actualmente se están implementado tecnologías que permiten transmitir señales de televisión basadas en IP a través de cables coaxiales. ⁽²⁵⁾

Además de los equipos y dispositivos propios de producción, los centros de producción de estos sistemas de serviciodesignal de televisión personalizada, están conformados por codificadores y moduladores de radiofrecuencia, los cuales convierten en fuente de video las señales de televisión por satélite y o por reproductores de cartelera digital de los canales de TDT, que reciben a través de sus correspondientes receptores, que se pueden distribuir a través de redes de cable coaxial, para un gran número de televisores. En la figura No. 5.68 se ilustra los componentes básicos de un centro de producción de las redes de distribución de señal de televisión personalizada. ⁽²⁶⁾

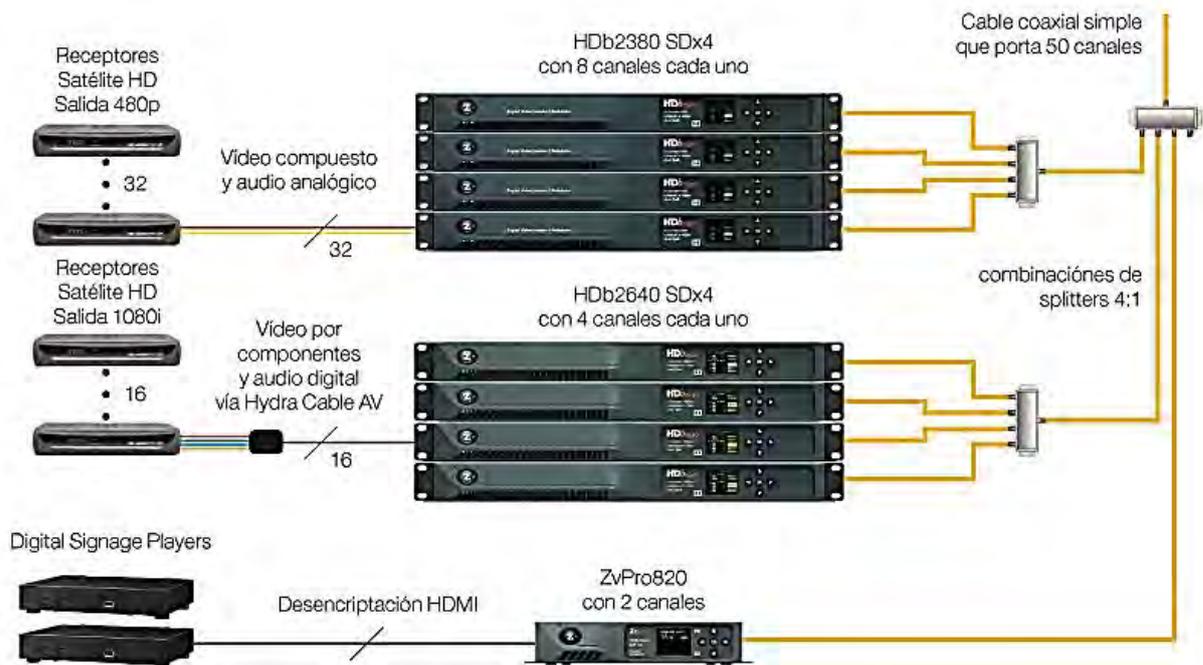


Figura No.53.68 Componentes básicos de un centro de producción de las redes de distribución de señal de televisión personalizada.

Fuente: Catálogo *Canales de televisión personali ados*”, Neoti media, 2018.

5.10.9 Transmisión de audio digital

En una de las áreas donde la aplicación del cable coaxial tiene mayor presencia, es en las redes de transmisión de señales de *audio digital*, utilizando conectores semejantes a los RCA. Este cable es más grueso que para el caso del utilizado para audio análogo, ya que utiliza el mismo tipo de malla que emplean los cables de antenas de televisión tradicional. En la figura No. 5.69 se muestra dos terminales de cable coaxial para transmisión de señales digitales con sus respectivos conectores. Como se puede apreciar el cable coaxial para este tipo de aplicaciones viene con blindaje exterior. ⁽²⁷⁾



Figura No. 5.69 Cable coaxial y conectores para transmisión de señales de audio digital.

Fuente: Definición de cable coaxial. (2019). Disponible: <http://definicion.de/cable-coaxial-ixzz46fP90zG>

5.11 Instalación y conexión del cable coaxial

Se puede establecer como procedimiento a tenerse en cuenta para la instalación y conexión de los cables coaxiales las siguientes consideraciones, las cuales son algunas de ellas de sentido lógico: ⁽²⁸⁾

1. Determinar el *tipo de cable* a ser utilizado: dependiendo de los requerimientos de su funcionamiento y servicios a prestar. En la mayoría de los casos para las aplicaciones más frecuentes, incluyendo las vistas en este capítulo, se emplean principalmente los siguientes tipos de cables coaxiales:

- Para las instalaciones antena televisor: RG-59 y RG-6 (ambos de 75 ohmios). Preferiblemente el RG-6, ya que ofrece mayor ancho de banda.
- Para las instalaciones de antenas comunitarias: preferiblemente Platinum 6.8 mm blanco y Mini-UHF (ambos de 75 ohmios).

- Para las instalaciones antenas transmisora receptoras: cable speedflex 375 o LMR 400 para tendidos cortos (10 metros o menos); LMR 400 para tendidos largo (mas de 10 metros); Heliax 15 8", Heliax 3 8", Heliax 7 8", Heliax15 8" o superior, dependiendo de la potencia a que va a ser sometido el cable. Todos de 50 ohmios.
- Para las redes de transmisión de datos: RG-58 de 50 ohmios, conocido como *coaxial* Ethernet: RG-62 de 93 ohmios, frecuentemente utilizado por la red ACRNET; RG-59 de 75 ohmios, usualmente utilizado en la red ANGNET.
- Para las redes telefónicas: RG-58 (50 ohmios); RG-59 (75 ohmios) han sido algunos de los tipos de cable coaxial para servicio telefónico más comunes, así como el cable de 500 con mensajero incorporado para instalaciones aéreas y cable 500 para instalaciones subterráneas, ambos de 75 ohmios. Para tendidos submarinos el SF (*Semi-flex*), entre otros. Los cables coaxiales han soportado hasta 132.000 conversaciones telefónicas simultáneas, en trayectos no muy prolongados, con tensión de 24 voltios.
- Para las redes de televisión por cable (CATV): RG-6 de 75 ohmios, preferiblemente. El empleo de cable coaxial en las redes CATV es relativamente limitada, corresponde esencialmente a las conexiones en la cabecera del sistema y en la red de abonado.
- Para los circuitos cerrados de televisión (CCTV): RG-59 RG-6 RG-11 de 75 ohmios de impedancia, especialmente para distancias relativamente reducidas, distancias iguales o menores de los 200 metros.
- Para las redes de distribución de señal de televisión personalizada: RG-6 de 75 ohmios de impedancia, es uno de los tipos de cable coaxial más utilizados para el tendido de las redes de estos sistemas.

2. Definir la *longitud* requerida: dependiendo de las distancias de los enlaces, se busca carretes que en principio contenga la totalidad del tendido del cable necesario, evitando en lo posible el requerimiento de empalmes, para evitar incrementar las pérdidas del enlace. En la práctica se recomienda dejar un excedente de la longitud requerida, para posibles cambios de puntos de conexión. La cantidad de este excedente depende de las proyecciones de cambio que se puedan presentar. Este excedente se enrollado en forma circular con un diámetro no inferior a 1.5 metros, evitando cualquier tipo de doblez.

3. Elegir los *conectores* correctos: la mayoría de los conectores de instalaciones para video casero se hacen con conectores RG-6 tipo F o N. El conector más frecuente en las conexiones de las redes CCTV, CATV y redes de datos es el

BNC. Los conectores a rosca son fáciles de usar, pero son menos seguros y pueden dejar una pequeña bolsa de aire, lo que podría afectar la calidad de la señal. En su contraparte están los conectores a presión (tipo cápsula), los cuales son un poco más difíciles de instalar pero logran mejores conexiones. Hay que recordar que para toda conexión se requiere de un conector macho y un conector hembra del mismo tipo. Por lo general el conector macho se encuentra en los terminales del cable, mientras los conectores hembra en los dispositivos o equipos que conforman la red. Para el caso de cables coaxiales muy delgados es muy común la utilización de conectores SMA (*Sub-Miniature version A*).

4. Realizar el *corte* del cable, una vez definido la longitud a ser utilizada, mediante las herramientas adecuadas y efectuar la colocación del correspondiente conector. Para lo anterior, en cada uno de los extremos del cable, se retira parte de la cubierta, así como de la malla que cubre el dieléctrico y se deja libre el conductor central. Se abre la malla, evitando pérdidas de sus filamentos, haciendo el dobles hacia la cubierta, de tal forma que la cubra en todo su alrededor (ver figura No. 5.70). Se introduce la punta del cable al conector correspondiente, por su parte posterior, teniendo de presente que el conductor central quede completamente posicionado en el pin central del conector y la malla presionada a la carcasa del conductor. Si los conectores lo permiten se recomienda hacer una fijación con soldadura, tanto a al conductor central como a la malla. Es conveniente revisar que no existe ningún tipo de contacto entre la malla y el conector central (se revisa mediante un medidor de continuidad)".



Figura No. 5.70 Proceso de colocación del conector al cable coaxial.

Fuente: Connect coaxial cable connectors. (2019). Disponible: <http://es.iiho.com/connect-coaxial-cable-connectors>.

5.12 Construcción del cable coaxial

En términos referenciales, las principales etapas en el desarrollo de fabricación de los cables coaxiales se pueden puntualizar en las siguientes: ⁽²⁹⁾

- . *Estirado conductor central*: El alambre de cobre o de acero recubierto de cobre (CCS) que formará el conductor interno se pasa por un proceso de estirado intermedio para reducir su diámetro hasta que queda con las dimensiones requeridas.
- . *Estirado conductor externo*: En forma paralela, el alambre de cobre o aluminio que formará la malla metálica se pasa por un proceso de estirado fino para reducir su diámetro hasta que queda con las dimensiones requeridas.
- . *Aislamiento*: El alambre de cobre o CCS ya reducido continúa hacia el proceso de aislamiento de acuerdo con las especificaciones eléctricas y físicas requeridas.
- . *Devanado*: El alambre de cobre o aluminio proveniente del proceso de estirado fino pasa a un proceso de devanado en el que se preparan los carretes que se usarán como alimentación para el proceso siguiente de trenzado.
- . *Trenzado*: El conductor, una vez aplicado el material aislante, pasa al proceso de trenzado para colocar el blindaje de una o más cintas aluminizadas y una o más mallas de hilos metálicos.
- . *Cubierta*: El conductor con el blindaje pasa al proceso de cubiertas mediante el cual se le aplica la cubierta exterior y, en su caso, se le agrega el mensajero.
- . *Medición*: El cable es sometido a mediciones de sus características estructurales física como eléctricas, para validar el cumplimiento de los estándares establecidos al respecto.
- . *Empacada*: El cable terminado se empaca en carrete, rollo o caja en las longitudes que los clientes requieren”.

En la figura No. 5.71 se muestra un diagrama de bloques, en el cual se representa la secuencia de las principales etapas del proceso de fabricación del cable coaxial

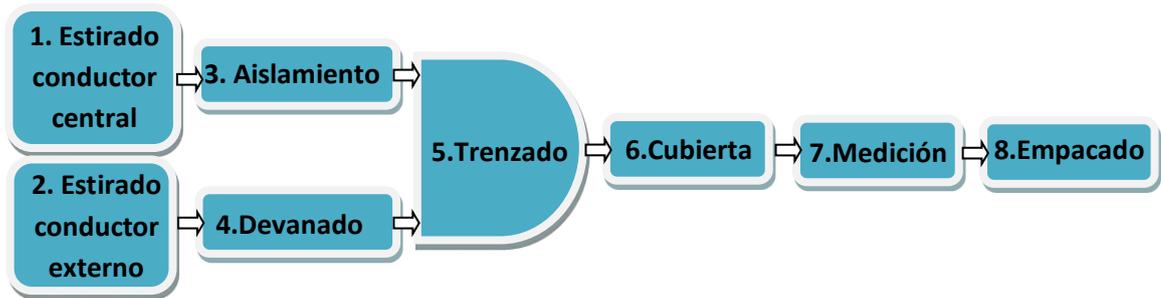


Figura No. 5.71 Diagrama de bloques del proceso básico de fabricación del cable coaxial.

En la figura No. 5.72 se ilustra una imagen de las instalaciones de una fábrica de cable coaxial, así como la de las bodegas de almacenamiento de los carretes que almacenan los diferentes tramos de dicho cable.





Figura No. 5.72 Instalaciones y bodega de una fábrica de cable coaxial
 Fuente: Portafolio de servicios. Golden Technologies SGS, Machinery. 2018.

Con el propósito de establecer un compendio de los principales cables coaxiales que se utilizan esencialmente para transportar señales RF (alta frecuencia), en la tabla No.5.9 se relacionan estos cables, indicando sus características estructurales y eléctricas básicas.

Tipo	Impedancia (Ω)	Núcleo mm	Dieléctrico		Diámetro mm	Trenzado	Velocidad
			Tipo	mm			
RG-6/U	75	1.0	Sólido PE	4.7	8.4	doble	0.75
RG-8/U	50	2.17	Sólido PE	7.2	10.3		
RG-9/U	51		Sólido PE		10.7		
RG-11/U	75	1.63	Sólido PE	7.2	10.5		0.66
RG-58	50	0.9	Sólido PE	2.9	5.0	Simple	0.66
RG-59	75	0.81	Sólido PE	3.7	6.1	Simple	0.66

RG-62/U	92		Sólido PE		6.1	Simple	0.84
RG-62A	93		ASP		6.1	Simple	

Tabla No. 5.9 Características básicas de los cables coaxiales más utilizados para señales RF.

Fuente: Cortés, J. León, . Escobar, F., *Cable Coaxial*, Universidad de Cartagena, 2017, p.12.

5.13 Avances tecnológicos en los cables coaxiales

Con anterioridad a la utilización masiva de las redes de fibra óptica (terrestres como submarinas) y de los diferentes servicios y cubrimiento que prestan las redes inalámbricas (terrestres como satelitales), el cable coaxial era uno de los medios de transmisión más empleados en las comunicaciones, alcanzando capacidades de más de 10.000 canales de voz, para el caso de sistemas de telefonía análoga basados en la técnica de multiplexación por división de frecuencia FDM (*frequency division Multiplexing*) y la transmisión digital de más de 7.000 canales de 64 bps, basado en la técnica de multiplexación por división de tiempo TDM (*Time division Multiplexing*).^{(30), (31)}

Debido al auge de la fibra óptica y de los sistemas de radiocomunicaciones en todas sus manifestaciones, la industria del cable coaxial se ha alertado al respecto, buscando que su producto no salga del mercado de las instalaciones de las diversas y grandes redes de comunicaciones. Recientemente se ha desarrollado una nueva técnica en la construcción del cable coaxial cambiando la malla de cobre exterior por una capa de *nanotubos de carbono*, los cuales se adhieren químicamente al cable aislante, ahorrándose por lo menos un 97 de la masa de la malla original, haciéndolo más resistente, más liviano, delgado y flexible, así como permitiéndole transmitir señales más limpias y libres de interferencias. La impedancia característica de estos cables coaxiales es esencialmente de 50 ohmios. A este tipo de cable coaxial se le conoce como CNT (*Carbon nanotube Technology*). En la figura No. 5.73 se muestra el terminal de un cable coaxial CNT, la malla de *nanotubos de carbono* y un tramo del mismo.

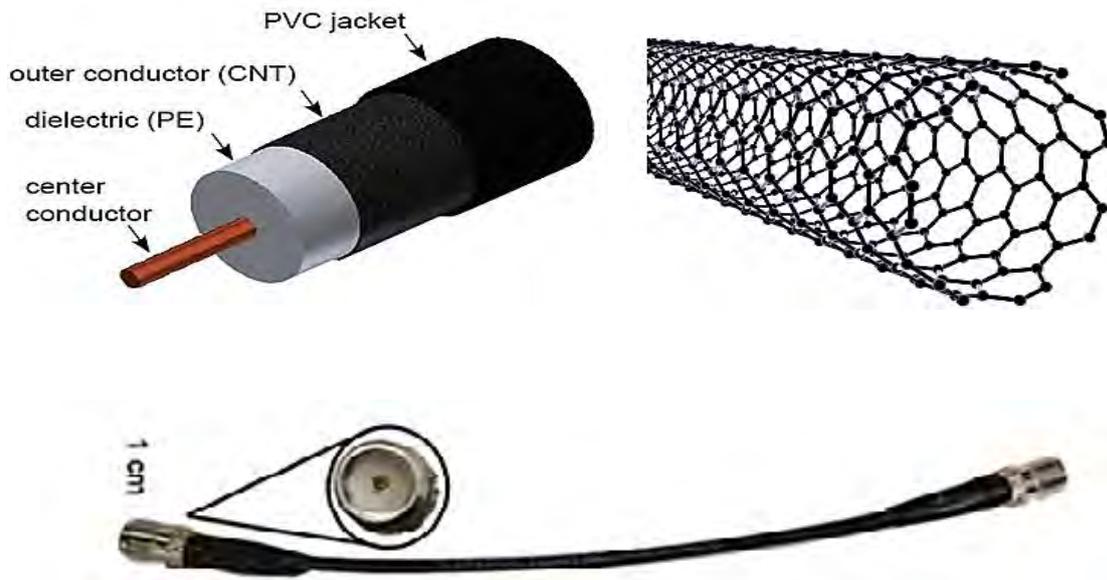


Figura No. 5.73 Cable coaxial CNT

Fuente: Harvey, S. *Carbon nanotube Technology Promises a Revolution in Cabling*, Advanced Development Group, 2018, p. 2

Material En la tabla No. 5.10 se relacionan algunas características técnicas del CNT, de manera comparativa con las de otros materiales.

Fuerzas mecánicas			
Material / Características	CNT	Acero	Aluminio
Módulo Yung (TPa)	0,8 a 1.4	0.3	0.7
Fuerza de tensión (GPa)	63	2	0.3
Densidad (g/cm ³)	1.4	8	2.7
Propiedades Eléctricas			

Material / Característica	CNT	Cobre	Plata
Resistividad (uohm.m)	1	17	1.55
Propiedades Térmicas			
Material / Característica	CNT	Diamante	
Conductividad térmica (W mK)	3.000	2.000	

Tabla No. 5.10 Características técnicas de CNT y de otros materiales.

Fuente: TE Connectivity, 2018.

Los nanotubos de carbón (CNT) fueron descubiertos por personal científico de la IBM y NEC de Japón, a comienzo de los años 1993, los cuales corresponden a tubos de dimensiones molecular de carbono grafitico.Un CNT se puede entender como una lámina de grafeno que consiste en una sustancia compuesta por carbono puro, con átomos dispuestos en un patrón regular hexagonal, similar al grafito. En la figura No. 5.74 se hace una representación esquemática una lámina de grafeno. ⁽³²⁾

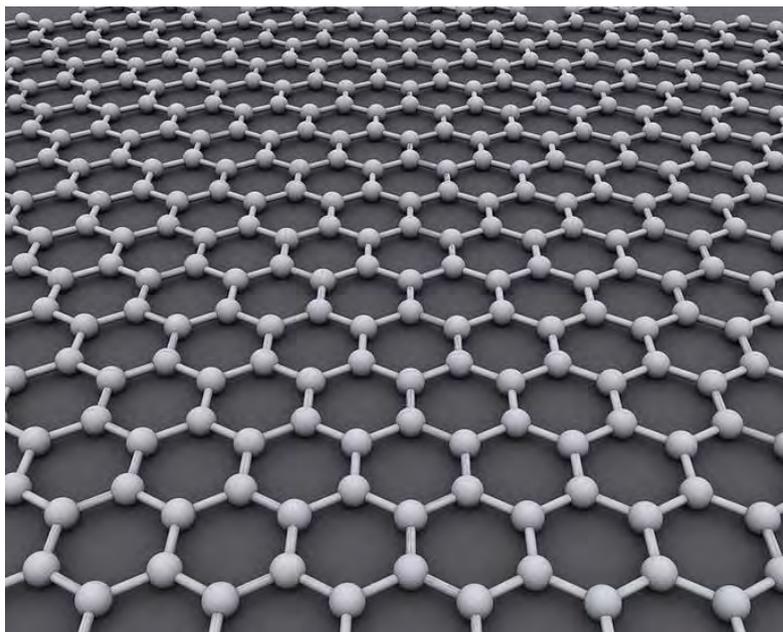


Figura No. 5.74 Representación esquemática una lámina de grafeno.

Fuente: Chernova, T. / Murphy, F. / Galavotti, S. / Sun, X.M. / Powley, I. R. / Grosso, S. / Schinwald, A. / Zacarias-Cabeza, J. / Dudek, K. M. / Dinsdale, D. / et, al. (2018). "Long-fiber carbon nanotubes replicate asbestos-induced mesothelioma with disruption of the tumor suppressor gene *Cdkn2a (Ink4a/Arf)*". *Current Biology* **27**: 3302-3314.

doi:10.1016/j.cub.2018.09.007.

El grafeno es un material casi transparente. Una lámina de un átomo de espesor es unas 200 veces más resistente que el acero actual más fuerte, siendo su densidad más o menos la misma que la de la fibra de carbono, y unas cinco veces más ligero que el aluminio. Siendo su densidad de 0.54 g cm^3 . El grafeno ha sido considerado como el material del futuro por las propiedades muy especiales que ofrece.

Los tipos de nanotubos de carbono (CNT) dependen de la cantidad de láminas que conforman el nanotubo de forma cilíndrica. Un nanotubo de carbono de una sola lámina se denomina S NT (Single alled Nano ubes) y los de láminas múltiples M NT (Multi alled NanoTubes).

Entre las principales propiedades que ofrecen los nanotubos de carbono, se pueden destacar las siguientes: ⁽³³⁾

- Soportan intensidades altas de corriente.
- Poseen una conductividad térmica específica comparable con la de los diamantes.
- Ofrecen capacidad de misión de luz en la banda de comunicación óptica.
- Permiten almacenamiento de hidrogeno.
- Brindan la capacidad de soporte de catalizador de metal.
- Los S NT presentan propiedades de semiconductores y metales, lo que les permiten servir como dispositivos no electrónicos como: pantallas de emisión de campo, almacenamiento de energía y dispositivos de nanosensor.

En la figura No. 5.75 se ilustra unos nanotubos de carbono (CNT) de una sola lámina (S NT) y otro de doble lámina (D NT), con sus respectivas dimensiones.

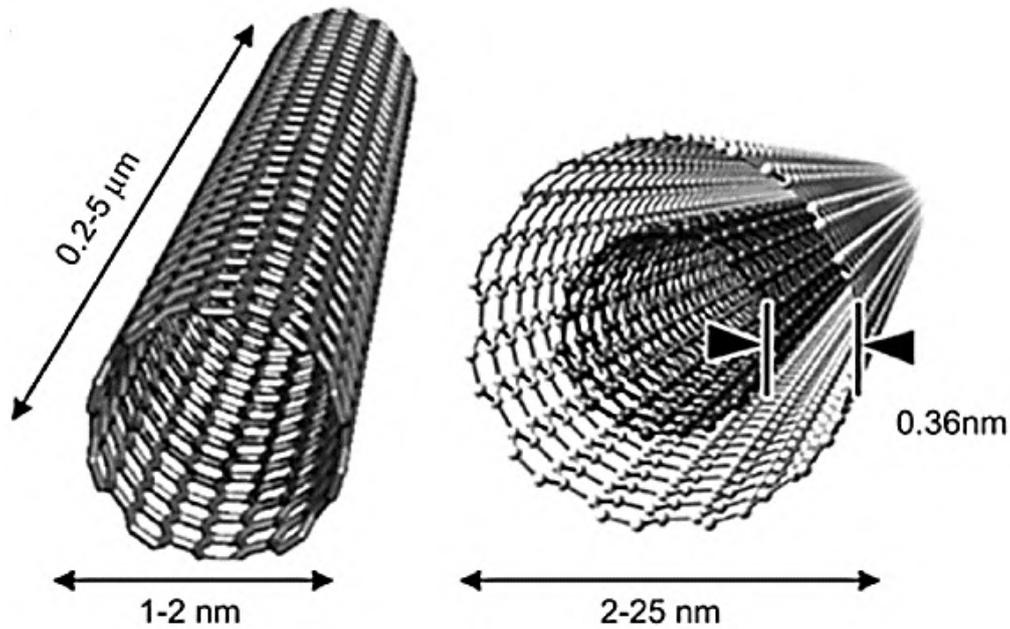


Figura No. 5.75 Nanotubos de carbono S NT y D NT

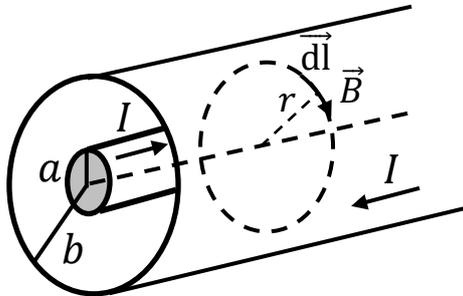
Fuente: Catálogo: *Te Global Market Applications*, Nanotubes Future Markets, 2018, p. 14.

Los nanotubos y nanofibras de carbono presentan propiedades morfológicas, mecánicas y electrónicas excepcionales, que permiten su aplicación en muchos campos que van desde una amplia gama de componentes electrónicos, al reforzamiento de materiales (conductividad eléctrica y resistencia mecánica), al almacenamiento de gases, sobre todo y de manera sobresaliente el hidrógeno y a la utilización como soportes catalíticos ⁽³⁴⁾

Ejemplo No. 5.15

Determinar el comportamiento del campo magnético, dentro de los dos conductores, de un cable coaxial, por el cual circula una corriente que alimenta a una carga a través de uno de los conductores y se retorna por el otro. El dieléctrico es de aire,

Solución:



Aplicando la ley de Ampere:

$$\int_0^l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$\int_0^l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_0^l B dl \cos 0 = \int_0^l B dl = B \int_0^l dl \mu_0 I = B l_0^{2\pi r} = 2\pi r B = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad \rightarrow \quad \vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \hat{a}_\phi \quad (\text{Wb/m}^2)$$

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

CAPÍTULO 5

Preguntas:

1. Cuál es la estructura básica de una línea de transmisión de tipo coaxial . Describa cada uno de sus componentes indicando el tipo genérico de material con que debe ser construido y su función principal.
2. Cuáles son las características técnicas esenciales de los cables coaxiales . Identifique el significado de cada una de ellas.
3. ¿Qué tipos de factores son los que esencialmente inciden en el grado de atenuación, que le presentan los cables coaxiales a las señales que se transfieren a través de los mismos . Determinar el porqué.
4. En la figura No. 3.4 se exponen las curvas de atenuación de algunos de los diferentes tipos de cables coaxiales, en función de la frecuencia de operación. ¿Qué puede inferir del comportamiento de estas
5. En la figura No. 3.6 se ilustra el corte transversal de un cable coaxial, en donde se indican la presencia, tanto, del campo eléctrico como la intensidad magnética que se presenta dentro del cable, cuando se le aplica un potencial eléctrico entre sus conductores y fluye por el mismo una corriente. Explicar el porqué del comportamiento de esos campos de esa manera.
6. En la tabla No. 3.3 se dispone de una información referencial sobre las principales características eléctricas y estructurales de los diferentes cables coaxiales. ¿En qué consiste el significado de cada una ellas .
7. Cuál es la característica estructural de los cables coaxiales que influye más significativamente en la capacidad de la potencia que los mismos pueden resistir
8. ¿A qué se deben las denominadas pérdidas por retorno estructural (SRL: *Structural Return Loss*) en los cables coaxiales . Cómo se pueden reducir .
9. Se considera que el cable coaxial se puede usar en todas aquellas aplicaciones que se requiera transmitir señales eléctricas a alta velocidad y que sea protegidas de interferencias de otras señales espurias. Es por lo anterior que la gran mayoría de la utilización del cable coaxial está orientada a la transmisión de señales de información (análogas o digitales). Cuáles son las principales aplicaciones de esta utilización .

10. Cuáles son los principales componentes que conforma los denominados sistemas de antenas comunitarias. Describa en que consiste cada uno de estos componentes e indique su función básica.
11. En la figura 3.22 se muestra la estructura básica de una instalación de unos sistemas de antenas comunitarias. Identificar sus componentes básicos y la función esencial de cada uno de ellos.
12. Por qué para radioenlaces con frecuencias relativamente altas especialmente de 2.5 GHz en adelante no es aconsejable la utilización de los cables coaxiales. Por cuál dispositivo es reemplazo.
13. Las guías de onda tienen un ancho de banda en el cuál es posible su utilización. Cómo se le denominan a los límites de esta banda y cuál es la razón de qué estas limitantes se presenten.
14. En qué consiste las denominadas redes de transmisión de datos y cuál es su función básica.
15. Cuáles son los tipos de cables coaxiales que mas demanda tienen en los tendidos de las redes de transmisión de datos. Por qué se atizan en estas redes.
16. Una de las topologías más comunes para redes de datos de cubrimiento reducido es la denominada *Bus*. Por qué se utiliza el cable coaxial en estos tendidos. Cuál es el tipo de cable coaxial que más se recomienda en estos tendidos.
17. En los extremos del cable coaxial en los tendidos de topología *Bus* se colocan unos tapones terminales (conectores consumidores de energía). Cuál es la razón de la utilización de estos tapones.
18. Uno de los criterios que se tiene para clasificar las redes de transmisión de datos es el área de su cobertura. Cuáles son los principales tipos de redes de transmisión de datos según su cobertura, y que tipo de cable coaxial se utilizan frecuentemente en cada una de estos tipos de redes.
19. Qué tipos de cables coaxiales se utilizan frecuentemente en los tendidos de las redes de telefónicas.
20. En los tendidos subterráneos cuál es el tipo de cable coaxial que preferiblemente se utiliza. Indique las principales características de este tipo de cable coaxial.
21. En los tendidos submarinos cuál es el tipo de cable coaxial que preferiblemente se utiliza. Indique las principales características de este tipo de cable coaxial.

22. En las redes CAT donde se utiliza tanto cable coaxial como fibra óptica se denominan CAT HFC (*ybrid iber Coax*). ¿qué tipo de cable coaxial se utilizan en este tipo de redes .

23. En la figura. No. 3.50 se muestra la arquitectura típica de una red CAT HFC. (*ybrid iber Coax*). Cuáles son los tramos donde se está utilizando cable coaxial .

24. Tabla No. 3.9 se relacionan las velocidades binarias de bajada como de subida, de acuerdo al ancho de banda y modulación empleada, en los sistemas CAT HFC. Cuál es la tendencia que experimentan estas velocidades .

25. Cuáles son los principales dispositivos pasivos que se requieren en el tendido de las redes CAT , además del cable empleado

26. Una de las características esenciales de los acopladores, empleados en las redes CAT , es el aislamiento. En qué consiste esta característica y cómo se puede calcular .

27. Otras de las características que se deben tener en cuenta en la utilización de acopladores en las redes CAT son: el factor de acoplamiento, la directividad y las pérdidas por inserción. En qué consisten estas característica y cómo se pueden calcular .

28. Cuáles son y en qué consisten los principales servicios complementarios de las redes CAT

29. ¿qué se entiende por red de acceso a los sistemas CAT Describa su estructura y funcionamiento.

30. En la figura. No. 3.60 se muestra la estructura básica del acceso a una red CAT . Cuáles son sus principales componentes y cómo se relacionan entre sí .

31. En qué consiste las redes de circuitos cerrados de T Cuáles son sus principales componentes que las conforman . Cuál es el tipo de cable coaxial más utilizado en este tipo de redes .

32. En la figura No. 3.65 se hace una representación de un esquema de la estructura básica una red de un sistema integrado de CCT . Describa el funcionamiento de este tipo de redes.

33. En la figura No. 3.68 se hace una representación de un esquema de la estructura básica de un centro de producción de las redes de distribución de

señal de televisión personalizada. Describa el funcionamiento de este centro de producción.

34. Para los diferentes instalaciones y conexiones donde se utiliza cable coaxial en los respectivos tendidos se recomienda la utilización de determinado tipo de cable coaxial. Cuáles son estos tipos de cables .

35. En la figura No. 3.71 se representa el diagrama de bloques del proceso básico de fabricación del cable coaxial. En qué consiste cada una de estas etapas y cuál es el resultado final que se logra en cada una de ellas .

36. Dentro de los avances tecnológicos en los cables coaxiales se encuentra el desarrollo del cable coaxial denominado como CNT (*Carbon nanotube Technology*). En qué consiste la tecnología que se le aplica a este tipo de cable .

37. Al final del numeral 3.13 se relacionan las principales propiedades que ofrecen los nanotubos de carbono. Explique las causas del porqué estos nanotubos brindan cada una de estas propiedades.

Ejercicios:

1. Deducir la expresión indicada en la ecuación 3.1., la cual corresponde a la impedancia característica de una línea de transmisión de tipo coaxial.

2. Determinar la relación de los diámetros de los conductores que debe tener un cable coaxial: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón, para que su impedancia característica sea de 75 ohmios.

3. Para el caso del cable coaxial del ejercicio inmediatamente anterior, determinar la conductancia distribuida, tanto para: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón.

4. Para el caso del cable coaxial de los ejercicios inmediatamente anteriores determinar la capacitancia distribuida, tanto para: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón.

5. La capacitancia total de un cable coaxial 890 metros de dieléctrico de aire es de $110 \eta F$, determinar la relación entre los radios de los conductores: externo e interno.

6. Para el caso del cable coaxial del ejercicio 1, determinar la inductancia distribuida, tanto para: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón.

7. Para el caso del cable coaxial del ejercicio 1, determinar la velocidad de propagación de la señal, tanto para: a.) con dieléctrico de aire y b.) con dieléctrico de teflón.

8. A un cable coaxial RG-8U, se le aplica un voltaje de 60 voltios entre el conductor interno y el conductor externo. Determinar el potencial eléctrico (voltaje) en el punto medio del área transversal del mismo.

Determinar la relación que debe existir entre los radios de un cable
19. coaxial, para que pueda resistir un voltaje de 100 voltios e indicar que tipos de cable podrían cumplir con este voltaje.

Determinar la potencia que transmiten los cables coaxiales identificados
19. en el ejercicio inmediatamente anterior si se le aplica un voltaje de 100 voltios entre el conductor interno y el conductor externo.

11. Utilizando las curvas contenidas en los anexos correspondientes, para el cable coaxial de cobre corrugado, con dieléctrico de espuma de polietileno, de 50 ohmios y un diámetro 3/8 de pulgada, calcular para una frecuencia de operación de 500 MHz:

a.) Las pérdidas (atenuación) para un tendido de 80 metros.

b.) La potencia transmisible que puede resistir.

12. Determinar la potencia con que llega la señal a los terminales de entrada del sistema de radiación (antena) de una *estación Radio Base*, si la potencia de salida del transmisor, del canal correspondiente a 480 MHz, es de 25 W y el cable es un LMR 400, con longitud de 400 pies entre el transmisor y la antenna, teniendo de presente que existe un perfecto acople de impedancias, entre la conexión del transmisor y el cable y de esta con los terminales de la antenna.

13. Si la potencia de la señal a los terminales de entrada de la antenna de una estación transmisora es de 5.2 W, para una frecuencia de 482.5 MHz, y el cable coaxial es de tipo LMR 400, con una longitud de 120 metros, determinar la potencia con que sale la señal del transmisor.

14. Si la potencia de salida de un acoplador direccional es de 30 microvatios y las pérdidas por inserción es de 0.458, determinar la intensidad de la señal a la entrada del acoplador.

15. Una red de CAT 5, al llegar al punto de un edificio la señal se divide en varios trayectos, mediante cable coaxial (uno por cada usuario), a través de un divisor

(*splitter*). Supóngase que el divisor no genera pérdidas y que la señal entrante se distribuye uniformemente entre los diferentes cables coaxiales de salida.

a.) Determinar cuántos decibelios cae la señal, en cada una de las salidas del *splitter*.

b.) Calcular la potencia en dB_w en cada una de sus salidas del *splitter*.

c.) Si la potencia de entrada es de 80 dBm , cuál la potencia de salida para los divisores uniformes de 2 y de 3 salidas, en dBm .

16. Una red de CAT , al llegar al punto de un vecindario la señal se divide en varios trayectos, mediante cable coaxial (uno por cada usuario), a través de un divisor (*splitter*). Supóngase que el divisor no genera pérdidas y que la señal entrante se distribuye uniformemente entre los diferentes cables coaxiales de salida. Calcular, la potencia de salida para los divisores uniformes de 2 y de 3 salidas, en dBm , si la potencia de entrada es de 92 dBm

17. Determinar la potencia de salida de un acoplador direccional si la intensidad de una señal a la entrada es de 250 microvatios y las pérdidas por inserción es de 0.0436 .

18. En la figura No. 5.75 se hace una representación de la estructura básica de la red de un sistema de antena comunitaria residencial, describir en forma detallada su composición y funcionamiento.

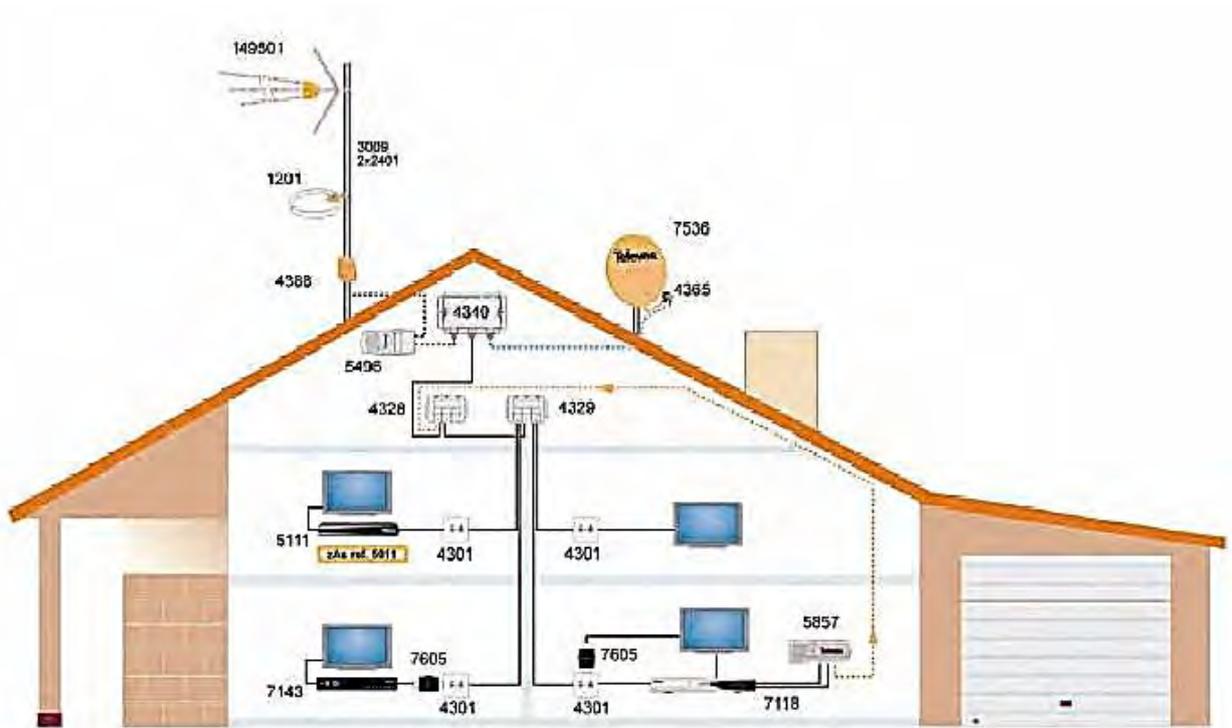


Fig. No. 5.75. Estructura básica de la red de un sistema de antena comunitaria residencial.

Fuente: Catálogo Montajes Eléctricos, IluMeners, 2018.

19. En la figura No. 5.76 se muestra la estructura de un S NT, que puede ser construido enrollando una lámina de grafito previendo que coincidan dos sitios cristalográficamente equivalentes de la red hexagonal. Determinar los tres tipos de nanotubos que se pueden presentar, dependiendo de la forma de enrollarse.
(35)

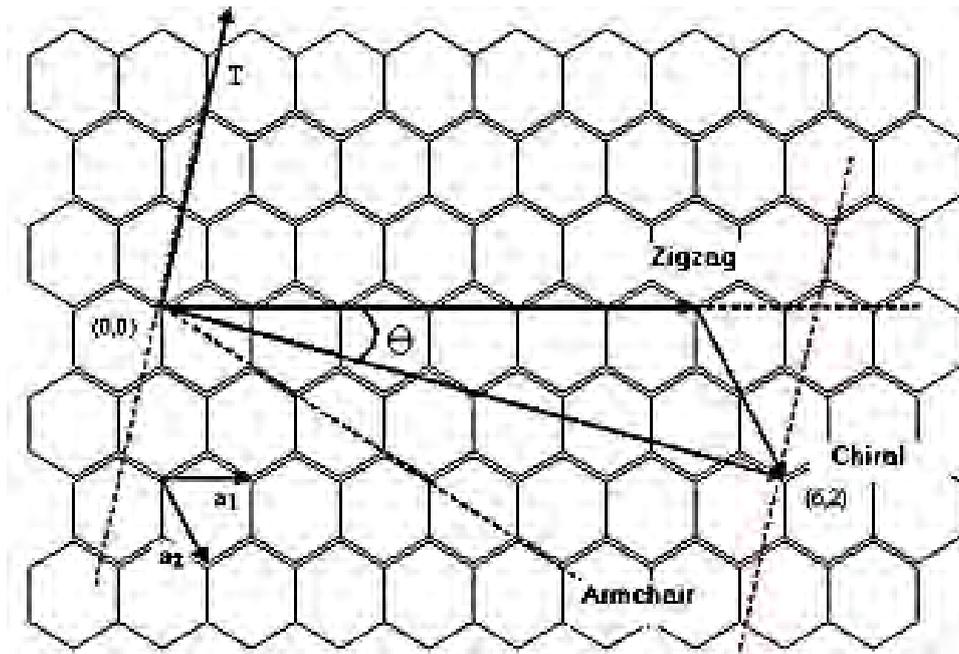


Figura No. 5.76 Estructura de un S NT

Fuente: Idena, ., Amiyama, ., Nomura, M., "Possibility of the production of Carbon nanotubes from heavy hydrocarbons". Fuel Process. Technol. 89, 449-454, 2017.

20. Para el cable coaxial indicado en el ejemplo No. 5.15, determinar la corriente que circula si la intensidad de campo magnético en la superficie del radio interior de 10 mm es de 50 mT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 5

(1) *Características de cables coaxiales, normas, calibres, composiciones*, T C, 2017.

(2) Bastidas, M. H. Patiño B. M. ngel C. G. I., *Tec nical-Tec nical-parameter calculation parameter calculation model for underground lo - model for underground lo po er electrical lines and indoor installations used in telecommunications*, Ingeniería e Investigación , Universidad Nacional de Colombia, 2017 pp.123-125.

(3) urplers, P. alter, Th. Magnard,, P. Salathe, ., *C aracteri ing t e attenuation of coaxial and rectangular micro ave-frequency aveguides at cryogenic temperatures*, EPJ uantum Thechnology (2019).Disponible: <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-017-0059-7>

(4) Bur hat, S. *Coaxial - ield robe for ig - o er Micro ave Measurement*. (2019)..

Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1132995>

(5) Mártony, J., *Antenas receptoras para la TV digital*, CUE Ltda. 2017, pp. 40-41.

(6) Glen E. C., *Specific coax types ere developed for t e t ernet standard* Mi e Meyers CompTIA Net or Certification Passport , by, edited by Christopher A. Crayton, McGra -Hill, 3rd Edition, 2017, pp. 31-32.

(7) Televisión Digital Terrestre. (2019). Disponible:

<http://televisiondigitalterrestretdt.com/InformacionTecnica/InstalacionColectiva.htm>.

(8) Antena Hogar. (2019). Disponible: <http://.vul.a.es/empresa/antena-hogar/714514.html>

(9) Manual *quipos de imagen*, CFGM Equipos Electrónicos. 2018.

(10) Escudero Pascal, A. Torres, J. F. Pietrosevoli, E., *Antenas y Cables*, Tricalcar, 2017.

(11) Estudios Sistemas Teleproceso. (2020). Disponible:

.uazuay.edu.ec/estudios-sistemas-teleproceso...1-cabcoax.htm.

- (12) Tipos de cable coaxial. (2019). Disponible:
<http://thegeniuszone.blogspot.com.co/2013/09/tipos-de-cable-coaxial.html>.
- (13) Meyers, M., *All-in-one Networking Certification Exam Guide*, 4ta Ed., McGraw-Hill, 2017. pp. 79-80
- (14) Escobar Cristiani, M. J., *Telefonía y Conmutación*, Red Tercer Milenio, 2017, pp. 13-14.
- (15) Historia del cable coaxial. (2020). Disponible:
<http://tecnocicmadrid.blogspot.com.co/2019/05/historia-del-cable-coaxial.html>.
- (16) Cables submarinos. (2019). Disponible:
<http://almadeherrero.blogspot.com.co/2014/10/cables-submarinos.html>.
- (17) Romero Argote, O. *Desarrollo de una herramienta software de gestión monitorización para una red de datos de cable CATV*, Doctorado en Gestión, Universidad EAN, 2016, pp. 8-9.
- (18) Catálogo: *Elementos para la instalación de redes de SCATV*, Téleves, 2017, pp. 31-33.
- (19) *Electronics Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*. Avionics Department of the Naval Air Warfare Center Weapons Division, 2016.
- (20) Ejemplos CATV. (2019). Disponible:
personal.us.es/jluque/tc/Problemas/PTC0001-12.pdf
- (21) Sistemas de televisión por cable. (2019). Disponible:
<http://es.slideshare.net/arlmarvila/sistema-televisioncable-50986478>, pp 11-12.
- (22) Sistemas CCTV (2019). Disponible:
<http://www.clarochile.cl/portal/cl/personas/todo-claro/02-arma-tu-play>.
- (23) Catálogo. *Digital CCTV Camera and Recording Systems*, CCTV Surveillance, 2018.
- (24) *Sistemas integrados de CCTV*, Universidad de Zaragoza, 2019.
- (25) Nueva solución smartuptv para hoteles. (2019). Disponible:

<http://www.tecnohotelnews.com> 2014 11 nueva-solucion-smartuptv-para-hoteles-2.

(26) Catálogo *Canales de televisión personalizados*, Neotimedia, 2018.

(27) Definición de cable coaxial. (2019). Disponible: <http://definicion.de/cable-coaxial/> ixzz46fP90zG .

(28) Connect coaxial cable. (2019). Disponible: <http://es.iiho.com/connect-coaxial-cable-connectors>.

(29) Fabricación cable coaxial. (2019). Disponible: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5378009&fecha=05/01/2016

(30) Harvey, S. *Carbon nanotube Technology promises a Revolution in Cabling*, Advanced Development Group, 2016, pp. 2 -3.

(31) Clifton, R. Rich, B. G., *Advances in imported coaxial cable technology*, IEEE, 06 agosto 2012.

(32) Chernova, T. Murphy, F. Galavotti, S. Sun, M. Pooley, I. R. Grosso, S. Schinald, A. Acarias-Cabeza, J. Dudek, M. Dinsdale, D. et al. (2019). *Long-fiber carbon nanotubes replicate asbestos-induced mesothelioma and disruption of the tumor suppressor gene Cdkn1a in Arf*. *Current Biology* 27: 3302-3314. doi:10.1016/j.cub.2018.09.007.

(33) Catálogo: *Global Market Applications*, Nanotubes Future Markets, 2018.

(34) Gadiou R. Saadallah S-E. Piquero T. David P. Parmentier J. Guterl C, *Influence of textural properties on the adsorption of hydrogen on ordered nanostructured carbons*. *Microporous and Mesoporous Materials* 79, 121-128. 2016.

(35) Idena, Y. Miyama, Y. Nomura, M., *Possibility of the production of Carbon nanotubes from heavy hydrocarbons*. *Fuel Process. Technol.* 89, 449-454, 2017.

CAPÍTULO 6

GUÍAS DE ONDAS

6.1 Introducción

Uno de los medios de tipo guiado para transmitir señales electromagnéticas son los denominados *uías de ndas*. Su aparición se remonta al año 1893 cuando, el físico y matemático británico, galardonado con el Premio Nobel de Física en 1906 por sus aportes en relación a la conducción de la electricidad a través de los gases, propuso la propagación de las ondas electromagnéticas dentro de una cavidad metálica cilíndrica, cuya verificación fue realizada en el siguiente año, por el también físico británico Oliver Joseph Lodge

A través de estos medios de transmisión se propagan ondas electromagnéticas cuya longitud de onda se encuentran en el rango de microondas, supliendo la utilización de las líneas de transmisión (cable coaxial, par trenzado, entre otros), ya que para estas frecuencias, estos últimos, presentan un alto grado de atenuación. Es por esta razón que la interconexión entre los equipos y las antenas de los enlaces en microondas, ya sean terrestres o satelitales, en vez de cable coaxial se emplea *uías de ndas*.

6.2 Concepto de guías de ondas

En esencia una *uía de ndas* es un tubo conductor hueco, que generalmente es de sección transversal rectangular, o circular o elíptica que guía ondas electromagnéticas. Las paredes conductoras de la *uía de ndas* confinan la onda al interior por reflexión, ya que estas no pueden atravesar superficies conductoras sino que son reflejadas, y de esta forma se propagan en forma de zig-zag.

Los materiales conductivos que comúnmente se emplean en las guías de ondas son: aluminio, latón o bronce. La parte interna de la *uía de ndas* está rellena de un dieléctrico, el cual por lo general es aire, lo que reduce el costo y el peso de la misma, y además aumenta la velocidad de propagación, debido a que su constante dieléctrica es igual a la unidad, situación que no se presenta en otro tipo de dieléctrico, donde la constante dieléctrica es mayor que la unidad, lo que genera difracción en el recorrido de la onda, reduciendo la velocidad de propagación.⁽¹⁾

6.3 Modos de Propagación

Un modo de propagación, de las ondas electromagnéticas, es la manera en que la energía se propaga a lo largo del medio en las cuales estas hacen presencia. La presencia (*polarización*) de los dos componentes de las ondas electromagnéticas (campo eléctrico y campo magnético) se manifiestan en planos diferentes, pero su propagación se realiza en la misma dirección. Dependiendo de cuantas coordenadas depende la polarización de estos componentes, en cada uno de sus correspondientes planos, se tipifican los modos de propagación.

Los modos de propagación dependen, fundamentalmente, de la longitud de onda, de la polarización de la onda y de las dimensiones de la guía. A continuación, se indican los modos de propagación más referenciados: ⁽²⁾

- *Modo T M* (Transverse Electro-Magnetic): corresponde a aquella propagación donde la polarización de cada uno de los dos componentes depende solamente de una coordenada. En este caso la polarización de estos componentes se realiza en planos que son perpendiculares entre sí. Este modo de propagación se presenta cuando las ondas electromagnéticas se propagan en medios ilimitados, como el espacio libre (vacío), y se dice que estas ondas son transversales. En el modo TEM sólo tienen componentes de campo transversales a la dirección de propagación. ($E_z = 0; H_z = 0$), es decir no existe ni componente eléctrico ni componente magnético en la dirección de propagación.

En la figura No 6.1, se muestra el modo TEM de propagación de una onda electromagnética, en el espacio libre. Este modo de propagación no se presenta en medios de transmisión guiados, como es el caso en las guías de ondas.

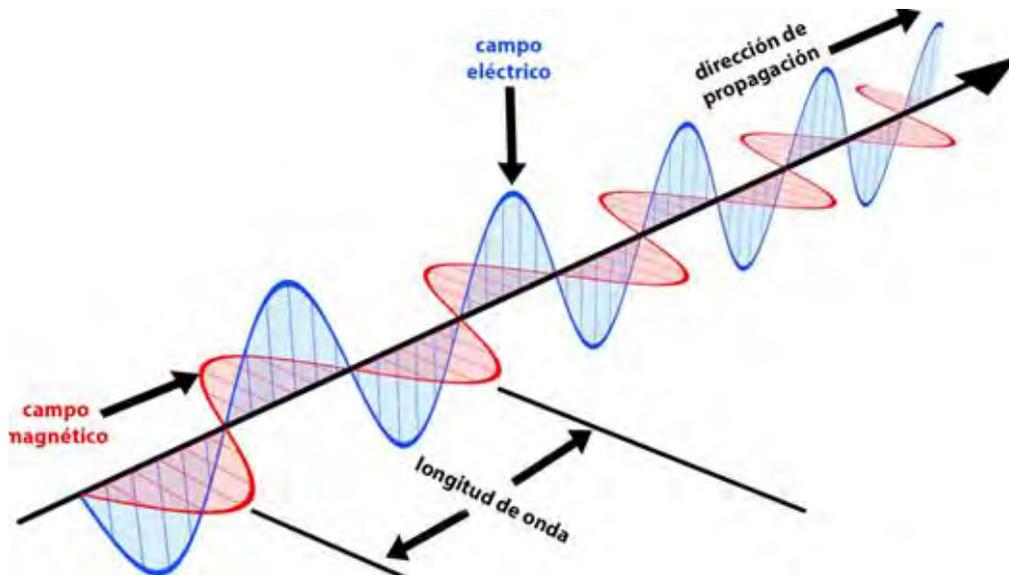


Figura No. 6.1 Propagación modo TEM, de los componentes de las ondas electromagnéticas en el espacio libre

Fuente: Respuestas lxxxix: por qué la velocidad de la luz es la que es (2019).
 Disponible:
<https://cienciadesofa.com/2018/02/respuestas-lxxxix-por-que-la-velocidad-de-la-luz-es-la-que-es.html>

- **Modo T (Transverse Electric):** corresponde a aquella propagación donde sólo la polarización del campo eléctrico es perpendicular (transversal) a la dirección de la propagación ($E_z = 0; H_z \neq 0$), es decir no existe componente eléctrico en la dirección de propagación.
- **Modo TM (Transverse Magnetic):** corresponde a aquella propagación donde sólo la polarización del campo magnético es perpendicular (transversal) a la dirección de la propagación ($E_z \neq 0; H_z = 0$), es decir no existe componente magnético en la dirección de la propagación.

El modo TE como TM, se presentan cuando las ondas electromagnéticas se propagan en medios limitados, como es el caso, entre otros, en las guías de ondas. Esto se debe a la existencia de condiciones de contorno que imponen las fronteras de los medios limitados, en los cuales la polarización de uno de los dos campos solamente es transversal a la dirección de propagación de la onda.

En la figura No. 6.2, se ilustra la dirección de polarización que se presenta en cada uno de los componentes de las ondas electromagnéticas, para el caso de los tres modos de propagación mencionados anteriormente.

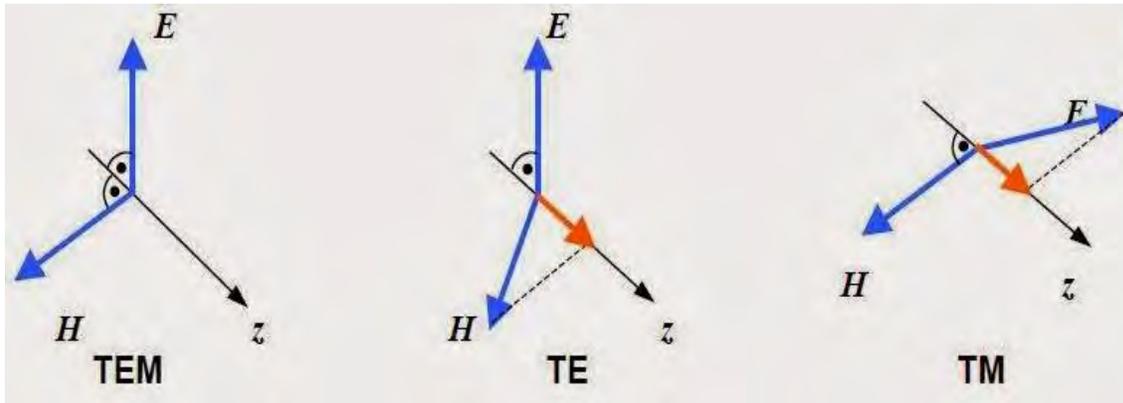


Figura No.6.2 Diagramas fasoriales de los principales modos de propagación de las ondas electromagnéticas.

Fuente: Guías de ondas electromagnéticas. (2019). Disponible: [http:// grupo5-guiadeondas.blogspot.com](http://grupo5-guiadeondas.blogspot.com) 2018 11 mododominante.html

En las guías de onda las señales electromagnéticas viajan en diferentes modos de propagación. Se afirma que, en teoría, existen infinitos modos de propagación, dependiendo de la longitud de onda, de su polarización, del tipo y dimensiones de la guía. ⁽³⁾

Cada modo tiene una frecuencia crítica (de corte), para cada tipo y dimensionamiento de guía de onda, que por debajo de ella no se propaga. A este modo se le conoce como *modo dominante*, el cual será el único modo que se propaga, siempre y cuando, sí la frecuencia es mayor a la primera frecuencia de corte, pero además sea menor a la frecuencia de corte del segundo modo.

Es frecuente que el dimensionamiento de las guías de ondas se seleccione, de tal manera, que sólo el modo dominante sea el que se propague por la guía. La propagación de un solo modo hace que los elementos de excitación de la guía sean más fáciles de calcular y su operación es más simple.

En la parte de éste capítulo correspondiente a los tipos de guías de onda, se indican los diferentes modos de propagación para cada uno de estos tipos de guías.

6.4 Tipos de guías de ondas

Existe una amplia gama de tipos de *guías de ondas*, cuya tipificación depende de su estructura física y o de las propiedades del medio que las conforman. A continuación, se relacionan las más referenciadas: ⁽⁴⁾

- *guías de ondas de estructura simple*: corresponden a aquellas conformadas por ductos metálicos, cuyo interior es aire, y su sección transversal más conocida es: rectangular, circular o elíptica.
- *guías de ondas de a* : son a aquellas conformadas por una sucesión de lentes o espejos capaces de guiar las ondas electromagnéticas.
- *guías de ondas acanaladas*: son guías de onda rectangulares que contienen resaltes conductores a lo largo de su interior de una de sus paredes de mayor dimensión. Pueden ser guiadas en (vertical) o guiadas en H (horizontal).
- *guías de ondas tabicadas*: están conformadas por dos cilindros metálicos coaxiales unidos en toda su longitud por un tabique radial metálico.
- *guías de ondas de carga periódica*: son aquellas guías en las que la propagación de las ondas electromagnéticas está determinada por las variaciones regularmente espaciadas de las propiedades del tipo y dimensiones del medio o de las superficies de su contorno.
- *guías de ondas dieléctricas*: están conformadas totalmente por materiales dieléctricos, sin ninguna pared conductora, como es el caso de la fibra óptica.

Las guías de ondas que presentan mayor utilización son las denominadas de estructura simple: *rectangulares, circulares y elípticas*. En los numerales siguiente se describen las principales características estructurales y funcionales de cada uno de estos tipos de guías de ondas.

6.5 Características de las guías de ondas rectangulares

6.5.1 Estructura de la guía de ondas rectangular

Estas guías de ondas presentan una estructura rectangular hueca (o rellena con un dieléctrico), donde el ancho tiene una dimensión a y la altura b . Por lo general el ancho es mayor que la altura. Es una de las guías de ondas más utilizadas. En la figura No. 6.3, se ilustra la característica estructura de una guía de ondas rectangular y una imagen de la misma.

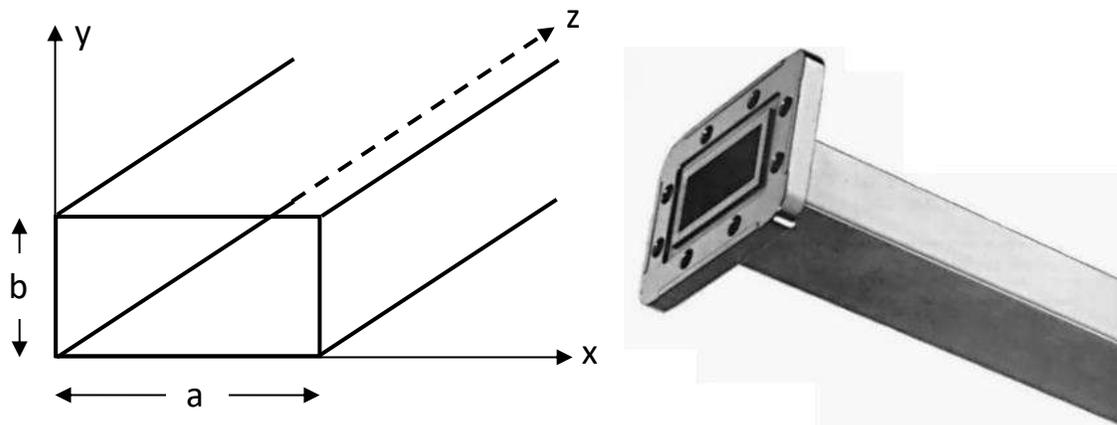


Figura No. 6.3 Estructura e imagen básica de una guía de onda rectangular.

6.5.2 Modos de propagación en las guías de ondas rectangulares

En la figura No. 6.4, se ilustra la forma en que se propagan los campos electromagnéticos dentro de una guía de ondas rectangular. El recorrido en zigzag corresponde a la dirección de propagación de la onda. Como se puede apreciar la polarización de las líneas del campo eléctrico es perpendicular a la dirección de propagación y la del campo magnético (intensidad magnética), es perpendicular a la del campo eléctrico.

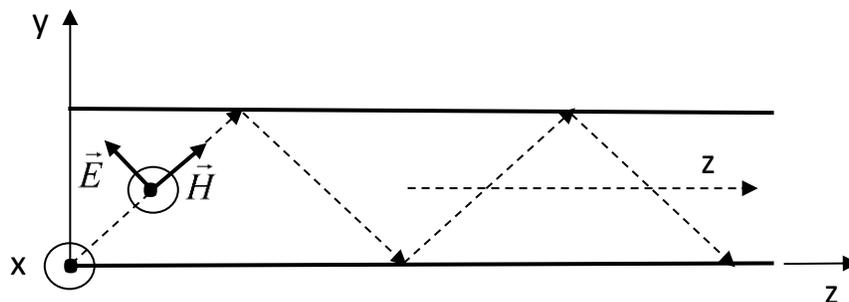


Figura No. 6.4 Propagación de los campos electromagnéticos en una guía de ondas rectangular

Como se mencionó anteriormente, en una guía de ondas, cualquiera que sea su tipo, solamente soporta los modos de propagación TE y TM pero no TEM, ya que solamente, en medios guiados, es transversal el campo eléctrico o el campo magnético pero nunca ambos a la vez. ⁽⁵⁾

6.5.2.1 Modo de propagación TE_{mn} en las guías de ondas rectangulares

En una guía de ondas de tipo rectangular, los componentes tanto del *campo eléctrico* como de la *intensidad magnética*, en todos los modos de propagación de tipo TE_{mn} , se relacionan en la ecuación 6.1.⁽⁶⁾

$$\langle 6.1 \rangle \text{ Modo } TE_{mn}$$

Componentes del Campo Eléctrico

$$E_x = E_{0x} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$
$$E_y = E_{0y} \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \quad , \quad E_z = 0$$

Componentes de la Intensidad Magnética

$$H_x = H_{0x} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

$$H_y = H_{0y} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

$$H_z = H_{0z} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

Donde: $m = 0, 1, 2, \dots$ y $n = 0, 1, 2, \dots$

m y n : no pueden ser cero simultáneamente

$\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \frac{2\pi}{v_g} \sqrt{f^2 - f_c^2}$: constante de fase de la onda en

la guía (rad./m).

$\lambda_g = v_g / \sqrt{f^2 - f_c^2} = \lambda / \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{1 - (f_c / f)^2}$: longitud de onda en la guía (m)

$v_g = c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$: velocidad de la onda en la guía (m/s).

λ : longitud de la onda en el dieléctrico de la guía (m).

f : frecuencia de la onda en el dieléctrico de la guía (de operación) (Hz).

f_c : frecuencia de corte de la guía (Hz).

ϵ_r : permitividad relativa del material interno (dieléctrico) de la guía.

μ_r : permitividad relativa del material interno (dieléctrico) de la guía.

$E_{0x}, E_{0y}, H_{0x}, H_{0y}, H_{0z}$: valor máximo de los campos, en los correspondientes ejes.

Ejemplo No. 6.1

Determinar la forma en que varía los campos electromagnéticos dentro de una *uía de ondas* rectangular, con modo de propagación TE₀₁.

Solución:

Empleando las expresiones de la ecuación 6.1, para m = 0 y n = 1 se tiene:

a.) *Componente campo Eléctrico :*

$$E_x = E_{0x} \cos(0) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} = E_{0x} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

$$E_y = E_{0y} \operatorname{sen}(0) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} = 0, \quad E_z = 0$$

b.) *Componente campo Magnético :*

$$H_x = H_{0x} \operatorname{sen}(0) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} = 0$$

$$H_y = H_{0y} \cos(0) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} = H_{0y} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

$$H_z = H_{0z} \cos(0) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} = H_{0z} \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

Las ondas electromagnéticas tienden a esparcirse en el medio de transmisión que se propagan. Para el caso de las *uías de ondas*, la característica de la dispersión también se debe a las condiciones de frontera impuestas por la geometría de la guía. Cuando existe dispersión, la velocidad de las ondas ya no está definida de manera única, lo que da lugar a la distinción entre la velocidad de fase y la velocidad de grupo. ⁽⁷⁾

En la figuras No. 6.5 se muestra las curvas correspondientes a la dispersión que sufren las ondas en las *uías de ondas* rectangulares, para los modos.

(7) Crai , A.D.D. *T e origins of ater ave t eory*". *Annual Revie of luid Mec anics* **36**.2014.: pp. 23-24.

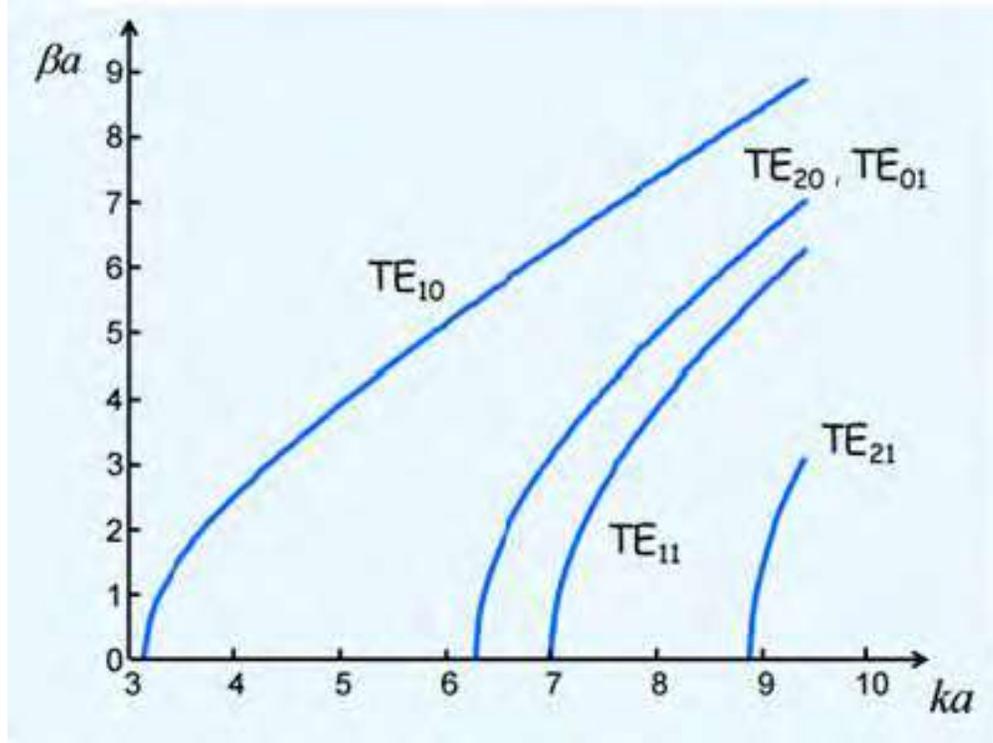


Figura No. 6.5 Curvas de dispersión modos T_{mn}

Fuente: (PDF) Presentación Guías de Onda | Dante Mornistar - Academia.edu. (2019).
Disponibile: https://www.academia.edu/35805860/Presentacion_Guias_de_Onda, p. 42.

Donde:

$$(6.2) \beta_g a = \sqrt{(ka)^2 - (m\pi)^2 - (2n\pi)^2}$$

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} : \text{número de onda}$$

$$\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \frac{2\pi \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2} : \text{constante de fase de la guía (rad / m)}$$

$\omega = 2\pi f$: velocidad angular de la onda en el material del dieléctrico de la guía (rad / s)

f : frecuencia de la onda en el dieléctrico de la guía (de operación) (Hz)

f_c : frecuencia de corte de la guía : (Hz)

a : anchura de la guía (m), c : velocidad de la luz (m / s)

ϵ_r : permitividad relativa del material interno (dieléctrico) de la guía.

μ_r : permeabilidad relativa del material interno (dieléctrico) de la guía.

$$\lambda_g = c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2} = \lambda / \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{1 - (f_c / f)^2} : \text{longitud de onda en la guía (m)}$$

c : velocidad de la luz (m / s)

λ : longitud de la onda en el material del dieléctrico de la guía (m).

En conclusión, en las guías de ondas de tipo rectangular, los modos TE conforman una familia doblemente infinita que se denomina TE_{mn} donde ($m = 0,1,2,\dots$ y $n = 0,1,2,\dots$). El modo TE_{00} no existe debido a que todas las componentes transversales son nulas. Mientras que el modo TE_{10} es el más dominante.

En una guía de ondas rectangular, con onda vertical, aparecen nodos TE_{mn} , donde el primer subíndice (m) significa el número de semiciclos de la onda en el

eje a y el segundo subíndice (n) significa el número de variaciones de la onda a lo largo del eje b .

En la figura No. 6.6 se muestra una imagen de la sección transversal de una guía de ondas rectangular, representando una configuración de onda estacionaria dentro de la guía, para diferentes modos de propagación TE_{mn} , con el campo eléctrico (\vec{E}) el cual varía en forma senoidal, cuya intensidad se representa con flechas perpendiculares a la superficie de la guía. Este campo eléctrico toma el valor de $\vec{E} = 0$ a lo largo de las paredes de la guía.

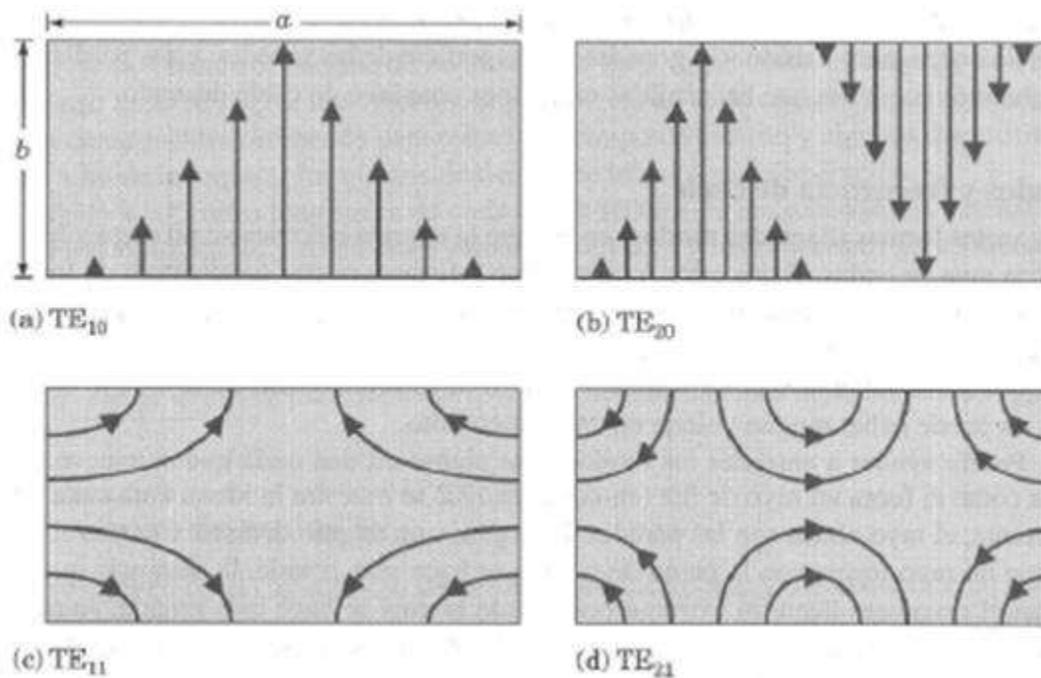


Figura No. 6.6 Configuración de onda estacionaria dentro de una guía de ondas rectangular, para diferentes modos de propagación TE_{mn}

Fuente: (PDF). PROPAGACIÓN EN GUÍA DE ONDAS d Contenido –coimbraweb. . (2019).
 Disponible: www.coimbraweb.com/documentos/antenas/6.3_propagacion_guia.pdf

Ejemplo No. 6.2

En una guía de onda rectangular, de dimensiones $a = 2 \text{ cm}$ y $b = 1 \text{ cm}$, y rellena de polietileno, se propaga una onda a 12 GHz, en modo TE_{11} , Determinar:

- a.) Constante de fase de la guía.
- b.) Longitud de onda en la guía.

Solución:

- a.) Constante de fase de la guía:

Como no se conoce la frecuencia de corte de la guía, no se puede emplear la ecuación 6.39 directamente, entonces se emplean las curvas de dispersión indicadas en la figura No. 6.5.

Desde la ecuación 6.39, teniendo en cuenta que la permitividad relativa del polietileno es de 2.25 y su permeabilidad relativa es aproximadamente: 1.0.

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = \frac{2\pi(12 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \sqrt{(2.25)(1)} = 377.52$$

$$ka = 377.52(2 \times 10^{-2}) = 7.55$$

Desde las curvas, para $ka = 7.55$ y TE_{11} , se tiene: $\beta_g a \approx 2.5$, entonces:

$$\beta_{g_{11}} = 2.5 / (2 \times 10^{-2}) = 125 \text{ (rad / m)}$$

- b.) Longitud de onda en la guía (ecuación 6.2):

$$\text{Se tiene que: } \beta_g = 2\pi / \lambda_g \Rightarrow \lambda_{g,11} = 2\pi / \beta_{g_{11}} = 2\pi / 125 = 5.07 \text{ cm}$$

6.5.2.2 Modo de propagación TM_{mn} en las guías de ondas rectangulares

En una guía de ondas de tipo rectangular, los componentes tanto del campo eléctrico como de la intensidad magnética, de todo modo de propagación de tipo TM_{mn} , se relacionan en la ecuación 6.2.⁽⁸⁾

⟨6.3⟩ *Modo TM_{mn}*

Componentes del Campo Eléctrico

$$E_x = E_{0x} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

$$E_y = E_{0y} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

$$E_z = E_{0z} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}$$

Componentes de la Intensidad Magnética

$$H_x = H_{0x} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z}$$

$$H_y = H_{0y} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \quad , \quad H_z = 0$$

Ejemplo No. 6.3

Realizar el proceso de deducción para lograr las expresiones de los componentes electromagnéticos en una *uía de ondas*, tipo rectangular modo TM_{mn}, indicadas en la ecuación 6.2.⁽⁹⁾

Solución:

1. La propagación de los campos electromagnéticos dentro de una guía de ondas rectangular se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\langle 6.4 \rangle \vec{E}(x, y, z) = E_x(x, y, z) \hat{a}_x + E_y(x, y, z) \hat{a}_y + E_z(x, y, z) \hat{a}_z$$

$$\langle 6.5 \rangle \vec{H}(x, y, z) = H_x(x, y, z) \hat{a}_x + H_y(x, y, z) \hat{a}_y + H_z(x, y, z) \hat{a}_z$$

2. Considerando de que los campos electromagnéticos se propagan en la dirección z , se tiene que cada componente del correspondiente campo se puede expresar de la siguiente forma:

$$(6.6) E_x = E_{0x}(x, y) e^{-j\beta_g z}, \quad E_y = E_{0y}(x, y) e^{-j\beta_g z}, \quad E_z = E_{0z}(x, y) e^{-j\beta_g z}$$

$$(6.7) H_x = H_{0x}(x, y) e^{-j\beta_g z}, \quad H_y = H_{0y}(x, y) e^{-j\beta_g z}, \quad H_z = H_{0z}(x, y) e^{-j\beta_g z}$$

3. Aplicando la Ley de Gauss, para coordenadas rectangulares, se tiene:

$$(6.8) \vec{\nabla} \cdot \vec{E}(x, y, z) = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

$$e^{-j\beta_g z} \frac{\partial E_{0x}}{\partial x} + e^{-j\beta_g z} \frac{\partial E_{0y}}{\partial y} - j\beta_g e^{-j\beta_g z} E_{0z} = 0$$

$$\frac{\partial E_{0x}}{\partial x} + \frac{\partial E_{0y}}{\partial y} - j\beta_g E_{0z} = 0$$

$$(6.9) \vec{\nabla} \cdot \vec{H}(x, y, z) = \frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$$

$$e^{-j\beta_g z} \frac{\partial H_{0x}}{\partial x} + e^{-j\beta_g z} \frac{\partial H_{0y}}{\partial y} - j\beta_g e^{-j\beta_g z} H_{0z} = 0$$

$$\frac{\partial H_{0x}}{\partial x} + \frac{\partial H_{0y}}{\partial y} - j\beta_g H_{0z} = 0$$

4. Aplicando la Ley de Faraday y la Ley de Ampere, respectivamente, para coordenadas rectangulares, se tiene:

Para el caso de $\vec{E}(x, y, z)$

$$(6.10) \quad \vec{\nabla} \times \vec{E}(x, y, z) = -j\omega\mu \vec{H}(x, y, z)$$

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{E}(x, y, z) &= \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix} \\ &= \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \hat{a}_x - \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \hat{a}_y + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \hat{a}_z \\ &= \left(e^{-j\beta_g z} \frac{\partial E_{0z}}{\partial y} - (-j\beta_g E_{0y} e^{-j\beta_g z}) \right) \hat{a}_x - \left(e^{-j\beta_g z} \frac{\partial E_{0z}}{\partial x} - (-j\beta_g E_{0x} e^{-j\beta_g z}) \right) \hat{a}_y \\ &\quad + \left(e^{-j\beta_g z} \frac{\partial E_{0y}}{\partial x} - e^{-j\beta_g z} \frac{\partial E_{0x}}{\partial y} \right) \hat{a}_z = -j\omega\mu (H_x \hat{a}_x + H_y \hat{a}_y + H_z \hat{a}_z) e^{-j\beta_g z} \end{aligned}$$

Al comparar términos, se tiene :

$$(6.11) \quad \frac{\partial E_{0z}}{\partial y} - j\beta_g E_{0y} = -j\omega\mu H_x \quad , \quad \frac{\partial E_{0z}}{\partial x} - j\beta_g E_{0x} = j\omega\mu H_y$$

$$\frac{\partial E_{0y}}{\partial x} - E_{0x} = -j\omega\mu H_z$$

Para el caso de $\vec{H}(x, y, z)$

$$(6.12) \quad \vec{\nabla} \times \vec{H}(x, y, z) = j\omega\varepsilon \vec{E}(x, y, z)$$

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{H}(x, y, z) &= \begin{vmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} \\ &= \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \hat{a}_x - \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \hat{a}_y + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \hat{a}_z \\ &= \left(e^{-j\beta_g z} \frac{\partial H_{0z}}{\partial y} - (-j\beta_g H_{0y} e^{-j\beta_g z}) \right) \hat{a}_x - \left(e^{-j\beta_g z} \frac{\partial H_{0z}}{\partial x} - (-j\beta_g H_{0x} e^{-j\beta_g z}) \right) \hat{a}_y \\ &\quad + \left(e^{-j\beta_g z} \frac{\partial H_{0y}}{\partial x} - e^{-j\beta_g z} \frac{\partial H_{0x}}{\partial y} \right) \hat{a}_z = -j\omega\varepsilon (E_x \hat{a}_x + E_y \hat{a}_y + E_z \hat{a}_z) e^{-j\beta_g z} \end{aligned}$$

Al comparar términos, se tiene :

$$(6.13) \quad \frac{\partial H_{0z}}{\partial y} - j\beta_g H_{0y} = j\omega\varepsilon E_x \quad , \quad \frac{\partial H_{0z}}{\partial x} - j\beta_g H_{0x} = -j\varepsilon E_y$$

$$\frac{\partial H_{0y}}{\partial x} - H_{0x} = j\omega\varepsilon E_z$$

5. Combinando las ecuaciones 6.11y 6.13, y teniendo en cuenta que la constante de fase de corte está dada por la ecuación 6.14, se tiene las ecuaciones relacionadas en la ecuación 6.15

$$(6.14) K_c^2 = \omega^2 \mu \epsilon - \beta_g^2 : \text{constante de fase de corte}$$

$$(6.15) K_c^2 E_{0X} = j\beta_g \frac{\partial E_{0Z}}{\partial x} - j\omega\mu \frac{\partial H_{0Z}}{\partial y}, \quad K_c^2 E_{0Y} = j\beta_g \frac{\partial E_{0Z}}{\partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_{0Z}}{\partial x}$$

$$K_c^2 H_{0X} = j\beta_g \frac{\partial H_{0Z}}{\partial x} + j\omega\epsilon \frac{\partial E_{0Z}}{\partial y}, \quad K_c^2 H_{0Y} = j\beta_g \frac{\partial H_{0Z}}{\partial y} - j\omega\epsilon \frac{\partial E_{0Z}}{\partial x}$$

6. En la ecuación 6.15 se puede observar lo siguiente:

Las componentes transversales : E_{0X} , E_{0Y} , H_{0X} y H_{0Y} dependen de las componentes longitudinales : E_{0Z} y H_{0Z} , lo anterior que permite dividir la solución en dos grupos :

- *uno en modos TE, cuando $E_{0Z} = 0$ y $H_{0Z} \neq 0$*
- *otro en modos TM, cuando $E_{0Z} \neq 0$ y $H_{0Z} = 0$*

7. *En modos TE donde $E_{0Z} = 0$ y $H_{0Z} \neq 0$*

La ecuación 6.14 quedaría de la siguiente manera:

$$\langle 6.16 \rangle K_c^2 E_{0X} = -j\omega\mu \frac{\partial H_{0Z}}{\partial y}, \quad K_c^2 E_{0Y} = j\omega\mu \frac{\partial H_{0Z}}{\partial x}$$

$$K_c^2 H_{0X} = j\beta_g \frac{\partial H_{0Z}}{\partial x}, \quad K_c^2 H_{0Y} = j\beta_g \frac{\partial H_{0Z}}{\partial y}$$

8. Desde las dos últimas expresiones indicadas en la ecuación 6.14, se tiene:

$$\langle 6.17 \rangle H_{0X} = \frac{j\beta_g}{K_c^2} \frac{\partial H_{0Z}}{\partial x}, \quad H_{0Y} = \frac{j\beta_g}{K_c^2} \frac{\partial H_{0Z}}{\partial y}$$

9. Reemplazando las expresiones indicadas en la ecuación 6.17, en la ecuación 6.10, se tiene:

$$\begin{aligned} \langle 6.18 \rangle \frac{\partial H_{0X}}{\partial x} + \frac{\partial H_{0Y}}{\partial y} + j\beta_g H_{0Z} &= 0 \\ \frac{j\beta_g}{K_c^2} \frac{\partial^2 H_{0Z}}{\partial x^2} + \frac{j\beta_g}{K_c^2} \frac{\partial^2 H_{0Z}}{\partial y^2} + j\beta_g H_{0Z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 H_{0Z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_{0Z}}{\partial y^2} + K_c^2 H_{0Z} &= 0 \end{aligned}$$

10. En modos TM donde $E_{0Z} \neq 0$ y $H_{0Z} = 0$

La ecuación 6.15 quedaría, para este caso, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} (6.19) K_c^2 E_{0X} &= j\beta_g \frac{\partial E_{0Z}}{\partial x}, \quad K_c^2 E_{0Y} = j\beta_g \frac{\partial E_{0Z}}{\partial y} \\ K_c^2 H_{0X} &= j\omega\epsilon \frac{\partial E_{0Z}}{\partial y}, \quad K_c^2 H_{0Y} = -j\omega\epsilon \frac{\partial E_{0Z}}{\partial x} \end{aligned}$$

11. Desde las dos primeras expresiones indicadas en la ecuación 6.18, se tiene:

$$\langle 6.20 \rangle E_{0X} = \frac{j\beta_g}{K_c^2} \frac{\partial E_{0Z}}{\partial x}, \quad E_{0Y} = \frac{j\beta_g}{K_c^2} \frac{\partial E_{0Z}}{\partial y}$$

12. Reemplazando las expresiones indicadas en la ecuación 6.20, en la ecuación 6.8, se tiene:

$$\langle 6.21 \rangle \frac{\partial E_{0X}}{\partial x} + \frac{\partial E_{0Y}}{\partial y} + j\beta_g E_{0Z} = 0$$

$$\frac{j\beta_g}{K_c^2} \frac{\partial^2 E_{0Z}}{\partial x^2} + \frac{j\beta_g}{K_c^2} \frac{\partial^2 E_{0Z}}{\partial y^2} + j\beta_g E_{0Z} = 0$$

$$\frac{\partial^2 E_{0Z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_{0Z}}{\partial y^2} + K_c^2 E_{0Z} = 0$$

13. Considerando que las paredes de la Guía de Ondas son conductores perfectos, entonces los campos: E_{0Z} y H_{0Z} son cero en estas paredes. Por lo tanto, para el caso del campo eléctrico:

$$\langle 6.22 \rangle E_{0Z}(x=0) = 0, \quad E_{0Z}(x=a) = 0$$

$$E_{0Z}(y=0) = 0, \quad E_{0Z}(y=b) = 0$$

14. Para resolver la ecuación 6.21, se emplea el método de separación de variables:

$$\langle 6.23 \rangle E_{0Z}(x, y) = X(x)Y(y)$$

15. Reemplazando en la ecuación 6.21, la expresión de la ecuación 6.23 y dividiendola entre $X(x)Y(y)$, entonces se obtiene:

$$\langle 6.24 \rangle \frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} + k_c^2 = 0$$

16. La solución de la ecuación inmediatamente anterior, da como resultado que los dos primeros términos deben equivaler, cada uno, a una constante, a saber:

$$\langle 6.25 \rangle \frac{1}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = -k_x^2, \quad \frac{1}{Y(y)} \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} = -k_y^2$$

$$\text{Entonces: } \langle 6.26 \rangle \quad k_x^2 + k_y^2 = k_c^2$$

17. Resolviendo las ecuaciones diferenciales de la ecuación 6.25, se obtiene:

$$\langle 6.27 \rangle X(x) = c_1 \cos(k_x x) + c_2 \text{sen}(k_x x)$$

$$\langle 6.28 \rangle Y(y) = c_3 \cos(k_y y) + c_4 \text{sen}(k_y y)$$

18. Para determinar los valores de las constantes c_1, c_2, c_3 y c_4 , se tienen en cuenta las condiciones fronterizas, indicadas en la ecuación 6.22:

$$E_{0z}(x=0) = 0, \text{ en la ecuación 6.27,}$$

$$E_{0z}(y=0) = 0, \text{ en la ecuación 6.28}$$

$$0 = c_1 \cos 0 + c_2 \text{sen} 0 \quad \Rightarrow \quad c_1 = 0$$

$$0 = c_3 \cos 0 + c_4 \text{sen} 0 \quad \Rightarrow \quad c_3 = 0$$

19. Entonces, las ecuaciones 6.27 y 6.28 quedarían de la siguiente forma:

$$\langle 6.29 \rangle X(x) = c_2 \text{sen}(k_x x)$$

$$\langle 6.30 \rangle Y(y) = c_4 \text{sen}(k_y y)$$

20. Aplicando en las ecuaciones 6.27 y 6.28 las siguientes condiciones fronterizas, se obtiene:

$E_{0z}(x = a) = 0$, en la ecuación 6.27,

$E_{0z}(y = b) = 0$, en la ecuación 6.28

$$(6.31) c_2 \text{sen}(k_x a) = 0 \Rightarrow \text{sen}(k_x a) = 0$$

$$(6.32) c_4 \text{sen}(k_y b) = 0 \Rightarrow \text{sen}(k_y b) = 0$$

21. Para que se cumpla las expresiones de las ecuaciones 6.31 y 6.32, entonces $k_x a$ y $k_y b$ tienen que ser múltiplos de π . Por lo tanto:

$$\langle 6.33 \rangle k_x = \frac{m\pi}{a} \text{ y } k_y = \frac{n\pi}{b} \text{ para: } m = 1, 2, \dots \text{ y } n = 1, 2, \dots$$

22. a que k_x y k_y pueden tener varios valores, por lo tanto, existirán varias soluciones para las ecuaciones 6.31 y 6.32 y cada una de ellas se le conoce como modo. Reemplazando 6.33 en 6.29 y 6.30, se tiene:

$$\langle 6.34 \rangle X(x) = c_2 \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right)$$

$$\langle 6.35 \rangle Y(y) = c_4 \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right)$$

23. Ahora reemplazando las anteriores expresiones en 6.23, se obtiene:

$$\begin{aligned} \langle 6.36 \rangle E_{0z}(x, y) &= c_2 c_4 \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \\ &= E_{0z} \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \end{aligned}$$

Donde: $c_2 c_4 = E_{0z}$: valor máximo de $E_{0z}(x, y)$

24. Reemplazando la expresión final de la ecuación 6.36 en la correspondiente expresión de la ecuación 6.6, se obtiene:

$$(6.37) E_Z = E_{0Z}(x, y) e^{-j\beta_g Z} = E_{0Z} \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_g Z}$$

25. Para determinar los otros dos componentes de la onda electromagnética, en la guía de onda rectangular modo TM_{mn} , que faltan: E_X , E_Y , H_X y H_Y , se repite todo el proceso que se realizó para determinar E_Z , haciendo los reemplazos y equivalencias respectivas, obteniéndose:

$$(6.38) E_X = E_{0X} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_g Z}$$

$$= E_Y = E_{0Y} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_g Z}$$

$$= E_Z = E_{0Z} \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_g Z}$$

$$(6.39) H_X = H_{0X} \text{sen}\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_g Z}$$

$$H_Y = H_{0Y} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{-j\beta_g Z}, \quad H_Z = 0$$

Ejemplo No. 6.4

Determinar la forma en que varía los campos electromagnéticos dentro de una guía de ondas rectangular, con modo de propagación TM .

Solución:

Empleando las expresiones de la ecuación 6.2, para $m = 0$ y $n = 1$ se tiene:

Componentes del Campo Eléctrico

$$E_X = E_{0X} \cos(0) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$$

$$E_Y = E_{0Y} \operatorname{sen}(0) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z} = 0$$

$$E_Z = E_{0Z} \operatorname{sen}(0) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z} = 0$$

Componentes de la Intensidad Magnética

$$H_X = H_{0X} \operatorname{sen}(0) \cos\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z} = 0$$

$$H_Y = H_{0Y} \cos(0) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z} = H_{0Y} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z} \quad , \quad H_Z = 0$$

Como se puede observar de los resultados obtenidos del ejemplo inmediatamente anterior: *El campo eléctrico, en modo de propagación TM, varía sinusoidalmente respecto a su anchura: "a" y de manera uniforme a su altura: "b". Las líneas del campo magnético están siempre perpendiculares a las líneas del campo eléctrico.*

6.5.2.3 Equivalentes de TE_{mn} y TM_{mn} , en las guías de ondas rectangulares

Las expresiones de T_{mn} y de TM_{mn} , indicadas en las ecuaciones 6.1 y 6.3 respectivamente, se pueden expresar de forma equivalente según lo indicado en las ecuaciones 6.40 y 6.41, habiéndose hecho los reemplazos y desarrollos correspondientes de los valores $E_{0X}, E_{0Y}, H_{0X}, H_{0Y}, H_{0Z}$.⁽¹⁰⁾

⟨6.40⟩ *Modo TE_{mn}*

a.) *Componentes del Campo Eléctrico*

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_{0x} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= j \frac{\omega \mu n \pi}{K_C^2 b} A \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 E_y &= E_{0y} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= -j \frac{\omega \mu m \pi}{K_C^2 a} A \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 E_z &= 0
 \end{aligned}$$

b.) *Componentes de la Intensidad Magnética*

$$\begin{aligned}
 H_x &= H_{0x} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= j \frac{\beta m \pi}{K_C^2 a} A \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 H_y &= H_{0y} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= j \frac{\beta n \pi}{K_C^2 b} A \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 H_z &= H_{0z} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= A \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}
 \end{aligned}$$

Dónde: A corresponde a la amplitud del componente longitudinal de la intensidad magnética (A/m).

⟨6.41⟩ *Modo TM_{mn}*

a.) *Componentes del Campo Eléctrico*

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_{0x} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= -j \frac{\beta_g m\pi}{K_C^2 a} B \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 E_y &= E_{0y} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= -j \frac{\beta_g n\pi}{K_C^2 b} B \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 E_z &= E_{0z} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= B \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z}
 \end{aligned}$$

b.) *Componentes de la Intensidad Magnética*

$$\begin{aligned}
 H_x &= H_{0x} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= j \frac{\omega \epsilon n\pi}{K_C^2 b} B \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 H_y &= H_{0y} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 &= -j \frac{\omega \epsilon m\pi}{K_C^2 a} B \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \\
 H_z &= 0
 \end{aligned}$$

Dónde: B corresponde a amplitud de la componente longitudinal del campo eléctrico (V / m).

6.5.2.4 Frecuencia de corte en las guías de ondas rectangulares

La frecuencia de corte en las guías de ondas se presenta cuando su constante de propagación es nula, es decir que no se propagan las ondas a través de ellas.

La constante de propagación de una guía de ondas rectangular, tanto para modos TE_{mn} como para modos TM_{mn} , esta expresada en la ecuación 6.42.⁽¹¹⁾

$$\langle 6.42 \rangle \rho_{mn} = \sqrt{k_{c,mn}^2 - k^2}$$

$$\text{Entonces: } \rho_{mn} = \sqrt{k_{c,mn}^2 - k^2} = 0$$

$$k_{c,mn} = k = \frac{2\pi f_{c,mn}}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = 2\pi f_{c,mn} \sqrt{\epsilon \mu} \Rightarrow f_{c,mn} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\epsilon \mu}} k_{c,mn}$$

$$\text{El número de onda en corte es: } k_{c,mn} = \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2}$$

$$f_{c,mn} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\epsilon \mu}} \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon \mu}} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$$

Ejemplo No. 6.5

Para la guía de ondas rectangular del ejemplo No.6.2, en modos TE_{10} y TM_{10} , determinar:

- Frecuencia de corte de la guía
- Constante de fase de la guía.
- Longitud de onda en la guía.

Solución:

- Frecuencia de corte:

Aplicando la ecuación 6.42.

$$f_{c,10} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon \mu}} \sqrt{(1/a)^2} = \frac{1}{2a\sqrt{\epsilon \mu}}$$

Teniendo en cuenta los valores dados en el ejemplo No. 6.2, y haciendo los reemplazos respectivos:

Permitividad del polietileno o :

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = (2.25)(8,854 \times 10^{-12}) = 19.92 \times 10^{-12} \text{ (F / m)}$$

Permeabilidad del polietileno :

$$\mu = \mu_r \mu_0 = (1.0)(4\pi \times 10^{-7}) = 12.57 \times 10^{-7} \text{ (H / m)}$$

$$\varepsilon\mu = (19.92 \times 10^{-12})(12.57 \times 10^{-7}) = 250.39 \times 10^{-19}$$

$$f_{c,10} = \frac{1}{2(2 \times 10^{-2})\sqrt{250.39 \times 10^{-19}}} \approx 5.0 \text{ GHz}$$

Para este caso la señal se propaga, en esta guía de ondas para estos modos, ya que $f > f_{c,10}$ ($12 \text{ GHz} > 5.0 \text{ GHz}$)

b.) Constante de fase de la guía:

Aplicando la ecuación 6.2

$$\begin{aligned} \beta_{g,10} &= \frac{2\pi}{\lambda_{g,10}} = \frac{2\pi\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}}{c} \sqrt{f^2 - f_{c,10}^2} \\ &= \frac{2\pi\sqrt{2.25 \times 1}}{3 \times 10^8} \sqrt{(12 \times 10^9)^2 - (5.0 \times 10^9)^2} = 342.71 \text{ (rad/m)} \end{aligned}$$

c.) Longitud de onda en la guía:

Aplicando la ecuación 6.2:

$$\lambda_{g,10} = \frac{2\pi}{\beta_{g,10}} = \frac{2\pi}{342.71} \approx 1.83 \text{ (cm)}$$

Ejemplo No. 6.6

Para la *uía de ondas*, del ejemplo No. 6.2, determinar los modos TE_{mn} y TM_{mn} que se pueden propagar, si la frecuencia de operación es la misma 12 GHz.

Solución:

Se aplica la ecuación 6.42 para determinarlas frecuencias de corte de los diferentes modos (iguales para ambos casos: TE_{mn} y TM_{mn}), y aquellos modos que tengan una frecuencia de corte menor a la de la operación (12 GHz), se pueden propagar.

- Para TE_{10} y TM_{10} , la frecuencia de corte es la misma,

$$f_{c,10} = \frac{1}{2a\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{2(2 \times 10^{-2})\sqrt{250.39 \times 10^{-19}}} \approx 5.0 \text{ GHz}$$

Este valor ya se había determinado en el ejemplo inmediatamente anterior, y como $f_0 > f_{c,10}$ (12GHz > 5.0 GHz) entonces estos nodos se pueden propagar

- Para TE_{01} y TM_{01}

$$f_{c,01} = \frac{1}{2b\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{2(1 \times 10^{-2})\sqrt{250.39 \times 10^{-19}}} \approx 10 \text{ GHz}$$

Como $f_0 > f_{c,01}$ (12GHz > 10 GHz) entonces estos nodos también se pueden propagar.

- Para TE_{11} y TM_{11}

$$\begin{aligned} f_{c,11} &= \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{(1/a)^2 + (1/b)^2} \\ &= \frac{1}{2\sqrt{250.39 \times 10^{-19}}} \sqrt{(1/(2 \times 10^{-2}))^2 + (1/10^{-2})^2} \approx 11.18 \text{ GHz} \end{aligned}$$

Como $f_0 > f_{c,11}$ (12GHz > 11.18 GHz) entonces estos nodos también se pueden propagar.

- Para TE_{20} y TM_{20}

$$f_{c,20} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{(2/a)^2} = \frac{1}{a\sqrt{\epsilon\mu}}$$

$$= \frac{1}{(2 \times 10^{-2})\sqrt{250.39 \times 10^{-19}}} = 10 \text{ GHz}$$

Como $f_0 > f_{c,20}$ ($12 \text{ GHz} > 10 \text{ GHz}$) entonces estos nodos también se pueden propagar.

- Para TE_{02} y TM_{02}

$$f_{c,02} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{(2/b)^2} = \frac{1}{b\sqrt{\epsilon\mu}}$$

$$= \frac{1}{(1 \times 10^{-2})\sqrt{250.39 \times 10^{-19}}} = 20 \text{ GHz}$$

Como $f_0 < f_{c,02}$ ($12 \text{ GHz} < 20 \text{ GHz}$) , entonces estos modos no se pueden propagar.

Al realizar los procesos de análisis para los demás modos, da como resultado que $f_0 < f_{c,mn}$, para cada uno de ellos, lo que indica que no se pueden propagar en la *uía de ndas* en cuestión.

La *propagación monomodo* se logra usando sólo el modo con la frecuencia de corte mínima, denominándose a este modo como *dominante*. En el caso de la *uía de ndas* rectangular, el modo dominante corresponde a TE_{10} cuándo $a = 2b$ y el modo TE_{20} tiene una frecuencia de corte del doble de la del modo TE_{10} .

Para la propagación TE_{10} , en una guía rectangular con dieléctrico de aire, la longitud de a debe ser al menos de $\lambda_{c10}/2$, lo cual la frecuencia de corte está dada por la ecuación 6.43.

$$\langle 6.43 \rangle \lambda_{c10} = 2a \Rightarrow f_{c10} = \frac{c}{\lambda_{c10}} = \frac{c}{2a}$$

Ejemplo No. 6.7

Determinar la frecuencia de corte de una guía de onda rectangular con dieléctrico de aire, de longitudes $a = 2 \text{ cm}$ y $b = 1 \text{ cm}$, en modo TE_{10} , mediante la ecuación 6.42 y mediante la ecuación 6.43

Solución:

a.) Aplicando la ecuación 6.40:

$$f_{c,10}|_{\text{aire}} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \sqrt{(1/a)^2} = \frac{1}{2a\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{2a} = \frac{3 \times 10^8}{(2)(2) \times 10^{-2}} = 7.5 \text{ GHz}$$

b.) Aplicando la ecuación 6.41:

$$f_{c,10} = \frac{c}{\lambda_{c10}} = \frac{c}{2a} = \frac{3 \times 10^8}{(2)(2) \times 10^{-2}} = 7.5 \text{ GHz}$$

Cómo referencia general, el rango de frecuencia a ser utilizado en las guías de ondas rectangulares, donde $a = 2b$, se encuentra entre la frecuencia de corte de esa guía, en el modo de propagación correspondiente, y la del corte del modo siguiente. Por ejemplo, para el caso del modo TE_{10} , el rango de frecuencia de operación de esta guía rectangular está entre: $f_{c,10} < f < f_{c,20}$, siendo en la práctica: $f_{c,10} < f < 2f_{c,10}$.

El rango de frecuencia de operación de cualquier guía de onda, y para cualquier modo de propagación, se encuentra entre su frecuencia de corte y la frecuencia máxima donde la atenuación, en la misma, no cambie sustancialmente. Además de las expresiones matemáticas para determinar los valores de estas frecuencias (frecuencia de corte y frecuencia máxima), en los catálogos de cada tipo de guía de ondas contienen las curvas donde se pueden, también, determinar estos valores.

Así mismo en la mayoría de los catálogos de las guías de ondas se referencia, en sus respectivas características eléctricas, el rango de frecuencia de operación de estas (denominado ancho de banda de operación).

Ejemplo No. 6.8

Para la guía de onda del ejemplo No.6.2, determinar el rango de frecuencia en que podría operar.

Solución:

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ejemplo No. 6.5, la frecuencia de corte de esta guía es de 5.0 GHz, entonces:

$$f_{c,10} < f < 2f_{c,10} \Rightarrow 5.0 \text{ GHz} < f < 10.0 \text{ GHz}$$

Cómo se puede observar, según los resultados en el ejemplo No. 6.6, se cumple que:

$$f_{c,10} < f < f_{c,20} \Rightarrow 5 \text{ GHz} < f < 10.0 \text{ GHz}$$

Sin embargo, se aconseja validar estos valores, con los que se indican en las características eléctricas de la guía de ondas, relacionados en su respectivo catálogo.

6.5.2.5 Impedancia característica de las guías de ondas rectangulares

La impedancia característica de una guía de ondas rectangulares (TE_{mn}), está dada en la ecuación 6.44 y 6.45, teniendo en cuenta, para la simplificación del proceso de deducción, las ecuaciones:6.2, 6.3 y 6.16. ⁽¹²⁾

a.) Para dieléctrico diferente a aire

$$\begin{aligned}\langle 6.44 \rangle Z_g &= \frac{E_X}{H_Y} = -\frac{E_Y}{H_X} = \frac{w\mu}{\beta} = \frac{w\mu}{((2\pi)/c)\sqrt{f^2 - f_c^2}} \\ &= \frac{2\pi f\mu c}{2\pi f\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} = \frac{\mu c}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}}\end{aligned}$$

b.) Para dieléctrico de aire

Impedancia del aire: $\eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi \text{ } (\Omega)$

μ_0 : permeabilidad del vacío = $4\pi \times 10^{-7} \text{ } (H / m)$

ϵ_0 : permitividad del vacío: $8,854 \times 10^{-12} \text{ } (F / m)$

Entonces la impedancia característica de la guía con aire, es:

$$\langle 6.45 \rangle Z_g = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \approx \frac{377}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} (\Omega)$$

Ejemplo No. 6.9

En una guía de ondas, con dieléctrico de aire e impedancia característica de 500 ohmios, se le introduce una señal de 6 GHz determinar la frecuencia de corte de la guía.

Solución:

Aplicando la ecuación 6.45, se despeja la frecuencia de corte:

$$Z_g = \frac{377}{\sqrt{1 - (f_c / f)^2}} \Rightarrow f_c = f \left[1 - (377 / Z_g)^2 \right]^{1/2}$$

$$f_c = 6 \times 10^9 \left[1 - (377 / 500)^2 \right]^{1/2} = 3.94 \text{ GHz}$$

Ejemplo No. 6.10

Determinar la impedancia característica de una guía de ondas rectangular, para el caso de (TM_{mn}) .

Solución:

Aplicando la definición de impedancia característica y haciendo los reemplazos respectivos, se obtiene:

$$\begin{aligned} (6.46) \quad Z_g &= \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x} = \frac{\beta_g}{\omega \epsilon} = \frac{(2\pi/c) \sqrt{f^2 - f_c^2}}{\omega \epsilon} = \frac{(2\pi) \sqrt{f^2 - f_c^2}}{2\pi f_0 c \epsilon} \\ &= \frac{\sqrt{1 - (f_c / f)^2}}{c \epsilon} = \frac{\sqrt{1 - (f_c / f)^2}}{1 / \mu c} = \mu c \sqrt{1 - (f_c / f)^2} \end{aligned}$$

6.5.2.6 Longitud de onda en las guías de ondas rectangulares

La longitud de onda de cada uno de los modos de las guías de ondas rectangulares está dada por la ecuación 6.47.

$$\langle 6.47 \rangle \lambda_g = \frac{2\pi}{\beta_g} = \frac{2\pi}{(2\pi \sqrt{\mu_r \epsilon_r} / c) \sqrt{f^2 - f_c^2}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2}}$$

Ejemplo No. 6.11

Para la guía de ondas del ejemplo inmediatamente anterior, determinar la longitud de onda en la guía, en las mismas condiciones de operación.

Solución:

Aplicando la ecuación 6.46:

$$\text{Para dieléctrico de aire } \sqrt{\mu_r \epsilon_r} = 1$$

$$\lambda_g = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{(6 \times 10^9)^2 - (3.94 \times 10^9)^2}} = 6.62 \text{ cm}$$

Nótese que la longitud de onda de una onda que se propaga por una guía de onda es mayor que para el caso que se propague por el espacio libre.

6.5.2.7 Velocidades de onda en las guías de ondas rectangulares

La difusión de las ondas, en las *guías de ondas*, presentan dos velocidades: una denominada *velocidad de fase* y la otra *velocidad de grupo*. La primera corresponde a la velocidad con la cual la onda cambia de fase y la otra a la velocidad con que se propaga la onda.

La *velocidad de fase* es aquella con que cambia una fase de onda, en dirección paralela a las paredes de la guía de ondas. La *velocidad de grupo* es la velocidad de un grupo de ondas, es decir, de un pulso.

La *velocidad de grupo* es aquella con la que se propagan las señales de información, sea cual sea el tipo de esta. Esta velocidad también corresponde a la cual se propaga la energía asociada a la onda.

La *velocidad de fase* siempre es por lo mínimo igual a la *velocidad de grupo* e incluso puede ser mayor que la velocidad de la luz, no violando el principio de que ninguna forma de energía puede viajar a mayor velocidad que la de la luz en el espacio libre, ya que la *velocidad de grupo* es la que representa la velocidad de energía y no la de fase.

a que la *velocidad de fase* en una guía de onda es mayor que su velocidad en el espacio libre se tiene que la longitud de onda para determinada frecuencia será mayor en la guía de onda que en el espacio libre.

También se presenta que el producto entre la *velocidad de fase* y la *velocidad de grupo* de una onda en una guía de onda es igual al cuadrado a la velocidad de propagación de la onda en el espacio libre. ⁽¹³⁾

6.5.2.7.1 Velocidad de fase

a que está velocidad está asociada con la que se desplaza la onda, en la dirección paralela a la superficie de las paredes de la guía de ondas, su determinación puede deducirse teniendo en cuenta las consideraciones que se relacionan a continuación y en base al diagrama indicado en la figura No. 6.7.⁽¹⁴⁾

- La velocidad de fase se aproxima a infinito ($v_f \approx \infty$) cuando la longitud de onda se acerca a la longitud de corte de la guía ($\lambda \approx \lambda_c$), es decir cuando $\theta \approx 90^\circ$. En este caso la onda no se propaga, se queda reflejando de un lado a otro entre las placas paralelas de la guía.
- La velocidad de fase se aproxima a velocidad de la luz (c) cuando la longitud de onda λ es muy pequeña ($\theta \ll 90^\circ$). En este caso la onda se propaga entre las placas paralelas de la guía.

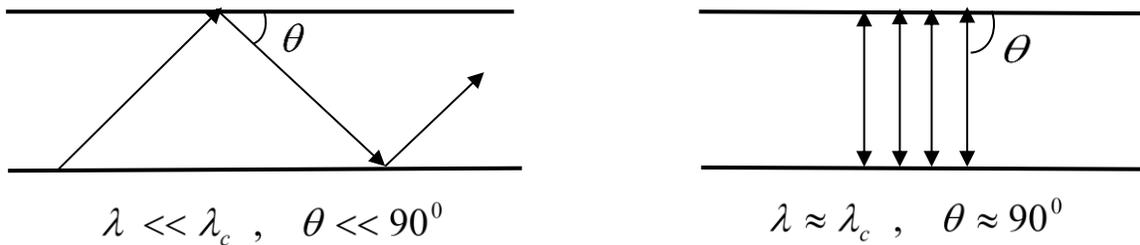


Figura No. 6.7 Situaciones de propagación de una onda en una guía de onda rectangular.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se puede determinar la velocidad de fase en una guía de ondas rectangular, lo cual está indicado en la ecuación 6.48

Se tiene que: $v_f = \frac{v_p}{\cos\theta} = \frac{v_p}{\sqrt{1 - \sin^2\theta}}$

También se tiene que: $n \cdot \frac{\lambda}{2} = a \cdot \sin\theta \Rightarrow \sin\theta = n \cdot \frac{\lambda}{2a}$

Para $n = 1$: longitud de onda equivale a la de corte y $\theta = 90^\circ$

entonces: $\sin 90^\circ = \frac{\lambda_c}{2a} = 1 \Rightarrow \lambda_c = 2a$ y $\sin\theta = \frac{\lambda}{\lambda_c}$

Lo que se tiene que para guía rectangular: $\lambda_c = 2a$

Reemplazando: $v_f = \frac{v_p}{\sqrt{1 - \sin^2\theta}} = \frac{v_p}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_c)^2}}$

Entonces: $\langle 6.48 \rangle v_f = \frac{v_p}{\sqrt{1 - (f_c / f)^2}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{1 - (f_c / f)^2}}$

Dónde:

λ : longitud de onda (m).

λ_c : longitud de onda de corte (m).

λ_0 : longitud de onda de operación (m).

v_f : velocidad de fase de la onda (m / s).

$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}$: velocidad de la onda a través de dieléctrico de la guía (m / s).

$n = 1,2,3\dots$: cantidad de semilongitudes de onda

a : ancho de la guía de ondas rectangular (m).

μ_r : permeabilidad relativa del dieléctrico de la guía

ϵ_r : permitividad relativa del dieléctrico de la guía

Ejemplo No. 6.12

Para una guía de onda rectangular con frecuencia de corte 2.8 GHz y de operación 3 GHz, determinar la velocidad de fase de la onda, si el dieléctrico es aire.

Solución:

Empleando la ecuación 6.48:

$$\text{Dieléctrico de aire: } \sqrt{\mu_r\epsilon_r} = 1$$

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r} \sqrt{1 - (f_c / f)^2}} = \frac{v_0}{\sqrt{1 - (2.8/3.0)^2}} = 2.77v_0$$
$$= (2.77)(3 \times 10^8) = 8.31 \times 10^8 \text{ (m / s)}$$

6.5.2.7.2 Velocidad de grupo (propagación)

Como se ha venido comentando, la velocidad de grupo corresponde a aquella con la cual se propaga la onda dentro de la guía, es aquella en la que se transporta la energía asociada a la onda. En la ecuación 6.49 se define la cuantificación de esta velocidad, teniendo como fundamento que la *la guía se comporta como un medio dispersor sin pérdidas*⁽¹⁵⁾

$$\begin{aligned} \langle 6.49 \rangle v_g &= v_f - \lambda_0 \frac{dv_f}{d\lambda_0} \\ &= \frac{v_p}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_c)^2}} - \lambda_0 \frac{d}{d\lambda_0} \left[\frac{v_p}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_c)^2}} \right] = v_p \sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_c)^2} \end{aligned}$$

$$\text{Entonces: } \langle 6.49 \rangle v_g = v_p \sqrt{1 - (f_c / f)^2} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{1 - (f_c / f)^2}$$

Ejemplo No. 6.13

Para una guía de onda rectangular, con frecuencia de corte 2.8 GHz y de operación 3 GHz, determinar la velocidad de propagación de la onda, si el dieléctrico de la guía es aire.

Solución:

Empleando la ecuación 6.49:

Para dieléctrico de aire: $v_p = c$: velocidad de la luz (3×10^8 m/s).

$$v_g = c \sqrt{1 - (f_c / f)^2} = (3 \times 10^8) \sqrt{1 - (2.8 / 3.0)^2} = 1.08 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

En la figura No. 6.8 se muestran las curvas que relacionan las velocidades de: propagación y la de fase de las ondas que se propagan por una guía de onda rectangular, con dieléctrico de aire, de acuerdo con el ángulo de reflexión (θ).

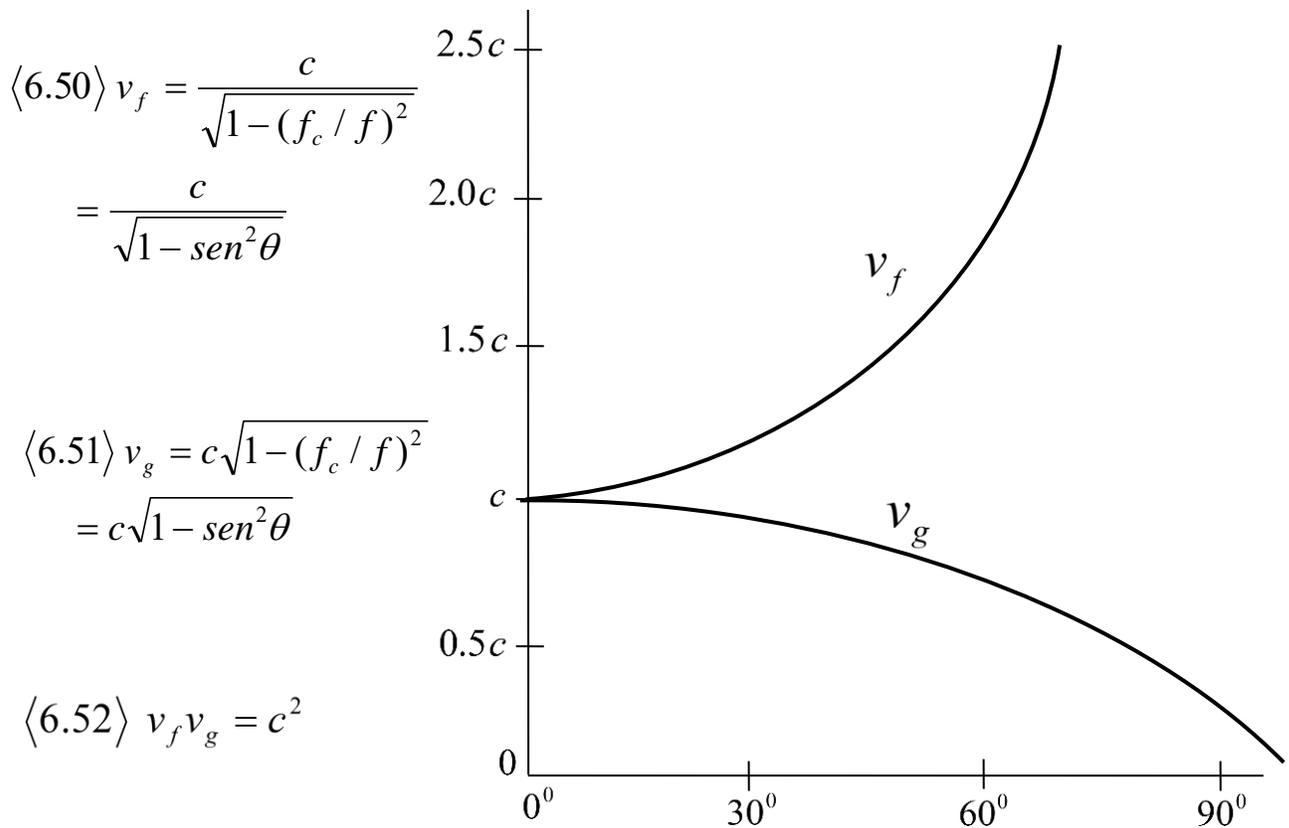


Figura No. 6.8 Curvas para velocidades de fase (v_f) y de grupo (v_g), en función del ángulo reflexión (θ), para guías de ondas rectangulares con dieléctrico de aire.

Ejemplo No. 6.14

Determinar el ángulo de reflexión (θ), para el caso de una guía de ondas rectangular, con dieléctrico de aire, si la frecuencia de operación de la onda es igual a la del corte de la guía $f = f_c$

Solución:

Empleando la ecuación 6.51, con dieléctrico de aire::

$$v_g = c\sqrt{1 - (f_c / f)^2} = c\sqrt{1 - (1)^2} = 0$$

$$v_g = c\sqrt{1 - \text{sen}^2\theta} \Rightarrow \sqrt{1 - \text{sen}^2\theta} = 0$$

$$1 - \text{sen}^2\theta = 0 \Rightarrow \text{sen}^2\theta = 1 \Rightarrow \text{sen}\theta = 1 \Rightarrow \theta = 90^\circ$$

Lo que indica que no hay propagación de la onda en estas condiciones.

Ejemplo No. 6.15

Demostrar que si la onda tiene una frecuencia igual o menor que la frecuencia de corte de la guía ($f \leq f_c$), no se propaga por dicha guía.

Solución:

a.) Para ($f = f_c$), ya demostró en el ejemplo inmediatamente anterior

b.) Para ($f < f_c$):

Empleando la ecuación 6.49, para dieléctrico de aire:

$$v_g = c\sqrt{1 - (f_c / f)^2} = c\sqrt{\text{valor negativo}} \equiv \text{indeterminado}$$

Lo que indica que no hay propagación.

Ejemplo No. 6.16

Determinar la frecuencia de operación que debe tener una onda para que se propague dentro de una guía rectangular, con dieléctrico de aire y con frecuencia de corte de 3 GHz, con un ángulo de reflexión de $\theta = 60^\circ$, empleando las curvas de la figura No. 6.8 y las ecuaciones 6.50 y 6.51, respectivamente.

Solución:

a.) Con la ecuación 6.50:

Desde las curvas de la figura No. 6.8, se obtiene que:

$$v_f \approx 1.8c = \frac{c}{\sqrt{1 - (f_c / f)^2}} \Rightarrow \sqrt{1 - (3 / f)^2} = 0.56$$

$$f \approx 3.47 \text{ GHz}$$

b.) Con la ecuación 6.51:

Desde las curvas de la figura No. 6.8, se obtiene que:

$$v_g \approx 0.56c = c\sqrt{1 - (f_c / f)^2} \Rightarrow \sqrt{1 - (3 / f)^2} = 0.56$$

$$f \approx 3.47 \text{ GHz}$$

6.5.2.8 Potencia media en las guías de ondas rectangulares

El principio de *Poynting* nos indica que *la densidad de potencia media que contiene una señal que se propaga por un medio determinado, equivale a la media del valor real de la densidad de potencia total asociada a la onda de la señal*".

La densidad de potencia total de una onda, la cual se denomina el *vector de Poynting*, equivale al producto vectorial entre los campos electromagnéticos que conforman la onda (ver ecuación 6.53).⁽¹⁶⁾

$$\langle 6.53 \rangle \vec{\phi} = \vec{E} \times \vec{H} \text{ (W / m}^2\text{)}$$

Dónde:

$\vec{\phi}$: *densidad de potencia total de la onda (W / m²).*

\vec{E} : *campo eléctrico de la onda (V / m).*

\vec{H} : *intensidad magnética de la onda (A / m)*

Entonces la densidad media de una onda que se propaga a través de un medio determinado está dada por la ecuación 6.54:

$$\langle 6.54 \rangle P_p = \bar{\phi}_p = \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \text{ (W / m}^2\text{)}$$

Dónde :

$\bar{\phi}_p$: *densidad de potencia propagada de la onda (W / m²).*

\vec{E} : *campo eléctrico de la onda (V / m).*

\vec{H}^* : *conjugado de la intensidad magnética de la onda (A / m)*

La potencia media de propagación de una onda, a través de cualquier medio, esta dada por la expresión indicada en la ecuación 6.55.

$$\langle 6.55 \rangle P_p = \int_S \bar{\phi}_p \cdot \vec{n} da = \iint_S \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot \vec{n} da = \frac{1}{2} \text{Re} \iint_S [\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot \vec{n} da$$

Dónde :

s : *superficie frontal que atravieza la onda (m²)*

\vec{n} : *normal a la superficie atravezada.*

da : *área unidimensional de la superficie atravezada (m²)*

Para el caso de que la onda se propague por una guía rectangular, la potencia media estará dada por la expresión de la ecuación 6.56.

Teniendo en cuenta que: $\vec{n} = \hat{a}_z$ y $da = dydx$

$$\langle 6.56 \rangle P_p = \frac{1}{2} Re \int_{X=0}^a \int_{Y=0}^b [\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot \hat{a}_z dydx$$

Ahora teniendo en cuenta el direccionamiento de la polarización de los campos electromagnéticos en la guía, se tiene que:

$$[\vec{E} \times \vec{H}^*] \cdot \hat{a}_z = [E_y \hat{a}_y \times H_x^* \hat{a}_x] \cdot \hat{a}_z = E_y H_x^* (\hat{a}_z) \cdot \hat{a}_z = E_y H_x^*$$

$$\text{Reemplazando: } \langle 6.57 \rangle P_p = \frac{1}{2} Re \int_{X=0}^a \int_{Y=0}^b E_y H_x^* dydx$$

Entonces, para poder determinar la potencia media que resiste una guía de onda, se requiere conocer las correspondientes expresiones del campo eléctrico (E_y) y del conjugado de la intensidad magnética (H_x^*), lo cual implica definir el modo de propagación a ser empleado, ya que el comportamiento de estos campos depende del modo de propagación empleado.

Ejemplo No. 6.17

Para una guía de onda rectangular de dimensiones $a \times b$, determinar la potencia media que resiste la guía, si el modo de propagación es de tipo TE_{10} .

Solución:

Se emplean las expresiones de E_y y de H_x^* indicadas en las ecuaciones 6.40, para el modo de propagación TE_{10} :

$$\begin{aligned}
E_Y|_{10} &= -j \frac{w\mu m\pi}{K_C^2 a} A \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g z} \Big|_{10} \\
&= -j \frac{w\mu\pi}{K_{C,10}^2 a} A_{10} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-j\beta_g z}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_X^*|_{10} &= -j \frac{\beta_g m\pi}{K_C^2 a} A \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{j\beta_g z} \Big|_{10} \\
&= -j \frac{\beta_g \pi}{K_{C,10}^2 a} A_{10} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{j\beta_g z}
\end{aligned}$$

$$E_{Y,10} H_{X,10}^* = \frac{w\mu\beta_g \pi^2}{K_{C,10}^4 a^2} |A_{10}|^2 \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi x}{a}\right)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 6.42 para TE_{10} :

$$K_{c,10} = \pi / a \Rightarrow K_{C,10}^4 = \pi^4 / a^4$$

$$\text{Sustituyendo: } E_{Y,10} H_{X,10}^* = \frac{w\mu\beta_g a^2}{\pi^2} |A_{10}|^2 \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi x}{a}\right)$$

Reemplazando en la ecuación: 6.57

$$P_{p,10} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{X=0}^a \int_{Y=0}^b E_Y H_X^* dy dx = \frac{1}{2} \frac{w\mu\beta_g a^2}{\pi^2} |A_{10}|^2 \int_{X=0}^a \int_{Y=0}^b \operatorname{sen}^2\left(\frac{\pi}{a} x\right) dy dx$$

$$\text{Integrando: } \langle 6.58 \rangle P_{p,10} = \frac{1}{4} \frac{w\mu\beta_g a^3 b}{\pi^2} |A_{10}|^2$$

Ejemplo No. 6.18

Para una guía de ondas rectangular R159 (1,590" 0.795"), con dieléctrico de aire, calcular la potencia máxima que puede soportar para una onda con frecuencia de 5.5 GHz .

Solución:

La resistencia dieléctrica promedio del aire, es de: $E_{\max} = 1.6 \text{ MV} / \text{m}$, es decir es la máxima intensidad de campo eléctrico que el aire puede resistir para no convertirse en conductor. Esto nos indica que a una guía de ondas, con dieléctrico de aire, no se le puede aplicar una intensidad de \vec{E} mayor a ese valor, ya que las ondas electromagnéticas no se propagan a través de medios conductivos.

$$\begin{aligned} E_{Y,10} \Big|_{10} &= -j \frac{w\mu\pi}{K_{C,10}^2 a} A_{10} \text{sen}\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-j\beta z} = -j \frac{w\mu\pi}{(\pi/a)^2 a} A_{10} \text{sen}\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-j\beta_g z} \\ &= -j \frac{w\mu a}{\pi} A_{10} \text{sen}\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-j\beta_g z} \end{aligned}$$

$$\left| E_{Y,10} \right|_{\max} = \frac{w\mu a}{\pi} A_{10} \text{sen}\left(\frac{\pi x}{a}\right) \Big|_{\max} = \frac{w\mu a}{\pi} A_{10} = 1.6 \text{ MV} / \text{m}$$

$$A_{10} = \frac{\pi}{w\mu a} \left| E_{Y,10} \right|_{\max} \quad \text{reemplazando en 6.58}$$

$$P_{p,10} \Big|_{\max} = \frac{1}{4} \frac{w\mu\beta_g a^3 b}{\pi^2} \left(\frac{\pi}{w\mu a} \left| E_{Y,10} \right|_{\max} \right)^2 = \frac{1}{4} \frac{ab\beta_g}{w\mu} \left| E_{Y,10} \right|_{\max}^2$$

La constante de fase a 5.5 GHz, empleando la ecuación 6.2:

$$\beta_g a = \sqrt{(ka)^2 - (m\pi)^2 - (2n\pi)^2} \quad , \quad k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} : \text{número de onda}$$

Para el caso del aire (vacío): $\epsilon_r = \mu_r = 1$, entonces: $k = \frac{\omega}{c}$, al

reemplazar, teniendo en cuenta que: $m = 1$ y $n = 0$, y que

$a = 1.59'' \approx 4.04 \text{ cm}$, tenemos que:

$$\begin{aligned} \beta_g &= \sqrt{(2\pi f / c)^2 - (\pi / a)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{2\pi \times 5.5 \times 10^9}{3 \times 10^8}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{4.04 \times 10^{-2}}\right)^2} = 84.96 \text{ (rad / m)} \end{aligned}$$

Reemplazando valores:

$$\begin{aligned} P_{p,10} \Big|_{\max} &= \frac{1}{4} \frac{ab\beta}{w\mu} \Big| E_{Y,10} \Big|_{\max}^2 \\ &= \frac{1}{4} \frac{(4.04 \times 10^{-2})(2.02 \times 10^{-2})(84.96)}{(2\pi)(5.5 \times 10^9)(4\pi \times 10^{-7})} (1.6 \times 10^6)^2 = 1.021,8 \text{ KW} \end{aligned}$$

6.5.2.9 Constante de atenuación en las guías de ondas rectangulares

Como es bien conocido la atenuación de una señal se define como la disminución del nivel que sufre la señal cuando se propaga a través de un medio determinado. Para el caso de las guías de ondas, la atenuación de la señal se debe principalmente a dos causas: por un lado, a que el dieléctrico de la guía no es perfecto (contiene cierto grado de conductividad) y a que el conductor de las láminas de la guía tampoco es perfecto (tiene una conductividad finita).

Se tiene que: *en un conductor no perfecto la componente tangencial de campo eléctrico no es estrictamente nula en su superficie* y por lo tanto, la densidad de corriente que se induce en la superficie del conductor no es totalmente superficial,

sino que en cierto porcentaje logra penetrar en el interior del conductor, lo cual produce unas pérdidas a la intensidad de la señal.

A continuación, se expresan las ecuaciones mediante la cuales se puede determinar las pérdidas, tanto las producidas por el dieléctrico como por los conductores de la guía. ⁽¹⁷⁾

- *Atenuación dieléctrica:*

$$\langle 6.59 \rangle \alpha_{d,mn} = \frac{1}{2} \frac{\sigma \eta}{\sqrt{1 - (f_{c,mn} / f)^2}} \quad (Np / m)$$

Dónde:

σ : *conductividad del dieléctrico (S / m)*

$\eta = \sqrt{\mu / \varepsilon}$: *impedancia intrínseca del dieléctrico (Ω)*

$f_{c,mn}$: *frecuencia de corte de la guía (Hz)*

f : *frecuencia de operación (Hz)*

- *Atenuación de conducción (ó mica):*

$$\langle 6.60 \rangle \alpha_c = \frac{|W_c|}{2W_0 l} \quad (Np / m)$$

Dónde :

W_c : potencia absorbida y disipada por las paredes de la guía (W)

W_0 : potencia transportada por el modo determinado en la guía (W)

l : distancia de propagación en la guía (m)

$$(6.61) W_c = \frac{1}{2} R_s I^2$$

$R_s = \sqrt{w\mu / 2\sigma}$: resistencia superficial de las láminas de la guía (Ω).

I : corriente en la superficie de las láminas de la guía (A).

w : velocidad angular de la onda (rad./s)

μ : permeabilidad magnética de las láminas de la guía (H/m).

σ : conductividad de las láminas de la guía (S/m).

Ejemplo No. 6.19

Determinar la constante de atenuación dieléctrica, para una guía de ondas rectangular, si la frecuencia de corte es de 3 GHz y la de operación es de 4GHz, para:

a.) Con dieléctrico de teflón (PTFE).

b.) Con dieléctrico de aire.

Teniendo como referencia los valores relacionados en la tabla No. 6.1, de las características eléctricas, de los dos dieléctricos a emplear.

Dieléctrico	Constante dieléctrica	Conductividad (S/m)	Factor de velocidad
Teflón	2.1	10^{-12}	0.7
Aire	1.00051	$3 \cdot 10^{-15}$	1.0

Tabla No. 6.1 Características eléctricas del Teflón y del Aire.

:
Solución:

Se utiliza la ecuación 6.59: $\alpha_{d, mn} = \frac{1}{2} \frac{\sigma \eta}{\sqrt{1 - (f_{c, mn} / f)^2}}$

a.) Con dieléctrico de teflón (PTFE)

$$\text{Impedancia intrínseca del teflón: } \eta = \sqrt{\mu / \epsilon}$$

$$\text{Constante dieléctrica del teflón: } K_e = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 2.1$$

$$\text{Permitividad del teflón: } \epsilon = (2.1)(8,854 \times 10^{-12}) = 18.59 \times 10^{-12}$$

$$\text{Velocidad de la onda a través del teflón: } v_p = 1 / \sqrt{\mu \epsilon} = 0.7c$$

$$\text{Permeabilidad magnética del teflón: } \mu = 1 / (0.7c)^2 \epsilon \approx 12.2 \times 10^{-7}$$

$$\text{Entonces: } \eta = \sqrt{12.2 \times 10^{-7} / 18.59 \times 10^{-12}} = 256.18 \Omega$$

$$\text{Reemplazando: } \alpha_{d, mn} = \frac{1}{2} \frac{(10^{-12})(256.18)}{\sqrt{1 - (3/4)^2}}$$

$$= 193.66 \times 10^{-12} \text{ (Np / m)} \approx 0.17 \times 10^{-8} \text{ dB / m}$$

b.) Con dieléctrico de aire

Impedancia intrínseca del aire (vacío) : $\eta \approx \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \approx 377 \Omega$

$$\begin{aligned} \text{Reemplazando : } \alpha_{d,mn} &= \frac{1}{2} \frac{(3 \times 10^{-15})(377)}{\sqrt{1 - (3/4)^2}} \\ &= 0.857 \times 10^{-12} \text{ (Np / m)} \approx 0.74 \times 10^{-11} \text{ dB / m} \end{aligned}$$

Los valores de estas atenuaciones son bastantes bajas, ya que corresponden solamente a las que les produce el dieléctrico de la guía.

Ejemplo No. 6.20

Determinar, para las guías de ondas rectangulares, tanto para el modo T como TM , en que frecuencia de operación la atenuación, debida a las pérdidas en el dieléctrico, es máxima.

Solución:

Encontramos el máximo de la atenuación de las guías de ondas rectangulares, debida a las pérdidas en el dieléctrico, expresada en la ecuación 6.59, con respecto a la relación $(f_{c,mn} / f_0)$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d(f_{c,mn} / f)} (\alpha_{d,mn}) &= \frac{d}{d(f_{c,mn} / f)} \left(\frac{1}{2} \frac{\sigma \eta}{\sqrt{1 - (f_{c,mn} / f)^2}} \right) = 0 \\ &= \frac{1}{2} \sigma \eta (1 - (f_{c,mn} / f)^2)^{-3/2} (2)(f_{c,mn} / f) = 0 \\ &= (1 - (f_{c,mn} / f)^2)^{-3/2} = 0 \end{aligned}$$

$$\text{Entonces : } (1 - (f_{c,mn} / f)^2) = 0 \Rightarrow f = f_{c,mn}$$

En la tabla No. 6.2, se relacionan la atenuación teórica de algunos tipos de guías de ondas rectangulares.

Denominación	Dimensiones (pulgadas)	Rango de frecuencia (GHz)	Atenuación (dB/m)
R650	6,500 3,250	1.00 - 1.70	0.009
R430	4,300 2,150	1.70 - 2.60	0.012
R340	3,400 1,700	2.20 - 3.30	0.018
R284	2,840 1,340	2.60 - 3.95	0.024
R229	2,290 1,145	3.30 - 4.90	0.031
R187	1,872 0,872	3.95 - 5.85	0.045
R159	1,590 0,795	4,90 - 7.05	0.055
R137	1,372 0,622	5.85 - 8.20	0.070
R112	1,122 0,497	7.05 - 10.0	0.100
R90	0,900 0,400	8.20 - 12.4	0.140
R75	0,750 0,375	10.0 - 15.0	0.200
R62	0,622 0,311	12.4 - 18.0	0.250
R51	0,510 0,255	15.0 - 22.0	0.350
R42	0,420 0,170	18.0 - 26.0	0.450
R34	0,340 0,170	22.0 - 33.0	0.560
R28	0,280 0,149	26.5 - 40.0	0.700
R22	0,224 0,112	33.0 - 50.0	0.750
R19	0,188 0,094	40.0 - 60.0	0.970

Tabla No. 6.2 Atenuación teórica de algunos tipos de guías de ondas rectangulares.

Fuente: Barbieri, M. B., *Campos y ondas*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata Argentina, 2012, p. 29.

En la tabla No. 6.3, se relacionan los principales parámetros básicos, de los dos modos de transmisión en las guías de ondas rectangulares.

Compendio de los parámetros básicos de las guías de ondas rectangulares		
Parámetro	Modo TE_{mn}	Modo TM_{mn}
Número de onda: K	$\frac{w}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$	$\frac{w}{c} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$
Número de onda de corte: K_c	$\sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2}$	$\sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2}$
Frecuencia de corte: f_c	$\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon\mu}} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$	$\frac{1}{2\sqrt{\varepsilon\mu}} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$
Constante de fase de la guía: β_g	$\frac{2\pi\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2} = \sqrt{k^2 - k_c^2}$	$\frac{2\pi\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2} = \sqrt{k^2 - k_c^2}$
Longitud crítica de la onda: λ_c	$2\pi / k_c$	$2\pi / k_c$
Longitud de onda en la guía: λ_g	$\frac{2\pi}{\beta_g} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2}}$	$\frac{2\pi}{\beta_g} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2}}$
velocidad de fase: v_f	$\frac{v_0}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}}$	$\frac{v_0}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}}$
velocidad de propagación: v_p	$v_0 \sqrt{1 - (f_c/f)^2}$	$v_0 \sqrt{1 - (f_c/f)^2}$
Constante de atenuación dieléctrica: α_d	$\frac{1}{2} \frac{\sigma \eta}{\sqrt{1 - (f_{c,mn}/f)^2}}$	$\frac{1}{2} \frac{\sigma \eta}{\sqrt{1 - (f_{c,mn}/f)^2}}$

Constante de atenuación de conducción: α_C	$\frac{ W_c }{2W_0 l}$	$\frac{ W_c }{2W_0 l}$
Campo eléctrico en x: E_x	$j \frac{w\mu n\pi}{K_c^2 b} A \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$	$-j \frac{\beta m\pi}{K_c^2 a} B \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$
Campo eléctrico en y: E_y	$-j \frac{w\mu m\pi}{K_c^2 a} A \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$	$-j \frac{\beta_g n\pi}{K_c^2 b} B \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$
Campo eléctrico en z: E_z	0	$B \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$
Intensidad magnética en x: H_x	$j \frac{\beta_g m\pi}{K_c^2 a} A \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$	$j \frac{w\varepsilon n\pi}{K_c^2 b} B \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$
Intensidad magnética en y: H_y	$j \frac{\beta_g n\pi}{K_c^2 b} A \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$	$-j \frac{w\varepsilon m\pi}{K_c^2 a} B \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$
Intensidad magnética en z: H_z	$A \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta_g Z}$	0
Impedancia característica: g	$\frac{w\mu}{\beta_g} = \frac{k\eta}{\beta_g} = \frac{\mu c}{\sqrt{1-(f_c/f_0)^2}}$	$\frac{\beta_g}{w\varepsilon} = \frac{\beta_g \eta}{k} = \mu c \sqrt{1-(f_c/f_0)^2}$

Tabla No. 6.3 Compendio de los parámetros básicos de las guías de ondas rectangulares

Ejemplo No. 6.21

Determinar el modo de que se transmite una onda TM_{mn} en una guía de ondas rectangular, con dieléctrico de aire y dimensiones a cm y b cm, si la distancia

entre dos ceros consecutivos de la onda es de 10cm y la frecuencia de operación es de 4.5 GHz. ⁽¹⁸⁾

Solución:

Una onda contiene tres ceros en la trayectoria de su longitud (el inicio, el terminal de su semiciclo de recorrido y el final de su ciclo). Por lo tanto, si hay dos ceros en la trayectoria de la onda, esto corresponde a un semiciclo de la misma, es decir que su longitud de la onda sería el doble de la distancia entre los dos ceros consecutivos.

- La longitud de onda de la señal que se propaga en la guía es:

$$\lambda_g = (2)(10 \times 10^{-2} m) = 20 \times 10^{-2} (m)$$

Las expresiones que se relacionan a continuación están referenciadas para el modo TM_{mn} :

- De acuerdo con la ecuación 6.47, la constante de fase en la guía (con dieléctrico de aire), es:

$$\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \frac{2\pi}{20 \times 10^{-2}} = 10\pi (rad./m)$$

- También se tiene que el número de onda (con dieléctrico de aire), es:

$$K = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad , \quad K|_{aire(vacío)} = \frac{\omega}{c} = \frac{(2\pi)(4.5 \times 10^9)}{3 \times 10^8} = 30\pi (rad./m)$$

- Número de onda de corte (desde la siguiente ecuación), con dieléctrico de aire:

$$\beta_g = \sqrt{k^2 - k_C^2}$$

$$k_C = \sqrt{k^2 - \beta_g^2} = \sqrt{(30\pi)^2 - (10\pi)^2} = 28.28\pi (rad./m)$$

- Modo de propagación TM_{mn}

El número de onda de corte está en función del modo de propagación, a saber:

$$k_c = \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2}$$

$$28.28\pi = \sqrt{(m\pi/(10 \times 10^{-2}))^2 + (n\pi/(5 \times 10^{-2}))^2}$$

$$799.76\pi^2 = (0.1)^2 \times 10^4 \pi^2 m^2 + (0.2)^2 \times 10^4 \pi^2 n^2$$

$$799.76 \times 10^{-4} = (0.1)^2 m^2 + (0.2)^2 n^2$$

$$8 = m^2 + 4n^2$$

La única solución posible de esta ecuación, es :

$$m = 2 \quad \text{y} \quad n = 1$$

Por lo tanto el modo de propagación de la señal en la guía, es TM_{21}

Ejemplo No. 6.22

Para el caso del ejemplo inmediatamente anterior, determinar las expresiones, de la onda, para el campo eléctrico longitudinal, si la magnitud del componente longitudinal del campo eléctrico es de 48 (m).

Solución:

Para el modo TM , los correspondientes componentes del campo eléctrico en la guía de ondas son:

$$\begin{aligned}
a.) E_x &= -j \frac{\beta_g m \pi}{K_c^2 a} B \cos\left(\frac{m \pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n \pi y}{b}\right) e^{-j \beta_g z} \\
&= -j \frac{(10 \pi) 2 \pi}{(28.28 \pi)^2 (10 \times 10^{-2})} (48) \cos\left(\frac{2 \pi x}{10 \times 10^{-2}}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi y}{5 \times 10^{-2}}\right) e^{-j 10 \pi z} \\
&= -j \frac{(10 \pi) 2 \pi}{(28.28 \pi)^2 (10 \times 10^{-2})} (48) \cos\left(\frac{2 \pi x}{10 \times 10^{-2}}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi y}{5 \times 10^{-2}}\right) e^{-j 10 \pi z} \\
&= -j 12 \cos\left(\frac{2 \pi x}{10 \times 10^{-2}}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi y}{5 \times 10^{-2}}\right) e^{-j 10 \pi z} \\
&= -j 12 \cos\left(\frac{\pi x}{5}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi y}{5}\right) e^{-j 10 \pi z} \text{ (V / m)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b.) E_y &= -j \frac{\beta_g n \pi}{K_c^2 b} B \text{sen}\left(\frac{m \pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n \pi y}{b}\right) e^{-j \beta_g z} \\
&= -j \frac{(10 \pi) \pi}{(28.28 \pi)^2 (5 \times 10^{-2})} (48) \text{sen}\left(\frac{2 \pi x}{10 \times 10^{-2}}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{5 \times 10^{-2}}\right) e^{-j 10 \pi z} \\
&= -j 12 \text{sen}\left(\frac{10^2 \pi x}{5}\right) \cos\left(\frac{10^2 \pi y}{5}\right) e^{-j 10 \pi z} \\
&= -j 12 \text{sen}\left(\frac{\pi x}{5}\right) \cos\left(\frac{\pi y}{5}\right) e^{-j 10 \pi z} \text{ (V / m)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c.) E_z &= B \text{sen}\left(\frac{m \pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n \pi y}{b}\right) e^{-j \beta z} = 48 \text{sen}\left(\frac{2 \pi x}{10 \times 10^{-2}}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi y}{5 \times 10^{-2}}\right) e^{-j 10 \pi z} \\
&= 48 \text{sen}\left(\frac{10^2 \pi x}{5}\right) \text{sen}\left(\frac{10^2 \pi y}{5}\right) e^{-j 10 \pi z} = 48 \text{sen}\left(\frac{\pi x}{5}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi y}{5}\right) e^{-j 10 \pi z} \text{ (V / m)}
\end{aligned}$$

Ejemplo No. 6.23

Una guía de ondas rectangular, con dieléctrico de aire, tiene una frecuencia de corte de 4.8 GHz y se encuentra operando en una frecuencia de 6.6 GHz, con modo predominante T_{10} , determinar:

- a.) El ancho de la guía.
- b.) La longitud de onda de corte.
- c.) La velocidad de grupo.
- d.) La velocidad de fase.

Solución:

- a.) Ancho de la guía:

Para el caso de modo predominante y dieléctrico de aire:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2} = \frac{c}{2} \sqrt{1/a^2} = \frac{c}{2a}$$

$$a = \frac{c}{2f_c} = \frac{3 \times 10^8}{(2)(4.8 \times 10^9)} = 3,125 \text{ (cm)}$$

- b.) Longitud de onda de corte:

$$\lambda_c = 2\pi / k_c$$

$$k_c = \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2} = \pi/a = \frac{\pi}{3,125 \times 10^{-2}}$$

$$\lambda_c = 2\pi / (\pi / (3,125 \times 10^{-2})) = 6.25 \text{ cm}$$

Otra forma de calcular λ_c : $\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \times 10^8}{4.8 \times 10^9} = 6.25 \text{ cm}$

- c.) velocidad de grupo, con dieléctrico de aire:

$$v_p = c \sqrt{1 - (f_c / f_0)^2} = 3 \times 10^8 \sqrt{1 - (4.8 / 6.6)^2} = 2,058 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

- d.) velocidad de fase, con dieléctrico de aire:

$$v_f = c / \sqrt{1 - (f_c / f_0)^2} = 3 \times 10^8 / \sqrt{1 - (4.8 / 6.6)^2} = 4,373 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

$$\text{Debe cumplirse : } v_f v_g = (2,058 \times 10^8)(4,373 \times 10^8) \approx 9 \times 10^{16} = c^2$$

Ejemplo No. 6.24

Determinar el ancho de banda de frecuencia, para que una guía de ondas rectangular con dieléctrico de aire de dimensiones $a = 4 \text{ cm}$ y $b = 2 \text{ cm}$, opere en régimen monomodo. T ⁽¹⁹⁾

Solución:

La operación de una guía de ondas en régimen monomodo se presenta cuando solamente se propaga un modo (modo fundamental) y a este modo de propagación se le conoce como modo dominante. Para el caso del ejemplo el modo dominante es T_{10} .

- El ancho de banda, de una guía de ondas, está dado por el intervalo existente entre la frecuencia de corte del primer modo y la del segundo modo. Entonces para este caso:

$$\langle 6.62 \rangle \Delta B = f_{c2} - f_{c1}$$

- Para una guía de ondas rectangular, del ejemplo; su frecuencia de corte en modo dominante es:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$$

$$f_{c1}|_{TE_{10}} = \frac{c}{2a} = \frac{3 \times 10^8}{(2)(4 \times 10^{-2})} = 3.75 \text{ GHz}$$

$$f_{c2}|_{TE_{20}} = \frac{2c}{2a} = \frac{c}{a} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 10^{-2}} = 7.5 \text{ GHz}$$

$$\Delta B = 7.5 - 3.5 = 4 \text{ GHz.}$$

Por lo tanto para que está guía trabaje en régimen monomodo, su frecuencia de operación debe estar entre ese rango de frecuencia:

$$f_{c1} < f < f_{c2} \quad , \quad 3.75 \text{ GHz} < f < 7.5 \text{ GHz}$$

En la práctica, se recomienda operar en el intervalo, $1.25 f_{c1} \leq f_0 \leq 0.95 f_{c2}$ para reducir el efecto de pérdidas óhmicas en las paredes conductoras, las cuales son más pronunciadas, para cada modo, en las proximidades de su frecuencia de corte y reduciendo también la distorsión de la onda.

Para la misma guía de ondas del ejemplo inmediatamente anterior, con dieléctrico de aire, determinar el valor de pico del campo eléctrico dentro de la guía, si el modo de propagación de la onda es de TE_{10} y transporta una potencia máxima de 4m . En una frecuencia de operación de 6GHz.

Solución:

Para este caso se tiene en cuenta la expresión indicada a continuación, deducida en el ejemplo No. 6.18.

$$P_{p,10}|_{\max} = \frac{1}{4} \frac{ab\beta_g}{w\mu} |E_{Y,10}|_{\max}^2 \Rightarrow |E_{Y,10}|_{\max}^2 = 4 \frac{w\mu}{ab\beta_g} P_{p,10}|_{\max}$$

$$|E_{Y,10}|_{\max} = \left[4 \frac{w\mu}{ab\beta_g} P_{p,10}|_{\max} \right]^{1/2} = (w\mu)^{1/2} \left[4 \frac{1}{ab\beta_g} P_{p,10}|_{\max} \right]^{1/2}$$

$$= \frac{2}{c} \left[\frac{1}{ab\beta_g} P_{p,10}|_{\max} \right]^{1/2}$$

Teniendo de presente la $f_c = 3.75 \text{ GHz}$, para modo TE_{10} , obtenida en el ejemplo anterior:

$$\beta_g = \frac{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2} = \frac{2\pi}{3 \times 10^8} \sqrt{(6 \times 10^9)^2 - (3.75 \times 10^9)^2}$$

$$= 98.1 \text{ (rad/m)}$$

Reemplazando valores: $|E_{Y,10}|_{\max} = \frac{2}{3 \times 10^8} \left[\frac{4 \times 10^{-3}}{(4 \times 10^{-2})(2 \times 10^{-2})(98.1)} \right]^{1/2}$

$$|E_{Y,10}|_{\max} = 4.76 \text{ (}\eta\text{V/m)}$$

Ejemplo No. 6.25

Definir el dimensionamiento de una guía de ondas rectangular, teniendo como condición que $b < a < 2b$, con dieléctrico de aire, para que opere a 3.2 GHz en modo T dominante. Se desea que la frecuencia de operación sea por lo menos 25% mayor que la frecuencia de corte. ⁽²⁰⁾

Solución:

- $f_0 \geq 1.25 f_{c,10} \Rightarrow f_{c,10} \leq 3.2 \text{ GHz} / 1.25 \Rightarrow f_{c,10} \leq 2.56 \text{ GHz}$

- $f_{c,mn} = \frac{c}{2} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2} \Rightarrow f_{c,10} = \frac{c}{2a} \leq 2.56 \text{ GHz}$

- $a \geq \frac{c}{2f_{c,10}} = \frac{3 \times 10^8}{5.12 \times 10^9} = 5.86 \text{ cm}$

\Rightarrow se elije: $a = 6.0 \text{ cm}$ (por ejemplo)

- $a \leq 2b \Rightarrow b \geq 6.0 \text{ cm} / 2 = 3.0 \text{ cm}$

\Rightarrow se elije: $b = 3.3 \text{ cm}$ (por ejemplo)

6.6 Características de las guías de ondas circulares

6.6.1 Estructura de la guía de ondas circular

Estas guías de ondas presentan una estructura circular hueca (o rellena con un dieléctrico), donde el radio interno tiene una dimensión a ". En la figura No. 6.9, se ilustra la característica estructural de una guía de ondas circular y una imagen de esta.

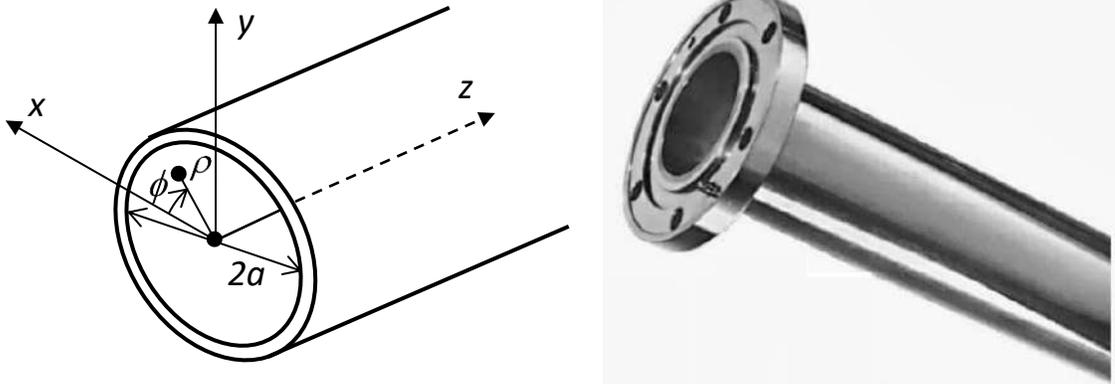


Figura No. 6.9 Estructura e imagen básica de una guía de onda circular

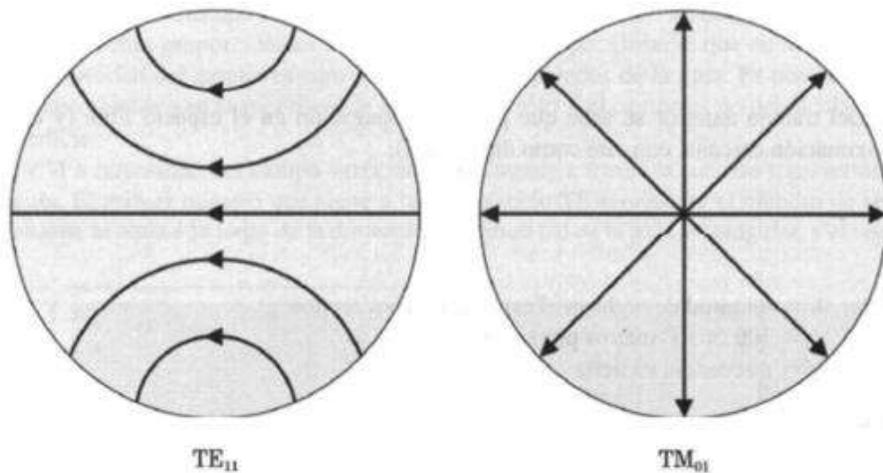
Este tipo de guía ofrecen mayor facilidad de construcción y de empalme, que las rectangulares, y así mismo permiten la propagación, tanto de ondas polarizadas verticales como horizontales. Sin embargo, puede presentar el hecho de cambiar la polarización de las ondas, de tal forma que si la onda que se propaga, por este tipo de guía, tiene polarización vertical podría cambiar a polarización horizontal y viceversa. ⁽²¹⁾

6.6.2 Modos de propagación en las guías de ondas circulares

Así como en las guías rectangulares, en las circulares puede ocurrir diferentes modos de propagación: TE , TM y TM , dependiendo de las veces que el campo eléctrico varíe a lo largo de la circunferencia de la guía, o a lo largo del radio de esta.

En las guías de ondas circulares, también se presenta que las líneas del campo eléctrico y las del campo magnético son perpendiculares entre sí en cualquier punto de la guía de ondas. En la figura No. 6.10 se muestra una imagen de la sección transversal de una guía de ondas circular, representando una configuración de onda estacionaria dentro de la guía, del campo eléctrico, para los modos de propagación:

TE_{11} y TM_{01}



En la figura No. 6.10 Configuración de onda estacionaria dentro de una guía de ondas circular, para modos de propagación TE_{11} y TM_{01}

Fuente: Propagación en guías de ondas. (2019). Disponible:
http://coimbraweb.com/documentos/antenas/6.3_propagacion_guia.pdf

6.6.2.1 Modo de propagación TE en las guías de ondas circulares

A continuación se describe el proceso de deducción de los componentes tanto del campo eléctrico como de la intensidad magnética, en una guía de ondas tipo Circular, en todos los modos de propagación de tipo T ,⁽²²⁾

1. Se parte de dos de las ecuaciones del Max ell:

$$\langle 6.63 \rangle \vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad , \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\varepsilon\vec{E}$$

2. Aplicando el rotacional a cada una de las ecuaciones anteriores, en el sistema cilíndrico, se tiene:

a.) Para los componentes del campo eléctrico:

$$\langle 6.64 \rangle \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \frac{\partial E_\phi}{\partial z} = -j\omega\mu H_\rho \quad , \quad \frac{\partial E_\rho}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial \rho} = -j\omega\mu H_\phi$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho E_\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_\rho}{\partial \phi} = -j\omega\mu H_z$$

b.) Para los componentes de la intensidad magnética:

$$\langle 6.65 \rangle \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} = j\omega\varepsilon E_\rho \quad , \quad -j\beta H_\rho - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} = j\omega\varepsilon E_\phi$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho H_\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\rho}{\partial \phi} = j\omega\varepsilon E_z$$

3. Considerando que la superficie interior de la guía es un conductor perfecto, no puede existir componente tangencial de campo eléctrico, por lo tanto, no habrá componente eléctrico en todos los puntos interiores de la guía, entonces:

$$\langle 6.66 \rangle E_z = 0.$$

4. Haciendo las combinaciones y los remplazos respectivos en las ecuaciones anteriores se tiene que:

$$\langle 6.67 \rangle \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \omega^2 \mu \epsilon H_z = 0$$

5. La solución de la ecuación anterior, es:

$$\langle 6.68 \rangle H_z = A_0 J_n(h\rho) \cos(n\phi)$$

Donde:

A_0 : intensidad pico

J_n : función de Bessel de segunda clase, de orden : n

J'_n : derivada de J_n

$h\rho$: argumento de la función de Bessel

6. Conocidos los valores de E_z y H_z , se puede despejar los demás componentes, tanto eléctricos como magnéticos, al despejar las ecuaciones relacionadas en 6.64 y 6.65, dando como resultado los componentes, tanto eléctricos como magnéticos, en modo T , en una guía de ondas circular:

$$\langle 6.69 \rangle E_\rho = j \frac{\omega \mu n}{h^2 \rho} A_0 J_n(h\rho) \sin(n\phi) \quad , \quad E_\phi = j \frac{\omega \mu}{h} A_0 J'_n(h\rho) \cos(n\phi)$$

$$E_z = 0$$

$$\langle 6.70 \rangle H_\rho = -j \frac{\beta_g}{h} A_0 J'_n(h\rho) \cos(n\phi) = -\frac{\beta_g}{\omega \mu} E_\phi$$

$$H_\phi = j \frac{\beta_g n}{h^2 \rho} A_0 J_n(h\rho) \sin(n\phi) = \frac{\beta_g}{\omega \mu} E_\rho \quad , \quad H_z = A_0 J_n(h\rho) \cos(n\phi)$$

6.6.2.2 Modo de propagación TM en las guías de ondas circulares

En forma similar al proceso descrito anteriormente, para determinar los componentes del modo T , se realiza para determinar los componentes del modo TM :(23)

1. Por las mismas consideraciones que no existe componente eléctrico en la superficie interior de la guía ($E_z = 0$), en modo T , entonces el componente magnético tampoco existirá en modo TM :

$$\langle 6.71 \rangle H_z = 0$$

2. Nuevamente haciendo las combinaciones y los remplazos respectivos en las ecuaciones 6.64 y 6.65, se tiene que:

$$\langle 6.72 \rangle \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + w^2 \mu \epsilon E_z = 0$$

3. La solución de la ecuación anterior, es:

$$\langle 6.73 \rangle E_z = B_0 J_n(h\rho) \cos(n\phi)$$

Donde:

B_0 : intensidad pico

J_n : función de Bessel de segunda clase, de orden : n

J_n' : derivada de J_n

hp : argumento de la función de Bessel

4. Conocidos los valores de E_z y H_z , se puede despejar los demás componentes, tanto eléctricos como magnéticos, al despejar las ecuaciones relacionadas en 6.64 y 6.65, dando como resultado los componentes, tanto eléctricos como magnéticos en modo TM , en una guía de ondas circular, indicados en las ecuaciones 6.74 y 6.75.:

$$\langle 6.74 \rangle E_{\rho} = -j \frac{\beta_g}{h} B_0 J_n'(h\rho) \cos(n\phi) \quad ,$$

$$E_{\phi} = j \frac{\beta_g m}{h^2 \rho} B_0 J_n(h\rho) \sin(n\phi) \quad , \quad E_z = B_0 J_n(h\rho) \cos(n\phi)$$

$$\langle 6.75 \rangle H_{\rho} = -j \frac{w\varepsilon n}{h^2 \rho} B_0 J_n(h\rho) \sin(n\phi) = -\frac{w\varepsilon}{\beta} E_{\phi}$$

$$H_{\phi} = -j \frac{w\varepsilon}{h} B_0 J_n'(h\rho) \cos(n\phi) = \frac{w\varepsilon}{\beta} E_{\rho} \quad , \quad H_z = 0$$

6.6.2.3 Función de Bessel

Las funciones de Bessel son especialmente importantes en muchos problemas de propagación de ondas, potenciales estáticos y cualquier otro problema descrito por las ecuaciones de Helmholtz o Laplace en simetrías cilíndricas o esféricas". En la figura No. 6.11 se representan las curvas de la función de Bessel, de diferente orden, donde el argumento es: $X = (h\rho)$.⁽²⁴⁾

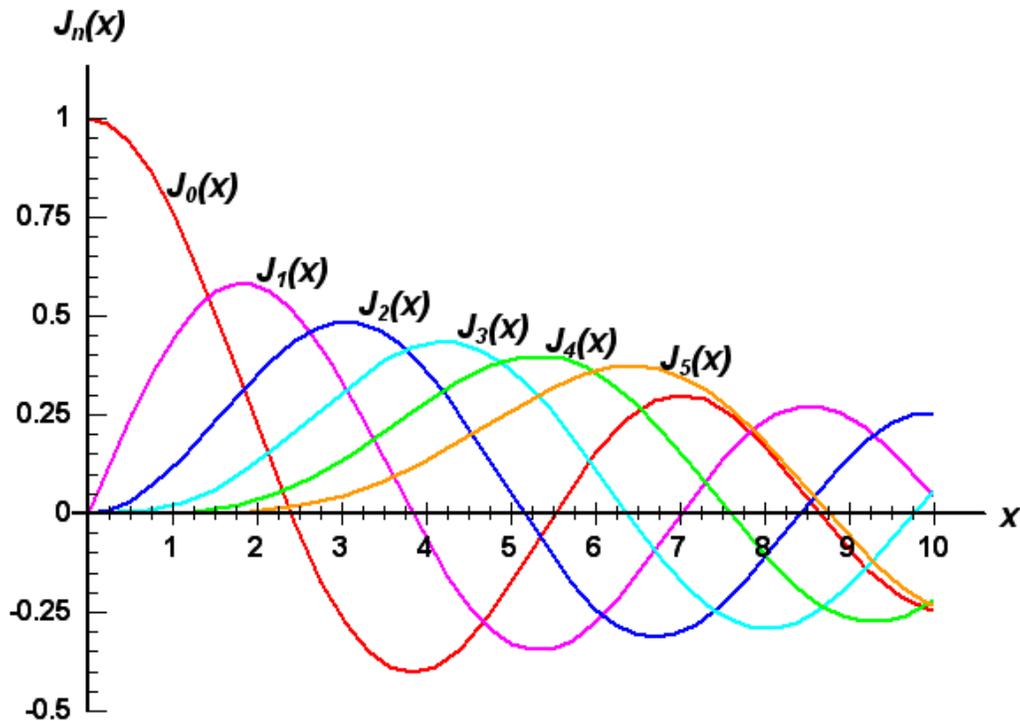


Figura No. 6.11 Curvas de la función de Bessel para diferente orden, donde $X = (h\rho)$.

Fuente: Olver, F. W. J.; Maximon, L. C. (2015), *Bessel function*, in Olver, Frank W. J.; Lozier, Daniel M.; Boisvert, Ronald F. et al., *NIST Handbook of Mathematical Functions*, Cambridge University Press.

En la tabla No. 6.4, se relacionan los valores correspondientes de la función de Bessel, de varias órdenes, para diferentes argumentos: $(h\rho)$.

$h\rho$	Orden																
	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}	J_{13}	J_{14}	J_{15}	J_{16}
0.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.25	0.98	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.5	0.94	0.24	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.5	0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0	0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	0.40	0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5.0	0.18	0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-
6.0	0.15	0.28	0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	-	-	-	-	-	-	-
7.0	0.30	0.00	0.30	0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02	-	-	-	-	-	-
8.0	0.17	0.23	0.11	0.29	0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03	-	-	-	-	-

Tabla No. 6.4 valores correspondientes de la función de Bessel, de varias órdenes, para diferentes argumentos: $(h\rho)$.

Fuente: Olver, F. W. J.; Maximon, L. C. (2015), *Bessel function*, in Olver, Frank W. J.; Lozier, Daniel M.; Boisvert, Ronald F. et al., *NIST Handbook of Mathematical Functions*, Cambridge University Press,

Ejemplo No. 6.26

Determinar la expresión del campo eléctrico, en función tanto del espacio como del tiempo, de una señal que se propaga en una guía de ondas circular, cuyo dieléctrico es de aire, con un radio de 3.0 cm y la frecuencia de operación es de 3.8 GHz, para modo de propagación T_{01} .⁽²⁵⁾

Solución:

La composición vectorial del campo eléctrico en el sistema de coordenadas cilíndricas está dada por la siguiente expresión:

$$\langle 6.76 \rangle \vec{E} = E_{\rho} \hat{a}_{\rho} + E_{\phi} \hat{a}_{\phi} + E_z \hat{a}_z \quad \text{para TE en guía circular} \rightarrow E_z = 0$$

De acuerdo con la ecuación 6.69:

$$E_{\rho} = j \frac{w\mu n}{h^2 \rho} A_0 J_n(h\rho) \text{sen}(n\phi) \quad , \quad E_{\phi} = j \frac{w\mu}{h} A_0 J'_n(h\rho) \text{cos}(n\phi)$$

Reemplazando en 6.76 :

$$\begin{aligned} \vec{E} &= j \left(\frac{w\mu n}{h^2 \rho} A_0 J_n(h\rho) \text{sen}(n\phi) \right) \hat{a}_{\rho} + j \left(\frac{w\mu}{h} A_0 J'_n(h\rho) \text{cos}(n\phi) \right) \hat{a}_{\phi} \\ \vec{E} &= j \frac{w\mu}{h} A_0 \left[\left(\frac{n}{h\rho} J_n(h\rho) \text{sen}(n\phi) \right) \hat{a}_{\rho} + \left(J'_n(h\rho) \text{cos}(n\phi) \right) \hat{a}_{\phi} \right] \end{aligned}$$

El valor de h se determina mediante la ecuación 6.77:

$$\langle 6.77 \rangle h = \frac{S_{m,n}}{a}$$

Donde:

$S_{m,n}$: corresponde al valor de la raíz del respectivo modo de propagación.

a : radio interno de la guía circular.

$$\langle 6.78 \rangle S_{m,n} = \frac{(f_{cTE_{m,n}})(2\pi a)\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}{c}$$

Donde:

$f_{cTE_{m,n}}$: frecuencia de corte de la guía circular en modo TE_{11}

ε_r : permitividad relativa del dieléctrico de la guía

c : velocidad de la luz.

Para el caso del ejemplo en cuestión:

Aplicando la ecuación 6.79 :

$$f_{cTE_{1,1}} = \frac{c}{1.71 \times D \times \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}$$

$$f_{cTE_{1,1}} = \frac{3 \times 10^8}{(1.71 \times 6 \times 10^{-2}) \times \sqrt{(1 \times 1)}} = 2.92 \text{ GHz}$$

$$S_{m,n} = \frac{(f_{cTE_{m,n}})(2\pi a)\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}{c}$$

$$S_{1,1} = \frac{(2.92 \times 10^9)(2\pi \times 3 \times 10^{-2})\sqrt{(1 \times 1)}}{3 \times 10^8} = 1,835$$

Entonces :

$$h = \frac{S_{1,1}}{a} = \frac{1,835}{3 \times 10^{-2}} = 61.17$$

Ahora reemplazando valores, en:

$$\vec{E}(\rho, \phi, z) = j \frac{\omega \mu_0}{h} A_0 \left[\left(\frac{n}{h\rho} J_n(h\rho) \sin(n\phi) \right) \hat{a}_\rho + \left(J'_n(h\rho) \cos(n\phi) \right) \hat{a}_\phi \right]$$

$$\vec{E}(\rho, \phi, z) = j \frac{(2\pi \times 3.8 \times 10^9)(4\pi \times 10^{-7})}{61.17} A_0 \left[\left(\frac{1}{61.17\rho} J_n(61.17\rho) \sin(\phi) \right) \hat{a}_\rho + \left(J'_n(61.17\rho) \cos(\phi) \right) \hat{a}_\phi \right]$$

$$= j490.49 A_0 \left[(0.016 J_1(61.17\rho) \sin\phi) \hat{a}_\rho + \left(J'_n(61.17\rho) \cos(\phi) \right) \hat{a}_\phi \right] (V/m)$$

En función del tiempo:

$$\vec{E}(\rho, \phi, z, t) = \text{Re} \left[\vec{E}(\rho, \phi, z) e^{j\omega t} \right] (V/m)$$

6.6.2.4 Longitud de onda y frecuencia de corte en las guías de ondas circulares

En las guías de ondas circulares la longitud de onda y la frecuencia de corte, están determinadas por el diámetro interno de la guía, dependiendo del tipo de modo de propagación empleado. En las siguientes ecuaciones se indica la expresión para calcular, tanto la longitud de onda de corte como la frecuencia de corte, de algunos modos de propagación, en las guías de ondas circulares.⁽²⁶⁾

⟨6.79⟩ Para modo TE_{11} (modo dominante):

$$\lambda_c = 1.71 \times D \text{ (m)} \quad , \quad f_c = \frac{c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8}{1.71 \times D \times \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \text{ (Hz)}$$

⟨6.80⟩ Para modo TM_{01} :

$$\lambda_c = 1.31 \times D \text{ (m)} \quad , \quad f_c = \frac{c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8}{1.31 \times D \times \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \text{ (Hz)}$$

⟨6.81⟩ Para modo TE_{21} :

$$\lambda_c = 1.03 \times D \text{ (m)} \quad , \quad f_c = \frac{c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8}{1.03 \times D \times \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \text{ (Hz)}$$

Ejemplo No. 6.27

Determinar el diámetro que debe tener una guía de onda circular, con dieléctrico de aire, la cual va a ser utilizada para interconectar los transmisores de una estación de radio enlace satelital, con su correspondiente sistema de radiación, en la banda 6 de IEEE 802.11b, en modo de propagación T , para el canal 2,437 GHz. ⁽²⁷⁾

Solución:

La banda 6 de IEEE 802.11b, está definida en el rango de: 2,400 GHz a 2,4835 GHz. Con el propósito de dar mayor confiabilidad de respuesta de la guía en la banda definida, se incrementa, para la definición del diámetro, los límites de la banda. Generalmente se toma 5% por debajo de la frecuencia mínima de la banda y 5% por encima de la frecuencia máxima de la misma.

$$f_1 = f_{\min} - 5\% f_{\min} = 2,400 \text{ GHz} - 0,1200 \text{ GHz} = 2,2800 \text{ GHz}$$

$$f_2 = f_{\max} + 5\% f_{\max} = 2,4835 \text{ GHz} + 0,1242 \text{ GHz} = 2,6077 \text{ GHz}$$

Ahora se toman estas nuevas frecuencias como las de corte de T_{11} y T_{21} , y se calcula los respectivos diámetros que, de la guía para cada una de ellas, aplicando las ecuaciones 6.79 y 6.81, respectivamente.

Teniendo en cuenta que el dieléctrico es aire : $\mu_r = \epsilon_r = 1$

$$D_1 = \frac{3 \times 10^8}{1.71 f_1} = \frac{3 \times 10^8}{(1.71)(2,2800 \times 10^9)} = 7,695 \text{ cm}$$

$$D_2 = \frac{3 \times 10^8}{1.03 f_2} = \frac{3 \times 10^8}{(1.03)(2,6077 \times 10^9)} = 11,1693 \text{ cm}$$

El diámetro de la guía debe encontrarse entre estos valores anteriormente calculados. De tal manera que el diámetro máximo, no debe ser tan grande que la máxima frecuencia de operación sea mayor que la frecuencia de corte del modo T_{mn} , y que el diámetro mínimo no debe ser tan pequeño, que la mínima frecuencia de operación sea menor que la frecuencia de corte del modo dominante T_{mn} .

De lo anterior, el diámetro de la guía de ondas circular debe estar entre los dos valores calculados (7,695 cm y 11,1693 cm. Para definir el valor del diámetro de la guía, se utiliza la expresión indicada en la ecuación 6,82, siempre que se encuentre dentro del rango calculado. ⁽²⁸⁾

$$\langle 6.82 \rangle D = \frac{3}{4} \lambda$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2,437 \times 10^9} = 12.31 \text{ cm} \Rightarrow D = \frac{3}{4}(12.31) = 9,2325 \text{ cm}$$

Este es un valor aceptable ya que se encuentra dentro del rango de los diámetros calculado.

6.6.2.5 Impedancia característica de las guías de ondas circulares

La impedancia característica de una guía de ondas circulares (TE_{mn}), está dada en la ecuación 6.83 y 6.84, teniendo en cuenta, para la simplificación del proceso de deducción, las ecuaciones:6.74 y 6.75. ⁽²⁹⁾

a.) Para dieléctrico diferente a aire

$$\begin{aligned}
 \langle 6.83 \rangle Z_g &= \frac{E_\rho}{H_\phi} - \frac{E_\phi}{H_\rho} = \frac{w\mu}{\beta_g} = \frac{w\mu}{((2\pi)\sqrt{\mu_r\epsilon_r/c})\sqrt{f^2 - f_c^2}} \\
 &= \frac{2\pi f\mu c}{2\pi f\sqrt{\mu_r\epsilon_r}\sqrt{1-(f_c/f)^2}} = \frac{\mu c}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}\sqrt{1-(f_c/f)^2}} \\
 &= \frac{\mu c}{c\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1-(f_c/f)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon/\mu}} = \frac{\eta}{\sqrt{1-(f_c/f)^2}} (\Omega)
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\eta = \sqrt{\mu/\epsilon} : \text{impedancia del dieléctrico de la guía } (\Omega)$$

b.) Para dieléctrico de aire

$$\text{Impedancia del aire: } \eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi (\Omega)$$

$$\mu_0 : \text{permeabilidad del vacio} = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H} / \text{m})$$

$$\epsilon_0 : \text{permitividad del vacio} : 8,854 \times 10^{-12} (\text{F} / \text{m})$$

Entonces la impedancia característica de la guía con aire, es :

$$\langle 6.84 \rangle Z_g = \frac{120\pi}{\sqrt{1-(f_c/f)^2}} \approx \frac{377}{\sqrt{1-(f_c/f)^2}} (\Omega)$$

Ejemplo No. 6.28

Para la misma guía de onda circular del ejemplo No 6.27 y trabajando en las mismas condiciones ahí indicadas, determinar:

a.) La longitud de onda de la señal en el material del dieléctrico a utilizar la guía (aire).

b.) La longitud de onda de la señal en la guía.

- c.) La constante de fase de la guía.
- d.) La impedancia de la guía.
- e.) El ancho de banda para que sólo se propague el módulo dominante.
- f.) La velocidad de fase en la guía.
- g.) La velocidad de grupo (propagación) en la guía.

Solución:

- a.) Longitud de onda en el maaterial (aire):

Velocidad de propagación en un material :

$$v_p = \lambda f = c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$$

Longitud de onda en el aire $\sqrt{\mu_r \epsilon_r} = 1$:

$$\lambda = c / f \sqrt{\mu_r \epsilon_r} = (3 \times 10^8) / (3.8 \times 10^9) = 7.89 \text{ cm}$$

- b.) Longitud de onda en la guía (con dieléctrico de aire):

$$\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2}} = \frac{c}{\sqrt{f^2 - f_c^2}} = \frac{c}{f \sqrt{1 - (f_c / f)^2}} \\ &= \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (f_c / f)^2}} = \frac{7.89 \times 10^{-2}}{\sqrt{1 - (2.92 / 3.8)^2}} = 12.33 \text{ cm} \end{aligned}$$

- c.) Constante de fase de la guía(con dieléctrico de aire):

$$\begin{aligned} \beta_g &= \frac{2\pi \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{c} \sqrt{f^2 - f_c^2} = \\ &= \frac{2\pi}{3 \times 10^8} \sqrt{(3.8 \times 10^9)^2 - (2.92 \times 10^9)^2} = 50.89 \text{ (rad / m)} \end{aligned}$$

d.) Impedancia de la guía (con dieléctrico de aire): se emplea ecuación 6.84, teniendo en cuenta, las frecuencia de corte de la guía y la frecuencia de operación $f_c = 2.9 \text{ GHz}$ y $f = 3.8 \text{ GHz}$, determinadas y definidas en el ejemplo No. 6.27:

$$Z_g = \frac{120 \pi}{\sqrt{1 - (f_c / f)^2}} = \frac{120 \pi}{\sqrt{1 - (2.9 / 3.8)^2}} = 769.37 \Omega$$

e.) Ancho de banda para que sólo se propague el módulo dominante (TE₁₁). Empleando la ecuación 6.62:

$$\Delta B = f_{C2} - f_{C1}$$

Ecuación 6.79: $f_{C1} \equiv f_{cTE_{11}} = \frac{c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8}{1.71 \times D \times \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$

$$= \frac{3 \times 10^8}{(1.71 \times 6 \times 10^{-2}) \times \sqrt{(1 \times 1)}} = 2.92 \text{ GHz (ya calculada)}$$

Ecuación 6.81: $f_{C2} \equiv f_{cTE_{21}} = \frac{c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8}{1.03 \times D \times \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$

$$= \frac{3 \times 10^8}{(1.03 \times 6 \times 10^{-2}) \times \sqrt{(1 \times 1)}} = 4.85 \text{ GHz}$$

$$\Delta B = f_{C2} - f_{C1} = (4.85 - 2.92) \text{ GHz} = 1.93 \text{ GHz}$$

f.) velocidad de fase en la guía:

$$v_f = \frac{w}{\beta_g} = \frac{2\pi f}{50.89} = \frac{(2\pi)(3.8 \times 10^9)}{50.89} = 4.69 \times 10^8 \text{ (m / s)}$$

g.) velocidad de propagación en la guía (ecuación 6.52):

$$v_g v_f = c^2 \Rightarrow v_g = \frac{c^2}{v_f} = \frac{(3 \times 10^8)^2}{4.69 \times 10^8} = 1.92 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

Ejemplo No. 6.29

Deducir la velocidad de fase en función de la velocidad de propagación de la onda en el material que utilice la guía como dieléctrico.

Solución:

$$\begin{aligned} v_f &= \frac{w}{\beta_g} = \frac{2\pi f}{\frac{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}{c}\sqrt{f^2 - f_c^2}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \\ &= \frac{c}{\sqrt{(\mu/\mu_0)(\epsilon/\epsilon_0)}\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} = \frac{c}{\left(\sqrt{\mu\epsilon}/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}\right)\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} = \frac{v_{pd}}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} \end{aligned}$$

Donde velocidad de propagación de la onda en el material

del dieléctrico de la guía es: $v_{pd} = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$

μ, ϵ : permeabilidad y permitividad del material del dieléctrico.

6.7 Características de las guías de ondas elípticas

6.7.1 Estructura de la guía de ondas elíptica

Estas guías de ondas presentan una estructura elíptica hueca (o rellena con un dieléctrico), donde el radio interno menor es a'' y el radio interno mayor es b'' . En la figura No. 6.12, se ilustra la característica estructural de una guía de ondas elíptica y una imagen de esta

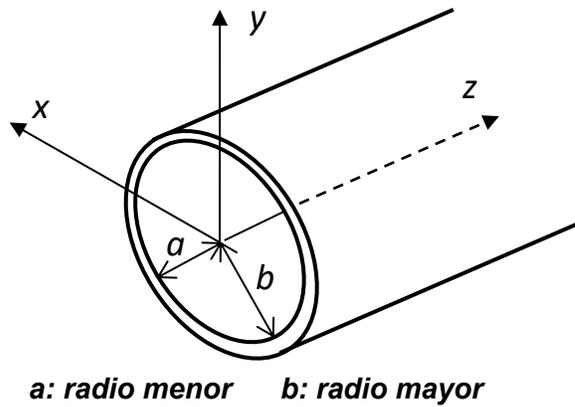


Figura No. 6.12, Característica estructural de una guía de ondas elíptica y una imagen de la misma

Debido a la flexibilidad que ofrecen estas guías, permiten mayor facilidad de instalación comparada con las guías rígidas. Es una de la de mayor utilización para interconexión entre las antenas (tipo parabólico esencialmente), para el rango de frecuencia entre 3.4 a 23.6 GHz. ⁽³⁰⁾

En la figura No. 6.13 se muestran unas imágenes donde se representa la estructura de la instalación de un conector a una fibra óptica elíptica



Figura No. 6.13 Estructura de la instalación de un conector a una fibra óptica elíptica.

Fuente: Cable ave Systems *Antenna Transmission ine Systems*”, Catalog, 2016, p.65.

6.7.2 Modos de propagación en las guías de ondas elípticas

La dirección de la polarización, en las guías de ondas elípticas, no puede girar, ya que la asimetría de su sección transversal hace que la polarización se mantenga en una dirección fija, ya sea paralela al eje mayor o al eje menor de la elipse. Por lo general se utiliza la dirección paralela al eje menor (ver figura No 6.14). Se considera que la guía elíptica es el paso intermedio de la transición de una guía circular a una guía rectangular. ⁽³¹⁾

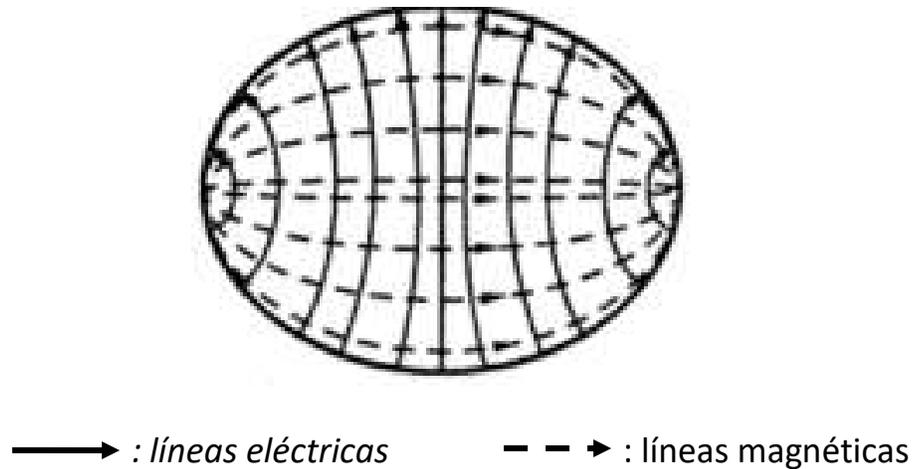


Figura No. 6.14 Campos transversales del modo dominante de propagación en una guía de ondas elípticas

Fuente: Teoría de las Guías de Onda.(2019). Disponible:
<https://dago60.blogspot.com/2018/07/teoria-de-las-guias-de-ondas-4.html>

6.7.3 Tipos de guías de ondas elípticas

En la tabla No. 6.5, se relacionan los principales tipos de guías de ondas elípticas, indicando su rango de frecuencia, las frecuencias de operación más utilizadas y las correspondientes atenuaciones para cada una de ellas

Tipo de Guía	Banda de Frecuencia (GHz)	Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB/m)
E 17, E P17	1.7 2.4	1.7 2.0 2.1	1.15 1.19 1.07
E 20	1.9 2.7	2.5	1.44

E 28	2.6 3.5	2.9 3.1 3.5	2.22 2.03 1.82
E 34,E P34	3.1 4.2	3.4 3.7 4.2	2.39 2.23 2.09
E 37,E P37 E P37S	3.3 4.3	3.7 3.95 4.2	3.03 2.77 2.60
E 44,E P44	4.2 5.1	4.4 4.7 5.0	4.54 4.00 3.69
E PS44	4.2 5.1	4.4 4.7 5.0	5.60 4.89 4.46
E 52,E P52 E P52S	4.6 6,425	5,925 6,125 6,425	3.95 3.87 3.80
E 63,E P63 E P63S	5.85 7,125	6,425 6,775 7,125	4.58 4.44 4.33
E 64,E P64	5.3 7.75	7,125 7,450 7,750	4.89 4.78 4.69
E 77,E P77	6.1 8.5	7,125 7,750 8,500	6.26 5.87 5.58
E 85	7.7 9.8	8.5 9.15 9.8	11.3 10.2 9.60
E 90,E P90 E PS90	8.3 11.7	10.7 11.2 11.7	10.31 10.05 9.84
E 127A E P127A	10.0 13.25	11.7 12.7 13.25	12.3 11.6 11.4
E 132,E P132	11.0 15.35	14.4 14.9 15.35	16.0 15.7 15.4

E 180, E P180	14.0 19.7	17.7 18.7 19.7	20.1 19.4 18.9
E 220, E P220	17.0 23.6	21.2 22.4 23.6	28.9 28.2 27.7

Tabla No. 6.5 Rango de frecuencias y atenuaciones de los principales tipos de guías de ondas elípticas.

Fuente: Costantini, S., *Características eléctricas de las guías de ondas elípticas*, Telecomunicaciones Universidad Metropolitana, 2017.

6.8 Aplicaciones de las guías de ondas

Las guías de ondas, tanto rectangulares como circulares y elípticas, tienen una diversidad de aplicaciones de las cuales se reseñan las siguientes:

6.8.1 Guías de ondas como medio de transmisión de microondas

Las guías de ondas son muy utilizadas para transmitir señales de microondas, entre un transmisor de radioenlace y el sistema de radiación correspondiente (antena), debido a que presenta pérdidas inferiores y resisten potencias superiores a lo que ofrece los cables coaxiales, para las mismas frecuencias. En la figura No. 5.26 se muestran las curvas, que indican la atenuación que presentan algunas de las guías de ondas, dentro de un rango de frecuencias, que corresponde al ancho de banda de su posible operación. Como ya se ha mencionado, en comentarios anteriores, el límite inferior del rango de frecuencia corresponde a la frecuencia de corte de la correspondiente guía y el límite superior a la frecuencia máxima de operación de la guía, ya que a partir de ese valor la atenuación crece de manera vertiginosa. En la misma figura se indican las curvas de atenuación de algunos tipos de cable coaxial, para el rango superior de sus posibles frecuencias de operación.

Ejemplo No. 6.30

Teniendo como referencia las curvas de atenuación de las principales guías de ondas, indicadas en la figura No. 5.26, determinar el rango posible de operación de las siguientes guías de ondas:

a.) E 127A.

- b.) R112.
- c.) C166.

Solución:

- a.) Para la guía elíptica E 127A, aproximadamente: 10 GHz a 13 GHz
- b.) Para la guía rectangular R112, aproximadamente: 11 GHz a 15 GHz
- c.) Para la guía circular C166, aproximadamente: 6 GHz a 8 GHz

En la figura No. 6.15 se ilustra la interconexión entre los equipos transmisores y receptores, con los sistemas de radiación (antenas) de una estación de repetición de microondas, utilizando guías de ondas.

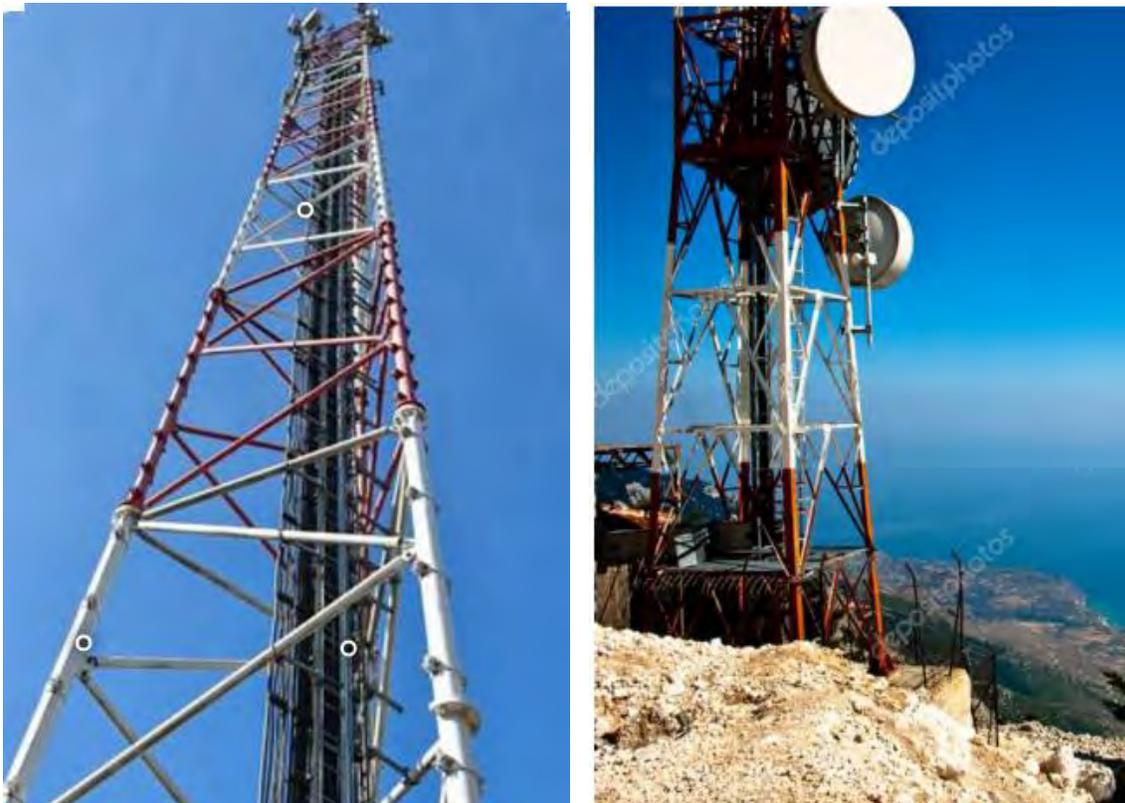


Figura No. 6.15 Torres de repetición de radioenlaces de microondas.

Fuente: Antena Parabolica Imágenes Fotos - 123RF. (2019). Disponible: es.123rf.com/imagenes-de-archivo/antena-parabolica.html

6.8.2 Guías de ondas como altavoz

Otra de las aplicaciones que han tenido las guías de ondas es la de servir como altavoz, donde la onda de sonido a ser difundida sale en forma plana en vez de una onda esférica, como es el caso de las bocinas convencionales. La onda plana

reduce sustancialmente las interferencias que se producen entre las ondas generadas entre el arreglo de bocinas, evitando de esta forma las llamadas zonas de interferencias. En la figura No. 6.16 se muestran unos de los diferentes tipos de altavoces existentes en el mercado, cuya base es una guía de onda circular y la apertura es de tipo rectangular. ⁽³²⁾



Figura No. 6.16 Altavoces con guías de ondas.

Fuente: Altavoz con guía de ondas. (2019). Disponible: patentados.com 2017 altavoz-con-guía-de-ondas

6.8.3 Guías de ondas como antena.

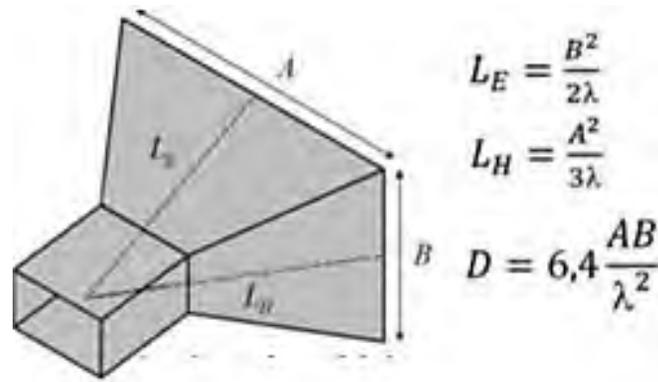
Existen diversas aplicaciones de las guías de ondas como antenas, a continuación, se relacionan dos de las de mayor referencia.

6.8.3.1 Guías de ondas como antena de apertura

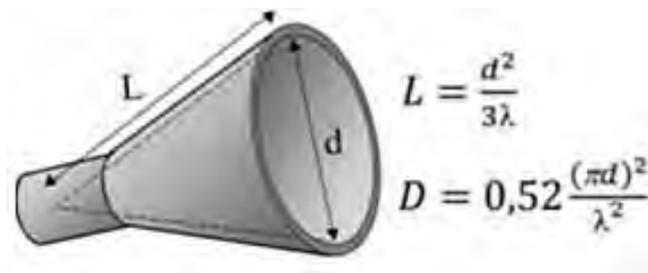
El principio de funcionamiento de las guías de ondas como antena de apertura consiste, fundamentalmente, en dejar abierto uno de sus extremos, lo cual genera una radiación de la señal que se transmite por la misma. Esta radiación puede ser incrementada sí el extremo abierto tiene una apertura, la cual generalmente es de tipo rectangular o de tipo circular.

Este tipo de antenas se le conoce como de apertura o bocina (Horn). Las de apertura rectangular, más utilizadas, se les denomina Horn Piramidal, teniendo como base

una guía de ondas rectangular, abriéndose tanto el ancho como la altura de la guía, y las de apertura circular se conocen como Horn Cónicas, teniendo como base una guía de ondas circular, abriéndose en forma cónica. En la figura No. 6.17 se muestra un diagrama de una antena piramidal y uno de una antena cónica, indicando las dimensiones estructurales básicas, así como la fórmula para calcular su directividad (D)



a.) Horn Piramidal



b.) Horn Cónica

Figura No. 6.17 Diagramas de una antena piramidal y de una antena cónica
 Antenas cónicas (2019). Disponible: <https://ftapinamar.blogspot.com/2018/06/antenas-conicas-para-banda-u-6.html>

Ejemplo No. 6.31

Dimensionar una antena Horn Cónica para opere a una frecuencia de 3 GHz y con directividad de 10 dB. .

Solución:

Teniendo como referencia los parámetros dimensionales indicados en la figura No. 6.18, tenemos:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 10 \text{ cm}$$

Directividad en veces:

$$10 \text{ dB} = 10 \log_{10} D (\text{veces})$$

$$D(\text{veces}) = 10$$

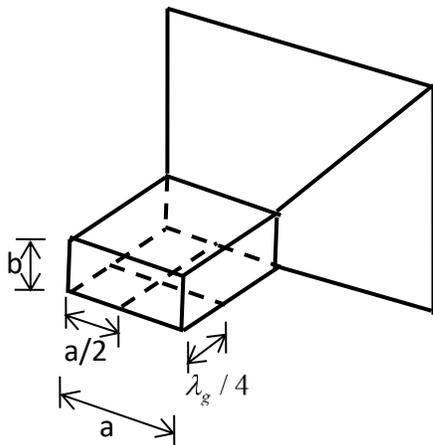
Diámetro:

$$d = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\lambda^2 D}{0.52} \right]^{1/2} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{(10^2)(10)}{0.52} \right]^{1/2} = 13.96 \text{ cm}$$

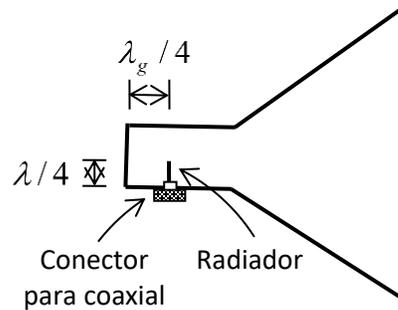
Longitud:

$$L = \frac{d^2}{3\lambda} = \frac{(13.96)^2}{3(10)} = 6.49 \text{ cm}$$

Estas antenas se alimentan con guías de ondas cuyo tipo corresponda al de la base de estas. Es decir, las piramidales se alimentan con guías de ondas rectangulares y las cónicas con guías de ondas circulares. Cuando se quiera alimentarlas con cable coaxial, se requiere en primer lugar sellar el extremo de entrada de la base de la antena con una lámina conductora, preferiblemente del mismo material con que es hecha la antena y en segundo lugar abrir un orificio en la parte inferior de la base, ya sea rectangular o cilíndrica, según lo especificado en la figura No. 6.18, que corresponde para una Horn Piramidal, pero de forma similar para la Horn Cónica. En esos orificio se coloca el conector para el cable coaxial a emplearse como alimentador. ⁽³³⁾ .



a.) ista posterior



b.) ista lateral

λ_g : longitud de onda en la guía = $c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2}$ (m)

λ : longitud de onda en el espacio libre = c / f (m)

f : frecuencia de operación (Hz)

f_c : frecuencia de corte de la guía de ondas = $2a$ (Hz)

c : velocidad de la luz (m/s)

μ_r : permeabilidad relativa del dieléctrico de la guía de ondas (H/m).

ϵ_r : permitividad relativa del dieléctrico de la guía de ondas (F/m).

Figura No. 6.18 Esquema de instalación del conector para cable coaxial en una antena Horn Piramidal

Ejemplo No. 6.32

Determinar, para la antena Horn Cónica, del ejemplo No. 6.31, el punto donde se debe abrir el orificio a la base de esta antena para habilitarla a conexión coaxial, y así mismo la longitud del radiador. Teniendo en cuenta que la frecuencia de corte de la guía de onda circular, empleada como base de la antena, es de 2.5 GHz.

Solución:

El orificio debe abrirse de un tamaño igual al del dieléctrico del conductor del coaxial a emplearse, en la parte inferior de la base circular de la antena, con el propósito de que al fijar el conector, sobre la base de la antena, quede ocupado, todo el orificio, por espesor del mencionado dieléctrico. El orificio debe abrirse a una distancia de $\lambda_g / 4$, de la parte posterior de dicha base:

a.) Distancia a abrirse el orificio a partir de la parte posterior de la antena:

$$\lambda_g = c / \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \sqrt{f^2 - f_c^2} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{(1)(1)} \sqrt{(3.0 \times 10^9)^2 - (2.5 \times 10^9)^2}} 18 \text{ (cm)}$$

$$\text{Entonces: } \lambda_g / 4 = 18 / 4 = 4.5 \text{ cm}$$

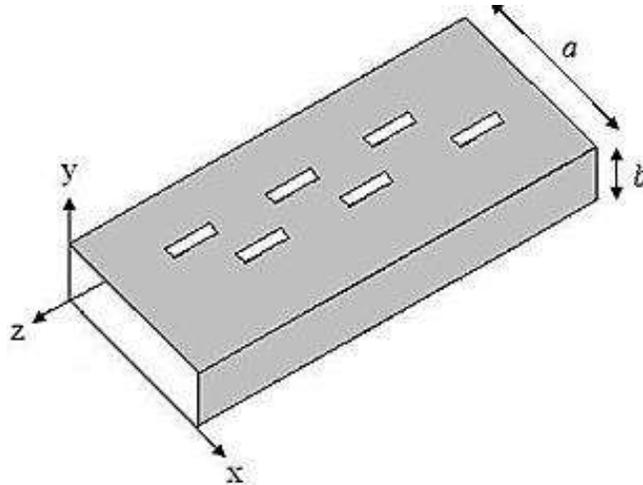
b.) Longitud del radiador: $L = \lambda / 4$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 10 \text{ (cm)} \Rightarrow L = \frac{10}{4} = 2.5 \text{ (cm)}$$

6.8.3.2 Guías de ondas como antena ranurada

También conocida como arreglo de ranuras. Cada una de las ranuras corresponde a un elemento de radiación. Estas antenas son de uso frecuente en aplicaciones aeronáuticas, ya que se pueden sujetarse a fácilmente a la superficie de las aeronaves. Son de fabricación sencilla y presentan bajas pérdidas.

Típicamente las ranuras son delgadas (menos de 0.1 de longitud de onda) y de largo 0.5 longitudes de onda, con respecto a la frecuencia central de operación. El ancho de banda, de la antena ranurada, depende de la anchura de las ranuras, tal como sucede para cualquier tipo de antena, donde a mayor superficie de sus elementos radiadores mayor es su ancho de banda. En la figura No. 6.19 se ilustra una antena ranurada. ⁽³⁴⁾



$$\langle 6.85 \rangle \text{ Frecuencia de corte: } f_c = \frac{c}{2\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2}$$

m y n : subíndices del modo de operación

Figura No. 6.19 Antena de ranura.

Fuente: Antenna Theory.(2019) Disponible: <http://www.antenna-theory.com/spanish/antennas/aperture/slottedWaveguide.php>.

En el modo de propagación dominante TE₁₀, los campos eléctricos y magnéticos existentes dentro de la guía ranurada son los siguientes:

$\langle 6.86 \rangle$

$$E_y = E_0 \text{sen}(\pi x / a) e^{-j\sqrt{k^2 - (\pi/a)^2} z}$$

$$H_x = \frac{-E_0}{2\pi f\mu} \sqrt{k^2 - (\pi/a)^2} \text{sen}(\pi x / a) e^{-j\sqrt{k^2 - (\pi/a)^2} z}$$

$$H_z = \frac{jE_0}{2a f\mu} \cos(\pi x / a) e^{-j\sqrt{k^2 - (\pi/a)^2} z}$$

Donde:

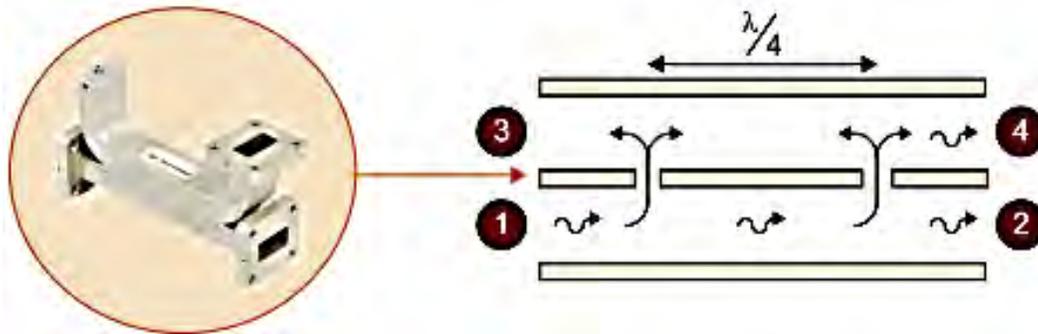
f : frecuencia de operación (Hz)

K : número de onda

6.8.4 Guías de ondas como acoplador direccional

Al comunicar dos guías de ondas a través de varios agujeros reducidos, se logra los acopladores direccionales. El acoplador más sencillo posee solo dos agujeros

separados $\lambda/4$. En la figura No.6.20 se muestra un acoplador direccional sencillo y el diagrama donde se indica la circulación interna de los campos eléctricos. ⁽³⁵⁾



a.) Acoplador direccional b.) Circulación interna de los campos eléctricos

Figura No. 6.20 Acoplador direccional y diagrama de la circulación interna de los campos eléctricos.

Fuente: Sánchez Delgado, A. M., "Guías de Ondas", Universitat Oberta de Catalunya (UOC), 2016. p. 45.

A continuación, se describe el proceso de funcionamiento del acoplador direccional, ilustrado en la figura inmediatamente anterior:

- La señal a ser propagada entra por el puerto 1 de la guía. Cuando pasa por los agujeros pierde una cantidad pequeña de energía, la cual es proporcional a las dimensiones de los agujeros. El resto de energía de la señal saldrá por el puerto 2.
- La señal que llega al puerto 3 lo hace a través de los dos agujeros. Parte de la señal que viene del puerto 1, entra por el primer agujero, después de haber recorrido determinada trayectoria en la guía inferior y después entra otra parte por el segundo agujero, habiendo recorrido la misma trayectoria que la que entro por el primer agujero más $\lambda/2$ ($\lambda/4$ de ida por el inferior más $\lambda/4$ de vuelta por el tramo superior).
- Lo anterior implica que la señal que entra por el primer agujero y que va de ida hacia la salida por el puerto 4 se encuentra en contra fase con la señal de vuelta que entra por el segundo agujero, anulándose mutuamente, lo que significa que por el puerto 3 no sale señal (puerto aislado).

- La señal que sale por el puerto 4 se debe a la suma de la señal que viene del primer agujero con la que viene por el segundo agujero, debido a que estas dos señales se encuentran en fase ya que recorren la misma distancia. Es por esta razón que a este puerto 4 se le denomina puerto acoplado.
- Como resultado final se puede extraer o añadir, por el puerto 4, una parte de la señal que entra por puerto 1.

Como el circuito del acoplador descrito es simétrico, también se puede lograr lo mismo el mismo resultado si el proceso se realiza en sentido contrario, es decir tomando el puerto 2 como de entrada de la señal original, donde el puerto 1 sería el de salida, el puerto 3 el acoplado y el puerto 4 el aislado.

6.8.5 Guías de ondas como filtro

Una de las aplicaciones de las guías de ondas como filtro, es para el caso de filtro pasa-bajo, lo cual se logra a través de la inserción de barras en la guía de ondas. Las barras presentan comportamiento inductivo, de tal forma que a bajas frecuencias generan una baja impedancia, permitiendo el paso de la señal, mientras que para altas frecuencias la impedancia aumenta obstruyendo el paso de la señal.

Los filtros con guías de ondas tienen una amplia variedad de escenarios de aplicación, entre los cuales se encuentra como filtros de microondas para el caso de las comunicaciones satelitales, redes de microondas y la radiodifusión de televisión. Lo anterior debido a que este tipo de filtros resisten las altas potencias que manejan estos sistemas de comunicación. Estos filtros permiten realizar procesos de selección de señales y limitan la presencia de ruido en las señales. En la figura No. 6.21 se muestra un filtro pasa-bajo en una guía de ondas rectangular.

(36)



Figura No. 6.21 Filtro pasa-banda en guía de ondas rectangular
Fuente: aveGuide. (2019). Disponible: <http://www.aveguide.com> en aveguide filter

6.8.6 Guías de ondas como circuladores

Los circuladores de microondas son unos dispositivos pasivos que disponen de dos o más puertos a través de los cuales el circulador suministra energía de microondas o le es suministrada a él. La energía circula entre dos puertos determinados en una sola dirección y los demás puertos, para este caso, estarán aislados, es decir no salen ni entra energía en esos puertos, para lo cual se les adiciona una carga RF, que consuma la energía que inciden en ellos.

Los circuladores son empleados en varias aplicaciones, resaltándose en los receptores de los enlaces satelitales, en los multiplexadores, en los amplificadores, en las estaciones radio base celular, en los transmisores de radiodifusión de video y o de audio, en los radares, en los aceleradores lineales y en el equipamiento de radiobúsqueda, esencialmente.

El rango de frecuencia de estos circuladores es bastante amplio, estando entre los 100 MHz y los 60 GHz ó más. La relación existente entre la intensidad de la señal que sale y la de la entrada, se conoce como como *función de transferencia*. Se espera, en el caso ideal, que la señal que sale sea lo más similar posible a la que entra. La diferenciación entre estas dos señales se debe, principalmente a: cambios de la temperatura, vibraciones o perturbaciones a que este sometido el circulador,

a los cambios minúsculos en la estructura del material del circulador, en la inconsistencia de las dimensiones, de densidad y deformaciones de las piezas.

En la figura No. 6.22 se muestra un circulador de tres puertos y el corte transversal del interior del mismo.

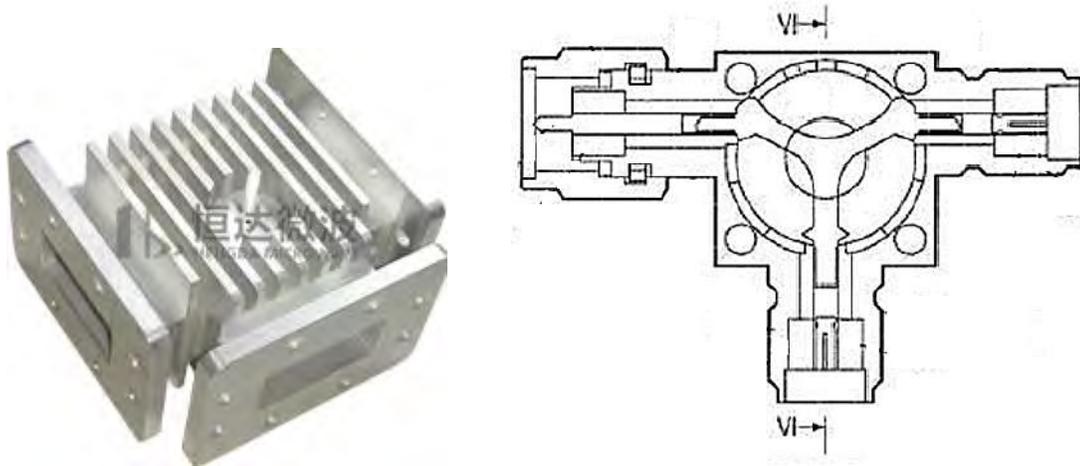


Figura No. 6.22. Imagen de un circulador de tres puertos y de su estructura interna del mismo.

Fuente: Circuladores de microondas. (2019). Disponible:
<https://patentados.com/2018/circuladores-de-microondas>

HengdaMicro ave: (2019). Disponible: <http://www.xianhengdamicroave.com>

6.8.7 Guías de ondas como acopladores de modo en sistemas satelitales

Para lograr asegurar un perfecto y continuo alineamiento entre las antenas transmisoras y de recepción en los sistemas satelitales y de radioastronomía, se emplean, entre otros mecanismos, los denominados: *sistemas monopulsos de varios modos*.

Los *sistemas monopulsos de varios modos*, funcionan con el modo principal y los modos de orden superior. Para el caso de estos sistemas en guía de ondas circular, trabajan en el modo dominante (TE_{11s}) como señal principal y adicionalmente algunos nodos de orden superior (TM_{01} , TE_{21} , TE_{21s} , TE_{21c}). Al patrón conformado por estos modos se le denomina *patrón diferencial*, el cual permite realizar el seguimiento. ⁽³⁷⁾

Cuando se empieza a presentar un deslindamiento entre las antenas del enlace correspondiente, la amplitud del modo dominante comienza a disminuirse

lentamente, mientras que los modos de orden superior comienzan a intensificarse, los cuales son nulos en la dirección de apuntamiento, logrando amplitudes suficientes para mantener el alineamiento del enlace respectivo, para pequeñas desviaciones.

Para lograr el realineamiento del radioenlace, la señal de error es amplificada y comparada con la señal referencia correspondiente al modo dominante. Las salidas del comparador son suministradas a una unidad de coordinación que alimenta a los motores de las antenas en azimut y elevación para corregir el ángulo de apuntamiento.

La polarización empleada en estos sistemas de seguimiento es de tipo circular. En la figura No. 6.23 se puede apreciar el patrón de radiación de los modos TE_{11s} y TM_{01} , en forma rectangular.

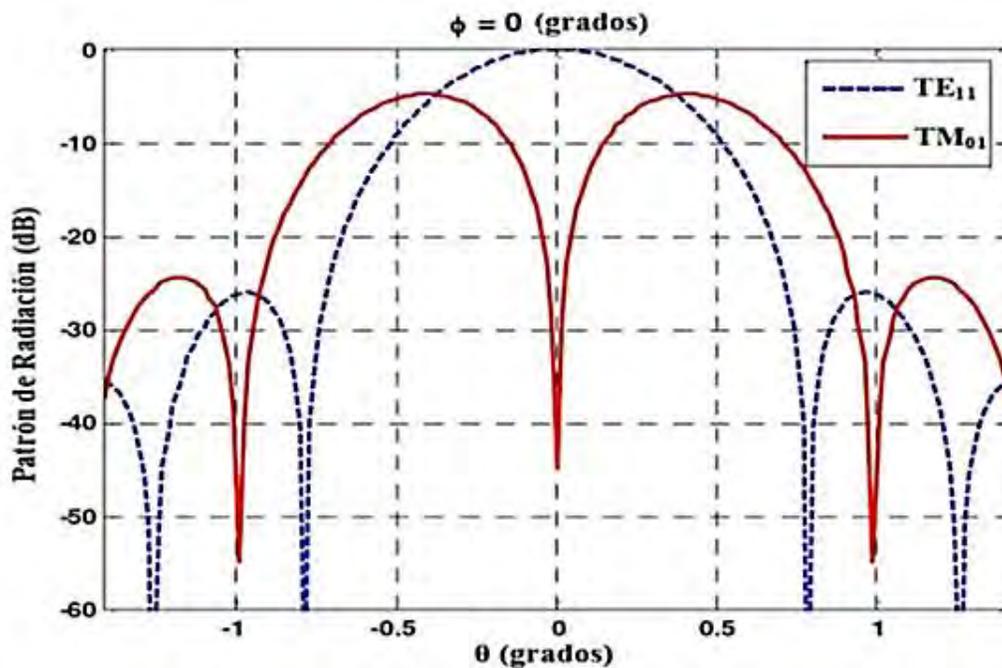


Figura No. 6.23 Patrón de radiación de los modos TE_{11} y TM_{01} .

Fuente: Lanfranco P. Cepero . . . Mediavilla A. Marante F." *esign of a TM compact mode coupler for Ta ing Mono-pulse Systems*", EAC vol.35 no.2 La Habana Mayo.-ago. 2016

6.9 Transición guía-coaxial

Tal como se mencionó anteriormente si se quiere alimentar a la guía de ondas con cable coaxial, se emplea el conductor central del coaxial como radiador en modo TE_{10} . Por lo general se presenta una relación de onda estacionaria de $S \approx 1.4$ en

todo el ancho el ancho de banda monomodal de la guía. En la figura No. 6.24 se ilustra dos montajes de transición de coaxial a guía de ondas, así como el esquema del corte transversal de los mismos. ⁽³⁸⁾

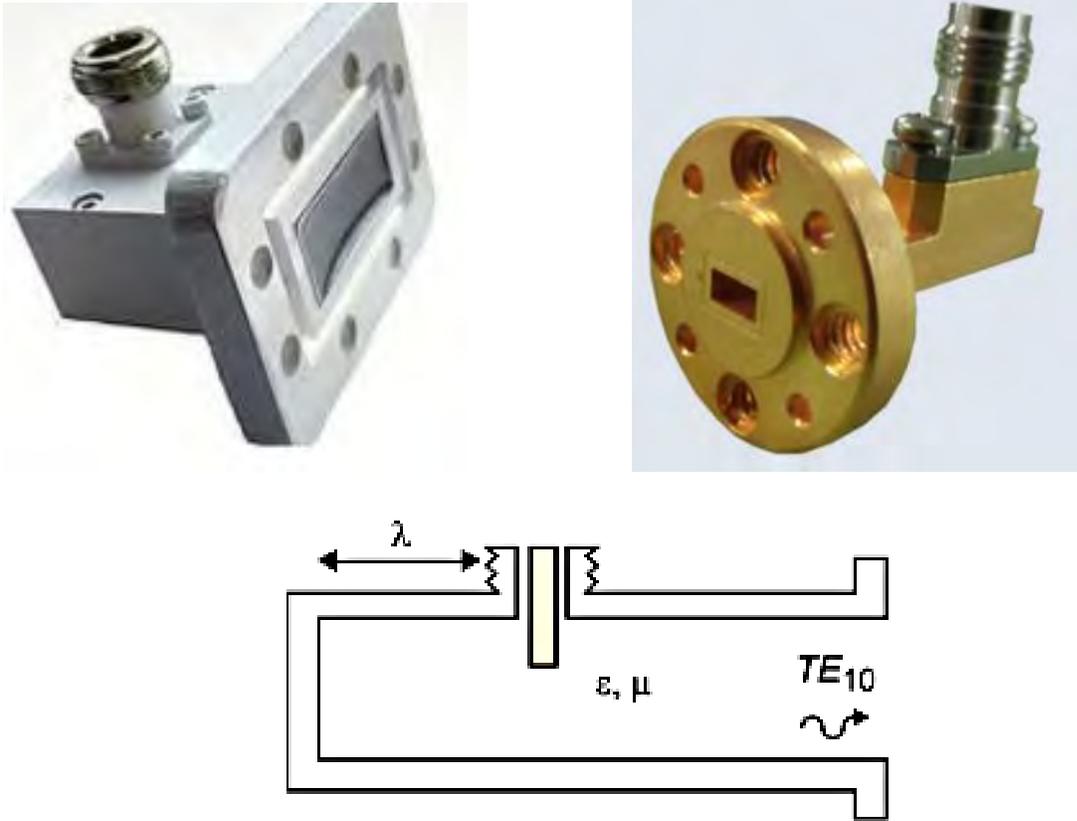


Figura No. 6.24 Montajes de transición coaxial-guía y esquema corte transversal.

Fuente: Sánchez Delgado, A. M., "Guías de Ondas", Universitat Oberta de Catalunya (UOC), 2016. p. 47.

6.10 Innovaciones en las guías de ondas.

Recientemente se ha venido desarrollando algunas innovaciones en la estructura de las guías de ondas, destacándose en otras: las guías de ondas flexibles y las guías de ondas dieléctricas. A continuación se describe el concepto estructural y funcional esencial de cada una de estas innovaciones.

6.10.1 Guías de ondas flexibles

Son generalmente hechas de latón, las cuales se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones militares y comerciales. El diseño de su contextura tiene como propósito aislar las vibraciones de los dispositivos que interconectan, así como

facilitar los procesos de su instalación. Una de las aplicaciones más conocida es para interconectar el elemento radiador de las antenas parabólicas, facilitando también los procesos de alineamiento de los enlaces de microondas que realizan dichas antenas, debido a que permiten movimientos en el posicionamiento de las mismas. ⁽³⁹⁾

Estas guías de ondas generan una relación de onda estacionaria, muy bajo (alrededor de 1.07:1) y una pérdida de inserción de unos 0.06 dB y resisten potencias relativamente moderadas, tales como 5 W. En la figura No. 6.25 se muestra una línea de guía de ondas flexible, así como su interconexión al radiador de una antena parabólica.

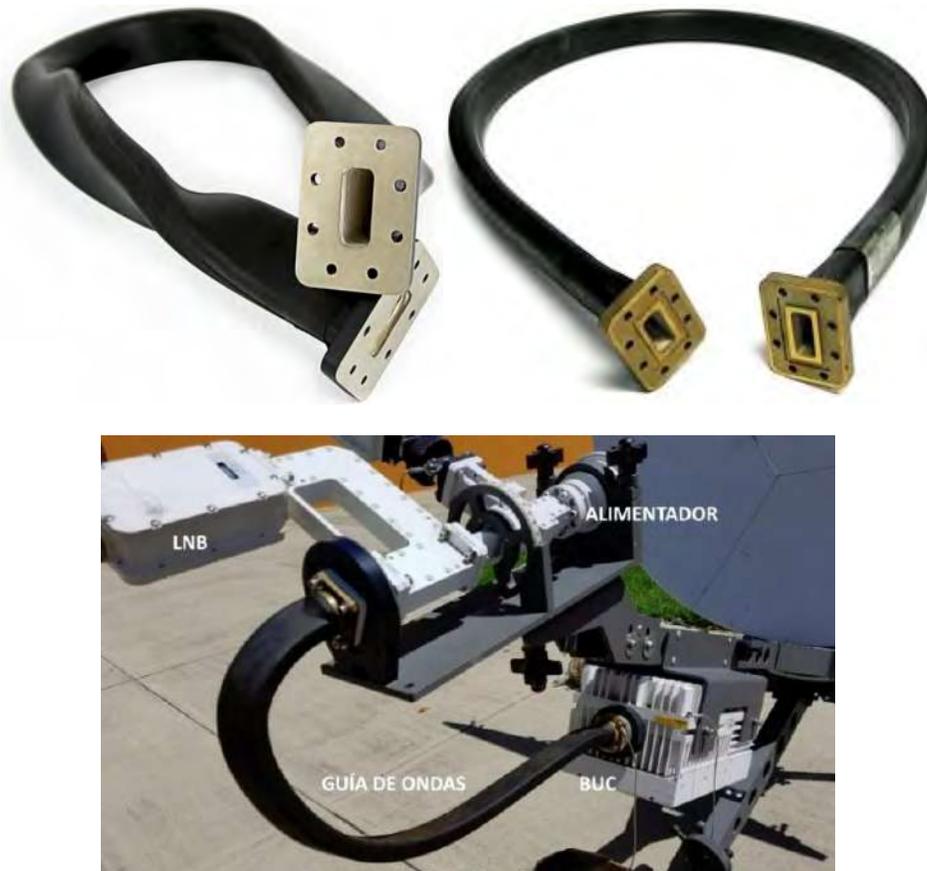


Figura No. 6.25 Líneas de guía de ondas flexibles y su interconexión a una antena parabólica.

Fuente: Flexwaveguide. (2019). Disponible: <http://www.flexwaveguide.com> Accesorios para la instalación: FTG - FI.MO.TEC. S.P.A.(2019). Disponible: www.ftgworld.com es products accesorios-para-la-instalacion ftg-guias-de-onda..

6.10.2 Guías de ondas dieléctricas

El principio de funcionamiento de una guía de ondas dieléctrica es el mismo que el de la fibra óptica, por lo tanto, su estructura consiste, básicamente, en dos capas de material dieléctrico. Una capa de revestimiento y otra en la parte interior de la de revestimiento, denominada núcleo. El índice de refracción del material dieléctrico de la capa interior (núcleo) debe ser mayor que el de la capa exterior (revestimiento). Debido a esta estructura la señal que se le introduce (a altas frecuencias) se propaga similar al caso de las guías de ondas conductoras. ⁽⁴⁰⁾

En la figura No. 6.26, se muestra un corte longitudinal de una guía de ondas dieléctrica, indicando la trayectoria de la propagación de la onda, en el dieléctrico interior (núcleo de ancho d).

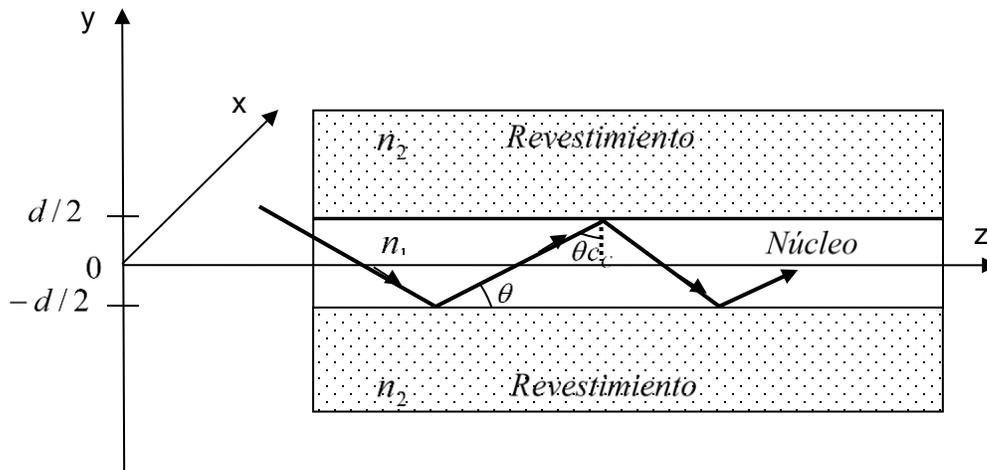


Figura No. 6.26 Vista de un corte longitudinal de una guía de onda rectangular dieléctrica.

Para que las ondas se propaguen dentro del núcleo, sin salirse del mismo en la dirección z , se requiere, además de que $n_1 > n_2$, el cumplimiento de la siguiente condición:

$$\langle 6.87 \rangle \theta < \theta_c = \frac{\pi}{2} - \text{sen}^{-1}(n_2 / n_1) = \text{cos}^{-1}(n_2 / n_1)$$

Los rayos que entran con este ángulo o menor se propagan a través del núcleo, pero los que inciden con ángulos mayores se refractan y se pierden.

6.11 Accesorios de las guías de ondas.

Existe una gran variedad de accesorios para la conexión, extensión, terminación y tendidos de las guías de ondas. En la figura No. 6.27 se ilustran algunos de estos accesorios.



a.) Carga para guía de ondas rectangular b.) Conector para guía de onda elíptica

c.) Codo para guía de ondas rectangular d.) Adaptadores guías de ondas

Figura No. 6.27 Muestras de accesorios guías de ondas

Fuente: SER SAT Guías de Ondas, (2019), Disponible:

.servsatcommunications.com es guías-de-ondas guías-de-ondas Cables, conductores
coaxiales, guías de onda - comprar en products.spinner-group.com ... cables-conductores-
coaxiales-guías-de-onda

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

CAPÍTULO 6

Preguntas:

1. Describa el concepto que se tiene de las guías de ondas e indique cuál es su principio de funcionamiento e indique el porqué de la estructura de las mismas.
2. ¿Qué se entiende por modo de propagación en las guías de ondas? Indique cuáles son los modos de propagación que se pueden presentar en las guías de ondas, describiendo su respectivo comportamiento.
3. Existe una amplia gama de tipos de *guías de ondas*. Relacione cada uno de ellos describiendo su principal característica funcional.
4. En la figura No. 6.4, se ilustra la forma como se propagan las señales electromagnéticas en las guías de ondas de tipo rectangular. Describa esta forma de propagación.
5. Cuando es que se presenta la frecuencia de corte en las Guías de Ondas y cuál es la razón de esta situación.
6. La longitud de onda de cada uno de los modos de las *guías de ondas* rectangulares, está dada por la ecuación 6.47. Describa el contenido de esta expresión.
7. La propagación de las ondas, en las *guías de ondas*, presentan dos velocidades. ¿Cuáles son estas velocidades y porque se presentan?
8. El principio de *Poynting* nos indica que *la densidad de potencia media que contiene una señal que se propaga por un medio determinado, equivale a la media del valor real de la densidad de potencia total asociada a la onda de la señal*". Describa el contenido de este principio.
9. La atenuación de una señal se define como la disminución del nivel que sufre la señal cuando se propaga a través de un medio determinado. Determinar cuáles son los principales factores que intervienen en la atenuación de las señales cuando se propagan por una guía de ondas.
10. Así como en las guías rectangulares, en las circulares puede ocurrir diferentes modos de propagación: TE , TM y TM , dependiendo de las veces que el campo eléctrico varíe a lo largo de la circunferencia de la guía, o a lo largo del radio de esta. Describa como se presentan estos modos de propagación en las guías de ondas circulares.

11. Las funciones de Bessel son especialmente importantes en muchos problemas de propagación de ondas, potenciales estáticos y cualquier otro problema descrito por las ecuaciones de Helmholtz o Laplace. Indique para que casos se emplean estas funciones, en el análisis del comportamiento funcional de las guías de ondas circulares.

12. En las guías de ondas circulares la longitud de onda y la frecuencia de corte, están determinadas por el diámetro interno de la guía, dependiendo del tipo de modo de propagación empleado. Explique la razón del porqué de estas cuasas.

13. La impedancia característica de una guía de ondas circulares (TE_{mn}), está dada en la ecuación 6.83 y 6.84. Describa el significado de estas expresiones.

14. La dirección de la polarización, en las guías de ondas elípticas, no puede girar, ya que la asimetría de su sección transversal hace que la polarización se mantenga en una dirección fija, ya sea paralela al eje mayor o al eje menor de la elipse. Explique la razón de esta situación.

15. Las guías de ondas tienen una amplia gama de aplicaciones. Relacionen aquellas más conocidas y explique por qué sirven para esas aplicaciones.

16. Describa la forma en que se puede implementar la transición guía coaxial. ¿qué consideraciones debe tenerse en cuenta para la implementación de esta transición

17. Recientemente se ha venido desarrollando algunas innovaciones en la estructura de las guías de ondas, relacione cuáles de estas innovaciones son las más notables, indicando el principio de su funcionamiento y el valor agregado que presentan en su funcionamiento.

Ejercicios:

1. Determinar la forma en que varía los campos electromagnéticos dentro de una *guía de ondas* rectangular, con modo de propagación TE_{11} .

2. En una guía de onda rectangular, de dimensiones $a = 3 \text{ cm}$ y $b = 1.5 \text{ cm}$, y rellena de polietileno, se propaga una onda a 14 GHz, en modo TE_{11} . Determinar:

a.) Constante de fase de la guía.

b.) Longitud de onda en la guía.

3. En el ejemplo No. 6.3 se realizó el proceso de deducción para lograr las expresiones de los componentes electromagnéticos en una *uía de ndas*, tipo rectangular modo TM_{mn} , indicadas en la ecuación 6.2 Haga un análisis de ese proceso de deducción.
4. Determinar la forma en que varía los campos electromagnéticos dentro de una *uía de ndas* rectangular, con modo de propagación TM .
5. Para la guía de ondas rectangular del ejemplo No.6.2, en modos TE_{11} y TM_{11} , determinar:
 - a) Frecuencia de corte de la guía
 - b.) Constante de fase de la guía.
 - c.) Longitud de onda en la guía.
6. Determinar la frecuencia de corte de una guía de onda rectangular con dieléctrico de aire, de longitudes $a = 4 \text{ cm}$ y $b = 2 \text{ cm}$, en modo TE_{10} , mediante la ecuación 6.42 y mediante la ecuación 6.43
7. Para la guía de onda del ejercicio inmediatamente anterior, determinar el rango de frecuencia en que podría operar.
8. Determinar la frecuencia de corte en una guía de ondas, con dieléctrico de aire e impedancia característica de 350 ohmios, se le introduce una señal de 8.7 GHz
9. Calcular la velocidad de fase de la onda, con dieléctrico de aire, para una guía de onda rectangular con frecuencia de corte 3.2 GHz y de operación 4.2 GHz,
10. Determinar la velocidad de propagación de la onda, si el dieléctrico de la guía es aire, para una guía de onda rectangular, con frecuencia de corte 3.0 GHz y de operación 3.8 GHz.
11. Para el caso de una guía de ondas rectangular, con dieléctrico de aire, con frecuencia de operación de la onda igual a la del corte de la guía $f = 1.3 f_c$, determinar el ángulo de reflexión (θ), para el caso de una guía de ondas rectangular,

12. Calcular la frecuencia de operación que debe tener una onda para que se propague dentro de una guía rectangular, con dieléctrico de aire y con frecuencia de corte de 3.8 GHz, con un ángulo de reflexión de $\theta = 66^\circ$, empleando las curvas de la figura No. 6.8 y las ecuaciones 6.50 y 6.51, respectivamente.

13. Para una guía de onda rectangular de dimensiones $a \times b$, determinar la potencia media que resiste la guía, si el modo de propagación es de tipo TE_{11} .

14. Para una guía de ondas rectangular R159 (1,590" 0.795"), con dieléctrico de aire, calcular la potencia máxima que puede soportar para una onda con frecuencia de 4.5 GHz.

15. Calcular, para una guía rectangular que tiene una sección transversal interna de 10 por 20 mm.

a) La frecuencia de corte para el modo TE₁₀.

b) La impedancia característica a una frecuencia de operación de 12 GHz.

c) La longitud de onda de la guía a una frecuencia de 12 GHz.

16. Demostrar para modos TM en guías tanto circulares como rectangulares, que la atenuación debida a las pérdidas en los conductores es mínima cuando:
 $f = 1.73 f_c$.

17. Para una guía de ondas rectangular de $a = 3 \text{ cm}$ y $b = 1.5 \text{ cm}$, con dieléctrico de parafina, calcular su frecuencia de corte para los modos de propagación TE₁₀, TE₀₁, TM₁₀ y TM₁₁.

18. Determinar la constante de atenuación dieléctrica, para una guía de ondas rectangular, si la frecuencia de corte es de 3.8 GHz y la de operación es de 4.5 GHz, para:

a.) Con dieléctrico de teflón (PTFE).

b.) Con dieléctrico de aire.

Teniendo como referencia los valores relacionados en la tabla No. 6.1, de las características eléctricas, de los dos dieléctricos a emplear.

19. Encontrar en que frecuencia de operación, la atenuación debida a las pérdidas en el dieléctrico es máxima, para las guías de ondas rectangulares, tanto para el modo T como en el modo TM .

20. Determinar el modo de que se transmite una onda TM_{mn} en una guía de ondas rectangular, con dieléctrico de aire y dimensiones a cm y b cm, si la distancia entre dos ceros consecutivos de la onda es de 12 cm y la frecuencia de operación es de 5.2 GHz.

21. Para el caso del ejercicio inmediatamente anterior, determinar las expresiones, de la onda, para el campo eléctrico longitudinal, si la magnitud del componente longitudinal del campo eléctrico es de 52 (m).

22. Una guía de ondas rectangular, con dieléctrico de aire, tiene una frecuencia de corte de 5.2 GHz y se encuentra operando en una frecuencia de 6.8 GHz, con modo predominante T , determinar:

- a.) El ancho de la guía.
- b.) La longitud de onda de corte.
- c.) La velocidad de grupo.
- d.) La velocidad de fase.

23. Determinar el ancho de banda de frecuencia, para que una guía de ondas rectangular con dieléctrico de aire de dimensiones a 5cm y b 2.5 cm, opere en régimen monomodo T ⁽¹⁹⁾

24. Para la misma guía de ondas del ejercicio inmediatamente anterior, con dieléctrico de aire, determinar el valor de pico del campo eléctrico dentro de la guía, si el modo de propagación de la onda es de T y transporta una potencia máxima de 6 m. En una frecuencia de operación de 6.5 GHz.

25. Para una guía de onda rectangular con dimensiones $a = 4.2$ cm y $b = 2.1$ cm, con un dieléctrico caracterizado por: $\sigma = 0$, $\epsilon_r = 4$ y $\mu_r = 1$, encontrar cuantos modos T y TM puede transmitir la guía.

26. Definir el dimensionamiento de una guía de ondas rectangular, teniendo como condición que $b < a < 2b$, con dieléctrico de aire, para que opere a 3.8 GHz en modo T dominante. Se desea que la frecuencia de operación sea por lo menos 22% mayor que la frecuencia de corte.

27. Determinar la expresión del campo eléctrico, en función tanto del espacio como del tiempo, de una señal que se propaga en una guía de ondas circular, cuyo dieléctrico es de aire, con un radio de 4.0 cm y la frecuencia de operación es de 4.8 GHz, para modo de propagación T ⁽²⁵⁾

28. Encontrar el diámetro que debe tener una guía de onda circular, con dieléctrico de aire, la cual va a ser utilizada para interconectar los transmisores de una estación de radio enlace satelital, con su correspondiente sistema de radiación, en la banda 6 de IEEE 802.11b, en modo de propagación T , para el canal 2,535 GHz.

(27)

29. Para la misma guía de onda circular del ejemplo No 6.27 y trabajando en las mismas condiciones ahí indicadas, con excepción de la frecuencia de operación, la cual se cambia por 4.2 GHz, determinar:

a.) La longitud de onda de la señal en el material del dieléctrico a utilizar la guía (aire).

b.) La longitud de onda de la onda en la guía.

c.) La constante de fase de la guía.

d.) La impedancia de la guía.

e.) El ancho de banda para que sólo se propague el modo dominante.

f.) La velocidad de fase en la guía.

g.) La velocidad de grupo (propagación) en la guía.

30. Calcular la frecuencia de corte de una guía de ondas circular, de radio $a = 2 \text{ cm}$, con dieléctrico de poliestireno, para los modos TE_{01} , TE_{11} , TM_{01} y TM_{11} .

(41).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 6

- (1) Laverghetta, T. S., *Micro waves and Wireless Simplified*", Second Edition, Artech House, Norwood, Mass, 2014, pp.75-78.
- (2) Cheng, D., *Fundamentals of electromagnetism for engineering*". Mexico, Editorial Pearson, 2014, pp.34-35.
- (3) Deslandes D. Cassivi . *The substrate integrated circuits - a new concept for gig -frequency electronics and optoelectronics*, Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, TELSI S. 6th Int. Conf., vol. - 1, pp. - III-P- vol.1, 2015, 125-127.
- (4) Guías de ondas. (2019). Disponible:
<http://guiasdeonda-sanchez.blogspot.com/2018/12/tipos-de-guias-de-ondas.html>
- (5) This domain is currently parked at g.g.n. . (2019). Disponible:
<http://www.mitecnologico.com/Main/Introd>.
- (6), (8) Cory, H. Shtrom, A., *Wave propagation along a rectangular metallic waveguide longitudinally loaded with a metamaterial slab*". *Micro wave and Optical Technology Letters*. vol 41, no. 2, 2014, pp 123-126.
- (7) Craik, A.D.D. *The origins of water wave theory*". *Annual Review of Fluid Mechanics* 36.2014.: pp. 23-24.
- (9) LeónJune, M.D, *Propagation and Electromagnetic RadiationII*", 2016, pp. 3-6
- (10) Oliner, Arthur A, *The evolution of electromagnetic waveguides: from hollow metallic guides to microwave integrated circuits* , chapter 16 in, Sarab et al., *History of Wireless*, Wiley. 2015.
- (11) Institute of Electrical and Electronics Engineers, *The standard dictionary of electrical and electronics terms*"; 6th ed. New York, N. J., Institute of Electrical and Electronics Engineers, c2012.IEEE Std 100-2012.
- (12) Pozar, D. M. *Micro wave engineering*", 3 Ed, Wiley, 2014.
- (13) Oramoto, J., *Fundamentals of optical waveguides*", 2a Ed, Academic Press, Estados Unidos 2015, p.p. 42-46.

(14) Deslandes D. *Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form*, IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., vol. - 11, pp. - 70, 2012.

(15) Manor, R. Datta, A. Dhar, A Holtz, M, Berg, S. Gangopadhyay, J. Dasgupta, P. Tem in, H. eeraraghavan, . ijayaraghavan, R. Dallas. T., *Microfabricated liquid core waveguides for microanalysis systems*". ,,, 660-664. DOI: 10.1109/ICSENS.2014.1037180.

(16) uru, B.S. seyin R. ., *lectromagnetic ield T eory fundamentals*, *nd d. Cambridge niv. ress.* , pp. .

(17) Characteristic impedance of vacuum, z_0 (2019) Disponible: *The ST reference on constants, units, and uncertainty: fundamental physical constants*. NIST.

(18) Problemas Resueltos Guías de Ondas. (2019). Disponible: <https://es.scribd.com/document/318477341>.

(19) Ejercicios de Medios de Transmisión Guiados. (2019). Disponible: https://personales.unican.es/peredaj/pdf/Ejercicios_MTG_ejercicios-guias-de_20onda.pdf.

(20) Problemas. (2019). Disponible: 2.elo.utfsm.cl/lib/elo250/clases/problemasresueltos.pdf

(21) Singh, G. B., ; Hızıro lu, H. R.,. " *lectromagnetic ield T eory fundamentals*", *nd d. Cambridge Univ. Press.* 2014. pp. 422 423.

(22) Balanis, C.A. Holzman, E. *Circular waveguides*". (2019). Disponible: <https://onlinelibrary.iley.com/doi/abs/10.1002/0471654507.eme049>

(23) hang-Cheng H. ei H. Ji- in C. iao-Ping C. e . " *Compact superide bandpass substrate integrated waveguide S filters*," vol. - 53, pp. - 2977, 2012.

(24) Bayin, S.S., *ssentials of Mat ematical Met ods in Science and ngeering*," iley, 2015, Chapter 11

(25) Rosendo, R. *ndas lectromagnéticas irigidas. uía de ndas Circulares, ejemplos*", Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional Bolivariana UNEFA Telecomunicaciones - Microondas. 2017.

(26) hang-Cheng H. ei H. Hao L. Hua . e . *A broadband substrate integrated waveguide S filter*, vol. - 1B, pp. - 601 vol. 1B, 2012.

(27) Díaz Morcillo, A. Fayos Fernandez, J. Monzó Cabrera, J., *Micro wave Transmission Lines, Waveguides and Resonant Cavities*", CRAI, 2018, pp. 128-130.

(28) Davidoff, M., *Satellite Experimenters Handbook*", 2nd edition, ARRL Publication No.50.

(29) Guías de ondas circular (paper) (2019). Disponible:
https://www.academia.edu/18949092/Paper_guias_de_onda_circular

(30) Wentworth, S. M., *Applied Electromagnetics. Early Transmission Lines Approach*" John Wiley Sons Inc., 2018, pp. 87-89.

(31) Ruíz Cruz, J. Masa, J., *Antenas y Circuitos de Alta frecuencia (ACAF)*", Departamento de Electromagnetismo y Teoría de Circuitos, Universidad Politécnica de Madrid, 2018.

(32) Altavoz con guía de ondas. (2019). Disponible: patentados.com/2017/altavoz-con-guia-de-ondas

(33) Antenas cónicas para banda U-6. (2019). Disponible:
ftapinamar.blogspot.com/2015/06/antenas-conicas-para-banda-u-6.html

(34) Stutzman, R. L. Thiele, G. A., *Antenna Theory and Design*". Third Edition, Biblioteca Universitaria Eriq, 2018, pp. 78-79.

(35) Sánchez Delgado, A. M., *Guías de Ondas*", Universitat Obierta de Catalunya (UOC), 2016. pp. 44-47.

(36) D. Deslandes D. Deslandes. *Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters*, vol. - 51, pp. 596- 599.

(37) Lanfranco P. Cepero, Mediavilla A. Marante F." *Design of a TM compact mode coupler for Timing Mono-pulse Systems*", EAC vol.35 no.2 La Habana Mayo. -ago. 2017

(38) Ruiz Bernal. A, *Modal analysis of Ridge Coaxial waveguide using the transverse resonance method and field matching to study micro wave filters*", Final Year Project, May 2012.

(39) Servsat Communications, Inc. (2019). Disponible: <http://servsat.com/es/guias-de-onda/guias-de-onda.aspx>

(40) Harg Cheng H. , H. H. Hao L. Hua . . e . . - *Multi ay broadband substrate integrated aveguide S po er divider*, vol. - 1A, pp. - 642 ol. 1A, 2016, pp146-148.

(41) Ejercicios de Medios de Transmisión Guiados. (2019). Disponible: https://personales.unican.es/peredaj/pdf/Ejercicios_MTG_ejercicios-guias-de_20onda.pdf.

CAPÍTULO 7

CINTAS CONDUCTORAS PARALELAS PLANAS, ACOPLADORES RF y MICROCINTAS

7.1 Introducción

Para el caso de requerirse la circulación de grandes valores de corriente eléctrica, como es el caso de la alimentación de las torres radiadores de las estaciones de transmisión de las emisoras de radiodifusión sonoras AM, de alta potencia (alrededor de los 150 ilovattios o mayor), se emplean como *líneas de transmisión* cintas conductoras paralelas planas, las cuales ofrecen mayor superficie de disipación, como se mencionó en capítulos anteriores.

En este capítulo se hace referencia a las características estructurales y funcionales básicas de las *líneas de transmisión* de tipo de cintas conductoras paralelas planas, así como las de los circuitos acopladores de impedancia utilizados para interconectar las líneas de transmisión con los radiadores de señales RF (*Radio frecuencia*), donde por lo general se emplean cintas paralelas planas como línea de transmisión, para el caso de señales de alta potencia.

Al final del capítulo se mencionan los principales aspectos de las líneas de transmisión denominadas *microcintas*, cuya aplicación, actualmente, ha tenido una gran demanda en los circuitos eléctricos que se emplean en los equipos electrónicos. Debido a su geometría, las *microcintas* se pueden considerar como una versión modificada de las cintas conductoras paralelas planas.

7.2 Composición básica de las líneas planas

Las cintas conductoras paralelas planas, denominadas comúnmente como *líneas planas*, están constituidas por dos conductores de tipo lámina de igual dimensionamiento y separados a una distancia uniforme en todo su tendido, dependiendo de la impedancia característica en la que debe operar la línea. Cada una de estas cintas van sobrellevadas en soportes, tipo T, de material dieléctrico uniformemente espaciados y con una altura también constante dependiendo de la potencia en la que van a operar estas cintas, para evitar posibles fugas de la corriente que circula por ellas, hacia la superficie terrestre, especialmente en momentos de lluvia. En la figura No. 7.1 se indica un diagrama esquemático del tendido de unas líneas planas (vista superior). Generalmente estas líneas planas van

separadas por aire, pero existe casos espaciales que su separación puede estar conformado por un material dieléctrico diferente.

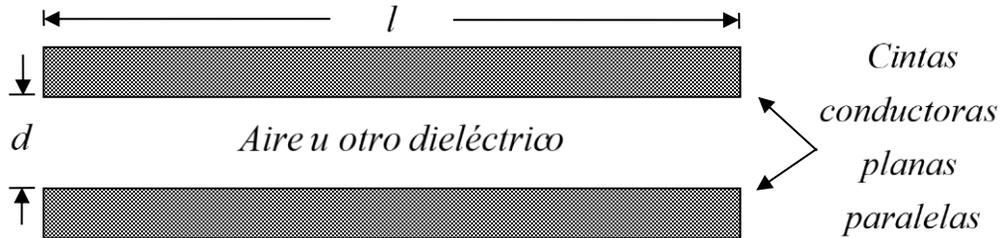


Figura. No. 7.1 Diagrama esquemático del tendido de una línea de doble cinta planas (vista superior)

7.3 Impedancia característica de las líneas planas

Teniendo como referencia la estructura física de estas líneas, representada en la figura No. 7.1, y las características eléctricas del material dieléctrico empleado, la impedancia característica (Z_0) de las *líneas planas*, para frecuencias RF, es la indicada en la ecuación 7.1⁽¹⁾

$$\langle 7.1 \rangle \text{ Impedancia característica: } Z_c = \eta \frac{d}{l} (\Omega)$$

$$\text{Pérdidas dieléctricas: } \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} (\Omega)$$

μ : permeabilidad del dieléctrico (H/m)

ε : permitividad del dieléctrico (F/m)

l : longitud de las líneas (m)

d : separación entre las líneas (m)

Ejemplo 7.1

Determinar la separación que debe existir entre las cintas conductoras de unas líneas planas paralelas, si el tendido total de la línea, entre el transmisor y el

radiador, es de 50 metros y se desea que la impedancia característica de la línea sea de 50 ohmios. El dieléctrico entre cintas es el vacío (aire).

Solución:

Desde la ecuación 7.1, de la impedancia característica para *líneas planas*, se tiene que:

$$d = \frac{Z_c l}{\eta}$$

$$\text{Pérdidas dieléctricas del vacío (aire): } \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{8,854 \times 10^{-12}}} = 377 \text{ } (\Omega)$$

Entonces la separación uniforme entre las cintas es de:

$$d = \frac{(50)(50)}{377} = 6.63 \text{ (m)}$$

Ejemplo 7.2

Determinar la longitud que debe tener una línea de transmisión de tipo *cintas planas paralelas*, con separación de 1.5 metros entre las cintas conductoras, para lograr una impedancia característica de 50 ohmios, si el dieléctrico entre las cintas es aire.

Solución:

Empleando la ecuación 7.1, tenemos: $l = \eta_0 \frac{d}{Z_c}$

Se tiene que $\eta_0 = 120\pi = 377 \text{ } \Omega$, entonces:

$$l = 377 \frac{1.5}{50} = 11.31 \text{ metros}$$

7.4 Potencial eléctrico en las líneas planas

Tal como se planteó para el caso del cable coaxial, para determinar este potencial se emplea ya sea la ecuación de Poisson o la de Laplace, dependiendo del modo

que este distribuida la carga en estas líneas paralelas planas, la cual se asocia al potencial existente dentro de las mismas.

Como ya se había mencionado, para determinar el potencial eléctrico, producido por cualquier distribución de cargas, se emplea el siguiente proceso:

1.) Definir si se emplea la ecuación de Poisson o la de Laplace.

Para este caso, se emplea la de Laplace ya que las cargas se encuentran distribuidas sobre la superficie de las líneas planas y por lo tanto no existe densidad volumétrica de carga ($\rho_V = 0$). La ecuación de la Laplace está dada por la siguiente expresión:

$$\langle 7.2 \rangle \nabla^2 V = 0$$

2.) Selección del sistema de coordenadas a emplear.

Debido a que la estructura de las líneas planas es de tipo rectangular, implica que la distribución de cargas es del mismo tipo, entonces lo apropiado es emplear coordenadas rectangulares. Por lo tanto la ecuación de Laplace se expresa según lo indicado en la ecuación 7.3.

$$\langle 7.3 \rangle \nabla^2 V(x,y,z) = \frac{\partial^2(x,y,z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(x,y,z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(x,y,z)}{\partial z^2} = 0$$

3.) Definición de las variables rectangulares de las cuales depende el potencial.

Teniendo como referencia la línea plana indicada nuevamente en la figura No. 7.2, vista superior, donde se representa el posicionamiento rectangular y el voltaje aplicado entre las dos líneas conductoras, se hace el siguiente razonamiento para determinar de qué variables depende el potencial dentro sus dos conductores:

Para cualquier punto entre los conductores de la línea plana, el potencial eléctrico solo depende de la variable: y (separación entre los conductores), ya que este cambia de valor a medida en que el punto vaya variando de posición entre la separación de los dos conductores y no varía de valor si ese punto se desplaza uniformemente sobre la longitud de la línea (variable: x), ni tampoco cambia si a esa misma separación, el punto, se desplaza uniformemente en el grosor de la misma (variable: z),

Entonces: $V \rightarrow V(y)$.

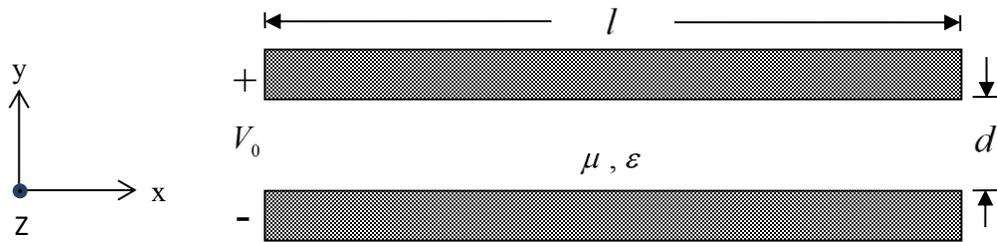


Figura No. 7.2 Voltaje entre los conductores de las dos cintas conductoras paralelas.

4.) Determinación de la ecuación final.

a qué el potencial solo depende de la variable y , la ecuación final sería la indicada a continuación. La derivada se expresa en forma completa ya que la función (el potencial en este caso) solo depende de una variable.

$$\langle 7.4 \rangle \nabla^2 V(\rho) = \frac{d^2 V(y)}{dy^2} = 0$$

5.) Solución genérica.

La solución a la ecuación 7.4 es la siguiente:

$$\langle 7.5 \rangle V(y) = a y + b$$

Dónde: a y b :son las constantes de integración, cuyos valores se determinan considerando las condiciones fronterizas del problema.

6.) Solución específica.

Se determinan las constantes de integración:

Para: $y = 0$, tenemos:

$$\langle 7.6 \rangle V(0) = 0 = b$$

Para: $y = d$, tenemos:

$$\langle 7.7 \rangle V(d) = V_0 = ad + b$$

De la ecuación: 7.6: $b = 0$.

Reemplazando este valor en la ecuación 7.7:

$$V_0 = ad \Rightarrow a = \frac{V_0}{d}.$$

Ahora reemplazando estos valores de $b = 0$, $a = V_0 / d$ en la ecuación 7.5, se logra la solución específica para este caso en particular:

$$\langle 7.8 \rangle V(y) = \frac{V_0}{d} y$$

Ejemplo No. 7.3

Comprobar la validez de la ecuación 7.8, la cual indica la forma de calcular el potencial eléctrico entre los conductores de una línea de cintas planas paralelas.

Solución:

Se tiene que la ecuación 7.8 está dada por:

$$V(y) = \frac{V_0}{d} y$$

Se utilizan las condiciones fronterizas para determinar su validez:

- Para:

$$y = 0 \Rightarrow V(0) = 0$$

que corresponde al potencial en el conductor negativo (tierra) de la línea.

- Para:

$$y = d \Rightarrow V(d) = V_0$$

que corresponde al potencial en el conductor positivo de la línea

Ejemplo No. 7.4

A una línea transmisión de cintas planas paralelas, se le aplica un voltaje de 100 voltios entre sus dos conductores. Determinar el potencial eléctrico (voltaje) en el punto medio de la misma, si la separación entre ellas es de 3 metros.

Solución:

El punto medio del área transversal es:

$$y = 1.5 \text{ metros}$$

Aplicando la ecuación 7.8:

$$V(1.5) = \frac{100}{3}(1.5) = 50 \text{ (V)}$$

7.5 Distribución de los campos electromagnéticos en las líneas planas

Conocido el potencial eléctrico entre las cintas planas conductoras, se puede determinar cómo se distribuyen los campos electromagnéticos dentro de la misma.

a. Campo eléctrico transversal

Se aplica la expresión indicada en la ecuación 7.9

$$\langle 7.9 \rangle \vec{E}_t = -\vec{\nabla}V$$

En las coordenadas rectangulares el gradiente de una función (para este caso la del potencial eléctrico), está dado por la expresión indicada en la ecuación 7.10:

$$\langle 7.10 \rangle \vec{E}_t = -\vec{\nabla}V = -\left[\frac{\partial V}{\partial x} \hat{a}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \hat{a}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{a}_z \right]$$

Como para este caso el potencial solo depende de la variable entonces la ecuación se reduce a la siguiente expresión

$$\langle 7.11 \rangle \vec{E}_t = -\vec{\nabla}V = -\frac{dV}{d\rho} \hat{a}_\rho$$

Con derivada completa ya que el potencial solo depende de una variable y , entonces:

$$\langle 7.12 \rangle \vec{E}_t = -\vec{\nabla}V = -\frac{dV(y)}{dy} \hat{a}_y = -\frac{d}{dy} \left[\frac{V_0}{d} y \right] \hat{a}_y = -\frac{V_0}{d} \hat{a}_y \text{ (V / m)}$$

b. *ntensidad magnética transversal*

$$\langle 7.13 \rangle \vec{H}_t = \frac{1}{\eta} [\hat{a}_z \times \vec{E}_t]$$

$$[\hat{a}_z \times \vec{E}_t] = \begin{bmatrix} \hat{a}_x & \hat{a}_y & \hat{a}_z \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{V_0}{d} & 0 \end{bmatrix} = \frac{V_0}{d} \hat{a}_x$$

$$\vec{H}_t = \frac{1}{\eta} \frac{V_0}{d} \hat{a}_x \text{ (A / m)}$$

Donde $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$: *pérdidas dieléctricas* (Ω)

μ : *permeabilidad del dieléctrico* (H / m)

ε : *permitividad del dieléctrico* (F / m)

Como podemos apreciar: el campo eléctrico se presenta, en forma lineal, entre el la cinta conductora plana con polarización positiva a la de polarización negativa y la intensidad magnética a lo largo del eje x (paralelo a la longitud de la línea), lo que significa que estos dos campos son ortogonales (ver figura No. 7.3).

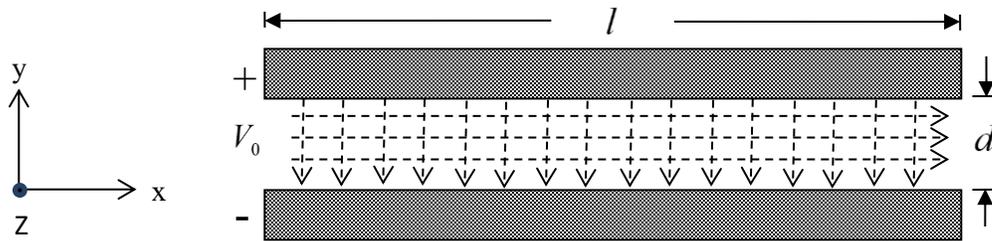


Figura No. 7.3 Distribución de los campos electromagnéticos entre los conductores de las dos cintas conductoras paralelas.

7.6 Interconexión: transmisor AM y torre radiador

Una de las utilizaciones de mayor frecuencia que tienen las *líneas planas*, es la interconexión entre los transmisores de las radiodifusoras sonoras AM y su torre de radiación, especialmente para el caso de las emisoras de alta potencia, como se mencionó anteriormente.

Las líneas coaxiales son generalmente utilizadas para aquellas emisoras cuya potencia sea relativamente moderada (menor de 150 W), debido a su limitación en cuanto a manejo de altas potencia. Para estas potencias el diámetro de estas líneas coaxiales no sobrepasan las 2 pulgadas. Mientras que para potencias altas (mayores de 150 W) se utilizan cables coaxiales de mayor diámetro ó alternativamente se emplean *líneas planas*, posicionadas en forma paralela entre si y a igual altura de la superficie. El dimensionamiento (anchura y grosor) de estas cintas, depende de la cantidad de potencia a manejar, entre más dimensionamiento mayor potencia soportan, debido a que presentan mayor contextura para la disipación de calor. ⁽²⁾

Para el caso de las *líneas planas*, el tendido se hace sobre soportes aisladores, como se indicó anteriormente, de madera ó de otro material dieléctrico, a una altura de unos 60 centímetros mínimo de la superficie y espaciados a unos 500 centímetros, dependiendo, esencialmente, del peso de las cintas, el cual obedece al dimensionamiento de las mismas (anchura y grosor). La separación entre las cintas depende de la impedancia característica que se desee para la correspondiente línea.

En la figura No. 7.4 se representan una imágenes de una torre radiador y de una sala donde se encuentran los equipos transmisores de una estación de radiodifusión sonora comercial AM. La interconexión entre los transmisores y el radiador se

realiza por cable coaxial o por *líneas planas*, dependiendo de la potencia a transmitir por la respectiva estación de radiodifusión. La línea de transmisión empleada, ya sea cable coaxial o *líneas planas*, llega hasta el circuito acoplador de impedancia que se utilice (caja de sintonía).



Figura No. 7.4 Imágenes de un radiador y de la sala de equipos de la estación transmisora de una emisora AM.

Fuente: Radiadores estaciones de radiodifusión A.M. (2019). Disponible:
[http: .ftatv.org foro vie topic.php t 12646](http://.ftatv.org foro vie topic.php t 12646).

7.7 Reflexión de potencias en las líneas de transmisión

La *reflexión* de la potencia, en las líneas de transmisión, se debe principalmente a las siguientes causas: ⁽³⁾

A que las impedancias de salida del transmisor, de la línea de transmisión y o de la antena no son completamente resistivas.

- Desacople de impedancias entre la salida del transmisor y la línea de transmisión y o entre la línea de transmisión y la entrada del acoplador de impedancia de la antena.
- A la presencia de cortocircuito o circuito abierto en cualquier parte de la línea.
- Deformaciones estructurales en alguna parte de la línea o a lo largo de la misma.
- Variaciones de la impedancia de los conectores y o uniones empleados en el tendido de la línea.

- Alteraciones en la constante dieléctrica del dieléctrico de la línea, causadas por envejecimiento de la misma y o factores de temperaturas y o humedad a los que es sometida la línea.
- Deflexiones o alteraciones bruscas que se presentan en el tendido de la línea.
- La humedad que se puede acumular en los conectores existentes en el tendido de la línea. El agua tiene un cierto grado de conductividad, lo que puede generar un corto circuito, siendo un factor relevante en la generación de potencias reflejadas. Esta situación se presenta con relativa reiteración.

Para determinar la potencia reflejada total, se mide primero la potencia de salida real del transmisor, desconectando la línea de transmisión y conectando el vatímetro entre la salida del transmisor y una carga fantasma. Posteriormente se mide la potencia de salida del transmisor, conectando el vatímetro entre el transmisor y la línea de transmisión, con la antena conectada. La diferencia entre estas mediciones corresponde a la potencia total reflejada (ver figura No. 7.5).

Esta potencia reflejada, también se puede medir, con el montaje indicando anteriormente, con la válvula del vatímetro en sentido inverso. La potencia indicada en el vatímetro corresponde a la potencia total reflejada.

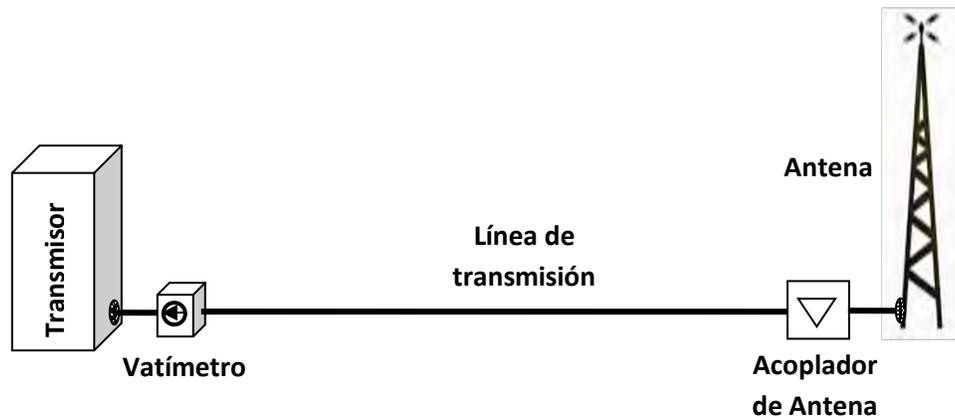


Figura No. 7.5 Medición de potencia reflejada total.

7.8 Relación de onda estacionaria (ROE)

La relación de onda estacionaria (R), o en inglés SWR (Standing Wave Ratio) o $VSWR$ (Voltage Standing Wave Ratio), corresponde al resultado de la relación existente entre la intensidad máxima de voltaje (V_{max}) y la intensidad mínima de voltaje, de la señal, al final la línea de transmisión (en la carga: antena). Tal como se indicó en el numeral 9.8 en la ecuación 7.14, se indica la forma de calcular el R .⁽⁴⁾

$$\langle 7.14 \rangle ROE = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r}$$

V_i : amplitud de voltaje de la onda incidente

V_r : amplitud de voltaje de la onda reflejada

El comportamiento del R no es lineal respecto a la intensidad de la onda reflejada, ya que el voltaje reflejado afecta al mismo tiempo tanto al numerador de la relación en forma positiva y al denominador en forma negativa. Por ejemplo si la intensidad de la onda reflejada se duplica, el R correspondiente se aumenta mucho más que el doble.

Un R de un valor muy alto puede deteriorar la transmisión, sino tiene protección contra onda reflejada. Un R es el valor promedio máximo permitido para los transmisores de las emisoras AM. Lo ideal es un R , lo que significa que no hay señal alguna reflejada.

(4) Pérez Vega., C. "Sistemas de Telecomunicaciones", Textos Universitarios. Universidad de Cantabria, 2012, pp. 294-295

Ejemplo 7.5

Determinar el porcentaje de potencia reflejada en una línea de transmisión de una radioemisora AM, si el ROE existente es de 1.5.

Solución:

Tenemos que, según ecuación 7.2:

$$ROE = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} = 1.5 \Rightarrow \frac{V_r}{V_i} = 0.2$$

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{(V_r^2 / R)}{(V_i^2 / R)} = \left(\frac{V_r}{V_i} \right)^2 = (0.2)^2 = 0.04$$

$$\frac{P_r}{P_i} \% = 0.04 \times 100 \% = 4\%$$

Entonces, el porcentaje de potencia reflejada es del: 4 . Por lo tanto el transmisor debe tener como mínimo un ROE de 1.5:1, para soportar este porcentaje de potencia reflejada.

También existe adicionalmente otro parámetro de reflexión denominado *coeficiente de reflexión de voltaje*: Γ , el cual corresponde a la relación entre las amplitudes de voltaje de la señal reflejada y la de la señal incidente. Así mismo corresponde a la relación del valor absoluto de la diferencia de las impedancias de entrada a la carga (antena) y la de la impedancia característica de la línea de transmisión, sobre la suma de las mismas. En la ecuación 7.3 se indica, nuevamente, este parámetro:

$$\langle 7.15 \rangle \Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{|Z_{in} - Z_0|}{Z_{in} + Z_0}$$

Z_{in} : Impedancia de entrada de la carga (antena)

Z_0 : Impedancia característica de la línea de transmisión

Al remplazar el *coeficiente de reflexión de voltaje* en la expresión de la relación de onda estacionaria, ecuación 7.16, se tiene:

$$\langle 7.16 \rangle ROE = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_i + V_r}{V_i - V_r} = \frac{(V_r/\Gamma) + V_r}{(V_r/\Gamma) - V_r} = \frac{V_r[(1/\Gamma) + 1]}{V_r[(1/\Gamma) - 1]}$$

$$= \frac{[(1/\Gamma) + 1]}{[(1/\Gamma) - 1]} = \frac{[(1 + \Gamma)/\Gamma]}{[(1 - \Gamma)/\Gamma]} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$$

Como se puede deducir de las ecuaciones: 10.2 y 10.4, si hay un perfecto acople de impedancias entre la de la antena y la de la línea de transmisión ($Z_{in} = Z_0$), no existe reflexión: $\Gamma = 0$ y $ROE = 1$, lo que corresponde al caso ideal.

En la tabla No. 7.1 se indica el porcentaje de pérdidas y de la potencia efectivamente radiada desde la antena, con referencia a diferentes valores de la R . Se entiende que toda la potencia que no se radia hacia fuera, se devuelve hacia el equipo. Se debe advertir que nunca se debe activar un transmisor si no se tiene conectada la antena o si está en corto, ya que la totalidad de la potencia emitida por el transmisor se devuelve hacia el equipo, pudiéndolo quemar, especialmente sino tiene protección contra onda reflejada, como se mencionó anteriormente.

ROE MEDIDA	% DE PÉRDIDA	PER*
1.0:1	0.0	100.0
1.1:1	0.3	99.7
1.2:1	0.8	99.2
1.3:1	1.7	98.3
1.4:1	2.7	97.3
1.5:1	4.0	96.0
1.6:1	5.0	95.0
1.7:1	6.0	94.0
1.8:1	8.0	92.0
2.0:1	11.0	89.0
2.2:1	14.0	86.0
2.4:1	17.0	83.0
2.6:1	20.0	80.0
3.0:1	25.0	75.0
4.0:1	38.0	62.0

PER Porcentaje de la potencia efectivamente radiada

Tabla N0. 7.1 Porcentaje de pérdidas y de la potencia efectivamente radiada desde una antena, para diferentes valores de la ROE.

Fuente: Gubans i S, et.al, *Reliable diagnostics of V Transformer insulation for Safety Assurance of Power Transmission System R AT - a European Research project*, D1-207, CIGRE session 2016, Paris

7.9 Medición de ROE

Teniendo como referencia el montaje indicado en la figura No.7.6, a continuación se relacionan los principales pasos que se deben realizar en el proceso de la medición de R , en el extremo inicial de la línea de transmisión:⁽⁵⁾

- Apagar el transmisor
- Hacer el montaje indicado en la figura No. 7.6
- Coloque el interruptor del medidor de R en la posición *adelante*.
- Encender el transmisor.
- Activar el transmisor (pulsar el PTT).
- Verificar que la aguja del medidor de R se desvía hacia delante, siempre y cuando el transmisor esté activado.
- Ajustar el mando sobre el medidor de R a la posición *cero*, teniendo presente que el transmisor este activado.
- Cambiar la posición del interruptor en el medidor de R a la posición *reflejada*.
- Con el transmisor activado, se lee en la escala respectiva la medición de R correspondiente.
- Apagar el transmisor.
- Reconectar nuevamente la antena.
- Encender el transmisor en caso que a sí se considere apropiado.

(5) Ramírez, J., "Campos electromagnéticos. Conceptos básicos y ejercicios resueltos", Editorial Bonaventuriana, 2014, pp. 459-460.

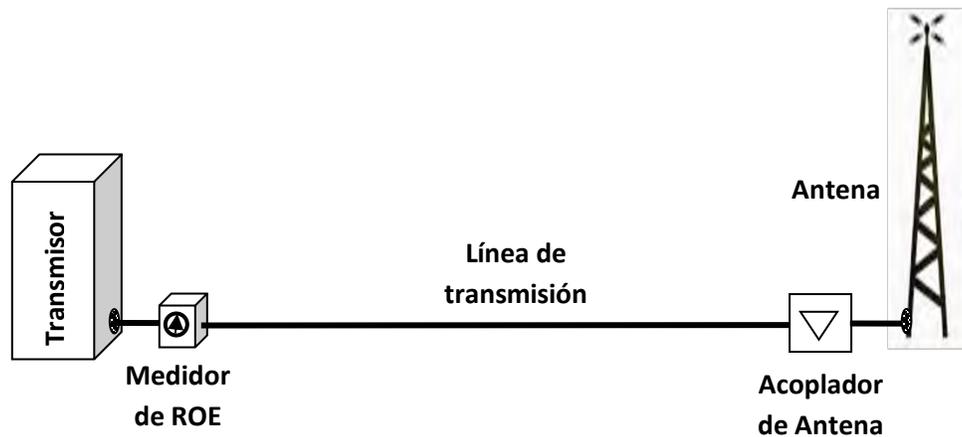


Figura No. 7.6 Montaje para la medición de ROE

Es importante volver a recordar que el máximo R permitido para el caso de las estaciones de radiodifusión sonora AM es de 1.5. Existen un gran número y variedad de medidores de R . En la figura No. 7.7, se muestran algunos de estos equipos medidores.





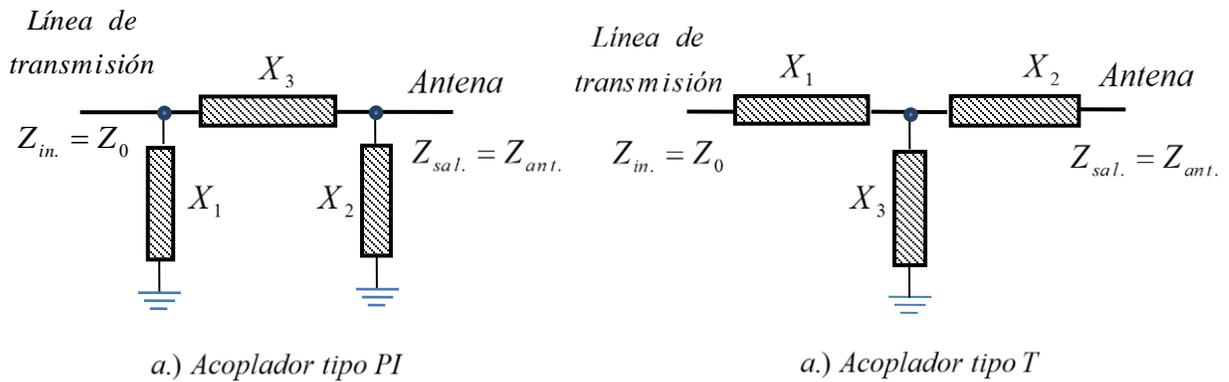
Figura No. 7.7 Imágenes de medidores de ROE
 Fuente: MaasEle troni ;Pihernz y 9Neuner

7.10 Acopladores de antena

Como se ha venido mencionando, para lograr que la señal que le llega al radiador (antena emisoras AM), mediante una línea de transmisión (cable coaxial o guía de onda), sea transferida con la máxima potencia, se requiere que la impedancia de la antena y de la línea de transmisión sean iguales y ambas resistivas (principio de máxima transferencia de potencia).

La función específica del *acoplador de antena*, es la de transformar la impedancia de la antena a un valor igual a la de *línea de transmisión* que la alimenta, que es por lo general de 50 ohm. De esta manera, este acoplador, evita que exista reflejo de señales, ondas estacionarias, permitiendo que el transmisor funcione correctamente a potencia plena. A estos acopladores también se les denomine *caja de sintonía*.

Por lo general, la circuitería de los *acopladores de antenas* (caja de sintonía) se basa en combinaciones de inductores (bobinas) y capacitores (condensadores). Las formas, más conocidas, de estas combinaciones son las de tipo PI y las de tipo T. En la figura No. 7.8 se hace una representación esquemática de estas formas de combinación.



$Z_{in.}$: Impedancia de entrada al acoplador de antena

Z_0 : Impedancia característica de la línea de transmisión

$Z_{sal.}$: Impedancia de salida del acoplador de antena

Z_{ant} : Impedancia de entrada de la antena

Figura No. 7.8 Tipos de *acopladores de antenas* para las emisoras AM
 Fuente: Solís G. José J. Pérez R. Javier, *Consideraciones de diseño de acopladores de antena tipo T para estaciones de radiodifusión AM*, RIEE, 2010, p. 3.

Por su simplicidad de montaje y facilidad de ajuste, de los *acopladores de antena* mencionados anteriormente, más utilizados, para el caso de las *emisoras AM*, son los de tipo T. A continuación se indican las ecuaciones para determinar los valores de los componentes que conforman este tipo de acoplador: ⁽⁶⁾

$$\langle 7.17 \rangle X_3 = -j \frac{\sqrt{Z_0 R_{ant}}}{\text{sen} \theta}$$

$$\langle 7.18 \rangle X_1 = -X_3 - j \frac{Z_0}{\text{tan} \theta}$$

$$\langle 7.19 \rangle X_2 = -X_3 - j \frac{R_{ant}}{\text{tan} \theta} - jX_{ant}$$

Z_0 : Impedancia característica de la línea de transmisión (Ω)

R_{ant} : Resistencia de la antena a la frecuencia de la portadora (Ω)

X_{ant} : Reactancia de la antena a la frecuencia de la portadora (Ω)

θ : desfase que sufre la señal al pasar por el acoplador

Dependiendo de la frecuencia de transmisión con que opere la *emisora AM*, se obtiene los valores de la resistencia de radiación (R_{ant}) y la de la reactancia (X_{ant}) de la antena (torre radiador). En la tabla No. 7.2 se indican estos valores para algunas frecuencias de operación. Las ecuaciones para calcular estos valores son bastantes complejas, las cuales no se encuentran relacionadas en este texto.

Frecuencia (KHz)	R_{ant} (Ohmios)	jX_{ant} (Ohmios)
1090	55.5	j68.6
1100	57	j72.6
1110	61	j78.6

Tabla No. 7.2 Impedancia de antena para algunas frecuencias de operación:
emisoras AM

Fuente: Solís G. José J. Pérez R. Javier, *Consideraciones de diseño de acopladores de antena tipo T para estaciones de radiodifusión AM*, RIEE, 2016, p. 4.

Es muy frecuente la utilización del criterio de 90° de desfase, ya que permite un diseño y una implementación más simple, especialmente cuando la longitud eléctrica de la antena es de $\lambda/4$, situación que corresponde a las torres radiadores (antenas) de las *emisoras AM*, y cuando la resistencia de la antena R_{ant} posee un valor cercano a 50 ohmios. Para este caso el procedimiento de diseño, para el *acoplador de antena* tipo T, es el siguiente: ^{(7), (8)}

a.) Se determina el tipo de las reactancias del acoplador, utilizando las ecuaciones: 7.17, 7.18 y 7.19, indicadas anteriormente, teniendo de presente que $\text{sen}(90^\circ) = 1$ y $\text{tan}(90^\circ) \rightarrow \infty$:

$$(7.20) X_3 = -j\sqrt{Z_0 R_{ant}} = -X_1$$

$$\langle 7.21 \rangle X_2 = -X_3 - jX_{ant}$$

Como podemos apreciar de las ecuaciones 7.20 y 7.21, X_3 corresponde a una reactancia capacitiva, mientras que X_2 a una reactancia inductiva. X_1 puede corresponder a una reactancia inductiva o capacitiva dependiendo de los valores reactivos de X_3 y de X_{ant} .

b.) Se calculan los valores de los componentes del acoplador (C y L), teniendo en cuenta que:

$$(7.22) X_C = -j/2\pi f C$$

$$\langle 7.23 \rangle X_L = j\pi f L$$

Dónde:

f : frecuencia central de operación

C : capacitancia para las reactancias capacitivas

L : inductancia para las reactancias inductivas

c.) Se definen los valores de los componentes (C y L), teniendo como referencia la disponibilidad que exista en el mercado, tanto de sus características de capacitancia

e inductancia, así como de los voltajes y corrientes que deben manejar. En el mercado generalmente se encuentran bobinas (inductores) variables y ajustables desde: $0 a 5 \mu H$ hasta de $0 a 150 \mu H$ y capacitores fijos desde $100 pF$ hasta $100.000 pF$. Todos estos componentes corresponden para diferentes niveles máximos de corriente y voltajes *r.m.s.*

La opción más procedente es calcular primero la capacitancia del capacitor, con un valor fijo, lo que representa unos costos más baratos, que para el caso de que sea variable. Se recomienda, por lo tanto, utilizar un capacitor fijo con capacitancia menor que la calculada, lo que implica una reactancia capacitancia mayor. Este capacitor se conecta en serie con un inductor (bobina) ajustable, de tal manera que elimine esta diferencia, y la reactancia resultante corresponda a la calculada originalmente.

Ejemplo 7.6

Determinar la composición de un acoplador de antena de tipo T, para una *emisora AM*, que opera con una antena (torre radiador) de 68.18 metros de longitud y la línea de transmisión es un cable coaxial de 50 Ohmios y desfase de 90° .⁽⁷⁾

Solución:

- Se determina la longitud de onda de la señal de operación, teniendo en cuenta que las antenas (torres radiadores) de las *emisoras AM*, son monopolos verticales de $l = \lambda/4$:

$$68.18 \text{ m} = \lambda/4 \Rightarrow \lambda = 4 \times 68.18 = 272.72 \text{ m}$$

- Se determina la frecuencia de operación de la *emisora AM*:

$$C = \lambda f \Rightarrow f = \frac{C}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{272.72} = 1.100 \text{ KHz}$$

- Para una frecuencia de operación (portadora) de 1.100 Hz, la antena (torre radiador) de la *emisora AM* en consideración, según tabla No. 7.2, tiene que una impedancia conformada por:

$$R_{ant} = 57 \ \Omega \quad \text{y} \quad jX_{ant} = j72.6 \ \Omega$$

- Considerando un desfase de $\theta = 90^0$, se puede aplicar las ecuaciones 10.8 y 10.9, entonces:

$$X_3 = -j\sqrt{Z_0 R_{ant}} = -X_1 \Rightarrow X_3 = -j\sqrt{50 \times 57} = -j53.39 \Omega$$

$$X_2 = -X_3 - jX_{ant} \Rightarrow X_2 = -(-j53.39) - j72.6 = -j19.21 \Omega$$

- Ahora considerando las ecuaciones 10.10 y 10.11 se tiene que:

$$X_3 = -\frac{j}{2\pi f C_3} = -j53.39 \Omega \Rightarrow C_3 = \frac{1}{2\pi(1.100 \times 10^3)(53.39)} = 2.710 \text{ pF}$$

$$X_1 = j53.39 \Omega = j2\pi f L_1 \Rightarrow L_1 = \frac{53.39}{2\pi(1.100 \times 10^3)} = 7,72 \mu\text{H}$$

$$X_2 = -j19.21 = \frac{-j}{2\pi f C_2} \Rightarrow C_2 = \frac{1}{2\pi(1.100 \times 10^3)(19.21)} = 7.531,8 \text{ pF}$$

Se puede implementar el *adaptador de antenas* con estos dispositivos (C_2 , C_3 y L_1) con valores fijos, pero conseguir, en el mercado, estos dispositivos con estos valores exactos a los calculados no es siempre posible. Ahora ya que el costo de los capacitores con valores variables es alto, se utiliza capacitores de valores fijos, que generen impedancias mayores a las calculadas (capacitancias menores), como se mencionó anteriormente, en combinación en serie con inductores (bobinas) variables, las cuales son relativamente más económicas, que se ajusten para eliminar la diferencia con respecto a la impedancia calculada.

Para el caso del ejemplo inmediatamente anterior, se tiene que:

- Se reduce el valor de la capacitancia de los capacitores (que sean posibles de conseguir en el mercado, supóngase los siguientes valores):

$$C_3 = 2.000 \text{ pF} \Rightarrow X_{C_3} = \frac{-j}{2\pi f C_3} = \frac{-j}{(2\pi)(1100 \times 10^3)(2000 \times 10^{-12})} = -j72.34 \Omega$$

$$C_2 = 5.000 \text{ pF} \Rightarrow X_{C_2} = \frac{-j}{2\pi f C_2} = \frac{-j}{(2\pi)(1100 \times 10^3)(5000 \times 10^{-12})} = -j28.94 \Omega$$

- Diferencia de las reactancias capacitivas:

$$X_{C_3} - X_3 = -j72.34 - (-j53.39) = -j18.95 \Omega$$

$$X_{C_2} - X_2 = -j28.94 - (-j18.68) = -j10.26 \Omega$$

- Por lo tanto, para contrarrestar las anteriores diferencias de reactancia, se le adiciona a cada capacitor un correspondiente inductor en serie, cuya reactancia sea igual a la de la respectiva diferencia:

$$X_{L_3} = j18.95 \Omega = j2\pi f L_3 \Rightarrow L_3 = \frac{j18.95}{j(2\pi)(1.100 \times 10^3)} = 2.74 \mu H$$

$$X_{L_2} = j10.26 \Omega = j2\pi f L_2 \Rightarrow L_2 = \frac{j10.26}{j(2\pi)(1.100 \times 10^3)} = 1.48 \mu H$$

- valores a los que hay que ajustar los inductores (bobinas):

$$L_1 = 7.72 \mu H \quad \wedge \quad L_2 = 1.48 \mu H \quad \wedge \quad L_3 = 2.74 \mu H$$

- Selección del rango de los valores de los inductores (bobinas) variables:

L_1 : variable de 10 μH , ajustada a 7,72 μH

L_2 : variable de 5 μH , ajustada a 1,48 μH

L_3 : variable de 5 μH , ajustada a 2,74 μH

- Los valores finales fijos de los capacitores serían:

$$C_2 : 5.000 \text{ pF} \quad \wedge \quad C_3 : 2000 \text{ pF}$$

En la figura No. 7.9, se representa la configuración del acoplador de antena del ejemplo 10.3, tipo T con un desfase de $\theta = 90^\circ$.

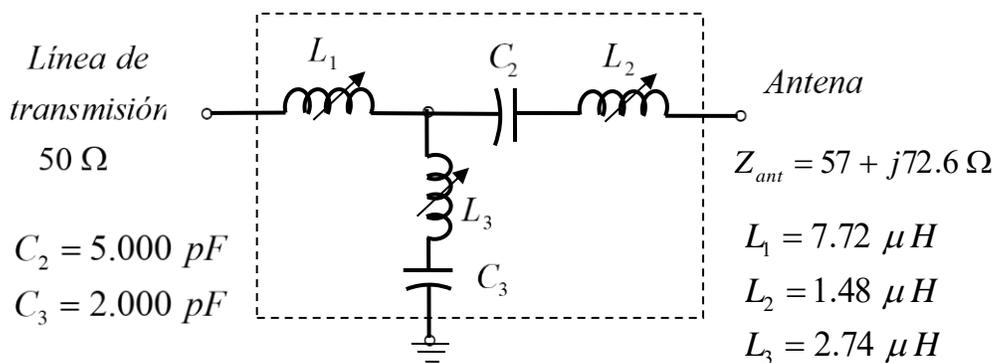


Figura No. 7.9 Conformación del acoplador de antena para el caso del ejemplo 10.3.

7.11 Imágenes cajas de sintonías

Como se ha venido indicando antes de que la línea de transmisión llegue a la torre, tiene que pasar por la *caja de sintonía* (acoplador de impedancia de antena). Esta caja contiene una serie de bobinas para realizar un ajuste o acople de impedancias. En la figura No. 7.10, se indica unas imágenes que contienen la conformación de los *acopladores de antena*, que se presentan en casos reales para una *emisora AM*.





Figura No. 7.10 Imágenes de *acopladores de antena* (cajas de sintonía) para casos reales de una *emisora AM*.

Fuente: Ubeldia, Miguel A., *líneas de transmisión y acopladores de antena*. LUI P, 2016, p.7

Los *acopladores de antena* vienen normalmente en gabinetes a prueba de intemperie. En la figura No. 7.11, se indica el gabinete de un *acoplador de antena*, que se presenta en un caso real para una *emisora AM* y la conexión a la antena (torre radiador).



Figura No. 7.11 Gabinete de un *acoplador de antena* para un caso real de una *emisora AM* y su conexión a la antena radiador.

Fuente: LBAGroup. Acopladores de Antenas AM (ATU), 2015

Teniendo de presente que el medidor de la R debe situarse completamente aislado de las bobinas del *acoplador de antena*, en caso de que se desee disponer de un medidor de R , como parte del *acoplador de antena*, este medidor deberá situarse lo suficientemente aislado de las bobinas, por ejemplo debajo del chasis donde se arma el conjunto del acoplador.

7.12 Impedancia de entrada caja de sintonía

La impedancia de entrada en la caja de sintonía (acoplador de impedancia de antena), debe corresponder exactamente a la impedancia de la línea de transmisión que se esté utilizando, calculada a la frecuencia portadora de la emisión, y ser ambas resistivas para que exista un perfecto acople de impedancias y por lo tanto

una transferencia máxima de potencia. La ecuación 7.24 indica la forma de calcular esta impedancia. ⁽⁹⁾

$$\langle 7.24 \rangle Z_{in} = X_1 + \frac{X_3(R_{ant} + X_{ant} + X_2)}{(R_{ant} + X_{ant} + X_2 + X_3)}$$

Sin embargo hay que tener en cuenta los componentes de modulación de audio, los cuales se encuentran a $\pm 10 \text{ KHz}$ alrededor de la portadora, para este caso de las emisiones de las emisoras AM, presentándose en estos componentes una variación del valor central de la impedancia de entrada a la caja de sintonía, con respecto a la existente en la frecuencia de la portadora, provocando por lo tanto para estos componentes espectrales ondas reflejadas. Para este caso el valor, tanto de la impedancia de entrada como el coeficiente de reflexión y el de ROE, se calculan con la frecuencia límite de la banda lateral correspondiente (superior inferior).

Calcular los valores de la impedancia de entrada al acoplador de impedancia (caja de sintonía), el coeficiente de reflexión y el del ROE, para el caso de la estación de radiodifusión sonora AM del ejemplo inmediatamente anterior, en la frecuencia portadora.

Solución:

a.) Impedancia de entrada al acoplador, aplicando la ecuación 7.24, con los valores obtenidos en el desarrollo del ejemplo:

$$Z_{in} = j53.39 + \frac{(-j53,39)(57 + j72.6 - j19,21)}{(57 + j72,6 - j19,21 - j53.39)} = 50 \Omega$$

b.) Coeficiente de reflexión, aplicando la ecuación 7.15 y reemplazando con los valores correspondientes:

$$\Gamma = \frac{|Z_{in} - Z_0|}{Z_{in} + Z_0} = \frac{|50 - 50|}{50 + 50} = 0$$

c.) El ROE: aplicando la ecuación 7.16 y reemplazando valores:

$$ROE = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = \frac{1+0}{1-0} = 1$$

Como se puede observar de los resultados obtenidos de este ejemplo, no existe onda reflejada, ya que se presenta un perfecto acople de impedancia entre la línea de transmisión y la entrada a la caja de sintonía.

Ejemplo 7.8

Calcular los valores de la impedancia de entrada al acoplador de impedancia (caja de sintonía), el coeficiente de reflexión y el del ROE, para el caso de la estación de radiodifusión sonora AM, de los dos ejemplos inmediatamente anteriores, en las frecuencias límites de su bandas laterales.

Solución:

1.) Banda lateral superior (1.110 Hz)

- En la frecuencia límite de la banda lateral superior (1.100 Hz), según tabla No. 7.2, los componentes de la impedancia de la antena :

$$R_{ant} = 61 \Omega \Rightarrow jX_{ant} = j78.6 \Omega$$

- Considerando un desfase de $\theta = 90^\circ$, se puede aplicar las ecuaciones 7.20 y 7.21, entonces:

$$X_3 = -j\sqrt{(Z_0 R_{ant})} = -X_1 \Rightarrow X_3 = -j\sqrt{(50 \times 61)} = -j55,23 \Omega = -X_1$$

$$X_2 = -X_3 - jX_{ant} \Rightarrow X_2 = -(-j55,23) - j78,6 = -j23,37 \Omega$$

a.) Impedancia de entrada al acoplador, aplicando la ecuación 7.24, con los valores obtenidos anteriormente:

$$\begin{aligned} Z_{in} &= X_1 + \frac{X_3(R_{ant} + X_{ant} + X_2)}{(R_{ant} + X_{ant} + X_2 + X_3)} = j55,23 + \frac{-j55,23(61 + j78,6 - j23,37)}{(61 + j78,6 - j23,37 - j55,23)} \\ &\approx j55,23 + \frac{-j55,23(61 + j55,23)}{(61)} = j55,23 + \frac{-j55,23(61 + j55,23)}{(61)} = 50 \Omega \end{aligned}$$

b.) Coeficiente de reflexión, aplicando la ecuación 7.15 y reemplazando con los valores correspondientes:

$$\Gamma = \frac{|Z_{in} - Z_0|}{Z_{in} + Z_0} = \frac{|50 - 50|}{(50 + j) + 50} = 0$$

c.) El ROE: aplicando la ecuación 7.16 y reemplazando valores:

$$ROE = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = \frac{1+0}{1-0} = 1$$

Como se puede observar de los resultados obtenidos, se mantiene el acople de impedancias, de igual forma que para el caso considerado para la frecuencia portadora. .

2.) Banda lateral inferior (1.090 Hz)

- En la frecuencia límite de la banda lateral inferior (1.090 Hz), según tabla No. 7.2, los componentes de la impedancia de la antena :

$$R_{ant} = 55.5 \Omega \Rightarrow jX_{ant} = j68.6 \Omega$$

- Considerando un desfase de $\theta = 90^0$, se puede aplicar las ecuaciones 7.20 y 7.21, entonces:

$$X_3 = -j\sqrt{(Z_0 R_{ant})} = -X_1 \Rightarrow X_3 = -j\sqrt{(50 \times 5.55)} = -j16.66 \Omega = -X_1$$

$$X_2 = -X_3 - jX_{ant} \Rightarrow X_2 = -(-j16.66) - j68.6 = -j51.94 \Omega$$

a.) Impedancia de entrada al acoplador, aplicando la ecuación 7.24, con los valores obtenidos anteriormente:

$$Z_{in} = X_1 + \frac{X_3(R_{ant} + X_{ant} + X_2)}{(R_{ant} + X_{ant} + X_2 + X_3)} = j16.66 + \frac{-j16.66(55.5 + j68.6 - j51.94)}{(55.5 + j68.6 - j51.94 - j16.66)}$$

$$\approx j16,66 + \frac{-j16,66(55,55 + j16,66)}{(55.5)} = 50 \Omega$$

b.) Coeficiente de reflexión, aplicando la ecuación 7.15 y reemplazando con los valores correspondientes:

$$\Gamma = \frac{|Z_{in} - Z_0|}{Z_{in} + Z_0} = \frac{|50 - 50|}{(50 + j) + 50} = 0$$

c.) El ROE: aplicando la ecuación 7.16 y reemplazando valores:

$$ROE = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = \frac{1+0}{1-0} = 1$$

Como se puede observar de los resultados obtenidos, se mantiene el acople de impedancias, de igual forma que para el caso considerado para la frecuencia portadora. .

De los resultados de los ejemplos inmediatamente anteriores, se puede deducir que el acople de impedancias se mantiene dentro todo el espectro de la emisión de esta estación radiodifusión sonora AM.

7.13 Microcintas

7.13.1 Estructura

Este tipo de líneas, conocidas como *Microstrip*, no se emplean como medio de transmisión para distancias convencionales, como es el caso del resto de líneas que se tratan en este texto, sino que se utilizan para constituir dispositivos de circuitos integrados de estado sólido para microondas.

Su estructura se fundamenta de dos placas conductoras paralelas, una ubicada en la superficie superior de un dieléctrico (substrato) que las separa y la otra en la superficie inferior del mismo. La placa inferior tiene el mismo ancho y longitud del dieléctrico, la cual corresponde al plano de tierra de la cinta, y la placa superior tiene un ancho menor constituyéndose en el conductor de la cinta. En la figura No 7.12, se ilustra la conformación básica de una *microcinta* ⁽¹⁰⁾

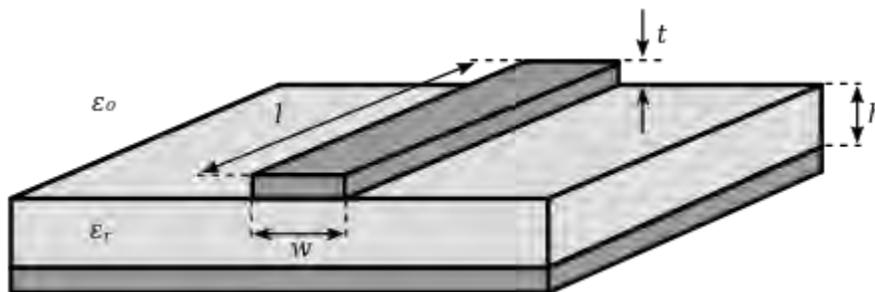


Figura No. 7.12 Estructura básica de una microcinta
 Fuente: Líneas de Microcinta - GEOCITIES. s. (2020) Disponible:
www.geocities.com/jaimealopezr/Electronica/LineasMicrocinta

El principio de funcionamiento de las líneas de transmisión de tecnología *microstrip*, se fundamenta en la generación de un campo eléctrico entre las cintas conductoras, cuya magnitud es afectada por la geometría de la estructura de la *microstrip* y de la constante dieléctrica del sustrato.

7.13.2 Modo de propagación

Las ondas electromagnéticas en las *microcintas* se propagan en forma cuasi-TEM (*Transversales electromagnéticas*), diferenciándose de las guías de ondas, en que mientras en estas últimas se propagan dentro de la guía, en las *microcintas* se propagan tanto en su dieléctrico como en el aire, lo que hace que estas líneas de microcintas sean medios de transmisión dispersivos. En la figura No. 7.13 se muestra el modo de propagación de las ondas electromagnéticas (eléctricas y magnéticas), en una línea de *microcintas*.

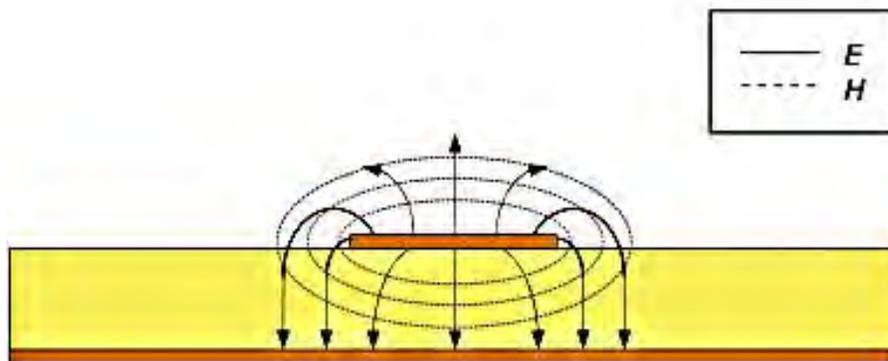


Figura No. 7.13 Modo de propagación de los campos electromagnéticos en una línea de transmisión: *microcintas*.

Fuente: Gutierrez, C. M., "o -pass filter design in technology substrate integrated ave guide si , for space applications" Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena, 2018, p.20

7.13.3 Impedancia característica

Para determinar la expresión que permitiera calcular la impedancia característica de este tipo de línea de transmisión, se requirió de un proceso más extenso y complejo que el utilizado para el del resto de líneas de transmisión, ya que las *microcintas* son estructura abiertas, lo que conlleva a que los campos electromagnéticos no se encuentran confinados dentro de la estructura misma de la línea.

El premio nobel de física H. A. Heiler, desarrollo una expresión matemática, que ha sido reconocida, para calcular la impedancia característica de las *microcintas*, la cual se indica en la ecuación 7.25, donde es despreciada el espesor de la cinta conductora (superior). ⁽¹¹⁾

$$(7.25) \text{ Si } \frac{w}{h} \leq 1 \quad \rightarrow \quad Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ff}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right)$$

$$\text{Si } \frac{w}{h} \geq 1 \quad \rightarrow \quad Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ff}}} \frac{1}{(w/h) + 1,393 + 0.667 \ln (w/h + 1,444)}$$

$$\text{Donde: } \epsilon_{ff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12h/w}} + 0.04(1 - w/h)^2 \right]$$

ϵ_{ff} : permitividad eléctrica efectiva

ϵ_r : permitividad relativa del dieléctrico

h : grosor de la placa dieléctrica

w : ancho de la cinta conductora (superior)

Ejemplo 7.9

Calcular la impedancia característica de una línea de transmisión de tipo *microcintas*, con las características estructurales indicadas en la figura No. 7.12, con una placa dieléctrica de permitividad relativa de 3.4 y con las siguientes dimensionales:

- Grosor del dieléctrico: 0.8 cm
- Ancho de la cinta conductora: 0.6 cm

Solución:

En primer lugar, se calcula la permitividad efectiva:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{3.4 + 1}{2} + \frac{3.4 - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12(0.8/0.6)}} + 0.04(1 - 0.6/0.8)^2 \right] = 2.49$$

$$\frac{w}{h} = \frac{0.6}{0.8} = 0.75 \leq 1$$

$$\frac{w}{h} \leq 1 \quad \rightarrow \quad Z_0 = \frac{60}{\sqrt{2.49}} \ln \left(\frac{(8)(0.8)}{0.6} + \frac{0.6}{4(0.8)} \right) = 9.07 \, \Omega$$

En el caso de requerirse un valor de impedancia característica determinado, debe redimensionar la estructura de la línea (grosor del dieléctrico y o ancho de la cinta conductora).

Existen varias herramientas computacionales para calcular las dimensiones de una línea *microstrip*, como es el caso de LineCalc, presente en el entorno del programa Advanced Design System (ADS) y el de T Line de Applied Wave Research, RF-CHART, partiendo de su impedancia característica y de su longitud eléctrica. Por lo general estas herramientas desprecian el grosor de la cinta conductora de las *microcintas*.⁽¹²⁾

7.13.3 Aplicaciones

Como se mencionó anteriormente, las líneas *microcintas* no se emplean como medio para transmisión para enlaces de comunicaciones, debido esencialmente a las altas pérdidas por dispersión que generan, pero si permiten una gama amplia de aplicaciones de gran utilidad, entre las cuales se encuentran: antenas, filtros, divisores de potencia, acopladores direccionales, osciladores, entre otras. A continuación, se describe dos de sus aplicaciones más conocidas:⁽¹³⁾

7.13.3.1 Antenas microstrip

a.) Estructura

Su construcción se fundamenta en la tecnología de las *microcintas*, donde la cinta conductora (superior), la cual se le conoce como "parche", hace las veces del elemento radiador de la antena y la cinta inferior (plano de tierra de la cinta) hace las veces del elemento reflector. Por su estructura, el rango de frecuencia en el cual opera este tipo de antenas es en el de microondas. ⁽¹⁴⁾

Debido a el tamaño reducido que presenta de este tipo de antenas, su utilización se hace muy práctico en los sistemas de comunicación de a aquellos dispositivos y naves móviles, tales como: misiles, aeronaves, drones, satélites, entre otros.

Las ventajas que ofrecen las *antenas microstrip*, son principalmente: su tamaño reducido, su peso liviano, facilidad de implementación y la versatilidad en su impedancia, patrón de radiación, polarización y frecuencia de operación. En cuanto a las ventajas que se le anotan se tienen: reducida potencia de radiación, baja eficiencia, ancho de banda angosto, altas pérdidas y además son muy susceptibles a ser afectadas por las condiciones térmicas.

En la figura No. 7.14, se muestra la estructura básica de una antena tipo *microstrip* rectangular, con sus indicaciones dimensionales.

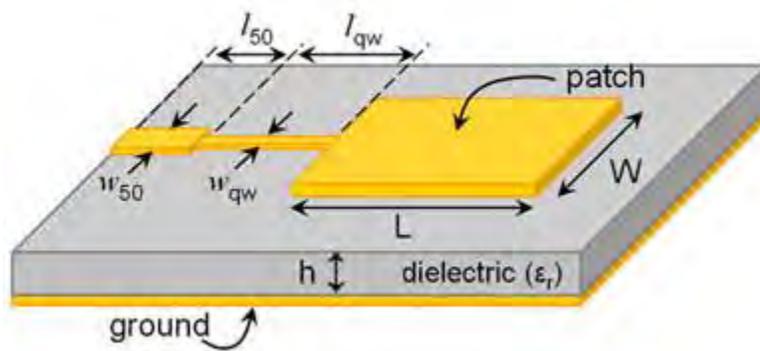


Figura No. 7.14 Estructura básica de una antena tipo *microstrip* rectangular

Fuente: Antena Microstrip. (2020). Disponible: <http://helo971016.blogspot.com/2019/10/antena-microstrip-investigacion.html>

El dimensionamiento de una antena tipo *microstrip*, depende fundamentalmente de la finalidad para la cuál va a hacer utilizada. A continuación, se relacionan unos rangos de valores de las dimensiones de sus principales elementos, respecto a una antena de configuración indicada en la figura No. 7.14: ⁽¹⁵⁾

✓ Longitud del parche: $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$

- ✓ Grosor del dieléctrico: $h \ll \lambda_0$
- ✓ Ancho del parche: $w \gg h$
- ✓ Permitividad relativa del dieléctrico: $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$

Donde: λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre

Entre menor sea la permitividad relativa del dieléctrico, se logra aumentar la eficiencia de la antena, ya que en estos casos el dieléctrico presenta menores pérdidas.

b.) Alimentación

Existen diferentes formas de alimentar una antena *microstrip*, para que funcione de manera eficiente, dependiendo fundamentalmente del área del equipo donde se vaya a implementar. Una de las formas de alimentar una antena tipo *microstrip*, es la conocida como alimentación por sonda de cable coaxial. En la figura No. 7.15 se muestra este tipo de alimentación

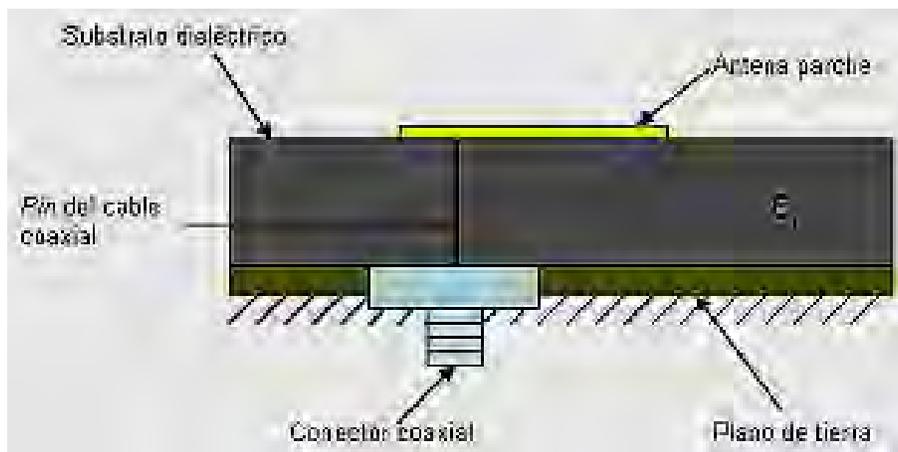


Figura No. 7.15 Alimentación por sonda de cable coaxial, de una antena tipo *microstrip*.

Fuente: Capítulo 3 Antenas Microstrip. (2020). Disponible:

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/capitulo3.pdf

c.) Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena *microstrip* rectangular, para el caso del que el plano tierra sea infinito, es de forma omnidireccional, pero radiando solamente hacia la parte superior, ya que este plano refleja, idealmente, la totalidad de la potencia radiada. Si embargo como el plano tierra es finito, se presenta ciertos lóbulos posteriores, pero de reducidas intensidades comparadas con las del lóbulo principal.

En la figura No. 7.16 se muestra el lóbulo de radiación ideal de una antena *microstrip* rectangular, en su representación polar planar.

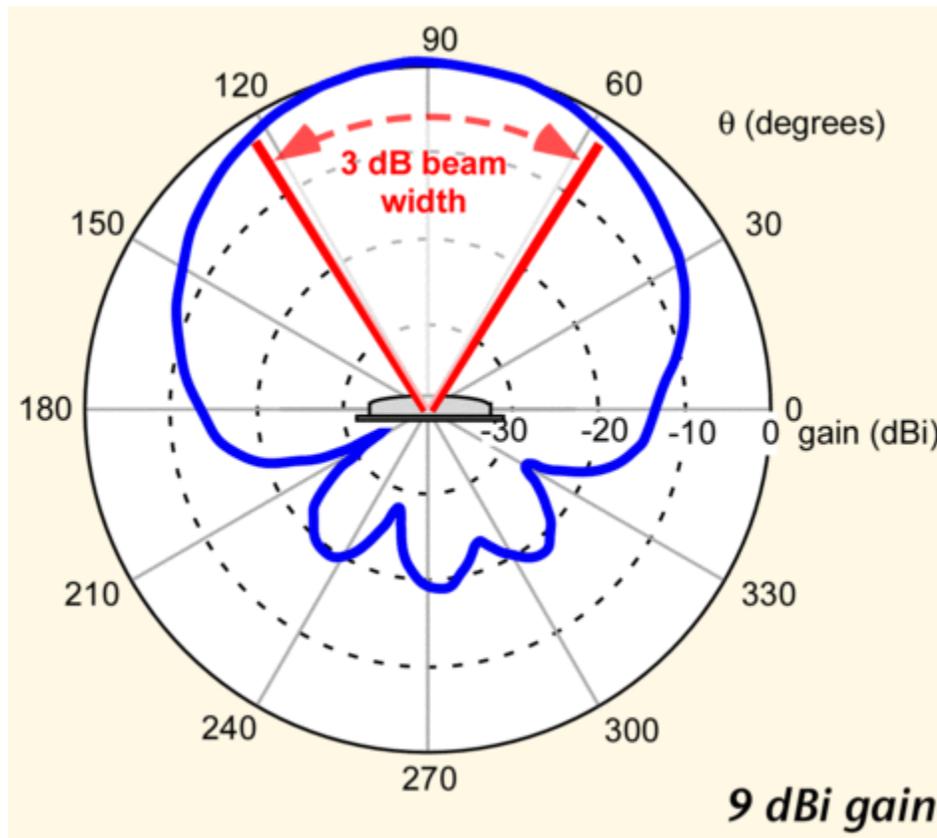


Figura No. 7.16 Patrón de radiación de una antena *microstrip* rectangular en su representación polar planar.

Fuente: Giró Uribe, F. . Selva Castañeta A. R., *Design and simulation of rectangular microstrip antenna to the frequency of* , " , Universidad de Oriente, Cuba, 2018, p. 15

d.) Diseño

Los pasos que regularmente se emplean para el desarrollo del diseño de una antena *microstrip* rectangular son los siguientes: ⁽¹⁶⁾

1. Se define la frecuencia de operación en la cual operará la antena: (f_{op})
2. Se precisa el tipo de substrato (dieléctrico) a ser empleado y el grosor de este: (ϵ_r y h).
3. Se calcula el ancho de la cinta parche, a través de la ecuación 7.26:

$$\langle 7.26 \rangle \quad w = \frac{1}{2f_{op}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c}{2f_{op}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

Donde:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m): permeabilidad del espacio libre (vacío)}$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ (F/m): permitividad del espacio libre (vacío)}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ (m/s). velocidad de la luz en el espacio libre}$$

4. Se determina la permitividad eléctrica efectiva, mediante la ecuación 7.27:

$$\langle 7.27 \rangle \quad \epsilon_{ff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r + 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-1/2}$$

5. Se obtiene la extensión de la longitud de la cinta parche (ΔL) (ver figura No. 7.17), mediante la ecuación 7.28.

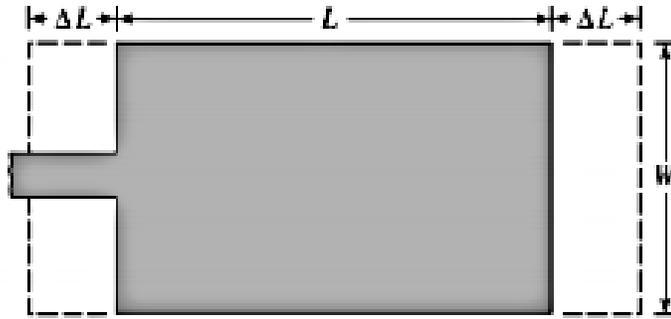


Figura 7.28 Vista superior de la estructura de la cinta parche de una antena *microstrip* rectangular.

Fuente: Aburto, M.L. / Anastasi Muschong, M. A. / Vivier, S. L. / Banchier, M. “*Design and Implementation of Microstrip Antenna*”, Departamento de Electrónica Facultad Regional Bahía Blanca Universidad Tecnológica Nacional Bahía Blanca, Argentina, 2018, p.23.

$$(7.28) \quad \Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{ff} + 0.3)[(w/h) + 0.264]}{(\epsilon_{ff} - 0.258)[(w/h) + 0.8]}$$

6. Se obtiene la longitud de la cinta parche, a través de la ecuación 7.29.

$$(7.29) \quad L = \frac{1}{2f_{0p}\sqrt{\epsilon_{ff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} - 2\Delta L$$

e.) Ganancia

La ganancia de una antena *microstrip*, con parche rectangular, oscila entre 2 y 3 dB, dependiendo esencialmente de las características conductivas de la cinta que hace las veces de plano tierra. A mayor sea la característica conductiva de la cinta del plano de tierra, la ganancia de la antena se puede incrementar a unos 3 dB, ya que por esta condición conductiva disminuye la radiación alrededor de la antena, porque la reflexión de la señal radiada se incrementa.

f.) Potencia

Como es el caso para todas las antenas, la potencia radiada por una antena *microstrip* depende, en buena parte, de la intensidad de señal que se le inyecte. Debido a su estructura reducida, estas antenas no admiten la alimentación de señales intensas, lo que limita el valor de la potencia radiada. La ecuación 7.30

contiene la expresión matemática para el cálculo de la potencia radiada, por las antenas tipo *microstrip* con parche rectangular. ⁽¹⁷⁾

$$(7.30) \quad P_{rad} = \frac{|V_{in}|^2}{240\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{K_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 \text{sen}^3(\theta) d\theta$$

Donde:

V_{in} : voltaje de entrada a la antena

$K_0 = 2\pi/\lambda_0$: constante de fase del espacio libre

θ : ángulo a partir del eje central del patrón de radiación

g.) Impedancia de entrada

Para el cálculo de la impedancia de entrada, en resonancia, de la antena *microstrip* de parche rectangular, se emplea la expresión indicada en la ecuación 7.31 ⁽¹⁷⁾

$$(7.31) \quad R_{in} = \frac{1}{2[G_1 \pm G_{12}]}$$

Donde:

$$G_1 = \frac{I_1}{120\pi^2}: \text{conductancia de la antena}$$

G_{12} : conductancia mutua entre las ranuras de la antena

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{K_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 J_0(K_0 L \text{sen}(\theta)) \text{sen}^3(\theta) d\theta$$

J_0 : función de Bessel de primer grado y orden cero

Ejemplo 7.10

Determinar la frecuencia con la cual debe operar una antena *microstrip* rectangular, si el ancho del parche es de $w = 50 \text{ mm}$ y la permitividad eléctrica relativa del sustrato es de $\epsilon_r = 2.2$

Solución:

A partir de la ecuación 7.26, despejamos f_{op} :

$$f_{op} = \frac{c}{2w} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{3 \times 10^8}{2(50 \times 10^{-3})} \sqrt{\frac{2}{2.2 + 1}} = 2.37 \text{ (GHz)}$$

Además de las de porche rectangular, existe una gran variedad de estructuras de antenas tipo *microstrip* de un solo elemento entre la que se encuentran las siguientes: cuadrada, pentagonal, triangular, circular, disco con ranura, anillo, semi-disco, anillo elíptico, espiral, entre otras. Así mismo existen antenas *microstrip* que cuentan con varios elementos como parche.

Cada una de estas variedades de antenas, tienen sus propias características y parámetros estructurales, eléctricas y de operación. cuentan con específicas expresiones matemáticas para poder determinar su diseño y funcionamiento.

7.13.3.2 Filtros *microstrip*

En los sistemas y equipos electrónicos los filtros son unos dispositivos esenciales. Los principales filtros son clasificados como: filtros pasa bajo, filtros pasa alto, filtros pasa banda y filtros rechaza banda. El papel fundamental de estos dispositivos es seleccionar las señales dentro de los límites espectrales designados.

La tecnología *microstrip* es muy empleada para el desarrollo e implementación de estos tipos de filtros para frecuencias de microondas, ya que por su tamaño reducido ocupan poco espacio, permitiendo además ser instalados de forma fijos, lo que hace que no vibren, en el caso de que el equipo donde están operando sea una nave en movimiento, asegurando mayor confiabilidad en su funcionamiento y también demanda costos relativamente bajos en su construcción.

Para lograr que los filtros *microstrip* sean eficientes en su funcionamiento, se debe emplear sustratos cuyas pérdidas sean menores y con una constante dieléctrica homogénea. ⁽¹⁸⁾

En la práctica se emplean herramientas computacionales de simulación para el diseño de los filtros tipo *microstrip*, entre las que se encuentran el programa ADS

(at *ave Advanced esign System*) y el programa isual Studio 2017 de Microsoft. Entre las ventajas que ofrecen estas herramientas, se puede destacar la flexibilidad de seleccionar el tipo y el orden del filtro a diseñar, su tipo de respuesta, la o las frecuencias de corte y la impedancia de carga, así como la constante dieléctrica y el espesor del sustrato a emplear. ⁽¹⁹⁾

Cuando se va a diseñar un filtro de microondas, se debe definir la función de transferencia que se ajuste a los requerimientos específicos de funcionamiento del filtro y a continuación sintetizar el circuito correspondiente que cumpla con esta función.

A manera de ilustración en la figura No.7.29, se hace una representación de una red, conocida como "escalera", cuya conformación es un conjunto de componentes en serie y paralelo de manera alternada, que se emplea como referencia para el proceso de diseño de los filtros microondas. El circuito indicado en la parte inferior corresponde al dual del indicado en la parte superior. ⁽²⁰⁾

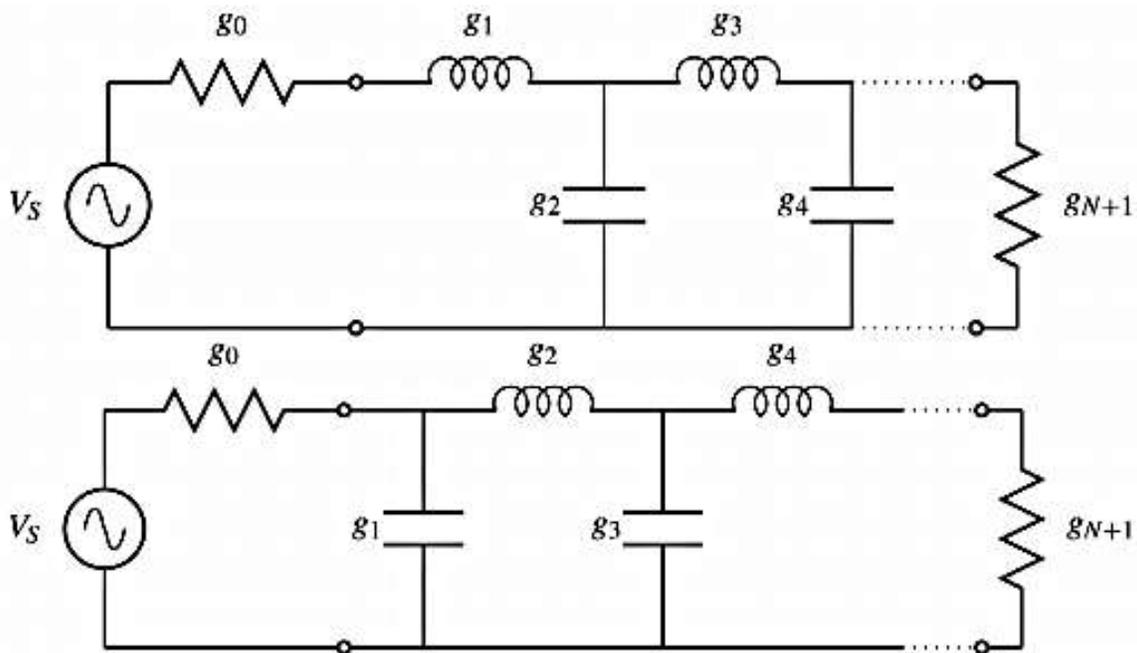


Figura No. 7.29 Red en escalera con elementos concentrados.

Fuente: Cuesta, G. P., *iseño de iltros aso Banda de Microondas mediante aps y íneas Acopladas*, Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de alencia, 2018, p.6

En la figura No. 7.30 se ilustra la banda de un filtro paso banda de microondas, que se podría lograr mediante redes de estructura "escalera".

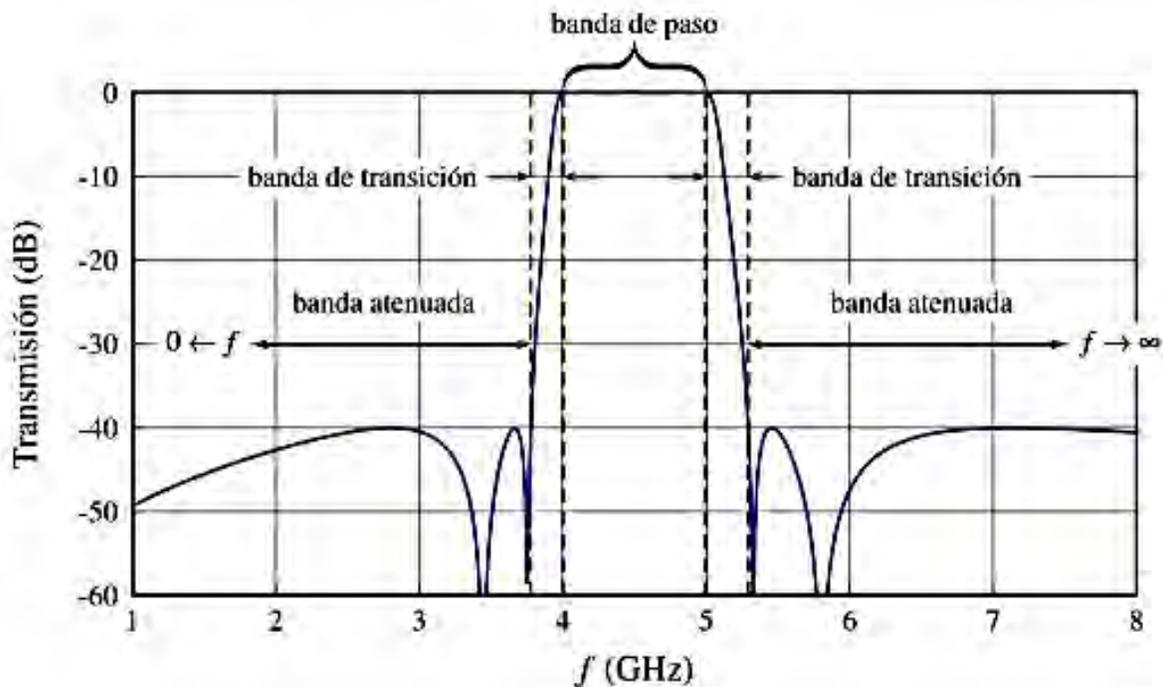


Figura No. 7.30 Filtro Paso Banda

Fuente: Cuesta, G. P., *Diseño de filtros paso Banda de Microondas mediante líneas acopladas*, Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, 2018, p.7

El algoritmo utilizado para la definición de los componentes y dimensiones de un filtro tipo *microstrip*, está conformado esencialmente por los siguientes pasos: ⁽²¹⁾

1. Definición de las características de funcionamiento del filtro
2. Cálculo de los coeficientes para una respuesta normalizada.
3. Aplicación de la Transformada de Richard.
4. Aplicación de la Identidad de Bode.
5. Cálculo de las dimensiones de las cintas conductoras.

✓ *Ejemplo del proceso de diseño de un filtro microstrip pasa bajos, mediante Visual Studio de Microsoft.*

Como ilustración, en la figura No. 7.31 se muestra la ventana de trabajo de la herramienta computacional Visual Studio 2017 de Microsoft, para el diseño de un filtro tipo *microstrip* pasa bajos.

En la parte izquierda superior se puede observar:

La definición de las características con que se quiere que funcione el filtro: tipo (Butter orth: respuestas planas), respuesta (pasa-bajos), orden (3), frecuencia de corte (1.5 GHz), resistencia del generador (50 ohmios), constante dieléctrica (4.4) y espesor del sustrato (1.544 mm).

En la parte superior se puede observar:

Los resultados del cálculo de los coeficientes para los componentes reactivos: L_1 17.76 uH, C_1 1.51 pF, L_2 17.16 uH y R_L 50 ohms. (estos valores podrían servir de referencia para contar con la posibilidad de implementar el filtro con componentes discretos)

En la parte inferior se puede observar:

Los valores de las impedancias, de cada uno de los 7 segmentos (cintas conductoras) que conformaran el circuito del filtro *microstrip*, así como las respectivas dimensiones de longitud y ancho de cada uno de ellos (mm).

En el lado derecho parte superior se muestra la configuración del circuito del filtro pasa bajo con componentes discretos y en la parte inferior la estructura del filtro con componentes *microstrip*.

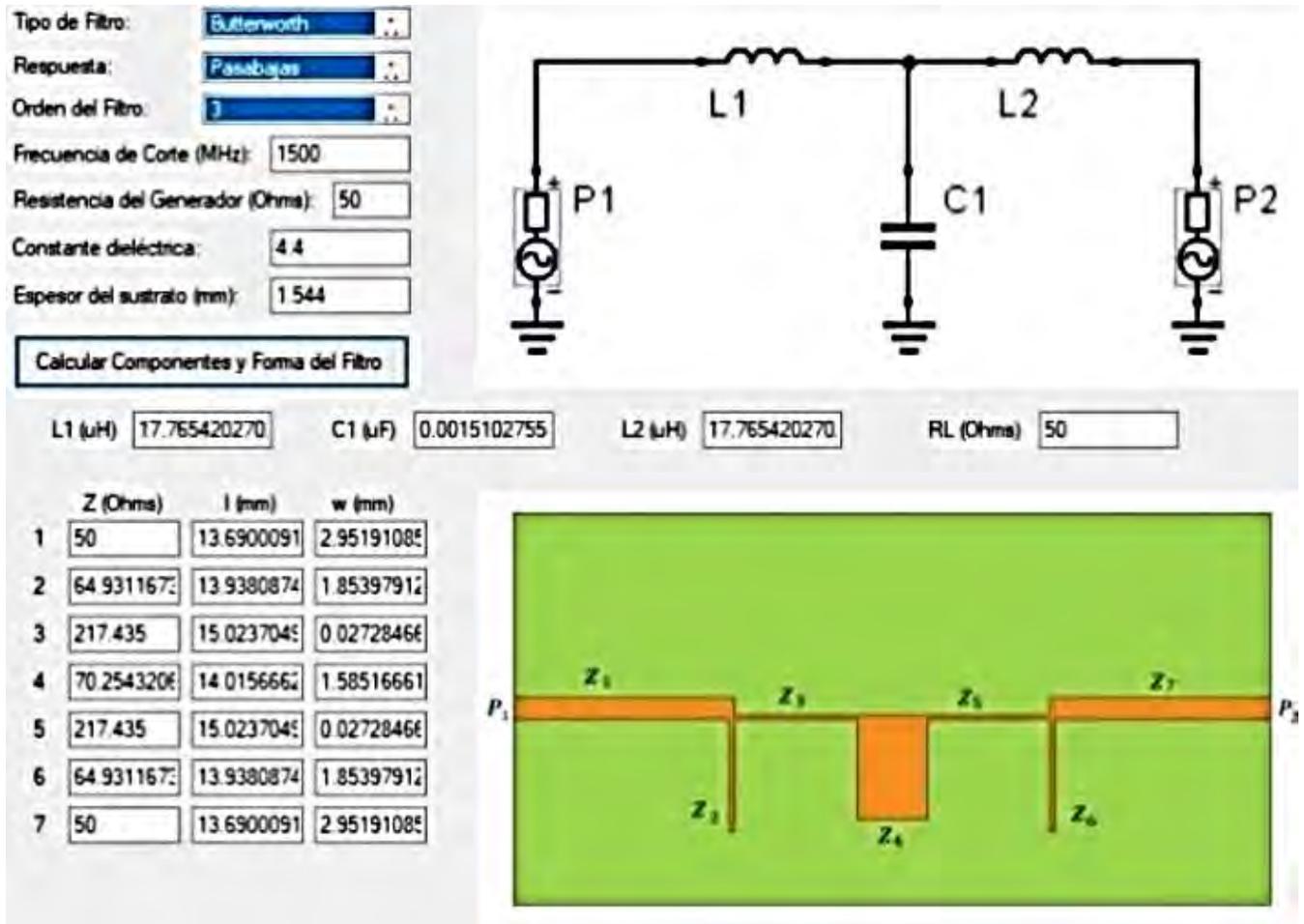


Figura No. 7.31 Pantalla de trabajo de la herramienta computacional Visual Studio 2017 de Microsoft

Fuente: Reyes Ayala, M., Andrade González, E. A., Tirado Méndez, A., Torres Peña, H., *Herramienta Computacional para el Diseño de Filtros de RF de Circuito Impreso Microstrip*, *RF filter design software*, Ingeniería Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana, 2019, p.23.

En la figura No.7.32 se muestra la imagen del filtro *microstrip* real paso bajas, diseñado mediante la herramienta computacional Visual Studio 2017 de Microsoft

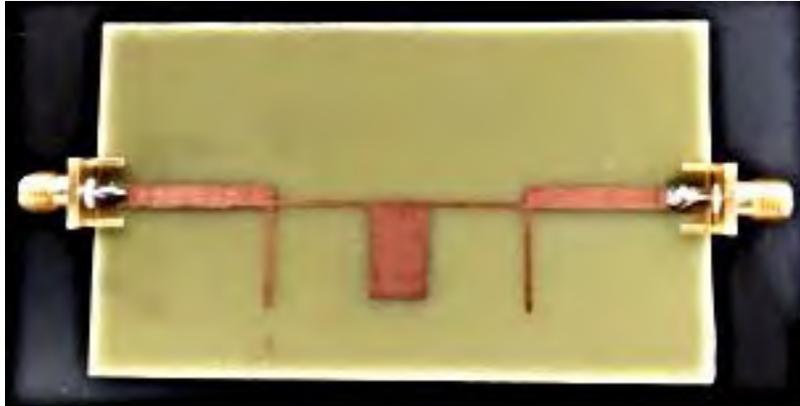
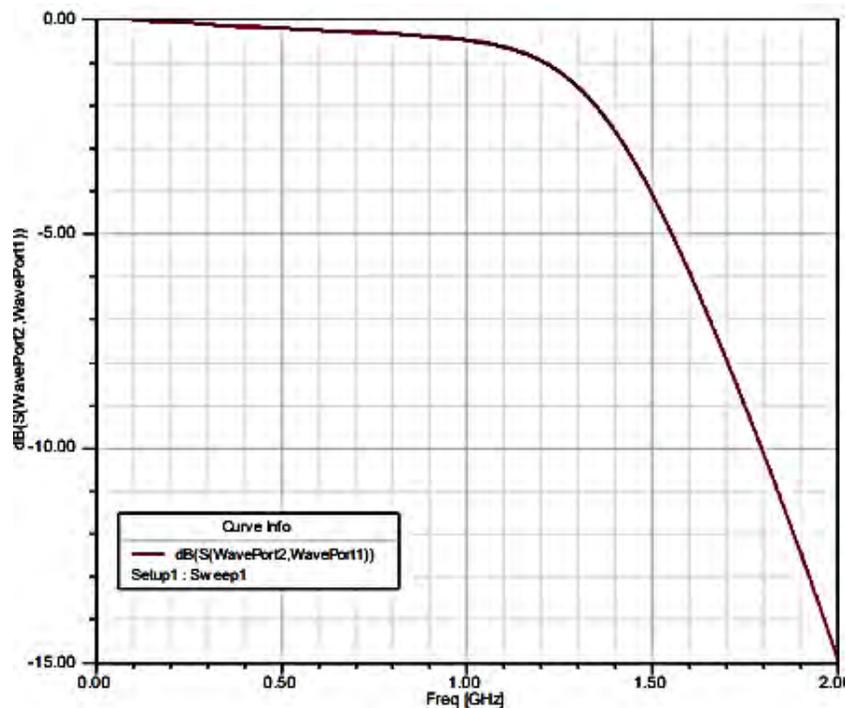


Figura No. 7.32 Imagen del filtro *microstrip* real pasa bajos, diseñado mediante la herramienta computacional visual Studio 2017 de Microsoft

Fuente: Reyes Ayala, M. Andrade González, E. A. Tirado Méndez, A. Torres Peña, H., *herramienta Computacional para el diseño de filtros de R de Circuito Impreso Microstrip R filter design software*, Ingeniería Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana, 2019, p.24.

En la figura No. 7.38, en la parte superior, se indica la curva característica ideal del filtro en cuestión (resultado del proceso de simulación) y en la parte inferior la correspondiente a la obtenida del filtro en su operación real.



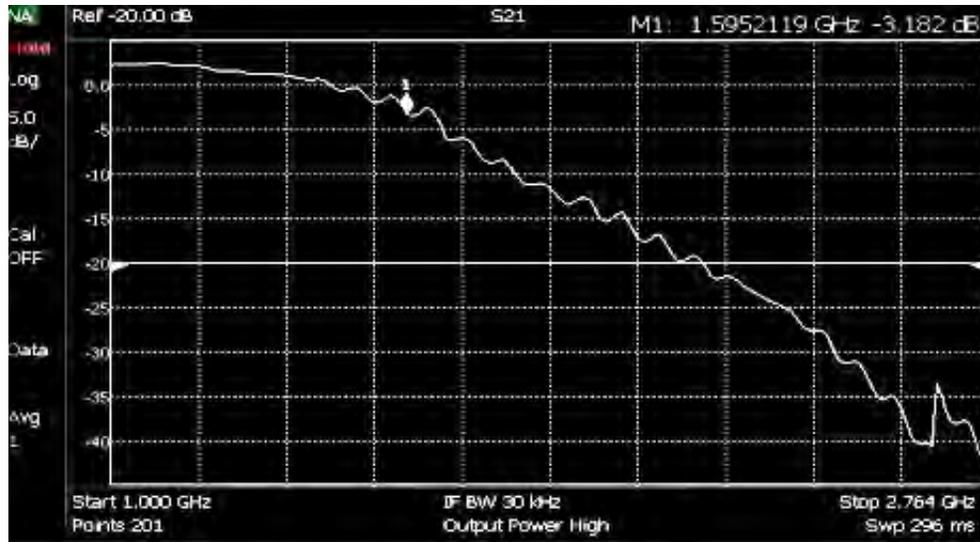


Figura No. 7.38 Curva característica del filtro microstrip pasa bajos

Fuente: Reyes Ayala, M. Andrade González, E. A. Tirado Méndez, A. Torres Peña, H., *herramienta Computacional para el diseño de filtros de R de Circuito Impreso Microstrip R filter design software*, Ingeniería Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana, 2019, p.25.

- ✓ ejemplo del proceso de diseño de un filtro pasa banda, en base líneas acopladas microstrip, mediante el programa A S.

En la figura No. 7.39 se muestra el corte transversal de unas líneas de *microstrip* simétricamente acopladas, a emplearse para el diseño del filtro pasa banda, de frecuencia central 2 GHz.⁽²²⁾

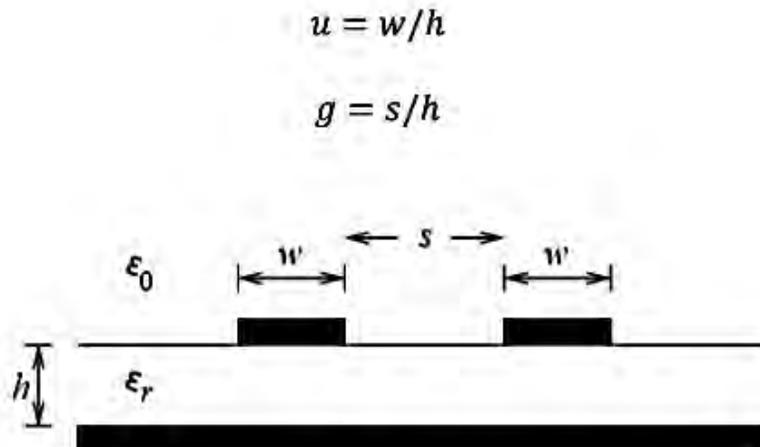


Figura No. 7.39 Vista del corte transversal de líneas de microstrip acopladas

Fuente: Sterr, M., *Micro wave and RF Design: A System Approach*, U.S: SciTech Publishing, Inc. 2014, p.25

En la herramienta LineCalc de ADS se realiza el siguiente proceso: (23), (24), (25)

1. Se identifica la viñeta Type y se elige MCLIN, que corresponde a línea de transmisión acoplada en *microstrip*.
2. Se introduce las características del sustrato a emplear. En la tabla No. 7.3 se relacionan las especificaciones técnicas del sustrato seleccionado para el diseño de este filtro.

Especificaciones Técnicas	Valor
Constante dieléctrica (E_r)	4.2
Permeabilidad relativa (M_{ur})	1.0
Tangente de pérdidas	0.015
Espesor de la lámina (H)	1.60 mm
Altura superior de la armadura (H_u)	3.9e+34 mil
Espesor del cobre (T)	35 μ m

Tabla No. 7.3 Especificaciones técnicas del sustrato

Fuente: Peralta Pillajo, A. L., *Diseño de filtro pasa banda con líneas acopladas en tecnología microstrip*, Universidad de San Francisco de Quito. USF, 2019, p. 22.

3. Se ingresan las impedancias características del modo par e impar previamente definidos, cuyos valores se encuentran en la tabla No. 7.4 y que para este diseño fueron calculados por los autores de la referencia, mediante un programa desarrollado en Matlab.

N	g_n	Admitancia invertida J_n	Impedancia de modo par Z_{0e}	Impedancia del modo impar Z_{0o}
1	3,4817	0,1163	56,4937	44,8598
2	0,7618	0,0289	51,4886	48,5951
3	4,5381	0,0253	51,2993	48,7649
4	0,7618	0,0253	51,2993	48,7649
5	3,4817	0,0289	51,4886	48,5951

6	1	0,1163	56,4937	44,8598
----------	----------	---------------	----------------	----------------

Tabla No. 7.4 Parámetros eléctricos de las líneas acopladas.

Fuente: Peralta Pillajo, A. L., *Diseño de filtro pasa banda con líneas acopladas en tecnología microstrip*, Universidad de San Francisco de Quito. USF, 2019, p. 23.

4. Se introducen las dimensiones físicas de las líneas acopladas, para lo cual también utilizó, el autor de la referencia, la herramienta LineCalc de ADS, cuyos valores se indican en la tabla No. 7.5, y en la figura No. 7.40 se muestra la ventana de trabajo de la herramienta computacional, empleada para este cálculo, para diferentes N (órdenes). Así mismo se coloca la frecuencia central con que se desea que opere el filtro: 2 GHz, para este caso.

N	Z_{oe}	Z_{oo}	W (mm)	S (mm)	L (mm)
1	56,4937	44,8598	3,02238	1,82056	21,08881
2	51,4886	48,5951	3,11935	6,04447	21,0206
3	51,2993	48,7649	3,12113	6,81328	21,0265
4	51,2993	48,7649	3,12113	6,81328	21,0205
5	51,4886	48,5951	3,11935	6,04447	21,0206
6	56,4937	44,8598	3,02238	1,82056	21,08881

Tabla No. 7.5 Parámetros eléctricos de las líneas acopladas microstrip, calculados en Matlab.

Fuente: Peralta Pillajo, A. L., *Diseño de filtro pasa banda con líneas acopladas en tecnología microstrip*, Universidad de San Francisco de Quito. USF, 2019, p. 24.

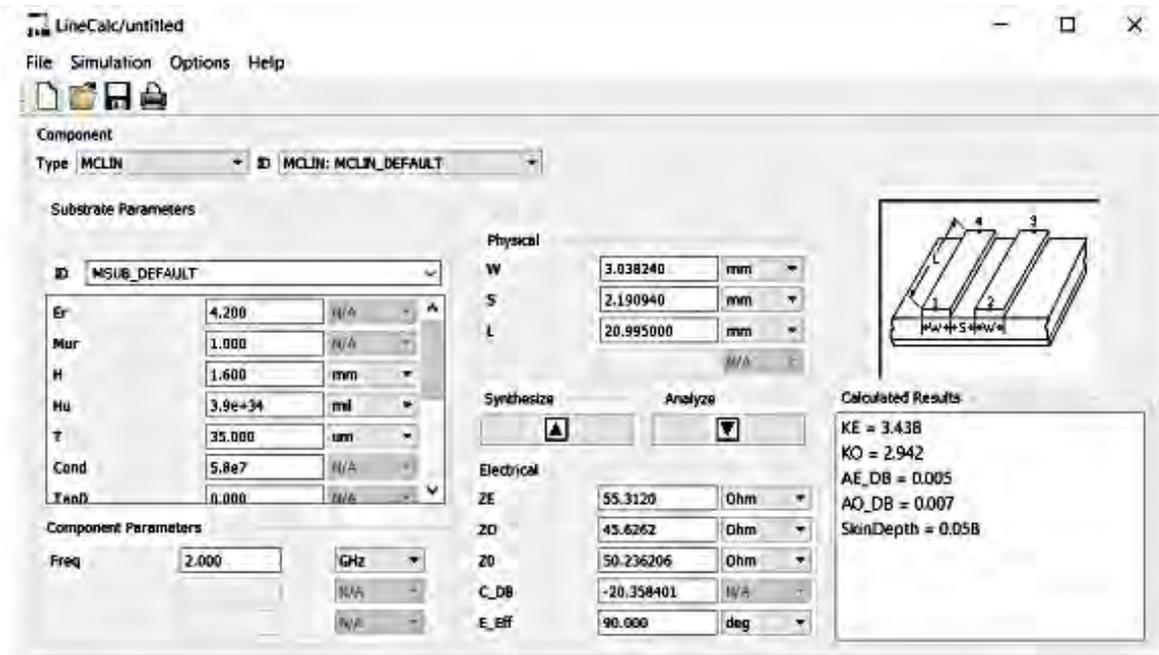


Figura No. 7.40 Herramienta LineCalc para el calculo de las dimensiones físicas de las líneas acopladas en microstrip.

Fuente: Peralta Pillajo, A. L., *Diseno de filtro pasa banda con líneas acopladas en tecnología microstrip*, Universidad de San Francisco de Quito. USF, 2019, p. 24.

En la figura No. 7.41 se muestra la respuesta del filtro pasa banda, con líneas acopladas sin pérdidas, para orden $N = 5$, indicándose la frecuencia central (2 GHz), así como las frecuencias de corte de 1.97 GHz y 2.03 GHz, con un rizado que se encuentra entre 0 dB y -3,057 dB.

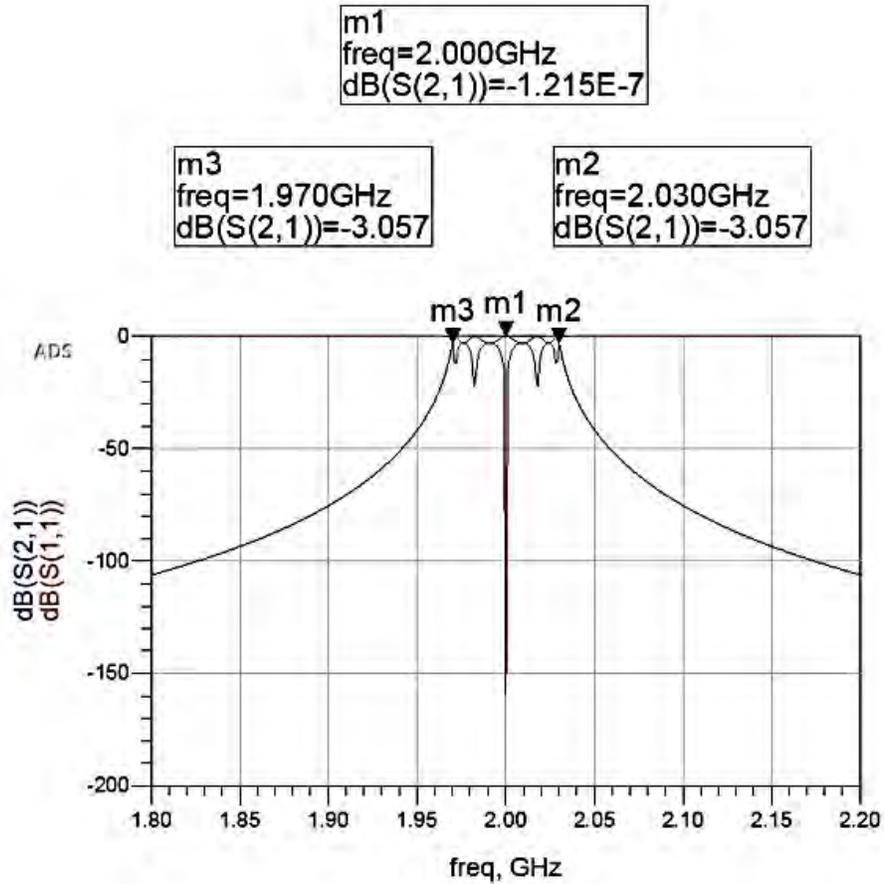


Figura No. 7.41 Respuesta de un filtro pasa banda (N 5) con líneas acopladas *microstrip* sin pérdidas.

Fuente: Peralta Pillajo, A. L., *iseño de filtro pasa banda con líneas acopladas en tecnología microstrip*, Universidad de San Francisco de uito. USF , 2019, p. 36.

En la parte superior de la figura No. 7.42 se muestra la estructura física del filtro pasa banda con líneas acopladas *microstrip* para frecuencia central de 2 GHz y en la parte inferior la medición del filtro mediante un analizador de redes.



a.) Filtro pasa banda con líneas acopladas *microstrip*



b.) Medición del filtro con líneas acopladas *microstrip*

Figura No. 7.42 Filtro pasa banda a 2 GHz con líneas acopladas microstrip y su medición mediante analizador de redes.

Fuente: Peralta Pillajo, A. L., *iseño de filtro pasa banda con líneas acopladas en tecnología microstrip*, Universidad de San Francisco de uito. USF , 2019, pp. 49-50.

Como ilustración complementaria en la figura No. 7.43, se enseña una imagen de un filtro *microstrip* de paso banda para filtrar la señal de 2.3 a 2.5 GHz, con el cual se puede mejorar la relación señal-ruido. Por ejemplo, antes de la amplificación IFI, IGbEE, Bluetooth y otras señales, primero se coloca este filtro para filtrar las señales del clutter y luego se coloca el amplificador de señal de bajo ruido para la amplificación de la señal. De esta forma es posible mejorar en gran medida la fiabilidad de la transmisión de señal, incrementando la distancia del enlace. ⁽²⁶⁾



Figura No. 7.43 Filtro paso banda microstrip en 2.4 GHz.

Fuente: Sattler S. , Gentili, F. Teschl, R. Carceller, C. B. Sch, ., *Merging Technologies and Concepts for Applications- A. Making Additive Manufactured Ceramic Microwave Filters Ready for* ,", 2018, p. 4

PREGUNTAS Y EJERCICIOS

CAPÍTULO 7

Preguntas:

1. Describa la composición de las líneas de cintas conductoras planas paralelas, indicando la razón fundamental de su aplicación.
2. ¿Qué se entiende por impedancia característica de un medio de transmisión? Para el caso de las líneas planas de qué depende el valor de esta característica?
3. Relacione los pasos que se deben seguir en el proceso de determinar el potencial eléctrico existente entre los conductores de las líneas planas paralelas. Describa el porqué de cada uno de estos pasos.
4. Conocido el potencial eléctrico entre las cintas planas conductoras, se puede determinar cómo se distribuyen los campos electromagnéticos dentro de la misma. Indique que tipo de posicionamiento hay entre estos planos y porqué parte de la línea se propagan.
5. Una de las utilidades de mayor frecuencia que tienen las *líneas planas*, es la interconexión entre los transmisores de las radiodifusoras sonoras AM y su torre de radiación, especialmente para el caso de las emisoras de alta potencia. ¿Cuál es la razón?
6. Relacione las principales causas por las cuales se presenta la *reflexión* de potencia en las líneas de transmisión. Explique el porqué de estos efectos.
7. A qué corresponde la relación de onda estacionaria (R), o en inglés S/R (Standing wave Ratio) o $V_{S/R}$ (Voltage Standing wave Ratio),
8. La función específica del *acoplador de antena*, es la de transformar la impedancia de la antena a un valor igual a la de *línea de transmisión* que la alimenta, que es por lo general de 50 ohm. ¿Qué se logra con este acoplamiento?
9. Por lo general, la circuitería de los *acopladores* de los radiadores de las estaciones de radiodifusión sonora AM (caja de sintonía) se basa en combinaciones de inductores (bobinas) y capacitores (condensadores). Indicar los principales tipos de combinación utilizados en estos acopladores y cuál es el criterio que se podría tener en cuenta para la selección de implementación de cada uno de ellos.

10. La impedancia de entrada en la caja de sintonía (acoplador de impedancia de antena), debe corresponder exactamente a la impedancia de la línea de transmisión que se esté utilizando. ¿qué criterios se debe tener en cuenta para el cálculo de esta

11. Relacione los principales componentes de una línea de transmisión *microcinta*, e identifique la función que desempeña cada uno de ellos.

12. ¿Cuál es la principal razón para que las líneas de transmisión *microcintas* no se empleen como medio de transmisión para distancias convencionales, en los enlaces de comunicaciones

13. Las ondas electromagnéticas en las *microcintas* se propagan en forma cuasi-TEM (*Transversales electromagnéticas*). Indique la diferencia fundamental con la propagación que tienen estas ondas en las guías de ondas.

14. Debido a el tamaño reducido que presenta antenas *micorstrip*, su utilización se hace muy práctico en los sistemas de comunicación de a aquellos dispositivos y naves móviles, tales como: misiles, aeronaves, drones, satélites, entre otros. ¿Cuál es la razón

15. Por qué se presenta que a mayor sea la característica conductiva de la cinta del plano de tierra, la ganancia de la antena se puede incrementar a unos 3 dB

16. ¿Cuál es la explicación por lo cual la tecnología *microstrip* es muy empleada para el desarrollo e implementación de filtros para frecuencias de microondas

17. Por qué se puede mejorar la relación señal-ruido cuando se emplean filtros *microstrip*, por ejemplo, en IFI, IGBEE, Bluetooth y otras señales

Ejercicios:

1. Si el tendido total de una línea de cintas conductoras planas paralelas, entre el transmisor y el radiador, es de 80 metros, determinar la separación entre las cintas conductoras para que la impedancia característica de la línea sea de 50 ohmios, teniendo en cuenta que el dieléctrico de la misma es de aire.

2. Determinar las pérdidas dieléctricas de una línea de cintas conductoras planas paralelas, con impedancia característica de 50 ohmios, de una longitud de 60 metros y una separación entre conductores 2.6 metros.

3. Para una línea de transmisión de tipo *cintas planas paralelas*, con separación de 3.4 metros entre las cintas conductoras, con dieléctrico entre ellas de aire, determinar la longitud que debe tener su tendido para lograr que su impedancia característica sea de 50 ohmios.

4. Determinar el potencial eléctrico (voltaje) en el punto medio de una línea de transmisión de cintas planas paralelas, con separación de 3.5 metros entre ellas, si se le aplica un voltaje de 80 voltios entre sus dos cintas conductoras.

5. Definir la intensidad del potencial eléctrico que se debe aplicar a los conductores de una línea de transmisión de cintas planas paralelas, para lograr que en su punto medio se presenta un voltaje de 44 voltios. La separación entre las cintas conductoras es 4.0 metros.

6. Determinar el porcentaje de potencia reflejada en una línea de transmisión de una radioemisora AM, si el ROE existente es de 1.3.

7. Si el porcentaje de potencia reflejada en una línea de transmisión de una radioemisora AM es de 3.2 , determinar el ROE existente en esta línea.

8. Determinar la composición de un acoplador de antena de tipo T, para una *emisora AM*, que opera con una antena (torre radiador) de 92.59 metros de longitud y la línea de transmisión es un cable coaxial de 50 Ohmios y desfase de 90°

9. Calcular los valores de la impedancia de entrada al acoplador de impedancia (caja de sintonía), el coeficiente de reflexión y el del ROE, para el caso de la estación de radiodifusión sonora AM del ejercicio inmediatamente anterior, en la frecuencia portadora.

10. Calcular los valores de la impedancia de entrada al acoplador de impedancia (caja de sintonía), el coeficiente de reflexión y el del ROE, para el caso de la estación de radiodifusión sonora AM, de los dos ejercicios inmediatamente anteriores, en las frecuencias límites de su bandas laterales.

11. Diseñar un acoplador en T, para adaptar una línea coaxial (no balanceada) de 75 a otra de 50 , para un desfase de 45° . La frecuencia de funcionamiento es de 100 MHz. ⁽²⁷⁾

12. Calcular la impedancia característica de una línea de transmisión de tipo *microcintas*, con las características estructurales indicadas en la figura No. 7.12, con una placa dieléctrica de permitividad relativa de 2.2 y con las siguientes dimensionales:

- Grosor del dieléctrico: 0.9 cm

- Ancho de la cinta conductora: 0.7 cm

12. Determinar la frecuencia con la cual debe operar una antena *microstrip* rectangular, si el ancho del parche es de $w = 60 \text{ mm}$ y la permitividad eléctrica relativa del substrato es de $\epsilon_r = 2.5$.

13. Si el ancho del parche de una antena *microstrip* rectangular es de $w = 54 \text{ mm}$, determinar la permitividad relativa del substrato para que la antena opere en 3.0 GHz .

14. Teniendo en cuenta el patrón de radiación de una antena *microstrip* rectangular, representado en forma polar planar, en la figura No. 7.16, determinar su ancho de banda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 7

- (1) Ue, A. Dylan F. Williams, D. F. H. *Characteristic Impedance Measurement of Planar Transmission Lines*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Section 2.22, POB 3345, 38023 Braunschweig, Germany E-mail: ue@ieee.org
- (2) Ubeldia, Miguel A., *Líneas de transmisión y acopladores de antena* LUI P, 2016, pp.5-7
- (3) Balmer Maxell. M., *Reflections, Transmission Lines and Antennas*, World Radio Books, 2014, Chapters 1, 5 and 6.
- (4) Pérez Vega., C. *Sistemas de Telecomunicaciones*, Textos Universitarios. Universidad de Cantabria, 2014, pp. 294-295
- (5) Ramírez, J., *Campos Electromagnéticos. Conceptos básicos y ejercicios resueltos*, Editorial Bonaventuriana, 2014, pp. 459-460.
- (6) FLELLRF *Micro wave transmission line products. Radio frequency Systems, Inc*. Catálogo de líneas de transmisión FLELL
- (7) Solís G. José J. Pérez R. Javier, *Consideraciones de diseño de acopladores de antena tipo T para estaciones de radiodifusión AM*, RIEE, 2012, pp. 3-5.
- (8) Jiang et Sui, J. et al. *A General T-Stub Circuit for Decoupling of Two Dual-Band Antennas*, IEEE, 2014.
- (9) Kennedy, G., *Electronic Communication Systems*, Ed. McGraw Hill Third Edition, pp 76-78.
- (10) Catano-Ochoa, D. Senior, D., López, F. Reyes-Cera, E., *Performance Analysis of a Microstrip Patch Antenna loaded with an Array of Metamaterial Resonators*. IEEE. 2018. DOI: 10.1109/APS.2018.7695849.
- (11) Heiler, H.A., *Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet*, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-3, No.3, marzo 2012, pp. 179 -180.

- (12) Amora, F., “*Diseño de líneas de Transmisión de Microcintas, usando laminados en PCBs*”, Universidad Distrital FJC, Fac. Tecnológica, 2019, pp. 3-4.
- (13) Uñiga-Juárez, J.E. Reynoso-Hernández, J.A. Maya Sánchez, M. Murphy-Arteaga, R. S. *An analytical method to calculate the characteristic impedance of uniform transmission lines*,” *Comput. y Sist.*, vol. 16, no. 3, 2016, pp. 281-284.
- (14) Balanis, C. E. *Antenna Theory: Analysis and Design*”, 4th Edition Wiley., 2014, pp 1135-1136.
- (15) Saunders, S. R., *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*”, Ed. John Wiley & Sons Ltd. 2015, pp. 135-137.
- (16): Giró Uribe, F. Selva Castañeta A. R., *Design and simulation of rectangular microstrip antenna to the frequency of ...*”, Universidad de Oriente, Cuba, 2018, pp. 15-17.
- (17) Aburto, M.L., Anastasi Muschong, M. A. Rivier, S. L. Banchier, M. *Design and implementation of Microstrip Antenna*”, Departamento de Electrónica Facultad Regional Bahía Blanca Universidad Tecnológica Nacional Bahía Blanca, Argentina, 2018, pp.23-24.
- (18) Pozar, D. M., *Micro wave engineering*”. 5th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016, pp. 134-135.
- (19) Adam, R. Nandgaonkar, A. (2020). *Design of a Coupled-Line Microstrip Bandpass Filter at ...*”. Disponible: https://www.irjet.net/archives/V2/I6/IRJET_216177.pdf
- (20) Cuesta, G. P., *Diseño de filtros de Banda de Microondas mediante líneas acopladas*”, Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, 2018, pp.6-7.
- (21) Reyes Ayala, M. Andrade González, E. A. Tirado Méndez, A. Torres Peña, H., *Herramienta Computacional para el diseño de filtros de Banda de Circuito Impreso Microstrip Filter design software*”, Ingeniería Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana, 2019, pp.22-25.
- (22) Sterr, M., *Micro wave and RF Design: A System Approach*”, U.S: SciTech Publishing, Inc. 2014, pp.25-26.

(23) Peralta Pillajo, A. L., *Diseno de filtro pasa banda con líneas acopladas en tecnología microstrip*", Universidad de San Francisco de Quito. USFQ, 2019, pp. 22-25, 35-36 y 49-50.

(24) Sheikh, T. Borah, J. Roy, S.. *Bandwidth improvement in BPF using Microstrips Couple lines*". (2020). Disponible:

https://www.researchgate.net/publication/270154325_Bandwidth_Improvement_in_BPF_using_Microstrip_Couple_lines.

(25) Adam, R. Nandgaonkar, A. (2020). *Design of a Coupled-Line Microstrip Bandpass Filter at 2.4 GHz*". Disponible:

<https://www.irjet.net/archives/V2/i6/IRJET-216177.pdf>.

(26) Sattler S. , Gentili, F. Teschl, R. Carceller, C. Bensch, M., *Merging Technologies and Concepts for Applications- A Manufacturing Additive Manufactured Ceramic Microwave Filters Ready for 5G*", 2018, pp. 3-5

(27) Pérez Vega, C. *Acopladores de impedancia* , Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones Universidad de Cantabria 2016, pp. 49-51.

CAPÍTULO 8.

CONCEPTO, CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES DE LA FIBRA ÓPTICA

8.1 Introducción

Este capítulo está orientado a referenciar los principales aspectos conceptuales, estructurales y funcionales del medio de transmisión guiado denominado *fibra óptica*. Así mismo indicar las principales redes donde es frecuentemente utilizado, y los avances y perspectivas tecnológicas del mismo.

La primera fibra óptica fue fabricada en 1970, con pérdidas de unos 17 dB/m, lo cual limitaba su implantación para los tendidos de las redes de comunicación. Unos años después, debido a las nuevas técnicas de fabricación se obtuvieron mejoras significativas, donde se redujo las pérdidas a unos 0.5 dB/m. En 1977 la empresa *General Telephony and Electronics*, realizó la primera transmisión telefónica a través de fibra óptica, con una velocidad de 6 MHz en Long Beach - California.

A mediados de la década de los años 80 s, AT&T, implemento un enlace de fibra óptica entre Boston y Washington (cerca de 1.000 km), el cual proporcionaba hasta 80.000 canales de voz para conversaciones telefónicas simultáneas. A partir de esta década se incrementó la implementación de los enlaces con fibra óptica para transmisión de señales digitales de voz, datos, televisión, entre otras. Entre estas implementaciones se empezaron los tendidos submarinos, con fibra óptica, alcanzando velocidades de transmisión de hasta de 2.5 Gbps, lo que permitió, inicialmente, transmisiones de por lo menos 30.000 canales telefónicos de 64 kbps.

Debido a las nuevas técnicas de multiplexación tales como DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), es posible transmitir más de una señal a través de una misma *fibra óptica*, empleando diferentes longitudes de onda, abrieron el camino para la transmisión de señales digitales portadoras de voz, datos, televisión, Internet, etc. con velocidades de transmisión de hasta 1.000 Tbit/s. Actualmente se puede considerar que el planeta esta interconectado mediante redes y enlaces de *fibra óptica*. Entre la inmensa cantidad de redes de fibra óptica, esencialmente submarinas, se pueden reseñar las siguientes: ⁽¹⁾

- **SAM-** : se inauguró en el año 2.000 y enlaza actualmente a Estados Unidos, Puerto Rico, Guatemala, Brasil, Argentina, Chile, Perú, Ecuador y

Colombia. Es de propiedad, en estos momentos, de Telefónica y TE Connectivity.

- **S A-M -** (South East Asia-Middle East- est Europe 4): enlaza a Francia, Italia, Argelia, Túnez, Singapur, Malasia, Tailandia, Bangladesh, India, Sri Lanka, Paistán, Emiratos rabes Unidos, Arabia Saudí y Egipto en un tendido de cerca de 20.000 kilómetros.
- **S A-M -** : actualmente es la más larga del mundo con cerca de 40.000 kilómetros de tendido, partiendo desde Alemania y une 39 puntos del globo hasta llegar a Japón y a Australia (ver figura No. 8.1).



Figura No. 8.1 Red de fibra óptica S A-M - .

Fuente: [Bac ground.](#) S A-M - .n.d. Retrieved - .

En el capítulo 5 se relacionan las principales formas de tender los cables ópticos, entre las cuales se encuentra el tendido submarino, así como otros aspectos complementarios y básicos referentes a estos procesos de instalación.

Se viene trabajando en proyectos de implementación que permita que las redes de *fibra óptica* alcance capacidades de transmisión del orden de los cientos de terabits por segundo (Tbps). Así mismo ya se está ofreciendo en el mercado fibras del orden de los petabits por segundo (Pbps). Debido a la gran capacidad que ofrece las redes de *fibra óptica* se les denomina las *autopistas de la información*.

8.2 Concepto y estructura de la fibra óptica

La *fibra óptica* es un medio de transmisión de señales luminosas de múltiples aplicaciones, entre las que se encuentra la de comunicaciones de información.

Se requiere de dos *fibras ópticas* para poder realizar una comunicación bidireccional.

La estructura básica de una *fibra óptica* la conforma un hilo de material dieléctrico: de vidrio o plástico, de grosor comparable con el de un cabello humano (aproximadamente 0.1mm de diámetro), al que se le denomina *núcleo*, y el cual está recubierto por otra capa de material también dieléctrico (esencialmente de plástico) denominada *revestimiento*. Con el propósito de protección, las *fibras ópticas* simples están reguardadas de una cubierta y fibras de protección, y externamente por una capa de plástico. En la figura No. 8.2 se muestra el núcleo de una *fibra óptica*, dos cables con varias fibras y su estructura básica.

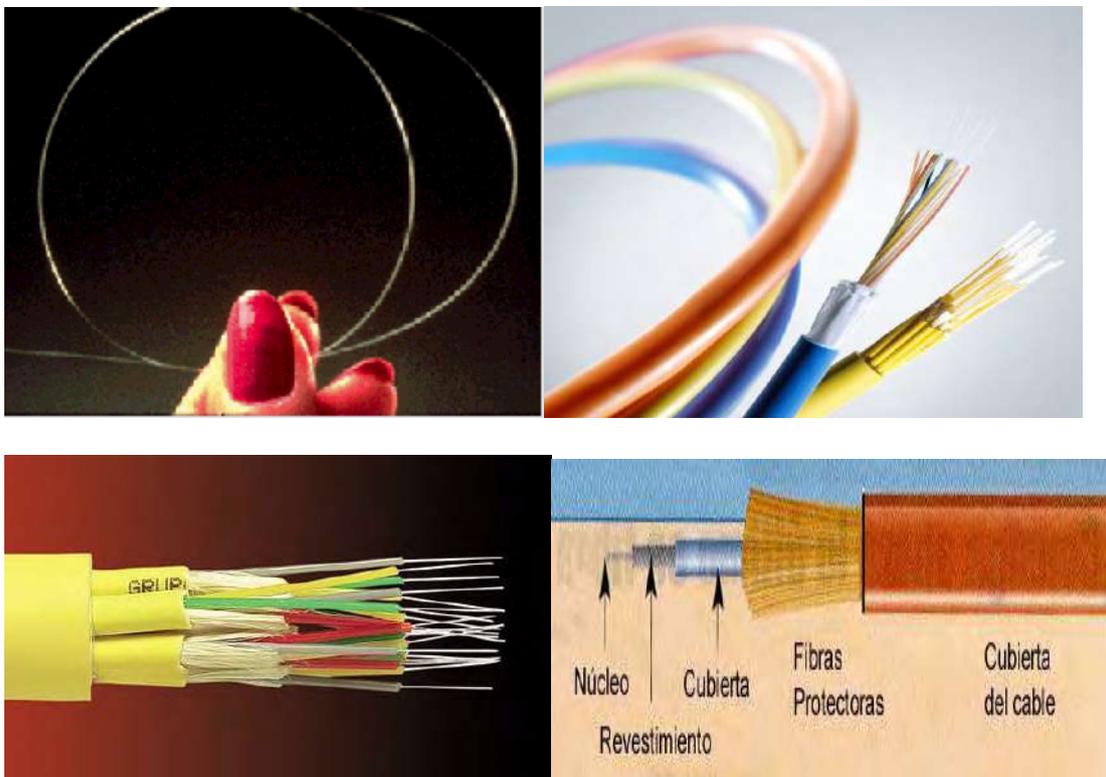


Figura No. 8.2 Núcleo, cables ópticos y estructura básica de una *fibra óptica* simple.

Fuente: Cable de Fibra óptica - introducción. (2019). Disponible:
<http://modul.galeon.com/aficiones1366320.html>. <https://www.leoni-industrial-solutions.com/es/productos-y-servicios/cables-de-fibra-optica>.

Las fibras con núcleo de vidrio son casi siempre hechas de sílice, pero algunos otros materiales son también utilizados, tales como: fluorocirconato, fluoroaluminado, vidrios calcogenuros o materiales cristalinos como el zafiro. La atenuación típica de estas fibras es de unos 0.25 dB/m para longitudes de onda de 1.550 nm y de unos 0.35 dB/m para longitudes de onda de 1.310 nm. ⁽²⁾

Las *fibras ópticas* con núcleo de vidrio GOF (*lass ptical iber*) o también denominados fibras de vidrio con recubrimiento de plástico (polímero) PCF (*olymer Cladded iber*) son más costosas y requieren de mayor cuidado en su implantación y manejo, para evitar rupturas en ellas. El ancho de banda de las fibras ópticas es bastante grande, mayor de los 500 MHz, alcanzando algunas de ellas el orden de los GHz. Así mismo las velocidades de transmisión de datos que permiten las *fibras ópticas*, comerciales, es del orden de los cientos de Gbps, y en casos especiales hasta algunos Tbps. Actualmente están saliendo al mercado *fibras ópticas*de núcleo de vidrio que alcanzan velocidades del orden de los petabits por segundo (Pbps).

Las fibras con núcleo de plástico, las cuales se conocen como fibras ópticas de plástico POF (*lastic ptical iber*), presenta una atenuación muy alta (55 dB m o más grandes), mucho mayor que las de vidrio, lo que limita su utilización en aplicaciones de cortas distancias, tales como: para la electrónica automovilística y aeronáutica, conexiones internas en hogares, control industrial, en la iluminación (tableros luminosos), en la medicina, en las trasmisiones de audio, entre otras. La ventaja principal de estas fibras, además de su reducido costo, es su fácil manejo, lo que facilita su instalación en paredes y lugares estrechos.

Las fibras ópticas de plástico POF son fibras de tipo multimodo, generalmente de índice escalonado, con diámetros de núcleo de unos 0.5 milímetros o mayor. Las fibras POF no ofrecen velocidades altas, como es el caso de las fibras de vidrio GOF, llegando a velocidades de solo hasta 2.5 Gbps. ⁽³⁾

Muchas son las ventajas que ofrecen las *fibras ópticas*en general, entre las que se cuenta ladeseuridad (confidencialidad), esencialmente para el caso de comunicaciones, ya que no se pueden pinchar para extraerle información de forma indebida, debido a que los datos que transportan no son señales eléctricas, como es el caso de los cables conductores, sino pulsos de luz (no eléctricos). Como se mencionó anteriormente hay que anotar que la *fibra óptica* sólo transmite en un sólo sentido, por lo tanto, un cable de fibra consta de dos hilos, por uno se transmite y por el otro se recibe. Sin embargo, a través de una misma fibra óptica se pueden transmitir simultáneamente, en una misma dirección, varias señales con distintas frecuencias (longitudes de onda).

8.3 Principios de funcionamiento

Los principales principios en los cuales se fundamentó el diseño de la *fibra óptica* y su posterior construcción y funcionamiento fueron: el *principio de Huygens*, la *ley de la reflexión*, el *fenómeno de la refracción*, la *ley de Snelly la reflexión total*de las ondas.

8.3.1 Principio de Huygens

El físico danés Huygens propuso, en los años 1660, un modelo simple para trazar la propagación de ondas, mediante el principio que lleva su nombre, cuyo enunciado establece que: *Todos los puntos en un frente de onda se pueden considerar como fuentes puntuales que generan ondas secundarias, que avanzan con una frecuencia y velocidad igual a la de las ondas primarias*”.

En la figura No. 8.3 se ilustran unas imágenes que pueden ayudar a comprender claramente el significado del modelo planteado por Huygens. La imagen de la izquierda corresponde al principio de Huygens para el caso de una onda plana y la segunda para el caso de una onda esférica.

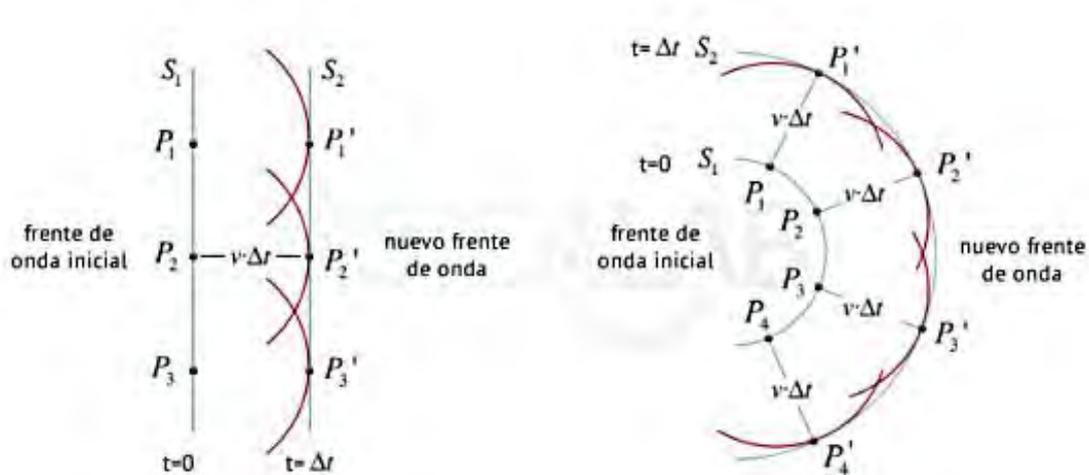


Figura No. 8.3 Imágenes ilustrativas del principio de Huygens para onda plana y onda esférica:

Fuente: Principio de Huygens. (2019). Disponible: <https://www.fisicalab.com/apartado-principio-huygens-contenidos>.

En las imágenes anteriores se tiene que el frente de la onda inicial, tanto plana como esférica, está conformado por el plano S , donde cualquiera de los puntos de este plano: P_1 , P_2 y P_3 , corresponden a sendos focos emisores de ondas secundarias que se propagan a la misma velocidad y en la misma dirección de la onda inicial.

Considerando que la velocidad de propagación es v y Δt es el tiempo de propagación de la onda entre uno de sus frentes y el siguiente, se tiene que el radio de las ondas secundarias es de $v \cdot \Delta t$ y el nuevo frente de ondas S_2 , corresponderá a la superficie tangente a todas estas ondas secundarias.

En este nuevo frente S_2 , los puntos P_1, P_2, P_3 y P_4 estarán en fase y se constituirán a su vez en focos de la nueva serie de ondas secundarias para conformar el siguiente frente de ondas. Debido a que se conserva la misma velocidad de propagación (considerando medios homogéneos e isotrópicos), se puede deducir que un frente de ondas plano causará frentes de ondas planos y

un frente de ondas esférico originará frentes de ondas esféricos, y por lo tanto el radio de las ondas secundarias que conforman cada nuevo frente, serán iguales entre sí. De lo anterior se puede deducir que el nuevo frente de ondas, en un instante dado, es la envolvente de todas las ondas secundarias.

8.3.2 Ley de la reflexión

Esta ley establece que: *Si se tiene que una onda incide sobre una superficie plana reflectora con un ángulo de incidencia θ_i , formado por el rayo incidente y la normal a la superficie reflectante, este ángulo es igual al ángulo de reflexión θ_r , formado por el rayo reflejado y la normal*.

Esta ley se fundamenta en la aplicación del principio de Huygens, considerando que si las ondas secundarias producidas en el frente de ondas chocan contra una superficie reflectante, se invierte el sentido de la propagación de la envolvente de las ondas secundarias reflejadas, dando lugar a la parte del frente de ondas reflejado, cuyo ángulo de reflexión θ_r , es igual al ángulo de incidencia θ_i del frente de ondas incidente (ver figura No. 8.4).

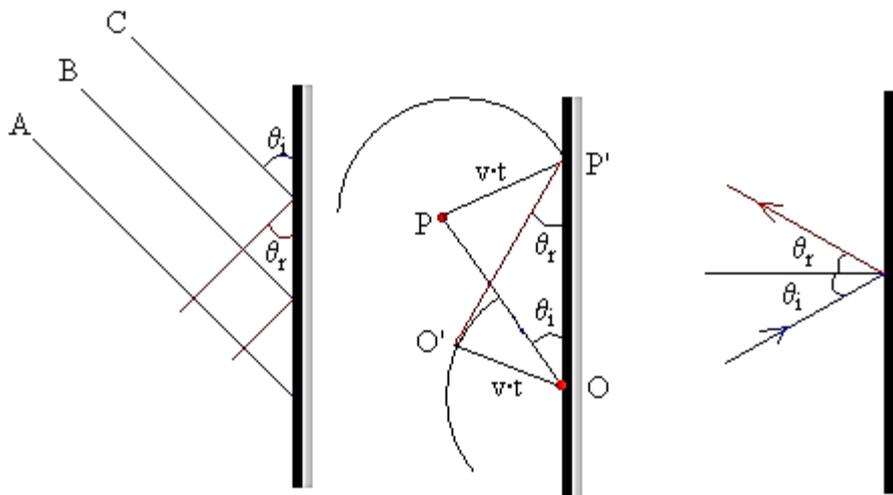


Figura No. 8.4 imágenes ilustrativas de la ley de reflexión.

Fuente: Bauer, F., Estfall, G., "University Physics: Modern Physics", McGraw Hill, 2016.

La explicación de la *ley de reflexión* podría expresarse de la siguiente manera: *Tomando como foco emisor de una onda secundaria incidente el punto P , desde la porción AB del frente de ondas incidente, se le tra a una recta perpendicular PO' , de tal forma que $PO' = v \cdot \Delta t$. Tomando como centro el punto P , se tra a una circunferencia de radio $v \cdot \Delta t$. A ora se tra a la recta $P'O'$, que sea tangente*

a la anterior circunferencia, donde esta recta se constituye en parte del frente de ondas reflejado. e la igualdad de los triángulos ' y se puede apreciar que el ángulo de incidencia θ_i es igual al ángulo de reflexión θ_r (4)

8.3.3 Índice de refracción

La refracción de una onda es aquel fenómeno consistente en la modificación de la dirección de propagación que sufre la onda cuando ésta pasa de un medio a otro de características diferentes. El índice de refracción de un medio está definido como: *el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula.* (ver ecuación 8.1) (5)

$$(8.1) \quad n = \frac{c}{v_p}$$

n : índice de refracción del medio

c : velocidad de la luz en el vacío

v_p : velocidad de la luz en el medio

El índice de refracción de un medio es una medida para saber cuánto se reduce la velocidad de la luz o de otras ondas, dentro del medio, con respecto a la velocidad de la luz. En la figura No. 8.5 se ilustra el fenómeno de la refracción.

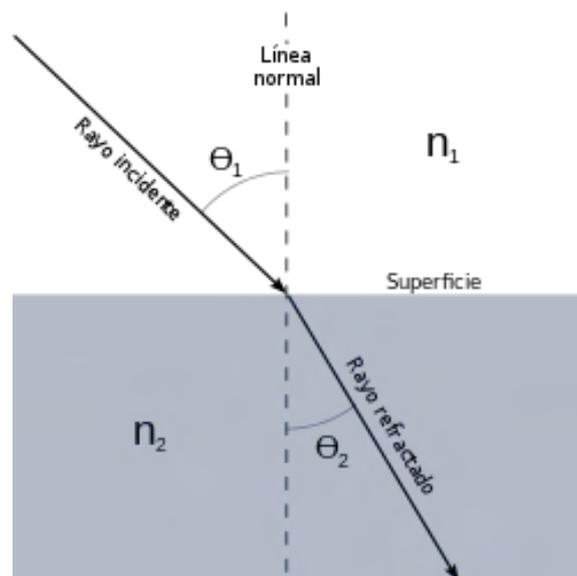


Figura No. 8.5 Ilustración del fenómeno de la refracción.

Fuente: Raymond Ser ay Je ett J. *ysics for scientists and engineers*, (6th ed.). Belmont CA: Thomson-Broo s Cole, 2016.

El índice de refracción de los medios depende esencialmente de dos de las características eléctricas de los mismos: permitividad relativa ϵ_r (F/m) y permeabilidad relativa μ_r (H/m). (ver ecuación 8.2).

$$\langle 8.2 \rangle n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

En términos generales la permeabilidad relativa de los medios dieléctricos es aproximadamente a la unidad. Para estos casos el índice de refracción queda solo en función de la permitividad relativa de los medios, la cual corresponde a la constante dieléctrica de los mismos: k_e (ver ecuación 8.3).

$$\langle 8.3 \rangle n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{k_e}$$

En la tabla No. 8.1 se relacionan el índice de refracción de algunos materiales.

Material	Índice de refracción
vacío	1.0
Aire ()	1,0002926
Agua	1,3330
Acetaldehído	1.35
Solución de azúcar (30)	1.38
1-butanol (a 20°C)	1,399
Glicerina	1,473
Heptanol (a 25°C)	1,423
Solución de azúcar (80)	1,52
Benceno (a 20°C)	1,501
Metanol (a 20°C)	1,329
Cuarzo	1,544
vidrio (corriente)	1,52
Disulfuro de carbono	1,6295
Cloruro de sodio	1,544
Diamante	2.42

() en condiciones normales de presión y temperatura

(1 bar y 20°C)

Tabla No. 8.1 Índice de refracción de algunos materiales.

Fuente: valores de índices de refracción. (2019). Disponible:
<https://blender3drecursos.wordpress.com/2018/07/12/valores-de-indices-de-refraccion-ior/>.

8.3.4 Fenómeno de la refracción

Como se mencionó, se entiende por la refracción de una onda como la *flexión* que sufre cuando entra a un medio con velocidad de propagación diferente. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (como el caso de la luz) es inversamente proporcional al índice de refracción del medio donde se está propagando (ver ecuación 8.4).

$$\langle 8.4 \rangle v_p = \frac{c}{n} \text{ (m/s)}$$

c : velocidad de la luz n : índice de refracción

La refracción de las ondas, cuando pasa de un medio de propagación rápido (índice de refracción menor) a otro más lento (índice de refracción mayor), dobla el rayo de las ondas en dirección a la normal a la superficie de contacto entre ambos medios. La cantidad de la *flexión* depende de los índices de refracción de los dos medios.

En las imágenes de la figura se muestra, en forma simplificada, como se desarrolla el fenómeno de la refracción. A continuación, se describe en forma puntual, el desarrollo de este fenómeno:⁽⁶⁾

- En la primera imagen, según el principio de Huygens, se tiene un frente de ondas que incide en la superficie de separación de dos medios con distinta velocidad de propagación: donde v_1 es la velocidad de propagación de las ondas en el primer medio y v_2 en el segundo medio. Cuando el frente de ondas incidente hace contacto con el segundo medio, este frente de ondas se refracta en la superficie de separación de estos dos medios, produciéndose ondas que se propagan tanto en el primer medio con velocidad v_1 como en el segundo medio con velocidad v_2 . La envolvente de las circunferencias trazadas conforman el frente de ondas después de un tiempo t , presentándose una línea

quebrada por parte del frente de ondas que se propagan en el primer medio y el frente de ondas refractado que se propaga en el segundo medio.

En la figura No. 8.6 se ilustran unas imágenes representativas del fenómeno de la refracción.

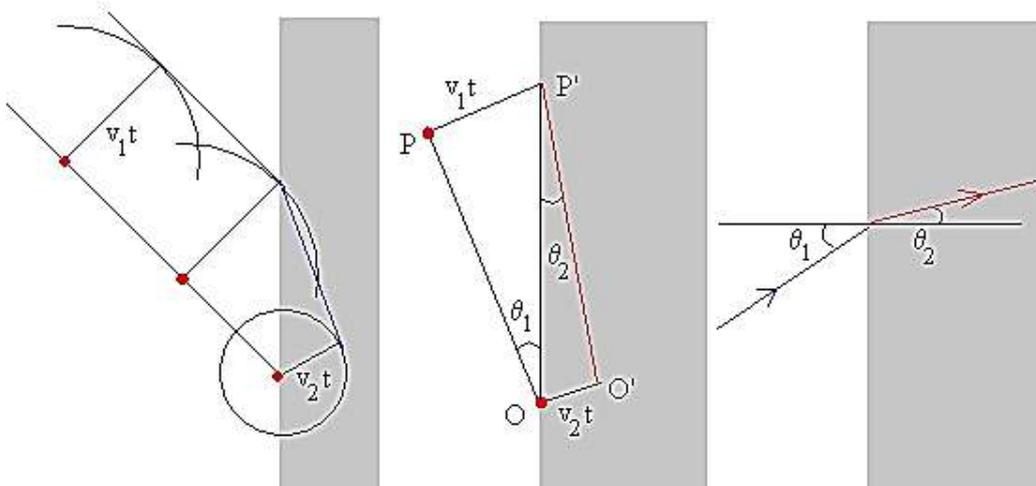


Figura No. 8.6 Imágenes representativas del fenómeno de la refracción.

Fuente: Fenómeno de refracción. (2019). Disponible: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/fermat.html>.

- En la imagen central de la figura, se indica tanto el ángulo θ_1 que se forma entre el frente de ondas incidentes con la superficie de separación entre los dos medios y el ángulo θ_2 correspondiente al que se forma entre el frente de ondas refractado con dicha superficie.
- En la última imagen, haciendo coincidir en un mismo punto, tanto el frente de ondas incidente con el frente de ondas refractado, se puede apreciar la relación entre estos dos ángulos (θ_1 : de incidencia y θ_2 : de refracción)

8.3.5 Ley de Snell

Teniendo como referencia los dos triángulos indicados en la imagen central de la anterior figura se puede determinar las siguientes relaciones:⁽⁷⁾

1. Triángulo OPP'

$$\langle 8.5 \rangle \operatorname{sen} \theta_1 = \frac{v_1 \cdot t}{|OP'|} \Rightarrow \frac{|OP'|}{t} = \frac{v_1}{\operatorname{sen} \theta_1}$$

2. Triángulo $OO'P'$

$$\langle 8.6 \rangle \operatorname{sen} \theta_2 = \frac{v_2 \cdot t}{|OP'|} \Rightarrow \frac{|OP'|}{t} = \frac{v_2}{\operatorname{sen} \theta_2}$$

De las dos expresiones dadas por las ecuaciones inmediatamente anterior, se tiene que:

$$\langle 8.7 \rangle \frac{v_1}{\operatorname{sen} \theta_1} = \frac{v_2}{\operatorname{sen} \theta_2}$$

Ahora, teniendo en cuenta las siguientes equivalencias:

$$\langle 8.8 \rangle v_1 = \frac{c}{n_1} \quad \wedge \quad v_2 = \frac{c}{n_2}$$

Remplazando en $\langle 4.7 \rangle$ se obtiene la ley de Snell:

$$\langle 8.9 \rangle \frac{n_2}{\operatorname{sen} \theta_1} = \frac{n_1}{\operatorname{sen} \theta_2} \Rightarrow n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

8.3.6 La reflexión total

Se puede apreciar en lo indicado en la imagen central de la figura No. 7.6 que:⁽⁸⁾

1. Si $\theta_1 > \theta_2$, entonces el rayo refractado se acerca a la normal.
2. Si $\theta_1 < \theta_2$, entonces el rayo refractado se aleja de la normal.

Desde la ecuación 7.9, se tiene que:

$$\langle 8.10 \rangle \operatorname{sen} \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \operatorname{sen} \theta_2$$

Sí $\theta_2 = \pi/2$, entonces el rayo refractado emerge tangente a la superficie de separación entre los dos medios, o sea perpendicular a la normal. Para este caso al ángulo de incidencia se le denomina ángulo crítico (o límite): $\theta_1 \equiv \theta_c$. Lo que da como resultado:

$$\langle 8.11 \rangle \text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

Ahora sí el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo crítico $\theta_1 > \theta_c$, el seno del ángulo de refracción resulta mayor que la unidad, por lo tanto se tiene la siguiente expresión:

$$\langle 8.12 \rangle \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_c} > 1 \Rightarrow \frac{(n_2/n_1)\text{sen}\theta_2}{(n_2/n_1)} = \text{sen}\theta_2 > 1$$

Lo anterior significa que las ondas que inciden, con un ángulo de incidencia mayor que el crítico, no pasan al segundo medio, sino que son reflejados totalmente en la superficie de separación. Lo que indica que para que exista reflexión total debe cumplirse que:

$$\langle 8.13 \rangle \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2} > 1$$

En la figura No. 8.7 se ilustra gráficamente el fenómeno de reflexión total de una onda incidente sobre la superficie de separación entre los dos medios.

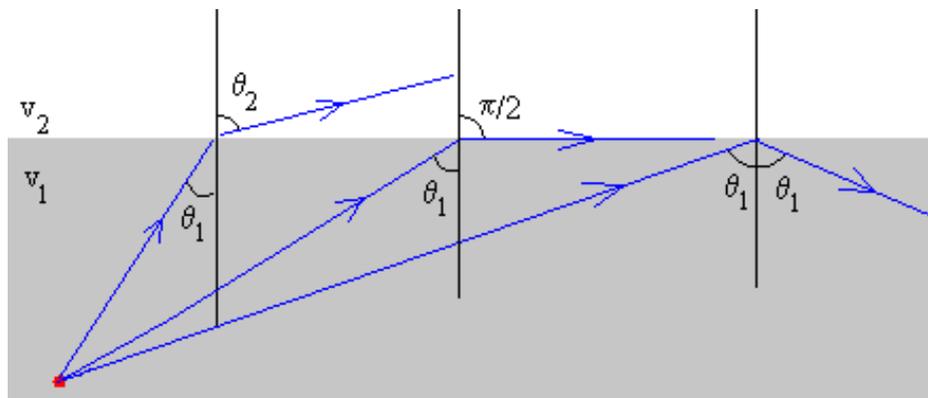


Figura No. 8.7 Reflexión total de una onda incidente sobre la superficie de separación entre los dos medios.

Fuente: Seo, . Naoya, N. Masato, S. Renichi, . Hiro azu, S., " *valuation of ig -po er ndurance in ptical iber in s*". Furu a aRevie s. 2016, p.24.

Como se puede observar de la figura inmediatamente anterior, a medida que se incrementa el ángulo de incidencia θ_1 , el ángulo de refracción θ_2 también se incrementa hasta llegar a $\pi/2$. Al incrementarse más el ángulo de incidencia, entonces la onda incidente se refleja hacia el medio donde proviene.

8.4 Parámetros de funcionamiento de la fibra óptica

De manera muy puntual a continuación se relacionan los principales parámetros de operación y funcionamiento de la *fibra óptica*.

8.4.1 Apertura numérica (NA)

La apertura numérica (NA: *umericalApertura* de una fibra óptica corresponde al seno del ángulo máximo que un rayo de luz que incide a la entrada de la fibra puede tener con el eje de la misma y aún puede propagarse por reflexión interna. Mediante un desarrollo de equivalencias trigonométricas, se puede demostrar que la apertura numérica corresponde a lo expresado en la ecuación 8.14, suponiendo que el rayo de luz entra a la fibra óptica desde el espacio libre. ⁽⁹⁾

$$\langle 8.14 \rangle NA = \text{sen}\theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

8.4.2 Ángulo de aceptación total

El ángulo de aceptación total de una fibra óptica corresponde a dos veces al determinado por el de la apertura numérica. Este ángulo conforma el *cono de aceptación*, el cual concierne a aquel donde cualquier onda de luz que entra a él se reflejará internamente y se propagará dentro de la fibra.

8.4.3 Propagación de la luz dentro de fibra

- Cualquier rayo de luz que incide en el núcleo de la fibra óptica, dentro del cono de aceptación, después de sufrir una refracción, se propaga a través de dicho núcleo.
- El rayo de luz llega a la superficie entre el núcleo y el revestimiento. Si el índice de refracción del núcleo n_1 es mayor que el de revestimiento n_2 , entonces el rayo de luz se refleja totalmente dentro del núcleo, continuándose su propagación.
- El rayo de luz llega al otro extremo de la superficie entre el núcleo y el revestimiento, reflejándose nuevamente por la misma razón indicada

anteriormente. De esta forma el rayo de luz continua su propagación dentro el núcleo de la fibra, en forma de zic zac.

En la figura 8.8 se muestra la forma de propagación de un rayo de luz dentro el núcleo de una fibra óptica.

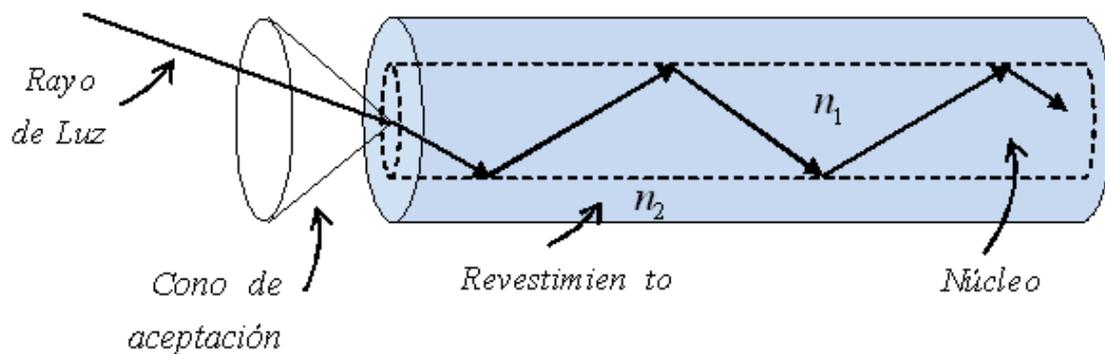


Figura No. 8.8 Propagación de un rayo de luz dentro el núcleo de una fibra óptica.

Se podría resumir que el funcionamiento de la fibra óptica se basa en transmitir por su núcleo un rayo de luz, de tal forma que no atraviese su capa de revestimiento, sino que se refleje y continúe su propagación. Lo anterior se logra sí el índice del núcleo es mayor que el del revestimiento, y también sí el ángulo de incidencia del rayo, a la entrada de la fibra, es superior al ángulo crítico.

Ejemplo No. 8.1

Una fibra óptica está conformada por un núcleo con un índice de refracción de 1.5 y con una capa de revestimiento de 1.3, determinar:

- El ángulo crítico.
- El ángulo de refracción si el ángulo de incidencia del rayo de luz es de 50° .
- La apertura numérica (NA).
- El ángulo de aceptación total.
- El ancho total del cono de aceptación.

f.) El ancho del cono de aceptación.

Solución:

a.) ángulo crítico: aplicando la ecuación 4.11.

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.3}{1.5} \approx 0.87 \Rightarrow \theta_c = \text{arsen}(0.87) = 60.46^\circ$$

b.) ángulo de refracción para ángulo de incidencia de 50° : aplicando ecuación 7.10.

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \text{sen}\theta_2 \Rightarrow \text{sen}\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen}\theta_1$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{1.5}{1.3} \text{sen}50^\circ \approx 0.88 \Rightarrow \theta_2 = \text{arsen}(0.88) = 61.64^\circ$$

c.) Apertura numérica: aplicando ecuación 4.14

$$NA = \text{sen}\theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1.5^2 - 1.3^2} \approx 0.748$$

d.) ángulo de aceptación total ($2\theta_{\max}$).

$$\theta_{\max} = \text{arsen}(0.748) = 48.42^\circ \Rightarrow 2\theta_{\max} = 96.84^\circ$$

e) Ancho total del cono de aceptación: corresponde al ángulo de aceptación total.

$$2\theta_{\max} = 96.84^\circ.$$

Ejemplo No 8.2

Para un fibra óptica cuyo núcleo tiene un índice de refracción de 1.48 y su revestimiento de 1.39, determinar.

a.) Las constantes dieléctricas del núcleo y el revestimiento.

b.) La velocidad de la luz en el núcleo y el revestimiento.

- c.) El ángulo crítico
- d.) La apertura numérica
- e.) El ángulo máximo
- f.) El ancho del cono de aceptación.

Solución:

- a.) Constantes dieléctricas: aplicando ecuación 4.3.

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{k_e} \Rightarrow k_e = n^2$$

- Constante dieléctrica del núcleo:

$$k_{e1} = n_1^2 = (1.48)^2 \approx 2.19$$

- Constante dieléctrica del revestimiento:

$$k_{e2} = n_2^2 = (1.39)^2 \approx 1.93$$

- b.) velocidad de la luz: aplicando ecuación 4.4.

$$v_p = \frac{c}{n} \text{ (m/s)}$$

- velocidad de la luz en el núcleo:

$$v_1 = \frac{c}{n_1} = \frac{3 \times 10^8}{1.48} \approx 2.03 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

- velocidad de la luz en el revestimiento:

$$v_2 = \frac{c}{n_2} = \frac{3 \times 10^8}{1.39} \approx 2.16 \times 10^8 \text{ (m/s)}$$

Es bueno aclarar que esta velocidad correspondería si la luz se refractara en el revestimiento, pero para este caso se refleja, por lo tanto la velocidad es cero.

c.) ángulo crítico: aplicando ecuación 4.11.

$$\text{sen}\theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{1.39}{1.48} = \frac{2.03 \times 10^8}{2.16 \times 10^8} \approx 0.9392$$

$$\theta_c = \text{arcsen}(0.9392) \approx 69.92^\circ$$

d.) Apertura numérica: aplicando ecuación 4.14.

$$NA = \text{sen}\theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(1.48)^2 - (1.39)^2} \approx 0.5082$$

e.) ángulo máximo: aplicando ecuación 4.14

$$\text{sen}\theta_{\max} \approx 0.5082 \quad \Rightarrow \quad \theta_{\max} = \text{arcsen}(0.5082) \approx 30.54^\circ$$

f.) Ancho del cono de aceptación.

$$2\theta_{\max} = 61.08^\circ$$

8.5. Ventanas de operación

Las ventanas de operación de las fibras ópticas corresponden a aquellos longitudes de onda, donde la atenuación total que se presentan en las mismas tienen un valor mínimo. La atenuación de la señal óptica atañe a la disminución de la energía luminosa en su propagación a lo largo de la fibra. Las causas esenciales de atenuación, inherentes a la fibra, son: *la dispersión* que se produce al rayo de luz, debido fundamentalmente a la falta de homogeneidad del material del núcleo, dispersando parte de la energía luminosa hacia la capa de revestimiento, y *la absorción* que corresponde a la energía que es absorbida por la fibra y la transforma en calor. ⁽¹⁰⁾

El rango de las longitudes de onda en el cual operan las fibras ópticas está comprendido entre: 750 nm y 1650 nm. En términos generales se opera en las ventanas que se relacionan a continuación, cuya definición de uso depende de cómo se puede lograr la mejor transmisión por dicha fibra.

- Primera ventana (850 nm).
- Segunda ventana (1.310 nm).
- Tercera ventana (1.559 nm).

En la figura 8.9 se representan las curvas de atenuación y de absorción, de la fibra óptica de vidrio, dependiendo de la longitud de onda a ser empleada en la señal luminosa, a ser transmitida a través dicha fibra.

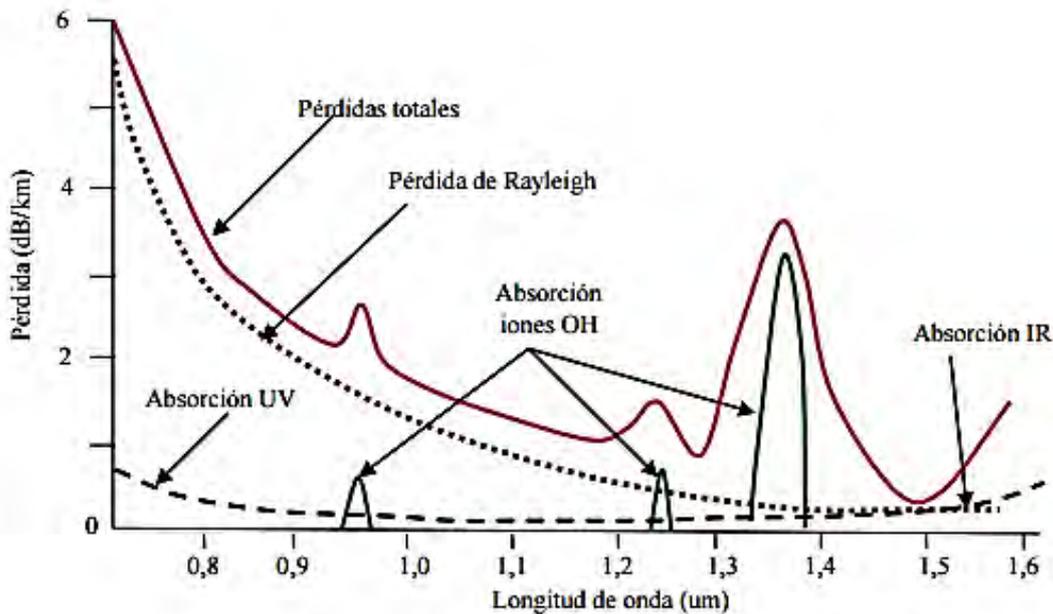


Figura 8.9 Atenuación y absorción en la fibra óptica dependiendo de la longitud de onda de la señal luminosa.

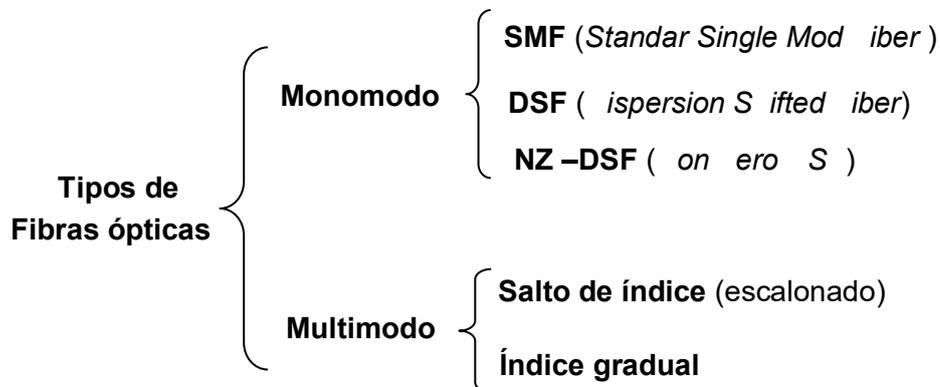
Fuente: Córdoba, M. / Castellarin, E., "Procesos de fabricación de fibras ópticas", Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática, Ingeniería Industrial, Universidad de Belgrano, Departamento de Investigación marzo 2016, p. 10.

Un vez definido el tipo de fibra óptica a ser empleada para una determinada longitud de onda, si se varia esta longitud, cambia también la cantidad de modos de propagación. A cada modo le corresponde una determinada longitud de onda, más allá del cual ese modo no se puede propagar. El único modo que siempre va existir es el denominado *modo fundamental* el cual se presenta en todas las longitudes de onda. Así mismo, una vez definida la longitud de onda de la señal luminosa a ser transmitida, si se varia el grosor del núcleo de la fibra, se varia la cantidad de modos de propagación, de tal forma que si el grosor disminuye el número de modos que se propagan también se disminuye. Unas de las longitudes de onda más empleadas son 1.310 nm y 1.550 nm.

8.6 Tipos de fibra óptica

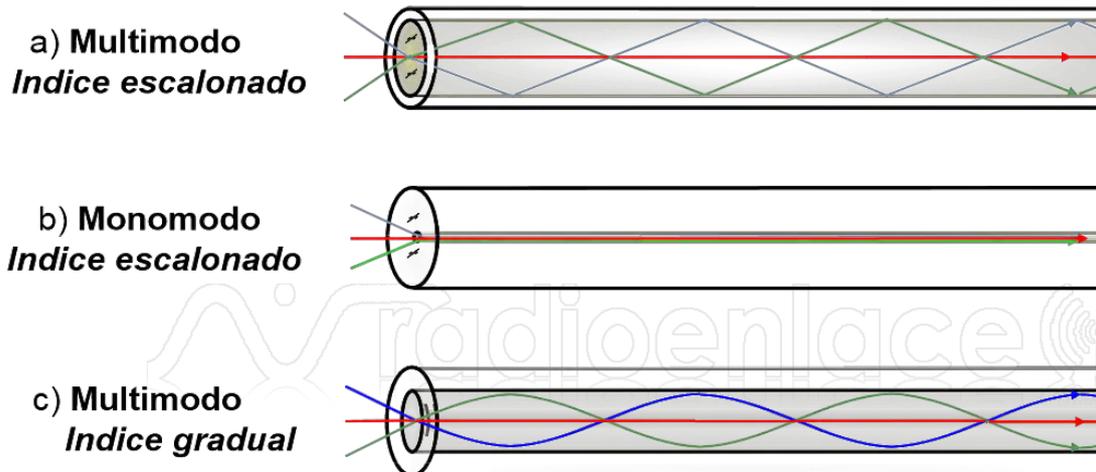
Dependiendo del criterio de clasificación que se tome como referencia, las fibras ópticas se pueden tipificar de diferentes formas. A continuación, se establece una clasificación dependiendo de la forma como se propaga la luz en dichas

fibras, así como según la dispersión que presentan y según el tipo de índice de refracción. ⁽¹¹⁾



8.6.1 Según forma de propagación

- fibra monomodo*: corresponde a aquellas donde el rayo de luz sólo se propaga en un modo, debido esencialmente a que el grosor del núcleo es muy pequeño (menor de 9 micrometros), haciendo que las señales que se propagan por estas fibras alcance mayores distancias y tasas de transmisión más altas, que para el caso de la fibra óptica multimodo. Lo anterior se debe a que este tipo de propagación evita la dispersión modal o de polarización (esta dispersión ocurre cuando las dos componentes ortogonales de polarización, denominados modos de polarización rápido y lento recorren la fibra a diferentes velocidades de grupo y así alcanzarán al receptor en tiempos diferentes).
- fibra multimodo*: corresponden a aquellas donde el rayo de luz se propaga en varios modos de manera simultánea, debido esencialmente a que el grosor del núcleo no es tan pequeño (50 micrometros o mayor), presentandose dispersión modal. El grosor de la capa de revestimiento es del orden de los 125 micrometros. En la figura No. 8.10 se ilustra la propagación en diferentes tipos de fibra óptica.



FiguraNo. 8.10 Modos de propagación en la fibra óptica.

Fuente: Tipos de modos de transmisión Fibra óptica. (2019). Disponible: <http://radioenlace.com/tipos-de-nucleo-fibra-optica-monomodo-sm-9125>.

8.6.2 Según la dispersión

En las fibras monomodo se presentan tres principales tipos de fibras, dependiendo de la dispersión que se produzca, de la luz, en la fibra. Esta dispersión se debe esencialmente por la forma de su fabricación y el tipo de material con que está conformado el núcleo. ⁽¹²⁾

- *Fibra monomodo estándar:* conocida como SMF (*Standard Single Mode fiber*), presenta dispersión cromática la cual se expresa en ps/(nm·m), representando el retraso o incremento de tiempo (en ps), para una fuente con una anchura espectral de 1 nm que viaja en 1 kilómetro de la fibra. Estas fibras presentan un valor típico de esta dispersión de unos 16 ps/(nm·m) y una atenuación de 0.2 dB/m, en la tercera ventana. En la segunda ventana la dispersión prácticamente desaparece, pero la atenuación se incrementa, casi el doble, respecto a la que se presenta en la tercera ventana.
- *Fibra con dispersión desplazada:* conocida como DSF (*Dispersion Shifted fiber*), logra anular la dispersión cromática en la tercera ventana, pero aumenta un poco la atenuación (a unos 0.25 dB/m). Esta fibra no es recomendada para sistemas de multiplexación por división de longitud de onda DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), ya que presenta efectos no lineales.
- *Fibra no cero dispersiones desplazadas:* conocida como NZ-DSF (*Non-zero Dispersion Shifted fiber*), presenta una dispersión cromática casi nula, pero no cero, lográndose así contrarrestar los efectos no lineales.

En la figura No.8.11 se muestran las curvas que indican la intensidad de dispersión cromática que originan los tres tipos de fibras ópticas monomodo relacionadas anteriormente, para diferentes longitudes de onda.

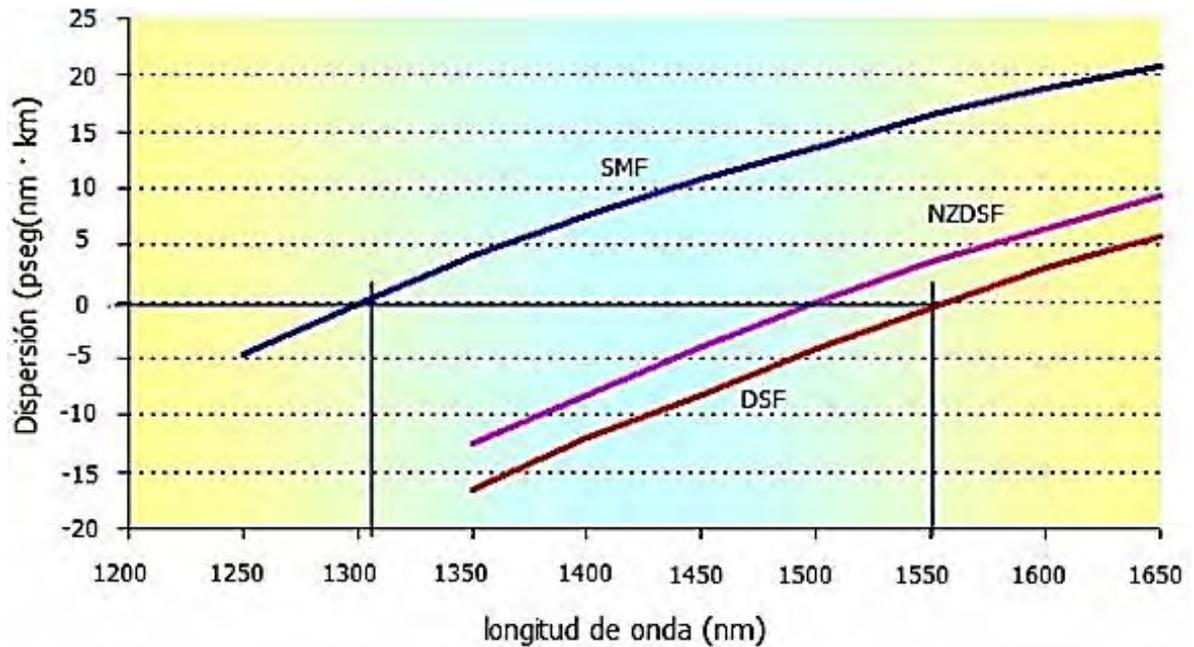


Figura No 8.11 Curvas de la dispersión cromática de las fibras monomodo de SMF DSF N -DSF, para diferentes longitudes de onda.

Fuente: Dispersión cromática Fibra óptica. (2019). Disponible: http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_1_1.htm.

Ejemplo No. 8.3

Determinar la intensidad de la dispersión cromática que originan cada uno de los tres tipos de fibras ópticas monomodo: SMF, DSF y NZDSF. Para una señal de longitud de onda de 1.550 nm

Solución:

Utilizando las curvas indicadas en la figura No. 8.11:

- a.) Para SMF: aproximadamente 18 ps/nm·m.
- b.) Para DSF: aproximadamente 0 ps/nm·m.
- c.) Para NZDSF: aproximadamente 3 ps/nm·m.

Ejemplo No. 8.4

Determinar la dispersión total (retrazo o incremento de tiempo) que se presenta en un enlace óptico de 45 m, si utiliza una fibra con una dispersión cromática de 8.94 ps nm. m y una fuente óptica de 2.3 nm de anchura espectral.

Solución:

Dispersión total =

Dispersión cromática × *anchura espectral de la fuente* × *km*

$$\text{Dispersión total} = 8.94 \text{ (ps/nm} \cdot \text{km)} \times 2.3 \text{ (nm)} \times 45 \text{ (km)} = 925.29 \text{ (ps)}$$

8.6.3 Según el tipo de índice de refracción

En las fibras multimodos se presentan dos principales clases de fibras, dependiendo de su tipo de índice de refracción. ⁽¹³⁾

- *fibra de índice escalonado*: también denominada de salto de índice. En este caso el cambio de índice en la superficie entre el núcleo y la capa de revestimiento es abrupto (cambio vertical). Se debe a que tanto en el núcleo como en la capa de revestimiento sus respectivos índices son uniformes en todo el material de los mismos.
- *fibra de índice gradual*: en este caso el índice del núcleo varía gradualmente desde el centro hasta su superficie. Para este tipo de fibra se reduce la dispersión modal, debido a que con el cambio del índice de refracción se reduce la diferencia de caminos que recorren los diferentes modos que se propagan por la fibra.

En la figura No. 8.12 se ilustra la sección transversal y perfiles de índice de refracción para los dos tipos de fibras, según el tipo de índice de refracción.

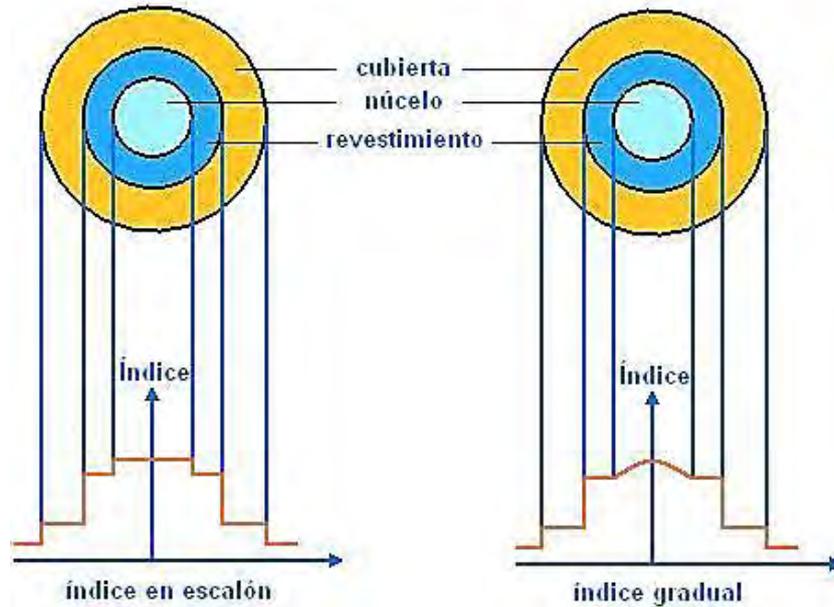


Figura No. 8.12 Sección transversal y perfiles de índice de refracción para los dos tipos de fibras, según el tipo de índice de refracción.

Fuente: Raymond Ser y Je ett J ysis for scientists and engineers" (6th ed.). Belmont CA: Thomson-Broo s Col, 2017.

En la figura No. 8.13 se muestra un compendio del tipo de perfil y modos de propagación que se presentan en los diferentes tipos de fibra óptica.

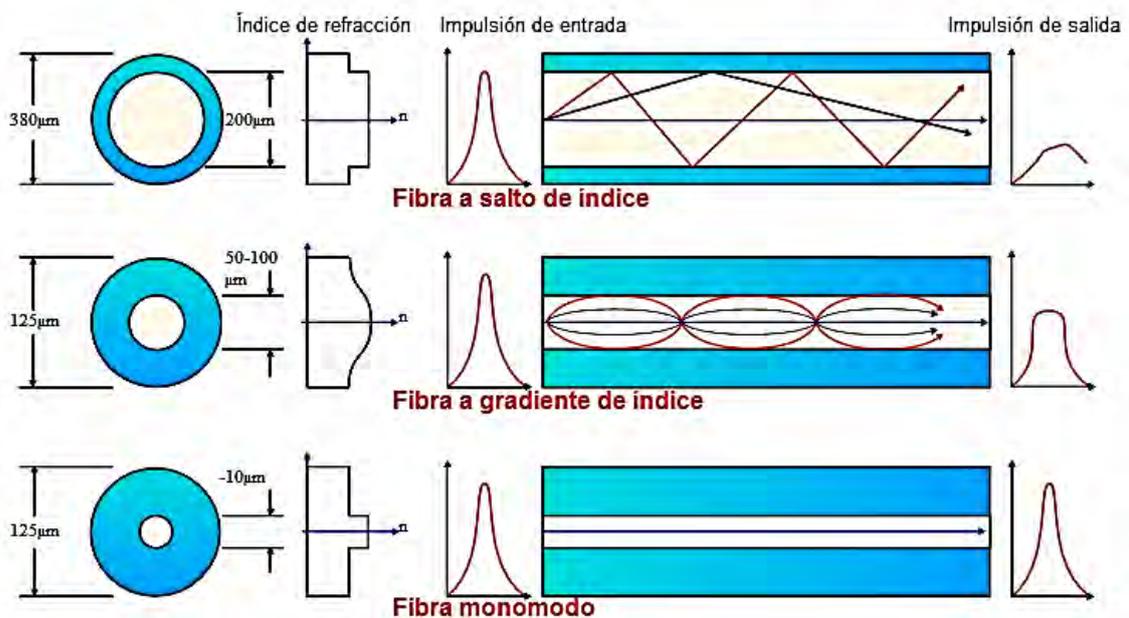


Figura No. 8.13 Contraste entre las fibras ópticas.

Fuente: Fibra ptica características y ventajas. (2019). Disponible: <https://www.pandaancho.mx/noticias/fibra-optica-caracteristicas-ventajas.htm>

8.7 Número de modos de una fibra óptica

Como se ha mencionado, el número de trayectorias de propagación de la señal de luz dentro del núcleo de una fibra óptica (número de modos), depende entre otros aspectos, del material del núcleo (vidrio o plástico), de la estructura de la fibra (monomodo o multimodo), del tipo de índice de refracción (escalonado o gradual), de la longitud de onda del haz de luz e incluso del grado de concentración del haz del láser incidente y de su ángulo de incidencia, así como de la coherencia entre el emisor de luz y la misma fibra. Teniendo en cuenta algunos de estos parámetros, se ha desarrollado una fórmula para determinar un estimativo de este número de modos (M), que se expresa en la ecuación 8.15.
(14)

$$\langle 8.15 \rangle \quad M = 1 + \frac{2d(n_1^2 - n_2^2)^{0.5}}{\lambda}$$

d : diámetro del núcleo

n_1 : índice de refracción del núcleo

n_2 : índice de refracción del revestimiento

λ : longitud de onda del haz de luz

Ejemplo No. 8.5

Determinar el diámetro del núcleo de una fibra óptica que se encuentra trabajando con una señal de longitud de onda de 1.55 μm , si las constantes de refracción son 1.8 y 1.6 del núcleo y de la capa de revestimiento, respectivamente. Para el caso de que la fibra:

- a.) Sea monomodo
- b.) De dos modos

Solución:

Teniendo en cuenta la ecuación 8.15:

$$d = \frac{(M - 1)\lambda}{(n_1^2 - n_2^2)^{0.5}}$$

a.) Monomodo: M 1, entonces diámetro cero (teóricamente infinitamente pequeño)

b.) Para dos modos: M 2

$$d = \frac{(2-1)1.550 \text{ nm}}{(1.8^2 - 1.6^2)^{0.5}} = 1.879,69 \text{ nm}$$

Se podría complementar la presencia de diferentes modos de propagación en la fibra óptica, indicando: que el rayo de luz en fibras ópticas se irradia de manera similar a las señales de radio en una guía de onda, entonces estas señales ópticas se propagan en varios modos específicos. Si el diámetro del núcleo de la fibra es relativamente grande (fibras multimodos), se presentan varios modos de propagación, debido a que el rayo de luz que entrada a la fibra incide en diferentes ángulos, generándose varios modos de propagación. En el caso de las fibras ópticas cuyo núcleo sea suficientemente estrecho (fibras monomodos) se presenta un solo modo de propagación.

La propagación multimodo produce dispersión de la señal óptica, generándose esparcimiento en los pulsos y por lo tanto limitando el ancho de banda utilizable de la fibra. Para la propagación monomodo la dispersión es mucho menor, pero debido a que el diámetro del núcleo es pequeño se requiere que su apertura numérica sea también menor, lo que demanda un acople del rayo de luz más crítico, tanto hacia dentro como hacia fuera de la fibra.

8.8 Diámetro máximo permisible del núcleo

Para el caso de la fibra monomodo, el diámetro máximo que puede tener su núcleo depende de la longitud de onda de la luz incidente, para que la señal de luz se pueda propagar en modo monomodo por esa fibra. La ecuación 8.16 indica como determinar este diámetro. ⁽¹⁵⁾

$$\langle 8.16 \rangle \quad d_{\max} = \frac{0.766 \lambda}{NA}$$

Ejemplo No. 8.6

Determinar el diámetro máximo que podría tener el núcleo, para una señal óptica de longitud de onda de 1.56 micrometros, de una fibra con propagación monomodo, con índice de refracción en su núcleo de 1.54 y en su revestimiento de 1.49.

Solución:

Aplicando las ecuaciones: 8.14 y 8.16:

$$NA = \text{sen}\theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(1.54)^2 - (1.49)^2} \approx 0.3873$$

$$d_{\max} = \frac{0.766 \lambda}{NA} = \frac{(0.766)(1.56 \times 10^{-6})}{0.3873} = 3.08 \mu\text{m}$$

8.9 Aplicaciones de la fibra óptica

La fibra óptica tiene una inmensa variedad de aplicaciones, entre las que se puede puntualizar las siguientes:

8.9.1 Conexión a la Internet

La conexión a la Internet por *fibra óptica* permite mayor velocidad de transferencia de la información, respecto al par telefónico convencional o a línea de abonado digital asimétrica ADSL: *Asymmetric Digital Subscriber Line*. Además, ofrece mayor ancho de banda y seguridad del mantenimiento de la conexión. Así mismo se prevé que en un futuro inmediato permita el servicio de la masificación de interlocutores, en entornos multimedia, tales como de video, sonido, mensajería, entre otros. ⁽¹⁶⁾

La conexión a la Internet les permite a los usuarios visualizar las páginas web desde un navegador y acceder a otros servicios que ofrece Internet, como correo-e, mensajería instantánea, protocolo de transferencia de archivos (FTP), entre otros. Se puede acceder a internet, además de línea de abonado o fibra óptica, como se mencionó anteriormente, a través de cable coaxial, iFi, vía satelital, banda ancha móvil, teléfonos celulares o móviles con tecnología 3G 4G.

El servicio de conexión a la Internet lo ofrecen ciertas empresas denominadas proveedores de servicios de Internet (ISP: *Internet Service Provider*). Las ventajas y servicios que presta la Internet son diversos y de una gran utilidad. En la figura No. 8.14 se ilustra un diagrama simplificado de la conexión de una empresa y de usuarios individuales a la red de la Internet.



Figura No.8.14 Acceso a la red de la Internet.

Fuente: Tipos de conexión a Internet. (2019). Disponible: <http://www.informatica-hoy.com.ar/aprender-informatica/Tipos-conexion-Internet.php>.

8.9.2 Sistemas de comunicaciones

La *fibra óptica* por sus características estructurales (delgadez y flexibilidad) y funcionales (gran ancho de banda y altas velocidades de transmisión) es muy pretendida para ser utilizada en las redes de los diferentes sistemas de comunicaciones. A continuación, se relacionan algunos de ellos, indicando sus aspectos estructurales y funcionales generales.

- **Redes de transmisión de datos:** es grande el incremento de la utilización de la fibra óptica en las redes de transmisión de datos de áreas locales LAN y en las de áreas amplias AN, permitiendo un aumento en el rendimiento de funcionamiento de estas redes y facilitando la incorporación a las mismas de nuevos dispositivos, servicios y usuarios.
- **Redes telefónicas:** en estas redes también se está extendiendo la utilización de fibra óptica. La *fibra óptica* ofrece unas comunicaciones libres de interferencias y de protección de intercesiones y boicoteo en la línea, muy comunes en las líneas conductoras. Así mismo la señal transmitida es más nítida y se reduce la utilización de repetidores, ya que las pérdidas de propagación son menores. Otra ventaja del teléfono mediante fibra óptica es la posibilidad de establecer conexión de Internet y teléfono al mismo tiempo y con tan solo una

línea. Esto no sería posible en una línea de teléfono convencional debido a lo reducido de su ancho de banda para transmitir información.

- **Redes submarinas:** los tendidos submarinos de redes de comunicación están utilizando, desde hace varios años (comienzo de los años 2000), solamente cables ópticos, los cuales han posibilitado la transmisión de señales digitales portadoras de voz, datos, televisión, entre otras. con velocidades de transmisión de hasta 100 Tbit s. La red submarina, con fibra óptica, de cobertura más extensa que existe en el mundo, como se mencionó en la parte introductoria de este capítulo, es la S A-M - - , con una trayectoria cerca de los 40.000 kilómetros de tendido, partiendo desde Alemania y une 39 puntos del globo hasta llegar a Japón y a Australia (ver figura No. 8.1).
- **Redes híbridas de televisión por cable CAT HFC:** como se mencionó en el numeral 6.4.6, estas redes en gran parte de su tendido están conformada por fibra óptica y en menor parte por cable coaxial. Su implementación reviste la particularidad de ser redes bidireccionales, pudiendo esencialmente enviar señales de T , Internet, Telefonía IP, entre otras y recibir en retorno señales de Internet y de Telefonía IP, principalmente. Dispone de un alto ancho de banda y de velocidades de: 55 Mbps de cabecera a usuario y de 10 Mbps de usuario a cabecera. En el numeral referenciado, también se describe, de manera general, la estructura y funcionamiento de este tipo de redes, así como se muestra alguna figura donde se representa la composición básica de las mismas. En la figura No. 8.15 se complementa la información de esta estructura, haciendo resaltar las áreas de cobertura de la red CAT HFC, donde se utiliza fibra óptica y donde se utiliza cable coaxial. (17)

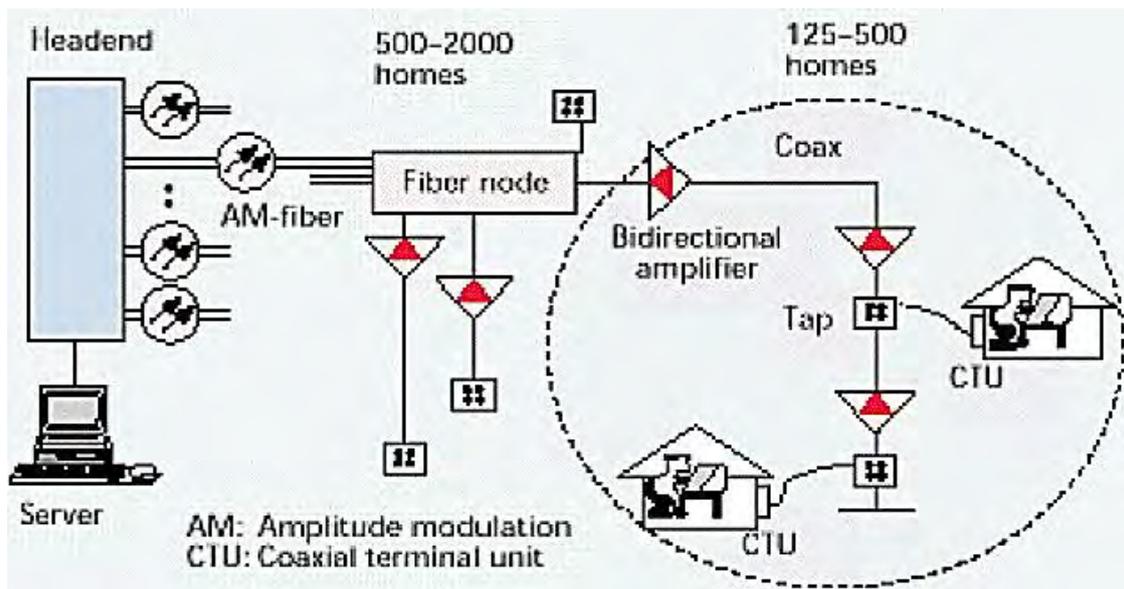


Figura No.8.15 Estructura elemental básica de una red CAT HFC.

Fuente: Red CAT HFC. (2019). Disponible: <http://www.aula.iiia.info/ampliacion/t3-acceso/residB/A.htm>.

- **Conexión a la televisión:** permite ampliar la recepción de un gran número de canales: informativos, musicales, de espectáculos, deportivos, documentales, de entretenimiento, infantiles, entre otros.
- **Redes de telemétrica:** a través de la fibra óptica se puede transferir la información captada sobre los servicios públicos del agua, el gas y o la electricidad.
- **Servicios web TV:** utilizando la fibra óptica se mejora los servicios de interactividad con los centros de emisión de televisión, facilitando de esta manera el acceso a información sobre eventos, espectáculos, ofertas comerciales, oportunidades de negocios, entre muchas otras.
- **Servicios radio digital:** facilidad en la disponibilidad de canales musicales especiales y al gusto del usuario, con un alto grado de calidad de sonido y de selectividad de temas, autores e intérpretes.

8.9.3 Sistemas sensoriales

Los sistemas sensoriales eléctricos no son convenientes donde existen altas tensiones y o señales interferentes, ya que alteran o distorsionan el espectro de la señal monitoreada. Estos problemas no se presentan para el caso de los sistemas sensoriales que utilizan para el transporte de las señales la fibra óptica. Entre los sistemas sensoriales que utilizan fibra óptica se encuentra los: acústicos, eléctricos y magnéticos, de rotación, de presión, de temperatura, entre otros.

Debido a la utilización de la fibra óptica como medio de transporte de las señales en estos sistemas sensoriales, les permite a ellos ser empleados en aquellos sitios de difícil acceso (máquinas, equipos, estructuras físicas o naturales), debido al reducido grosor y a la flexibilidad que presenta las fibras ópticas. Así mismo, debido a la inmunidad de interferencias y al gran ancho de banda que ofrece la fibra óptica, estos sistemas pueden detectar señales de niveles muy bajos y de pequeñas variaciones.

Entre los diversos sistemas sensoriales que emplean fibra óptica, se encuentran los sistemas hidrofónicos, los cuales han tenido gran acogida en la industria de exploración de petróleo y las fuerzas armadas marítimas para detectar objetos submarinos. Así mismo las aeronaves de gran tamaño utilizan los giroscopios para monitorear, mantener o cambiar su orientación.

8.9.4 Sistemas de Iluminación

Debido a que la función esencial de las *fibras ópticas* es el transporte de señales de luz, permite que estas puedan servir de dispositivos de iluminación, independiente de la información que llevan, iluminando áreas de difícil acceso o que contengan cierto grado de riesgo de incendio, tales como: las zonas de exploración petrolífera, de explotaciones de material minero, de actividades industriales donde exista altos componentes inflamables, entre otras. La utilización de la fibra óptica como fuente luminosa, ofrece una iluminación segura, atractiva, eficiente y discreta, brindando una gama inmensa de aplicaciones y servicios de alumbrados altamente eficientes y creativos.

El color de la luz que emite la fibra óptica depende de la longitud de onda de la señal luminosa que se le inyecte. Es por esta razón que el color de la luz que genera las fibras ópticas puede ser variado solamente al cambiar la longitud de onda de la señal luminosa que se le aplique. Hay que también tener presente que el consumo de energía que demanda la fibra óptica para generar iluminación es menor que el de las fuentes luminosas convencionales, en iguales condiciones de servicio.

El tipo de fibra óptica que se emplea para iluminación puede ser de núcleo de vidrio o de plástico. Con núcleo de vidrio es más eficiente y atractivo el servicio, pero el costo de la fibra es mayor. En un sistema de iluminación a través de la fibra óptica, se necesita de un generador o fuente de luz, al cual le corresponde suministrar toda energía (señal) luminosa que requiera el sistema. En la figura No. 8.16 se ilustra una imagen de una fibra óptica generando iluminación y la de un generador o fuente de luz

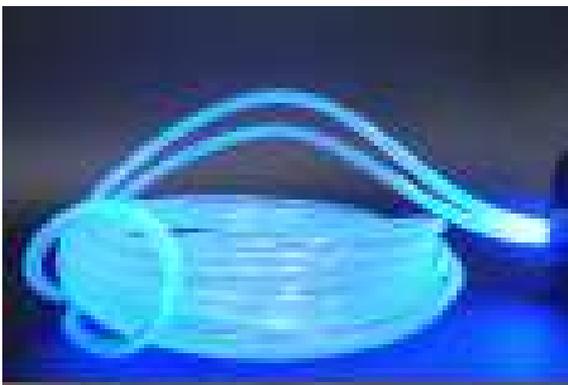


Figura No 8.16 Imagen de fibra óptica generando iluminación y la de un generador de luz.

Fuente: Luz láser. (2019). Disponible: <http://la3fibroptica.com>

Itimamente la fibra óptica está siendo utilizada para señalización en las carreteras, en las pistas de algunos aeropuertos, en el entorno externo e interior de las piscinas, en las fuentes de agua, ya que son resistentes a la humedad y a la intemperie, evitando el riesgo de posibles efectos eléctricos nocivos (cortos circuitos) a las personas, como es el caso cuando se hace la iluminación, en estos espacios, con sistemas convencionales. En la figura No.8.17 se muestra una imagen de una piscina con iluminación interior y exterior mediante fibra óptica.



Figura No.8.17 Piscina con iluminación interior y exterior a través de fibra óptica.

Fuente: Iluminación láser. (2019). Disponible: http://2.udec.cl/jdupre_fibra_apli.html.

Así mismo se ha venido fomentando la iluminación de espacios abiertos (pasillos, parques, áreas deportivas, entre otros) y o cerrados (oficinas, residencias, teatros, supermercados, restaurantes, centros comerciales, bares, entre otros). En la figura No. 8.18 se muestran unas imágenes de algunas de estas aplicaciones





Figura No.8.18 Espacios cerrados y abiertos con iluminación a través de fibra óptica.

Fuente: <http://.metrolight-es.com/productos/fibra-optica.html>. Consultado en junio 2017

Otras de las grandes ventajas de la utilización de la fibra óptica como fuente luminosa, es que el calor que origina es despreciable y es exenta a cortos circuitos, ya que no maneja corrientes eléctricas, lo que protege a los objetos (pinturas, piezas de museo, entre otros) que son susceptibles de deterioro por causa del calor, que sí genera la iluminación convencional. Además, evita la presencia de cortos circuitos, disminuyendo de esta manera los riesgos de incendios. De esta forma la fibra óptica se emplea para arreglos decorativos luminosos, lámparas personales, iluminación de vitrinas, entre otras aplicaciones. En los museos se está aplicando la fibra óptica para la iluminación, ya que pueden filtrar los componentes espectrales ultravioletas de la luz, los cuales deterioran a las pinturas. En la figura No. 8.19 se indican unas imágenes de algunas de estas aplicaciones.

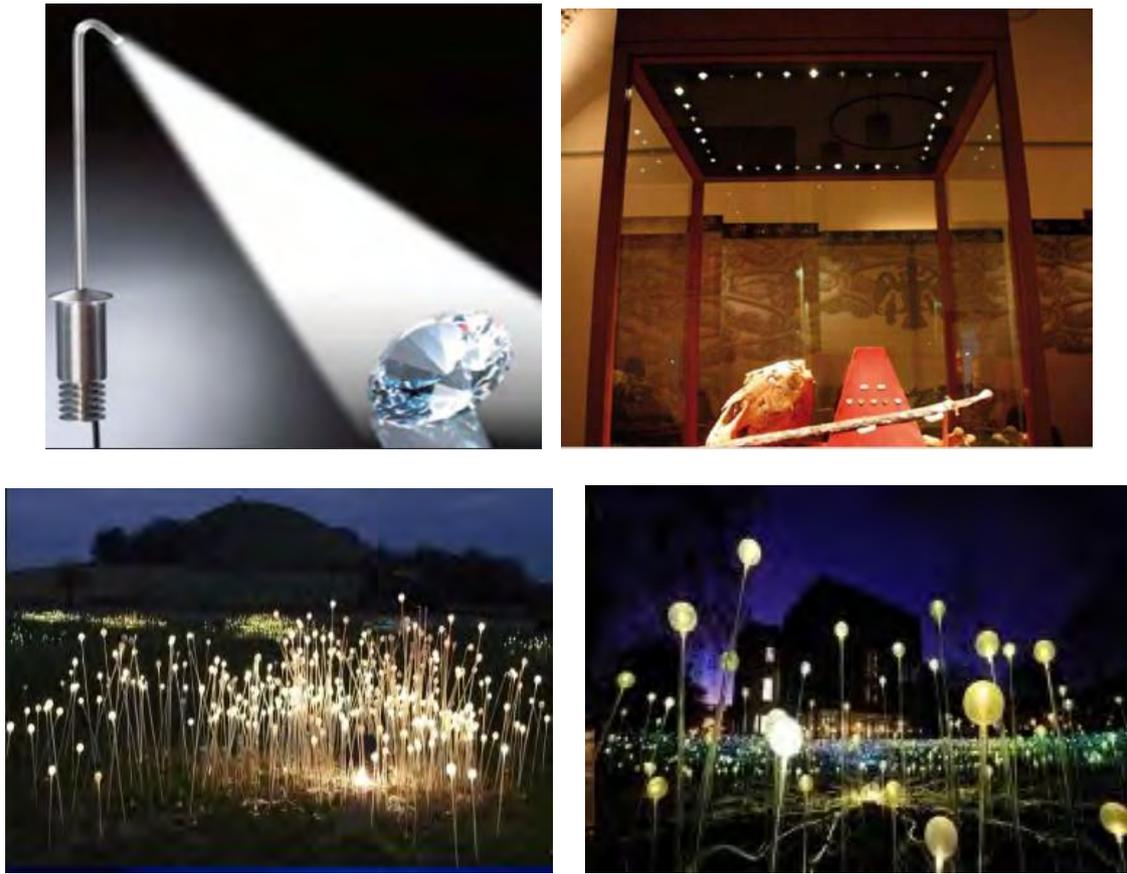


Figura No. 8.19 Imágenes de diversas aplicaciones locales de la fibra óptica como fuente luminosa.

Fuente: Aplicaciones fibra óptica. (2019). Disponible: <http://www.iluminet.com/fibra-optica-iluminacion> http://www.academia.edu/7546480/FIBRA_OPTICA

8.9.5 Intervenciones médicas

Debido a que las *fibras ópticas* son súper delgadas y flexibles, permiten ser introducidas a través de las aberturas naturales del cuerpo o a través de pequeñas incisiones, dirigiéndose por los conductos internos del organismo, facilitando a los galenos poder auscultar el interior del cuerpo humano y o realizar procedimientos médicos como la extirpación de células malignas. Diversos equipos y dispositivos médicos incluyen la *fibra óptica* para realizar con gran precisión la exploración y o intervención en cavidades internas del cuerpo humano o de cualquier ser viviente. Entre estos equipos se encuentran los: videoendoscopios, laringoscopios, rectoscopios, broncoscopios, endoscopios, vaginoscopios, gastroscopios, aparoscopios, fibroscopios, entre otros. ⁽¹⁸⁾

Los fibroscopios permiten la inserción de agujas y o pinzas para toma de muestras, así mismo de electrodos de cauterización, de tubos para la introducción de anestésicos o evacuación de líquidos. Una fibra óptica se encarga de transportar la luz al interior del organismo y otra de retornar la imagen

para ser observada en un monitor. Estos equipos son muy útiles para la detección de cánceres y úlceras en estado inicial que no son visibles a través de rayos .

Debido al gran ancho de banda y a la alta velocidad que viaja la información a través de la *fibra óptica*, actualmente es posible que un cirujano pueda operar a un paciente interactuando en tiempo real, mediante altas tecnologías, sobre un paciente que se encuentra en otro sitio lejano e incluso en otro continente.

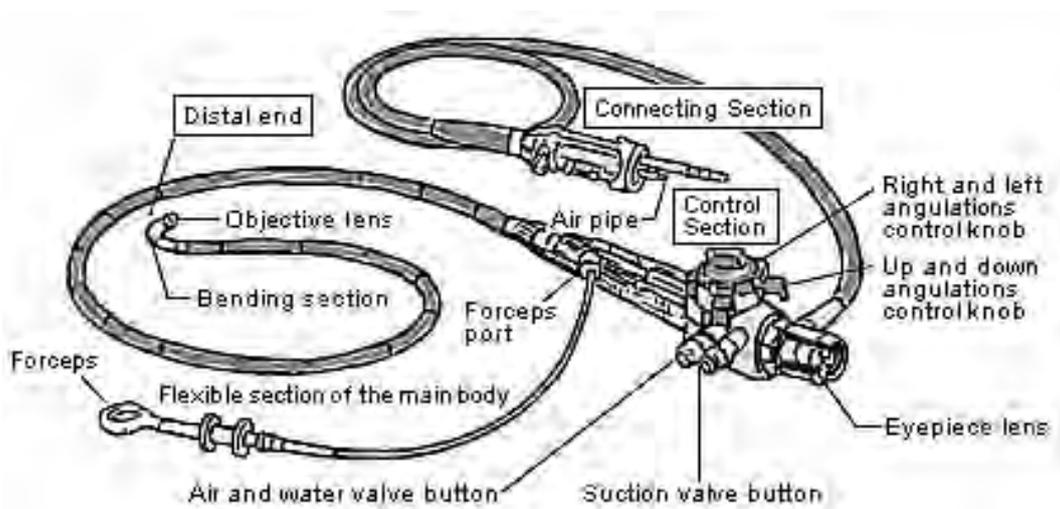
En la figura No. 8.20 se ilustra unas imágenes de un fibroscopio y de un videoendoscopio, así como la de la identificación de los componentes básicos de un fibroscopio.



a.) Fibroscopio



b.) videoendoscopio



c.) Componentes de un fibroscopio

Figura No. 8.20 Imágenes de un fibroscopio y de un videoendoscopio
Fuente: Fibroscopio. (2019). Disponible: http://2.udec.cl/~jdupre/fibra_apli.html.

Las intervenciones médicas donde se emplean dispositivos que utilizan como medio de transmisión de señales a la *fibra óptica*, son muy numerosos. En la figura No. 8.21 se muestran dos imágenes donde se representan sendas intervenciones médicas: una utilizando un fibroscopio y la otra un videoendoscopio.



Figura No. 8.21 Imágenes de intervenciones médicas donde emplean dispositivos con fibra óptica.

Fuente: videoendoscopio. (2019). Disponible: <http://www.medicaexpo.es/fabricante-medical-videoendoscopio-rectoscopio-31014.html>

8.9.6 Inspecciones industriales

Los fibroscopios, además de servir para intervenciones médicas, actualmente también se están aplicando en la industria, para la inspección visual de espacios de difícil acceso, tales como los de los vehículos, ductos de redes de comunicaciones y o de servicios públicos, maquinaria industrial, ductos de exploración y distribución de combustibles (petróleo y o gas), y en general para trabajos de instalación, exploración y otros ámbitos en los que se necesita inspeccionar cavidades y o orificios delgados. Se debe disponer de una fuente-cámara especial que genere la luz y muestre lo inspeccionado. En la figura No. 8.22 se ilustra unas imágenes donde se muestra un fibroscopio y la de cuando se está utilizando para la inspección del comportamiento del motor de un automóvil.



Figura No. 8.22 Fibroscopio en uso industrial.

Fuente: Fibroscopios (2019). Disponible: <http://.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-optico/fibroscopio-pce-e130.htm>.

8.9.7 Investigaciones arqueológicas

De la misma manera que para los casos de medicina e industria, se están empleando dispositivos similares para hacer inspecciones en los procesos de estudios de investigación de la historia de los materiales (arqueología), para lo cual se están perforando ductos muy delgados a estos materiales e introduciéndoles la *fibra óptica* de estos instrumentos de inspección. En la figura 8.23 se muestran las imágenes de dos tipos de videoendoscopios empleados, entre otras aplicaciones, a los estudios de investigación arqueológica.



Figura No.8.23 Videoendoscopio empleado para estudios de investigación arqueológica.

Fuente: Catálogo *Videoendoscopio inalámbrico con pantalla C C -V* " PCE, 2014
Catálogo *Videoscopio computarizado V -* " GimateG., 2016.

8.9.8 Aplicaciones militares

La razón esencial de la aplicación de la *fibra óptica*, en lo que hace referencia a las acciones netamente militares, radica fundamentalmente en la confidencialidad que estas ofrecen, para el caso de ser empleadas como medio de transmisión, frente a las comunicaciones inalámbricas y las de las redes de cables conductores. Reduciéndose de esta forma, en gran medida, el requerimiento de implementación de sistemas de codificación en los mensajes. También influye en estas aplicaciones, los siguientes aspectos estructurales y funcionales de la *fibra óptica*: el peso (ahorro logístico de material de campaña); la capacidad alta de transmisión; la flexibilidad; la fiabilidad; la inmunidad y durabilidad ante los factores nocivos de la intemperie.

Es pertinente resaltar que el lanzamiento y/o intersección de los misiles se controlan desde varios centros que están interconectados por redes redundantes de cables ópticos. En la figura No.8.24 se enseña el centro de pruebas de lanzamiento de misiles de los EEUU denominado el *olígono*, el cual está interconectado con otros centros a través de fibra óptica.



Figura No. 8.24 Centro de pruebas de lanzamiento de misiles de los EEUU: El Polígono

Fuente: <http://stratocat.com.ar/bases/69.htm>. Consultado en junio 2016.

8.9.9 Aplicaciones vehiculares

Son varias las modalidades de la utilización de la *fibra óptica* en el área vehicular. Para sistemas de monitoreo y control, tanto en el sector automotriz, como en el aeronáutico, el ferroviario, aeroespacial y marítimo, es muy común el uso de la *fibra óptica*, para realizar el transporte de la información inspeccionada. De la misma forma para las instalaciones de comando y señalización implementados en estos medios de transporte.

La utilización de la *fibra óptica* en este sector se debe a la ligereza de esta y a su resistencia a condiciones climáticas adversas, además de las otras particulares estructurales y funcionales que se han mencionado de este medio. En la figura No. 8.25 se muestra unas instalaciones de la *fibra óptica* en una de las partes de unos vehículos.



Figura No.8.25 Instalaciones de fibra óptica en vehículos.

Fuente: http://www.ifm.com/ifmmx/eb/pinfo010_080_040.htm. Consultado en junio 2016.

8.9.10 Mapa conceptual: principales aplicaciones de la fibra óptica

Con el propósito de esquematizar las diferentes e innumerables aplicaciones que ofrece las *fibras ópticas*, en la figura No. 8.26 se hace una representación de un mapa conceptual donde se indican las principales aplicaciones de estas fibras, en diferentes áreas e instancias.

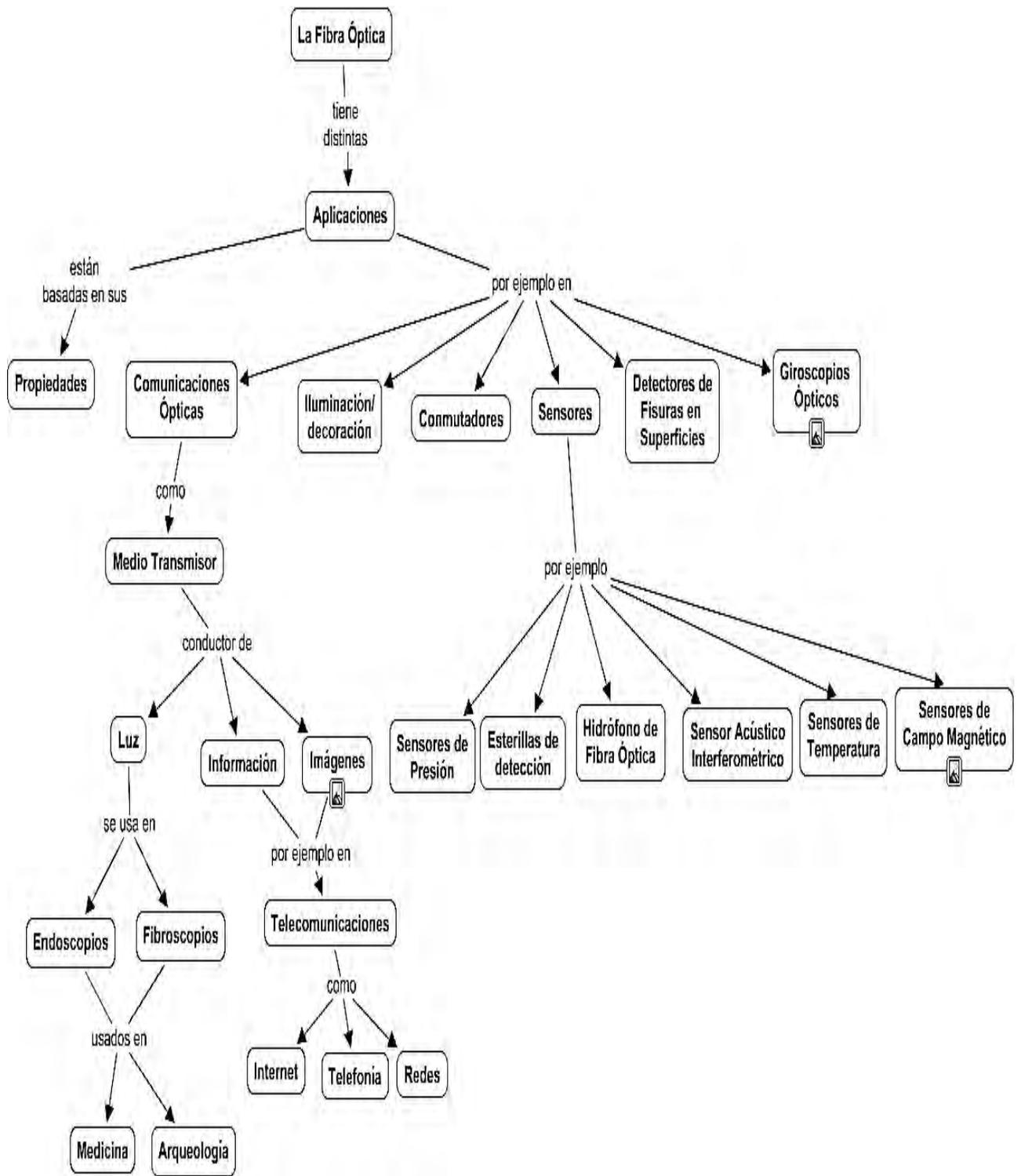


Figura No. 8.26 Mapa conceptual: principales aplicaciones de la fibra óptica

Fuente: Aplicaciones de la Fibra óptica. (2019). Disponible:
http://grupoorion.unex.es:8001/rid/1H/BMTTJJ-25J/S7-1/R4/Aplicaciones_20Fibra_20Optica.cmap. Consultado

8.10 Alcance en enlaces ópticos

La distancia que una señal luminosa puede alcanzar al propagarse a través de una *fibra óptica*, antes de requerirse ser retransmitida, depende de la longitud de

onda de la señal y del tipo de la fibra. En la tabla No. 8.2 se indica estos alcances (en kilómetros) dependiendo de la longitud de onda de la señal luminosa y del tipo de la fibra. ⁽¹⁹⁾

Hay que recordar que las *fibras ópticas* de núcleo de vidrio (PCF) tienen mucho más alcance que las de núcleo de plástico (POF) y de la misma forma ofrece mayor velocidad binaria. Para el caso de las fibras PCF su alcance es del orden de varios kilómetros y su velocidad de los terabits por segundo (Tbps), y actualmente están saliendo al mercado del orden de los petabits por segundo (Pbps). Para el caso de las fibras POF su alcance es reducido (de algunos metros) y su velocidad del orden de los Gbps.

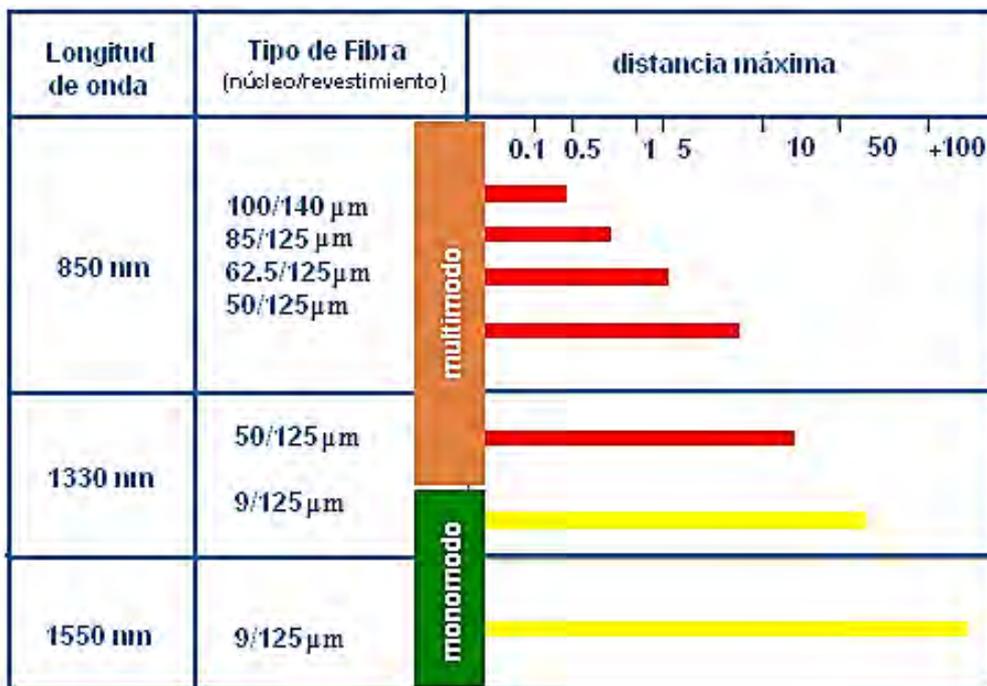


Tabla No. 8.2 Alcances de las fibras ópticas (m) en función de la longitud de onda de la señal luminosa y del tipo de fibra.

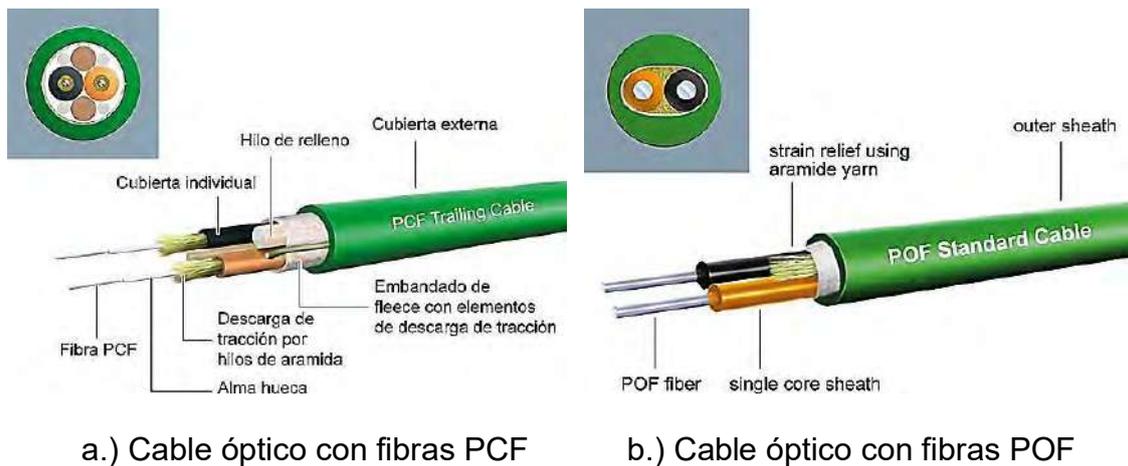
Fuente: Alcance de la fibra óptica. (2019). Disponible: [fibraopticahoy.com fibras-opticas...vs... alcance-de-la-fibra-optica](http://fibraopticahoy.com/fibras-opticas...vs...alcance-de-la-fibra-optica).

8.11 Estructura de los cables ópticos según el tendido

La estructura de los cables ópticos depende del tendido en el cual va hacer utilizado. A continuación, se hace referencia, de esta estructura, especialmente para aplicaciones de enlaces de comunicaciones. ⁽²⁰⁾

1. *ara un solo enlace de comunicación*: ya sea por tendido aéreo (por postes) o subterráneo (por ductos), la estructura básica de este cable óptico está conformado por dos fibras ópticas (una de envío y la otra de respuesta), ya sean de núcleo de vidrio con revestimiento de plástico PCF (*olymereCladded iber*) o de núcleo de plástico POF (*lastic ptica iber*), y por un conjunto de capas

protectoras, tensores y chaquetas de cubierta. Para el caso del cable óptico con fibras POF las distancias son muy cortas (algunos metros: áreas limitadas), por su alta atenuación, como se mencionó anteriormente. En la figura No. 8.27 se muestran unas imágenes donde se indica la composición estructural de un cable óptico con fibras ópticas PCF y POF, así como cables ópticos con conectores en uno de sus extremos.



a.) Cable óptico con fibras PCF

b.) Cable óptico con fibras POF



c.) Cables ópticos con conectores

Figura No. 8.27 Imágenes de la composición estructural de cables ópticos con fibras PCF y POF.

Fuente: Fibras PCF POF. (2019). Disponible:

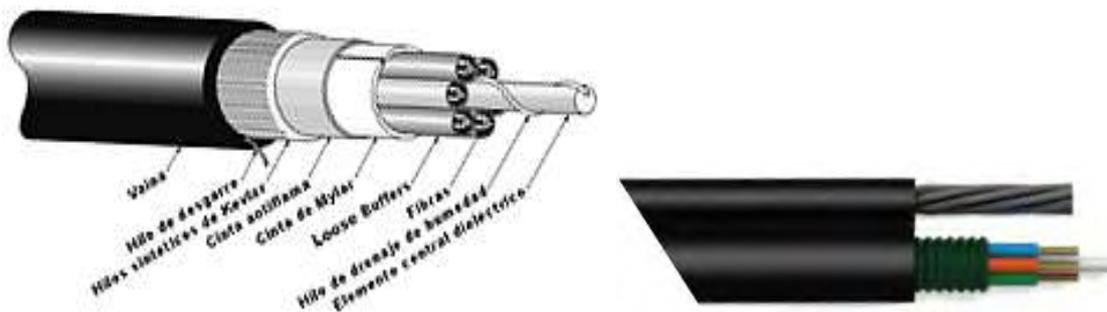
<http://apocusantti.blogspot.com.co/2018/11/sabias-como-fluye-la-senal-de-internet.html>.

2. *ara varios enlaces de comunicación:* generalmente se presentan en el caso de la utilización de los cables ópticos para tendidos largos terrestres y o submarinos, como es el caso en las redes de comunicaciones de coberturas extensas. En este caso el cable óptico contiene varias fibras ópticas, las cuales

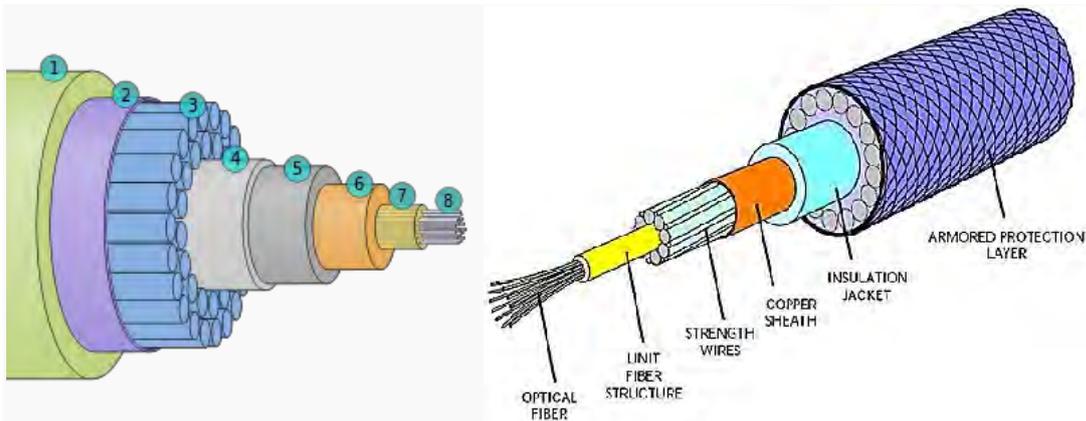
vienen recubiertas por mayor número de capas de protección, tensores, láminas, chaquetas, entre otros elementos. En la figura No.8.28 se ilustra, en lados primeras imágenes, la composición de cables ópticos con un gran conjunto de fibras, en las otras dos la estructura de cables ópticos con varias fibras para tendidos terrestres (aéreo o subterráneo) y submarino respectivamente.



a.) Cables ópticos con un gran conjunto de fibras



b.) Cable óptico subterráneo c.) Cable óptico aéreo



d.) Cables ópticos submarinos

Figura No. 8.28 Estructura típica de cables ópticos con varias fibras ópticas para tendidos terrestres extenso y o submarino.

Fuente: osh in N. I., Shir évich M. G.. *Manual de física elemental*". Editorial. Mir, 2018 p. 209. Manual: *Cable totalmente dieléctrico autosoportado A SS*", aveOptics, 2017.

En lo que hace referencia al cable óptico para tendido subterráneo, la finalidad de cada uno de sus componentes básicamente es la siguiente:

1. *elemento central dieléctrico*: permite dar consistencia al cable óptico (no se encuentra en todos los tipos de cables ópticos)
2. *tubo de drenaje de humedad*: provee un camino para que la humedad salga a través de él, liberando a las fibras ópticas de humedad.
3. *fibras ópticas*: son los componentes centrales del cable óptico, los que ofrecen el medio de transmisión de las señales ópticas.
4. *tubo Buffer*: es un tubo que recubre la fibra, produciendo una capa oscura contribuyendo a que los rayos de luz no se dispersen hacia fuera de la fibra.
5. *Cinta de Mylar*: es una capa de poliéster fina que cumple con la función de aislante.
6. *Cinta antífama*: es una capa que protege al cable del calor.
7. *hilos sintéticos de kevlar*: son hilos que contribuyen a darle consistencia y protección al cable óptico.
8. *tubo de degarre*: son hilos que también contribuyen a darle consistencia al cable óptico.

9. *Vaina*: es la capa exterior del cable óptico la cual le provee aislamiento y consistencia.

En cuanto a las capas y componentes estructurales enumerados, del cable óptico para tendido submarino indicado en la figura No. 8.46, se identifican en la tabla No. 8.3.

Número	Componente	Número	Componente	Número	Componente
1	Polietileno	4	Barrera de aluminio	7	aselina
2	Cinta de tereftalato	5	Policarbonato	8	Fibras ópticas
3	Alambres de acero	6	Tubo de cobre		

Tabla No. 8.3 Componentes básicos estructurales de un cable óptico submarino.

Existen también cables ópticos que están protegidos contra ruidos e interferencias, utilizando una armadura de chapa de acero corrugado, la cual también sirve como de protección a fuerzas externas y a darle mayor solides a la estructura del cable. En la fogura No. 8.29 se muestra un tipo de cable óptico con este tipo de armadura.



Figura No.8.29 Estructura de un cable óptico con armadura de chapa de acero corrugado.

Fuente: Catálogo *Cables y componentes para comunicaciones, S "*. C3, 2014.

Los componentes del cable óptico indicado en la figura No. 4.53, son los que a continuación se relacionan:

1. Fibras ópticas.
2. Macro tubo plástico.
3. Elemento resistente periférico (Hilaturas de fibra de vidrio).
4. Cubierta interior de polietileno.
5. Armadura de chapa de acero corrugado.
6. Cubierta exterior de polietileno.

Los aspectos generales de los procesos en los tendidos subterráneos y submarino de cableado para redes de comunicaciones se relacionan en los numerales 5.2.2 y 5.2.3, respectivamente, los cuales en esencia son aplicables tanto para los cables coaxiales como para los cables ópticos.

8.12 Conectores para fibra óptica

Son unos dispositivos pasivos indispensables para establecer un enlace óptico, siendo su función principal de interconectar, esencialmente, las *fibras ópticas* con los equipos terminales o intermedios del enlace total óptico. En la figura No. 8.30 se ilustran algunos de los diferentes tipos de conectores para *fibra óptica*.



Figura No.8.30 Tipos de conectores para fibra óptica.

Fuente: Conectores Fibra óptica. (2019). Disponible:

<http://es.slideshare.net/AndresMonroy1/conectores-de-fibra-ptica-y-termoencogible>.

Los conectores de los enlaces ópticos conectan el extremo de un cable de fibra óptica para permitir una conexión y desconexión fácil. La función esencial de estos dispositivos es acoplar mecánicamente los núcleos de las fibras para que la luz pueda pasar. La interfaz se completa cuando los dos conectores se presionan entre sí. Un conector apropiado permite que no haya espacios con aire entre los dos puntos. Los conectores vienen en muchas formas y tamaño. Las características que los separan incluyen el tipo de acople. ⁽²¹⁾

Dependiendo del tipo de *fibra óptica* existe una gran diversidad de tipos de conectores, siendo uno de los criterios de clasificación el modo de transmisión de la fibra: monomodo SM (*Single Mode*) o multimodo MM (*MultiMode*). Para cada uno de estos grupos de conectores se origina gamas especiales de ellos, obedeciendo al mayor o menor diámetro de la férula del conector, al aplicativo

del enlace óptico, a la tecnología específica del montaje, entre otros aspectos estructurales y funcionales.

La férula de un conector óptico corresponde a la parte central del mismo y es que contiene a *la fibra óptica* realmente. Entre el tipo de material de las férulas están principalmente: acero, plástico y la cerámica, siendo este último el que más se está utilizando actualmente, debido a su calidad. En la figura No. 8.31 se muestran, en la parte superior un tipo de conector SC (*Set and Connect*) para *fibra óptica* multimodo (MM) y en la parte inferior un tipo de conector ST (*Straight tTip*) para fibra óptica monomodo (SM). ⁽²²⁾

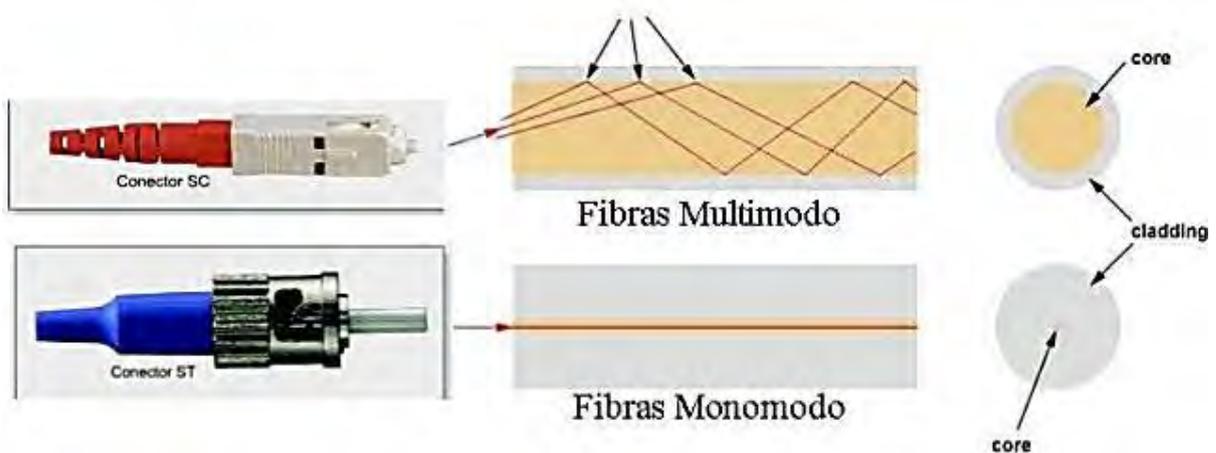


Figura No. 8.31 Conectores ópticos SC y ST.

Fuente: Conectores ópticos. (2019). Disponible:

<http://es.slideshare.net/AndresMonroy1/conectores-de-fibra-ptica-y-termoencogible>.

En la figura No. 8.32 se indican y se identifican los componentes básicos de un conector óptico STy así mismo la función principal de cada uno de ellos.





Figura No.8.32 Componentes básicos de un conector óptico tipo ST.

Fuente: Conectores ópticos. (2019). Disponible: <http://marismas-emtt.blogspot.com/2018/09/conector-st.html>.

(1): *érule*: como se mencionó anteriormente le corresponde el albergue de la fibra y alinearla. Para el caso de conectores ST el diámetro exterior es del orden de los 2.5 mm y el del interior del orden de los 0.127 mm.

(2): *Cuerpo metálico*: le corresponde la fijación del conector de la fibra al del equipo terminal o intermedio. Una vez introducido se gira un cuarto de vuelta quedando fijado por un resorte con mecanismo de bayoneta.

(3): *Anillo de crimpado*: le corresponde darle rigidez mecánica al conjunto y evitar posible rotura de la fibra óptica.

(4) *Manguito*: le corresponde darle rigidez mecánica al conjunto y de esta manera proteger a la fibra de roturas.

(5) *Resorte*: le corresponde activar o liberar el mecanismo de bayoneta.

Las pérdidas por inserción de los conectores ópticos dependen del tipo de conector y de la calidad de este. Un rango promedio de estas pérdidas se encuentra entre los 0.2 dB a 0.4 dB.

Para el caso de conexiones ópticas a equipos terminales o intermedios que presente vibración o movimiento, se requiere reforzar la fijación de dichas conexiones, para lo cual se emplean ciertos tipos de conectores que permitan lograr este objetivo. En la figura No. 8.33 se muestra uno de los conectores para este caso de situaciones de vibración, tales aplicaciones militares de campaña, aeroespaciales, entre otras.



Figura No. 8.33 Conector óptico para situaciones de alta vibración.

Fuente: Cables y conectores de la fibra óptica. (2019). Disponible:
<http://cablesyconectoreshoj.com> conector-de-fibra-optica-para-aplicaciones-militares-y-aeroespaciales .

Para un enlace óptico confiable y que se ajuste a los estándares de funcionamiento, deberá contar con conectores de *fibra óptica* de estrictas especificaciones de desempeño óptico y mecánico. En la figura No. 8.34 se ilustra una imagen donde se indica la conexión de varias fibras ópticas a un conmutador (switch), para conectar equipos de una red de área local (LAN) y cuyas especificaciones técnicas siguen el estándar conocido como Ethernet (IEEE 802.3).



Figura. No. 8.34 Conexiones de fibras ópticas a un conmutador de una red de área local (LAN).

Fuente: Conexiones de fibras ópticas. (2019). Disponible:
<http://ecured.cu> Estándares IEEE 802.3.

Dentro la inmensa variedad de tipos de conectores de fibra óptica, actualmente existen en el mercado unos que ofrecen un obturador de muelle que protege totalmente la férula del polvo y rozaduras, los cuales son muy utilizados en las redes: LAN, WAN y CAT 5, así como en aplicaciones de metrología, ferroviarias,

industriales, entre otros. En la figura No.8.35, se indican algunos de los tipos de conectores de la serie E 2000 (Euro 2000) que disponen de un obturador de muelle.



Figura.No.8.35 Tipos de conectores ópticos con obturador de muelle.

Fuente: Catálogo *Conectores de fibra óptica*", Conectrónica, 2017.

8.13 Acopladores y empalmes ópticos

Los acoplamientos y empalmes ópticos son las uniones entre dos *fibras ópticas*, que permiten dar continuidad al paso de la luz del extremo de una fibra a la otra. Estas uniones originan pérdidas, debido entre otras situaciones a las siguientes: una mala alineación lateral, una mala alineación de separación, una mala alineación angular, a unos acabados de superficie imperfectos, a las diferencias entre los núcleos o índices de refracción.

8.13.1 Acopladores ópticos

Los acopladores ópticos permiten la unión temporal entre las fibras de dos cables ópticos. Estas uniones son esencialmente de tipo mecánico, produciendo unas pérdidas altas (generalmente superiores a 5 dB). En lo posible se recomienda reducir la utilización de acoplamientos en las redes ópticas. En la figura No. 8.36 se exponen, en la parte superior, algunos de los diferentes tipos de acopladores ópticos existentes en el mercado, y en la parte inferior un acoplamiento óptico.

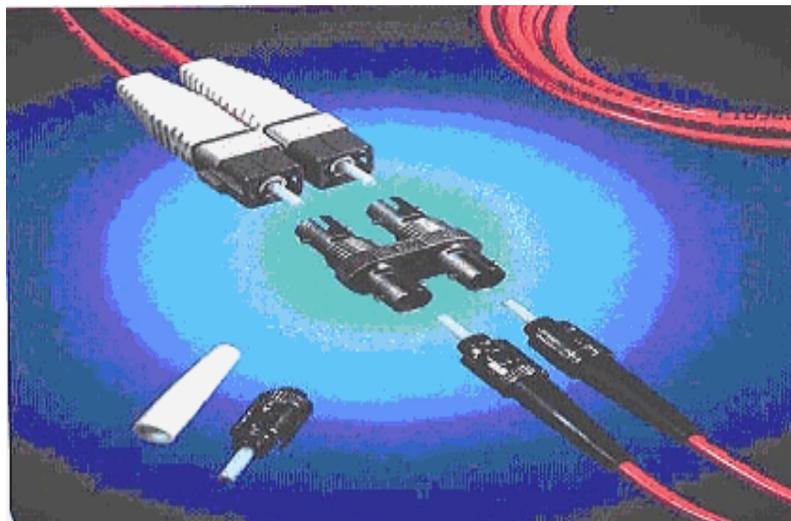


Figura No. 8.36 Tipos de acopladores ópticos.

Fuente: Acopladores ópticos. (2019). Disponible:
<http://.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml>.

8.13.2 Empalmes ópticos

Los empalmes ópticos permiten la unión permanente o fija entre las fibras de dos cables ópticos. Los empalmes entre fibras monomodo son los más críticos, debido al diámetro tan reducido de las fibras (alrededor de los 10 micrómetros), lo que demanda una mayor precisión en el empalme y por tanto equipos y mecanismos de alineamiento de mayor exactitud.

Entre las técnicas de empalmar dos fibras ópticas existen principalmente dos formas diferentes. Una de ellas es la de empalme por fusión, la cual es la que más utiliza, y la otra es la de empalme mecánico.

8.13.2.1 Empalme por fusión

En términos generales, el empalme por fusión consiste en unir las dos *fibras ópticas* fundiendo el material de las puntas de los dos correspondientes núcleos, a través de un arco eléctrico generado por dos electrodos a los cuales se le aplica una fuente de alta tensión (4 a 5 v) con corriente controlada. Estos empalmes originan bajas pérdidas (0.05 dB o menos, por empalme, para una buena unión). En figura No. 8.37 se ilustra un diagrama y una imagen del empalme por fusión. (24)

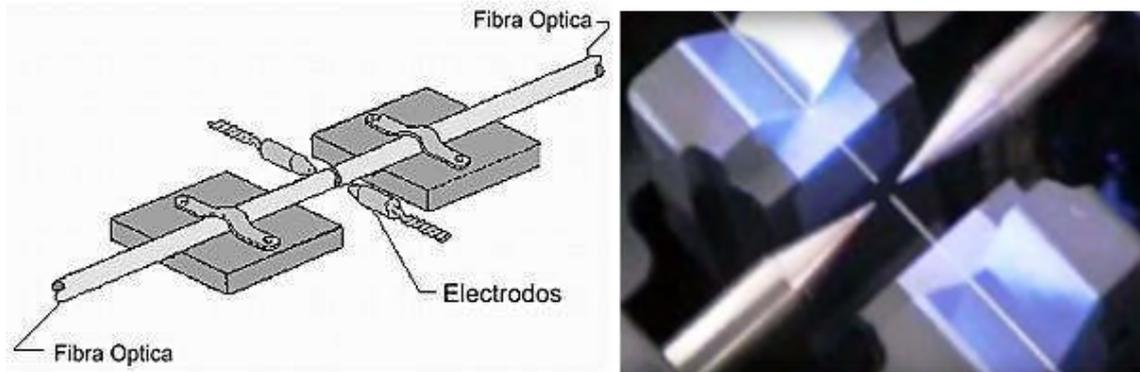


Figura No. 8.37 Empalme de fibras óptica por fusión.

Fuente: Empalmes de fibra óptica. (2019). Disponible:
[http: .fibraoptica hoy.com blog empalme-por-fusion .](http://.fibraoptica hoy.com blog empalme-por-fusion)

Estos empalmes se realizan empleando una máquina especial denominada *empalmadora* o *máquina de empalme*. Estas máquinas realizan básicamente las siguientes funciones, una vez las fibras este posicionadas en ellas: en primer lugar, la aproximación de las fibras, luego el alineamiento entre ellas y en seguida la fusión. Además, dispone de un calefactor integrado que permite colocar el protector al empalme y también cuentan con un dispositivo que calcula las pérdidas estimadas del empalme. En la figura No. 8.38 se exponen unas imágenes de dos tipos de *empalmadoras* o *fusionadoras*, como también se les conoce.



Figura No. 8.38 Imágenes de empalmadoras por fusión de fibras ópticas.

Fuente: Catálogo equipo: *Splicer usión mpalmadora por usión* ", 2015-2017.

Se debe tener algunas consideraciones de seguridad en la realización de los procesos de empalmes de fibras ópticas, entre las más frecuente que se recomiendan son:⁽²⁵⁾

- Usar en todo momento lentes de Seguridad.
- Emplear guantes de protección.
- La fusión genera una chispa eléctrica, por lo que se recomienda no usarla en lugares con gases inflamables.
- Tener un recipiente para colocar las virutas de las fibras".

8.13.2.2 Empalme mecánico

En el empalme mecánico se emplea un tubo, generalmente de plástico, el cual sirve para alinear las dos *fibras ópticas* que se van a empalmar, existiendo una bolsa de gel-adhesivo que une los extremos de las fibras y adapta sus índices de refracción. Este tipo de empalme origina mayores pérdidas que el de fusión, el cual es alrededor de los 0.3 dB o menor. ⁽²⁶⁾

Existen diferentes formas y dispositivos para realizar un empalme mecánico. Para el caso mostrado en la figura No. 8.39 y con una empalmadora específica, los pasos básicos en un proceso de empalme mecánico de *fibras ópticas*, en términos generales, se pueden puntualizar en los siguientes:⁽²⁷⁾



Figura No. 8.39 Pasos básicos en un proceso de empalme mecánico de fibras ópticas.

Fuente: Catálogo *Como hacer un empalme mecánico de fibra óptica*, Televes, 2017

1. Limpiar la zona de la funda (manguito) en la que se va a situar el empalme con un lienzo, que no suelte ningún tipo de partículas, humedecido en alcohol isopropílico.
2. Con la palanca de compresión levantada, se encaja el empalme mecánico. Mediante la peladora de precisión, se retira entre 30 a 40 mm de la funda protectora que posee una de las fibras ópticas. Se limpia la fibra resultante, al igual que en el punto 1.
3. Mediante la cortadora de fibra, se corta la fibra anterior dejando solamente una longitud entre 12 - 13 mm.
4. Insertar la fibra en el empalme, a través de la guía, hasta que se detenga.
5. Encajar la fibra en su sujeción (zona acolchada) presionando la pestaña del lado izquierdo, introduciéndola en el soporte de espuma. Liberar la pestaña de forma que el soporte retenga la fibra.

6. Repetir los pasos del 1 a 4 anteriores para la otra fibra.
7. Introducir la segunda fibra en su punto (zona acolchada). Empujar la segunda fibra en dirección a la primera fibra, hasta que la primera fibra comience a curvarse. Se deberá tener pulsada la pestaña derecha para que el soporte de espuma no la retenga.
8. Pulsar la pestaña izquierda y empujar la primera fibra hacia la segunda, hasta que la curvatura de las dos fibras se iguale.
9. Presionar sobre la palanca de compresión para activar el empalme mecánico.
10. Pulsar las pestañas izquierda y derecha para retirar los dos extremos sobrantes. En seguida, retirar el empalme mecánico tirando desde el centro de este.”

Después de realizado el empalme de la fibra óptica debe protegerse con cubiertas: metálicas, termoretráctiles y plásticas. Para el sellado del manguito, donde se encuentra el empalme, se emplea adhesivo o resina de secado rápido. En la figura No. 8.40 se ilustra un manguito para empalme mecánico, donde se indican sus componentes esenciales y dos fibras con empalme mecánico.

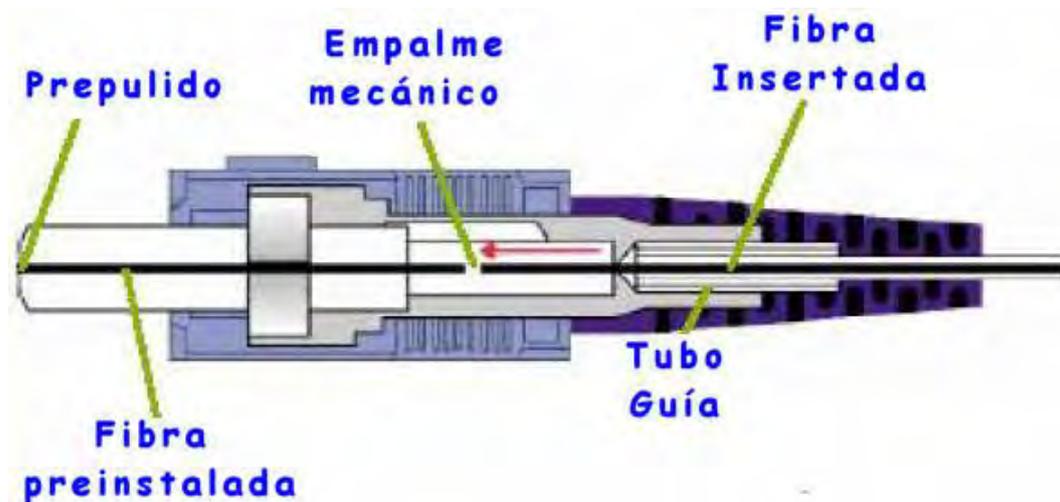




Figura. No. 8.40 Imágenes de un manguito para empalme mecánico de fibra óptica, tres empalmes con diferentes fibras ópticas, y la estructura de un empalme mecánico y dos fibras con empalme mecánico.

Fuentes: Empalmes mecánico. (2019).

Disponible: <http://www.estec.cl/productos/catalogo/181.fibra-optica/488.accesorios/empalme-mecanico-trimerx-1196.html>. Normativa de diseño de planta externa Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNTEP, 2018..

Tanto para los empalmes por fusión o mecánicos, se debe realizar la comprobación del empalme mediante señal. Para el caso de empalme por fusión esta comprobación la realiza la misma *fusionadora*, mientras que para el caso de empalmes mecánicos esta comprobación se realiza una vez terminado el empalme, utilizando un generador de luz triple y un medidor de intensidad luminosa con interfaz óptico.

8.14 Compendio etapas de empalme

Con el propósito de contextualizar lo referente a las etapas principales a seguir en los empalmes ópticos, descritos con detalle anteriormente, en la figura No. 8.41 se hace un compendio esquemático de estas etapas, indicando las protecciones más utilizadas para estos tipos de empalmes. Para el sellado del correspondiente manguito se emplea adhesivo o resina de secad rápido. ⁽²⁸⁾

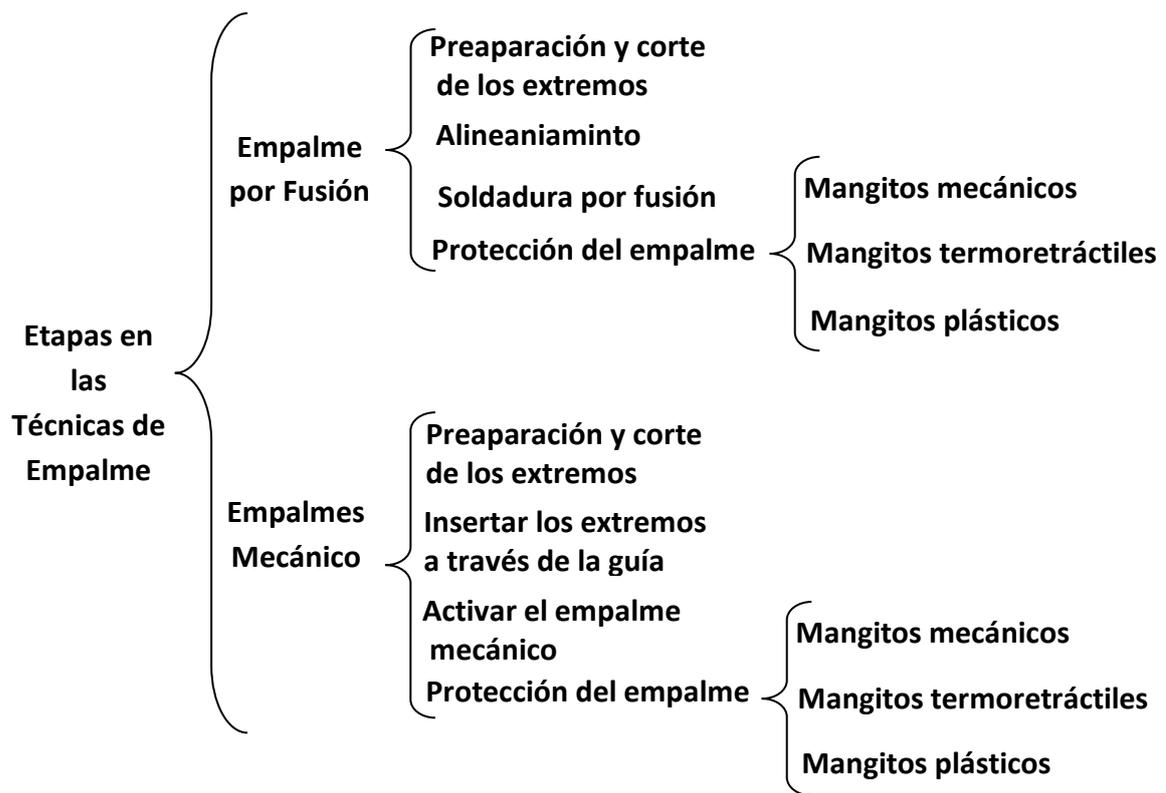


Figura No.8.41 Compendio de etapas en los procesos de empalmes ópticos.

8.15 Fabricación de la fibra óptica

Como se ha venido mencionando, el material de la *fibra óptica* (núcleo) es esencialmente de cristal (vidrio) o de plástico. Aunque el proceso de fabricación de la *fibra óptica* puede tener ciertos aspectos comunes, tanto para de vidrio como para de plástico, existen ciertas particularidades en cada uno de estos procesos. A continuación, se indican, de manera general, los pasos básicos de cada uno de estos procesos, para el caso de la fabricación de una *fibra óptica* simple.

8.15.1 Fabricación de la fibra óptica de vidrio

Para este caso el material con que se fabrica la *fibra óptica* es el cristal óptico de una pureza extremadamente alta (totalmente transparente), para una longitud de

onda determinada, que permita que la luz se pueda propagar eficientemente, además que facilite la producción de fibras muy delgadas, flexibles y largas.

En forma simplificada la fabricación de fibra óptica de vidrio se realiza en tres grandes pasos:

- Creación de un tubo sólido cilíndrico de entre unos 60 a 120 cm de largo y un diámetro de entre 10 y 25 mm, denominado *preformado*.
- La creación de la fibra óptica propiamente dicha mediante un procedimiento de estirado con la posterior aplicación de un revestimiento primario.
- Por último, las pruebas y medidas.

Existen varios métodos de fabricación de la *fibra óptica* de vidrio, cuyo proceso general se podría puntualizar en las siguientes etapas. ⁽²⁹⁾

1. *abricación del cilindro de cristal*: consiste en la fabricación de una varilla cilíndrica sólida de vidrio. Esta varilla es la conocida como el *preformado*. Se logra mediante un método denominado como: deposición de vapor químico modificado MC D (*Modified Chemical Vapor Deposition*), el cual utiliza químicos altamente puros, tales como el tetracloruro de silicio y tetracloruro de germanio. Para lograr un determinado índice de refracción del núcleo de la fibra, se emplean en proporciones variables estos químicos en la elaboración del *preformado*. En la figura No. 8.42 se hace una representación del esquema elemental de un proceso de la fabricación del *preformado*.

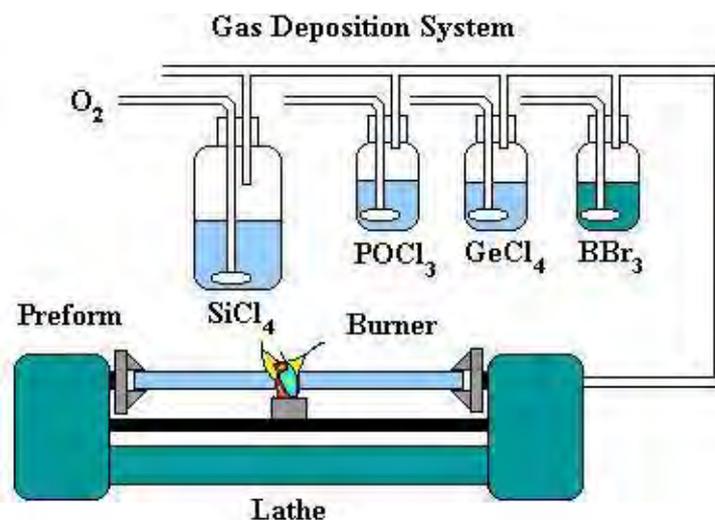


Figura.8.42 Esquema elemental de un proceso de la fabricación del preformado.

Fuente: Fabricación fibra óptica. (2019). Disponible: <http://lafibraoptica Peru.com> fabricacion-y-materiales-de-la-fibra-optica .

El porcentaje de los químicos, en la combinación de estos, depende de las características que se desee de la fibra: el índice de refracción, el coeficiente de la extensión, el punto de fusión, entre otras. Los vapores del gas resultante de la combinación de los químicos se conducen al interior de un tubo sintético con revestimiento, ya sea de silicio o de cuarzo, posicionado en un torno giratorio especial (*at e*). El torno hace girar al tubo, el cual es expuesto a un proceso de calentamiento (1.400°C a 1.600°C) mediante un quemador de hidrógeno y oxígeno (*Burner*), lográndose que:⁽³⁰⁾

- El silicio y el germanio reaccionen con el oxígeno, creando dióxido del silicio (SiO_2) y dióxido del germanio (GeO_2).
- En el interior del tubo se combinan el dióxido del silicio y el dióxido del germanio fundiéndose, debido al calentamiento, lográndose formar el cristal (*performado*).

En la figura No. 8.43 se ilustra una imagen de un proceso de calentamiento para lograr el *preformado*.

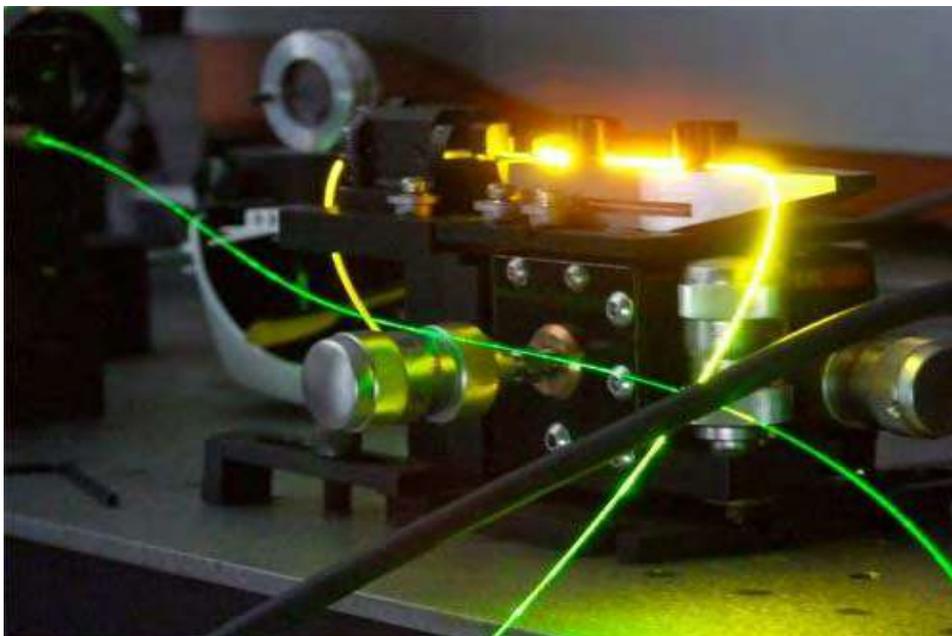


Figura.No. 8.43 Imagen de un proceso de calentamiento para lograr el preformado.

Fuente: Empalmes fibra óptica. (2019). Disponible:

<http://.xata.aciencia.com/tecnologia/como-se-fabrica-la-fibra-optica>

Para lograr un *preformado* uniforme, el torno hace girar al tubo en forma constante y para lograr el mantenimiento de la pureza del cristal se emplea un plástico resistente a la corrosión en el sistema de la entrega del vapor de gas y controlando el flujo y la composición de la combinación.

Además del método de fabricación del *preformado*, denominado MC D y referenciado anteriormente, existen otros métodos para lograr este resultado, entre los cuales están: AD (*Vapor Axial eposition*), O D (*utside Vapor eposition*), PC D (*lasma C emical Vapor eposition*), entre otros.

2. *xtracción de las fibras*: una vez hechas los *preformados*, se colocan verticalmente y se calientan por un horno (*urnace*), hasta que se van fundiendo formando un hillo continuo. El tramo inicial de la fibra resultante del *preformado* es enroscado por un operador en un carrete. El carrete jala lentamente la fibra, cuya velocidad de tirado es controlada por un micrómetro láser, el cuál mide el diámetro de la fibra y envía esta información al mecanismo del tractor, lográndose de esta forma mantener un tirado uniforme y de esta manera también el diámetro de la fibra. De un *preformado* se obtienen varios kilómetros de fibra. En la figura No. 8.44 se muestra un esquema simplificado de este proceso de extracción de las fibras ópticas.

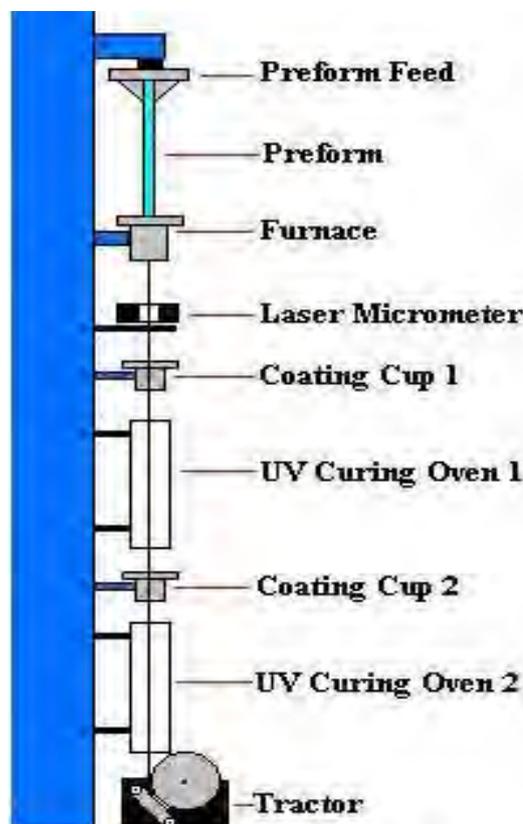


Figura No. 8.44 Esquema simplificado de un proceso de extracción de las fibras ópticas.

Fuente: Extracción de fibra óptica. (2019). Disponible:
<https://ropalmaromera.wordpress.com/fabricacion>

La velocidad de tirado de la fibra es de unos 10 a 20 m/s, cuyo control es completamente automatizado. En la figura No. 8.45 se muestran unas imágenes de la obtención final de las fibras ópticas. En la imagen izquierda de una sola fibra y de varias en la imagen derecha.



Figura No. 8.45 Imágenes extracción de las fibras ópticas.

Fuente: Extracción de la fibra óptica. (2019). Disponible:
<http://infotechnology.com/negocios/Como-se-fabrican-los-cables-de-fibra-optica-las-fotos-del-proceso-c>

3. *Trenado, encauchado y etiquetado del cable óptico*: cuando así se requiera se realiza el trenzado entre varias fibras. Ya sean varias fibras o una sola, se realiza posteriormente la encauchado del cable óptico que consiste en el cubrimiento de este con una capa externa protectora de polietileno de color negro, generalmente, o del color que se desee. En seguida viene la etapa de etiquetado del cable óptico, donde se registra información deseada, tal como: características del cable, cantidad del tiraje del cable y algunas veces el nombre de cliente. Para cada uno de estos tres procesos se emplea máquinas específicas para cada uno de ellos. En la figura No. 8.46 se muestra en la primera imagen el trenzado de varios cables ópticos, en la segunda el proceso del cubrimiento del cable óptico con la capa externa protectora y en la imagen inferior la rotulada respectiva.



Figura No. 8.46 Imágenes del trenzado de varios cables ópticos, de la encauchada de la capa externa protectora y de la etiquetada del cable óptico.

Fuente: Trenzado cables ópticos. (2019). Disponible: http://www.telnet-ri.es_p-content/uploads/2018/10/10bLinea-de-montaje-SMD.jpg.

4. *rueba de la fibra óptica acabada*: una vez finalizado el proceso de fabricación del cable óptico se le realizan las diferentes pruebas de calidad, entre las que se destacan las siguientes: ⁽³¹⁾, ⁽³²⁾

- *uer a extensible*: debe soportar 100.000 lb in² o más.
- *erfil del índice de refracción*: Determina el índice de refracción y el grado de impurezas en la fibra.
- *eometría de la fibra*: Se ve que el diámetro de base, las dimensiones del revestimiento y el diámetro de capa son uniformes.
- *Atenuación*: Determina el grado de degradación que sufren las señales luminosas de varias longitudes de onda a una cierta distancia.

- *Capacidad de carga de información* (ancho de banda): Número de señales que pueden ser llevadas al mismo tiempo (aplica solo a las fibras multi-modos).
- *dispersión cromática*: Extensión de varias longitudes de onda de la luz con la base (importante para la anchura de banda).
- *dependencia de la temperatura*: de la atenuación.
- *dependencia de la humedad*: de la atenuación.
- *Capacidad de conducir la luz debajo del agua*: importante para los cables submarinos”.

En la figura No. 8.47 se expone una imagen donde se muestra un centro de control de la fabricación de los cables ópticos y las pruebas de sus características estructurales y de funcionamiento.



Figura No. 8.47 Central de control de la fabricación de los cables ópticos y de pruebas de calidad del mismo.

Fuente: Manual *Manufacture of Fiber Optics*, Fiber Optics Technology Inc. 2018.

5. *Enrollamiento del cable y almacenamiento*: ya realizadas satisfactoriamente las pruebas de calidad, el cable óptico es enrollado en carretes especiales, cuya cantidad de longitud es variable, oscilando entre valores típicos de 3 a 8 m. En algunos casos esta longitud es definida con anterioridad, por un pedido previo de fabricación. En la figura No. 8.48 se exponen unas imágenes donde se

enseña, en la parte superior, unos sistemas de enrollado de los cables ópticos y en la inferior el almacenamiento de los respectivos carretes. Los sitios de acopio de estos carretes deben cumplir con ciertos requisitos mínimos de luminosidad, humedad, aireación, entre otros. El color de la cubierta del cable óptico es arbitrario, en algunos casos es solicitado por el cliente.



Figura No. 8.48 Procesos de enrollado de la fibra óptica y almacenamiento de los carretes correspondientes.

Fuente: Almacenamiento Fibra óptica. (2019). Disponible:

<http://www.infotechnology.com/negocios/Como-se-fabrican-los-cables-de-fibra-optica-las-fotos-del-proceso-completo>.

Algunos fabricantes cubren los carretes, que contienen a los cables ópticos, con unas bolsas de polietileno, con el fin de protegerlos de la intemperie, especialmente del polvo y demás partículas de suciedad que puedan existir en el medio ambiente. En la figura No. 8.49 se muestra algunos de estos carretes con dichas bolsas.



Figura No. 8.49 Carretes con cables ópticos en bolas de polietileno.

Fuente: Empaquetamiento de la Fibra óptica. (2019). Disponible: Fuente: <http://www.telnet-ri.es> sobre-telnet-ri instalaciones .

Hay que resaltar que la fabricación de la fibra óptica de vidrio es todo un proceso de alta tecnología y de extremo cuidado, ya que además de que su grosor es muy delgado (típico 125 micras) y su núcleo de unas 8 micras (para el caso de fibras monomodo), se requiere mantener su alto grado de pureza y de un núcleo completamente uniforme y homogéneo.

También hay que aclarar que, en los procesos de fabricación de fibra óptica referenciados anteriormente, no se contempla los casos en que el cable óptico requiera de estructuras específicas y o adicionales, dependiendo del tendido de la red para lo cual va hacer empleado, tales como: tendidos subterráneos, marítimos e incluso aéreos. Estos considerandos también se aplican para el caso de las fibras ópticas de plástico.

8.15.2 Fabricación de la fibra óptica de plástico

Como se ha venido mencionando, las fibras ópticas de plástico (POF: *lastic ptical iber*), se construyen con material plástico, donde generalmente el núcleo es de polimetilmetacrilato y el revestimiento de polímeros fluoruros. Son

muy económicas y flexibles, ofreciendo una gran facilidad para acomodarse a cualquier tendido que se requiera en su utilización. Sus diámetros oscilan entre 0.25 a 1.5 mm o mayor, lo que representa entre 20 a 100 veces mayor que el de la fibra óptica de vidrio. Presentan una alta atenuación (típico: 1 dB m) lo que limita su utilización a muy cortas distancias. La velocidad binaria que permiten es hasta unos 2.5 Gbps. ⁽³³⁾

Las etapas esenciales de un proceso de fabricación de fibra óptica de plástico se podrían puntualizar en los siguientes:

1. *estilación del monómero*: el monómero corresponde a una molécula de un peso relativamente bajo, que reacciona consigo mismo, o con otros compuestos también de bajo peso molecular, para formar polímeros sintéticos.
2. *olimeri ación*: corresponde al proceso por el cual los monómeros se combinan de extremo a extremo para formar un polímero.
3. *stirado*: es similar al estirado del proceso de *dobles crisol*, donde el material del polímero con índice de refracción más elevado se coloca en el crisol interior (tubo pequeño), formándose el núcleo de la fibra que se está fabricando, y el material de menor índice de refracción se coloca en el crisol exterior (tubo mayor), que se encuentra concéntrico al crisol interior, formándose la capa del revestimiento de la fibra. Estos crisoles resisten temperaturas muy elevadas (entre 500^o C a 1.500^o C). Ambos crisoles se calientan por inducción, existiendo un calibrador que permite controlar las dimensiones de la fibra (diámetros del núcleo y del revestimiento).
4. *Recubrimiento*: corresponde a la cubierta de protección, que se le coloca a la fibra, generalmente un polímero fundido.
5. *nrollamiento*: la fibra se enrolla sobre carretes específicos, a una velocidad controlada automáticamente.

Las altas pérdidas que presentan las fibras ópticas de plástico (55 dB m en el mejor de los casos) se deben principalmente a que el material utilizado para el núcleo es de plástico (polímero), los cuales no presentan una buena pureza (mala transparencia), afectando la propagación de las señales luminosas. Además, los crisoles presentan sustancias contaminantes, aumentando de esta forma la impureza de la fibra. En la figura No. 8.50 se exhibe un diagrama simplificado unos de los procesos de fabricación de fibra óptica de plástico.

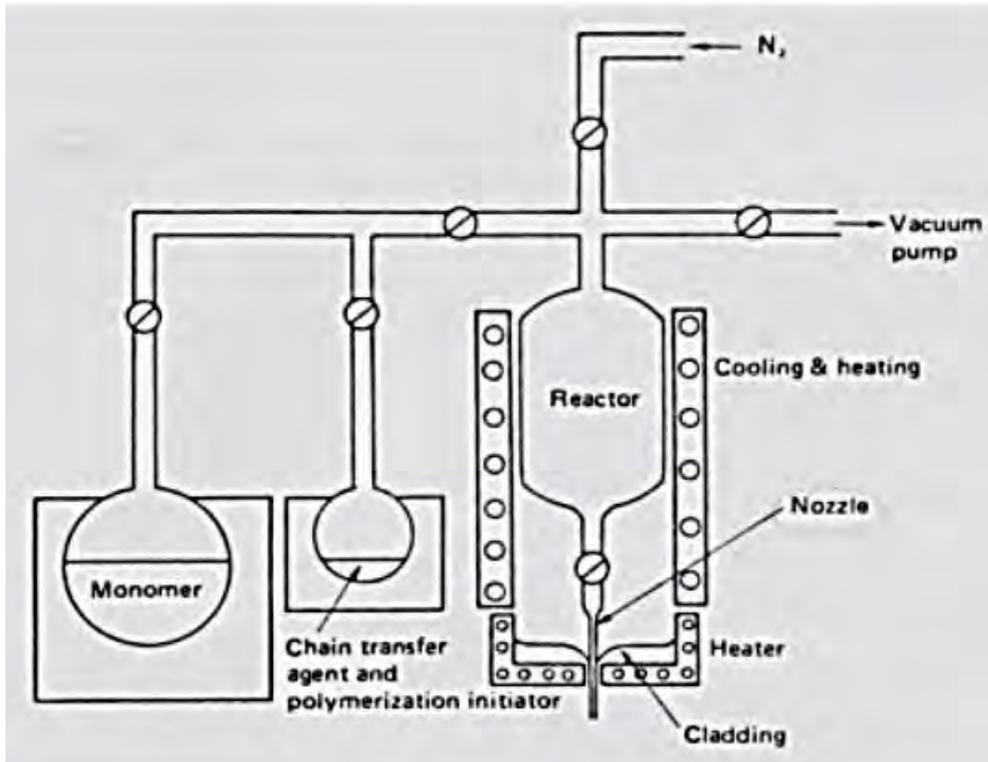


Figura No. 8.50 Esquema simplificado de la fabricación de la fibra óptica de plástico.

Fuente: Córdoba, M. / Castellarin, E., *"Procesos de fabricación de fibras ópticas"*, Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática, Ingeniería Industrial, Universidad de Belgrano, Departamento de Investigación Marzo 2015, p. 54

8.16 Mapa conceptual: fabricación de las fibras ópticas de vidrio

Con el propósito de esquematizar los diferentes métodos, que principalmente existen, para la fabricación de las fibras ópticas de vidrio, en la figura No. 8.51 se hace una representación de un mapa conceptual donde se indican estos métodos, teniendo de presente que no se contempla las etapas para el acondicionamiento que requieren los cables ópticos para tendidos de los mismos.

8.17 Características mecánicas de los cables ópticos

Como es conocido, para el caso de las redes de comunicaciones, las fibras ópticas son dispuestas en el interior de un cable formado por incorporación de varias de ellas. Para proteger al cable óptico de fuerzas de tracción y de presión, así como de la intemperie y o de los ambientes agresivos (en los tendidos subterráneos, submarinos, entre otros), se hace necesario adicionarle al cable diferentes capas y dispositivos que cumplan con tal propósito, tales como se indicaron anteriormente en la estructura de estos.

A continuación, se relacionan las principales condiciones mecánicas que deben cumplir los cables ópticos, incluyendo a las fibras ópticas que estos cables contienen:⁽³⁴⁾

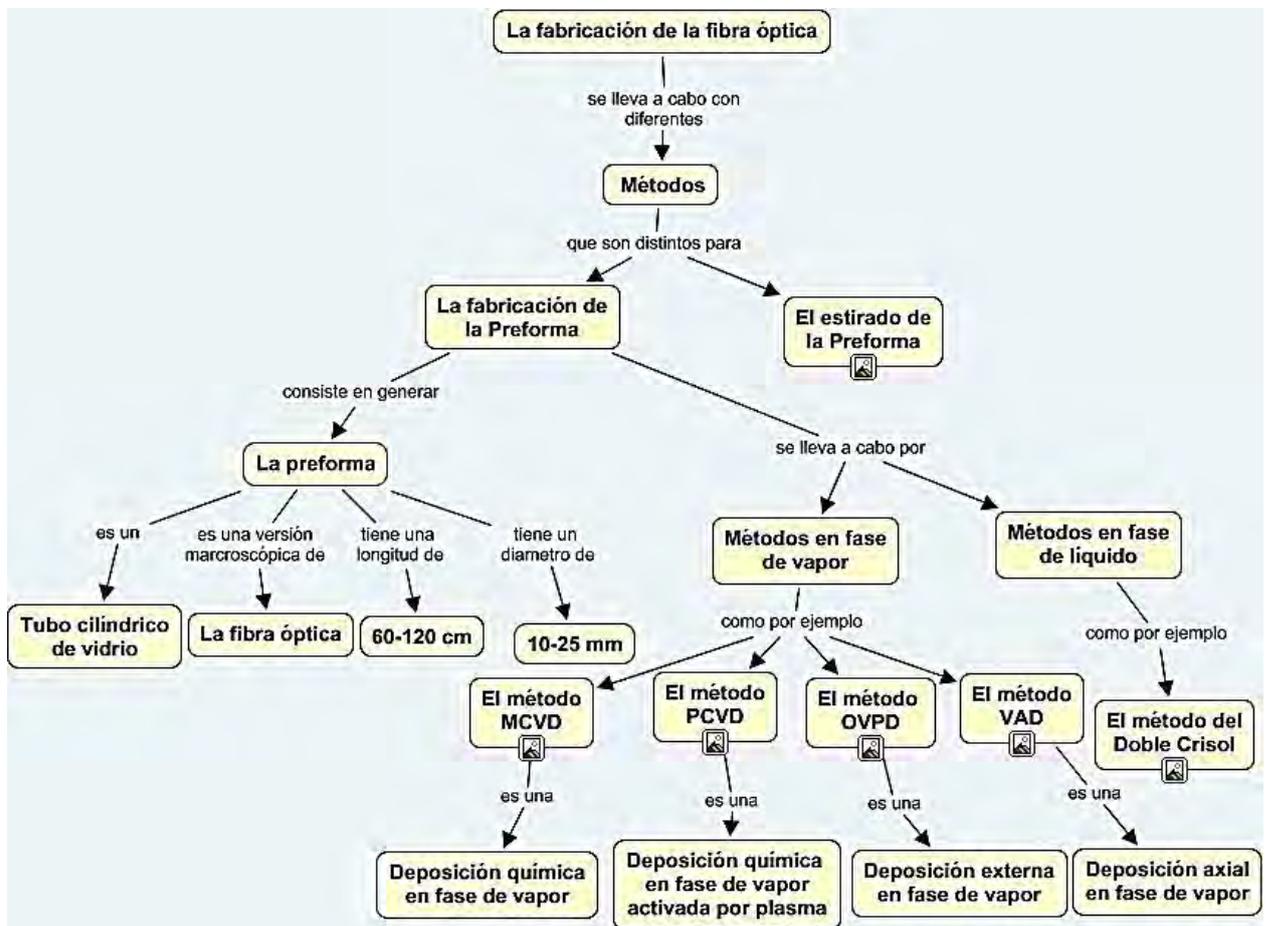


Figura No. 8.51 Mapa conceptual: fabricación de las fibras ópticas de vidrio.

Fuente: Fabricación de las fibras ópticas. (2019). Disponible:
[http://grupoorion.unex.es:8001/rid/1H/BMTTJJ-HGG/LN-1/Fabricacion 20de 20fibras 20opticas.cmap](http://grupoorion.unex.es:8001/rid/1H/BMTTJJ-HGG/LN-1/Fabricacion%20de%20fibras%20opticas.cmap)

- **Tensión:** corresponde al grado de elasticidad que disponen para soportar fuerzas de estiramiento o de contracción, sin que se rompan o se formen microcurvaturas en el cable.
- **Compresión:** atañe a los esfuerzos transversales que deben soportar el cable.
- **mpacto:** se refiere a la intensidad de los golpes que el cable puede soportar.
- **Curvatura:** concierne al máximo ángulo de doblamiento que puede soportar el cable.

- *Torsión*: compete a la cantidad de esfuerzo lateral y de tensión que puede soportar el cable.
- *Temperatura*: corresponde al margen térmico que pueden soportar el cable sin que se altere sus condiciones nominales de funcionamiento. Las fibras ópticas de vidrio soportan mayor grado de temperatura (-550°C a 250°C) que las de plástico (-40°C a 70°C).

8.18 Asignación de espectro óptico

Para las diferentes clases de redes totalmente ópticas PON (*passive optical network*) se le han asignado bandas de longitud de onda, tanto para el enlace ascendente (del usuario al servidor), como para el enlace descendente (servidor a usuario), así como para los videos RF. En la figura No. 8.52 se muestra esta asignación de espectro óptico para GPON, xG-PON, DM-PON y video RF.⁽³⁵⁾

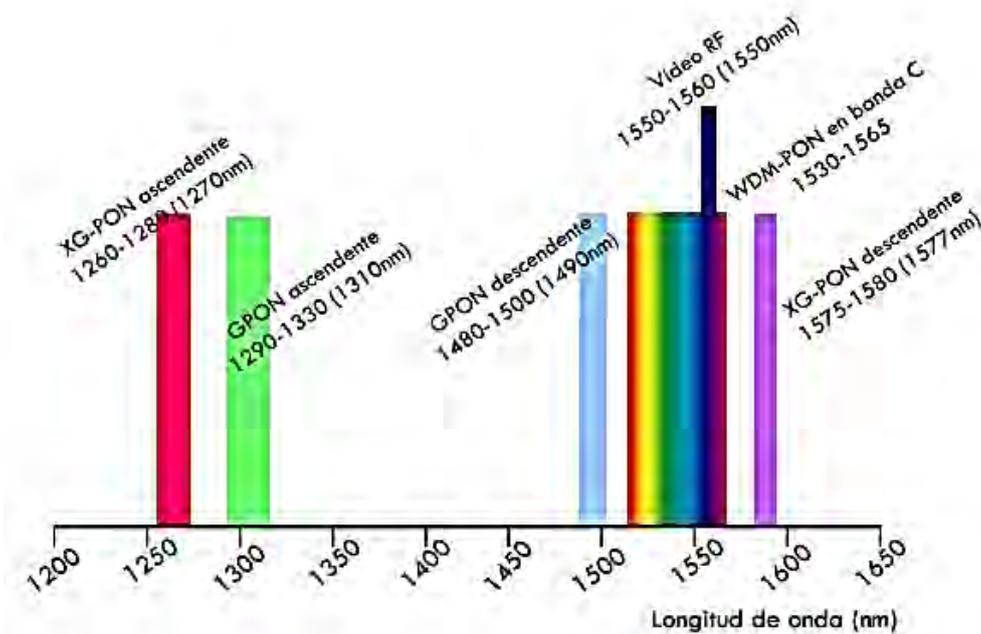


Figura No. 8.52 Asignación de espectro óptico: GPON, xG-PON, DM-PON y video RF.

Fuente: *Agarwal, G. A., "Introduction and General Concepts", Telnet, 2018.*

En la tabla No. 8.4 se relacionan los rangos de atenuación óptica recomendados por la ITU-T, para las diferentes clases de redes PON.

Clase	Rango de atenuación óptico	Recomendación ITU-T
GPON Clase A	5-20 dB	G.984.2 (2003)
GPON Clase B	10-25 dB	G.984.2 (2003)
GPON Clase C	15-30 dB	G.984.2 (2003)
GPON Clase B+	13-28 dB	G.984.2 Amendment 1 (2006)
GPON Clase C+	17-32 dB	G.984.2 Amendment 2 (2008)
XG-PON N1	14-29 dB	G.984.2 (2010)
XG-PON N2	16-31 dB	G.987.2 (2010)
XG-PON E1	18-33 dB	G.987.2 (2010)
XG-PON E2	20-35 dB	G.987.2 (2010)

Tabla No. 8.4 Rangos de atenuación para las diferentes clases de redes PON, recomendados por ITU-T

Fuente: *Agarwal, G. A., "Introduction and General Concepts", Telnet, 2018*

En la figura No. 8.53 se muestra las señales espectrales de cuatro canales ópticos multiplexados en sus correspondientes longitudes de onda y en la tabla No. 8.5 se relaciona el valor de la longitud de onda central de cada uno de estos canales con su respectiva potencia máxima en dBm.

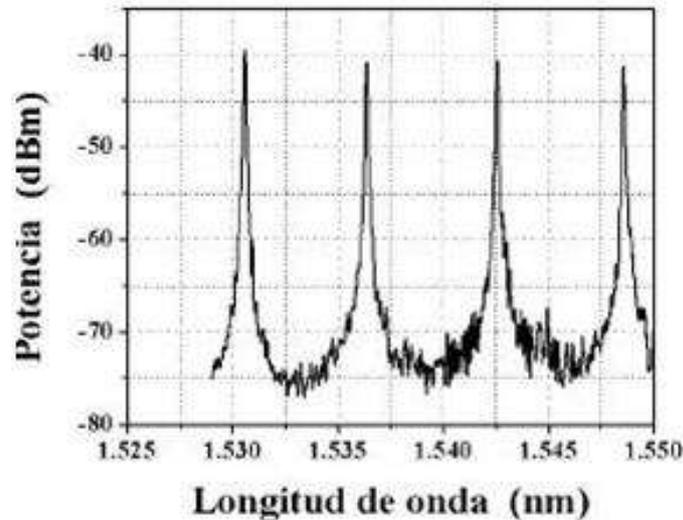


Figura No. 8.53 Señales espectrales de cuatro canales ópticos multiplexados
Fuente: P. etter (Bell Labs, Alcatel-Lucent), *ext eneration ptical Access Tec nologies*",
38th European Conference on Optical Communications (ECOC), Amsterdam, paper Tu.3.G.1,
2016.

Canal (λ)	Longitud de onda central (nm)	Potencia máxima (dBm)
λ_1	1.530,623	-39,568
λ_2	1.536,420	-40,803
λ_3	1.542,612	-40,637
λ_4	1.548,594	-41,291

Tabla No. 8.5 Potencias máximas de las cuatro señales ópticas multiplexadas.
Fuente: P. etter (Bell Labs, Alcatel-Lucent), *Next Generation Optical Access Technologies*",
38th European Conference on Optical Communications (ECOC), Amsterdam, paper Tu.3.G.1,
2017.

8.19 Dimensionamientos estructurales de la fibra y del cable óptico

El factor que más influye en el dimensionamiento estructural, tanto de la fibra como del cable óptico, es la cantidad y tipos de capas que se le adicionan para lograr una óptima protección contra la humedad, presiones, fuegos, fuerzas mecánicas, interferencias y o ruido, agresiones externas, y demás situaciones adversas que se puedan presentar en el correspondiente tendido. Lo anterior sin perjudicarsu adecuada flexibilidad para un favorable manejo e instalación.

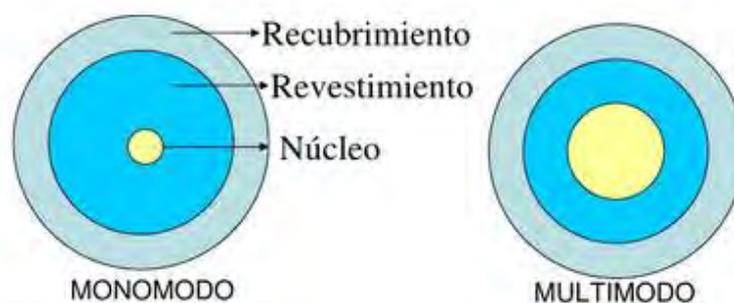
8.19.1 Dimensionamientos estructurales de la fibra óptica

Como se ha mencionado en secciones anteriores, los componentes esenciales de la fibra óptica son el núcleo, el revestimiento y la capa o capas de protección. Así mismo en algunos casos dispone de hiladuras de fibras sintéticas (aramida), colocadas periféricamente sobre la fibra óptica, para lograr conseguir la resistencia a la atracción que se le haga a la fibra.

El diámetro del núcleo está de acuerdo al modo de propagación de la fibra. Para el caso de multimodo, los valores típicos están entre 50 ó 62.5 micrómetros (micras) ó mayores. Para el caso de monomodo, el valor típico es de 10 micrómetros ó menores. El diámetro exterior del revestimiento tiene un valor típico de unas 125 micras. El diámetro de la capa protectora (recubrimiento o búfer) tiene un valor típico de 250 micras. Para el caso que la fibra óptica cuente con una capa de aramida el diámetro exterior típico de toda la fibra es de unas 900 micras. ⁽³⁶⁾

Todo lo anterior sin tener en cuenta el blindaje con que pueda contar la fibra y o de todas aquellas capas (cubiertas) adicionales que se le colocan para protegerla de las posibles agresiones de agentes externos y de las exigencias del tipo de tendido a ser sometido la fibra óptica.

En la figura 8.54, en su parte superior, se hace una representación de la sección transversal básica de una fibra óptica, para el caso de que no disponga de aramida, y en su parte inferior la de una fibra con aramida.



a.) Sección transversal de una fibra óptica sin aramida



b.) Fibra óptica con aramida

Figura 8.54 Estructuras básica de una fibra óptica.

Fuente: Cableado de fibra óptica para comunicaciones. (2019). Disponible: <http://www.fibraoptica hoy.com/cableado-de-fibra-optica-para-comunicaciones-de-datos-2a-parte/> Lain. J. M., *Curso de fibra óptica*. Telnet. 2018.

En la tabla No. 8.6 se relaciona un compendio de las dimensiones típicas de los componentes básicos de una fibra óptica, de acuerdo con su tipo de fibra. Además se indican los correspondientes valores característicos de algunos parámetros de su funcionamiento.

Tipo de Fibra	Diámetro del núcleo (um)	Diámetro de revestimiento (um)	Atenuación dB/km @ nm	Disp. cromática (nm)	Ancho banda MHz-km	Apertura Numérica
Mono-modo	9.2±0.4	125±0.7	0.36 1300 0.25 1550	1310	---	0.14
Multi-modo (50 um)	50±3	125±2	2.5 850 0.8 1300	1310	500	0.2± 0.015
Multi-modo (62.5 um)	62.5±3	125±2	3.0 850 0.7 1300	1340	200 850 500 1500	0.275± 0.015

Tabla No. 8.6 Características dimensionales y operativas de las fibras ópticas.

Fuente: Catálogo "Cables ópticos para uso exterior" Condumex Cables. 2018..

8.19.2 Dimensionamientos estructurales del cable óptico

El dimensionamiento transversal del cable óptico depende esencialmente de la cantidad de fibras que contenga y de la cantidad y tipo de cubiertas de protección que se le coloquen, esto último dependiendo de las exigencias que debe afrontar de acuerdo con el tendido a que sea sometido. En el numeral 4.14 se relacionan las principales estructuras de los cables ópticos según la cantidad de fibras con que cuentan y del tendido a que van a hacer sometidos.

En la tabla No. 8.7 se relacionan el dimensionamiento promedio de los cables ópticos con diferentes cantidades de fibras, para tendidos por ducto, charola o trinchera. Así mismo algunas características de instalación.

Número de fibras	Diámetro externo (mm)	Fibras por tubo	Peso Kg/km	Tensión Max. Instalación (N)	Prueba de compresión (N/cm)	Prueba de impacto (kg)	Radio Min. curvatura (mm)	Temperatura de operación (°C)
4,6,12,18 24, 36.	12.7±0.6	6	158	2700	300	3 (20 veces)	260	-20 a 65

Tabla No. 8.7 Características dimensionales y de instalación de los cables ópticos, con fibras monomodos, para tendidos por ducto, charola o trinchera.

Fuente: Catálogo "Cables ópticos para uso exterior" ConduMEX Cables. 2018..

En la tabla No. 8.8 se relacionan el dimensionamiento promedio de los cables ópticos con diferentes cantidades de fibras, para tendidos aéreos. Así mismo algunas características de instalación.

Número de fibras	Diámetro externo (mm)	Fibras por tubo	Peso Kg/km	Tensión Max. Instalación (N)	Prueba de Compresión (N/cm)	Prueba de impacto (kg)	Radio Min. curvatura (mm)	Temperatura de operación (°C)
4,6,12,18 24, 36.	8 a 24	6	235	5000	300	3 (20 veces)	260	-20 a 65

Tabla No. 8.8 Características dimensionales y de instalación de los cables ópticos, con fibras monomodos, para tendidos aéreos.

Fuente: Catálogo "Cables ópticos para uso exterior" ConduMEX Cables. 2018.

Estos cables ópticos son empleados para diferentes tipos de redes ópticas, sea cual fuese su tendido, dependiendo del tipo de fibra que contengan. Para el caso de que las fibras sean monomodos (unimodos: UM), se emplean, principalmente, para redes de T, de telefonía pública o servicios de transporte de información. Para el caso de que las fibras sean multimodos (MM), se emplean, principalmente, para redes locales de voz y datos, y para control industrial.

En la tabla No. 8.9 se relacionan los valores típicos de algunas de las características físicas y mecánicas de los cables ópticos utilizados para instalaciones internas y/o externas de conformación robusta y protegidos de los roedores con hilos de acero, referenciadas de acuerdo a la cantidad de fibras que

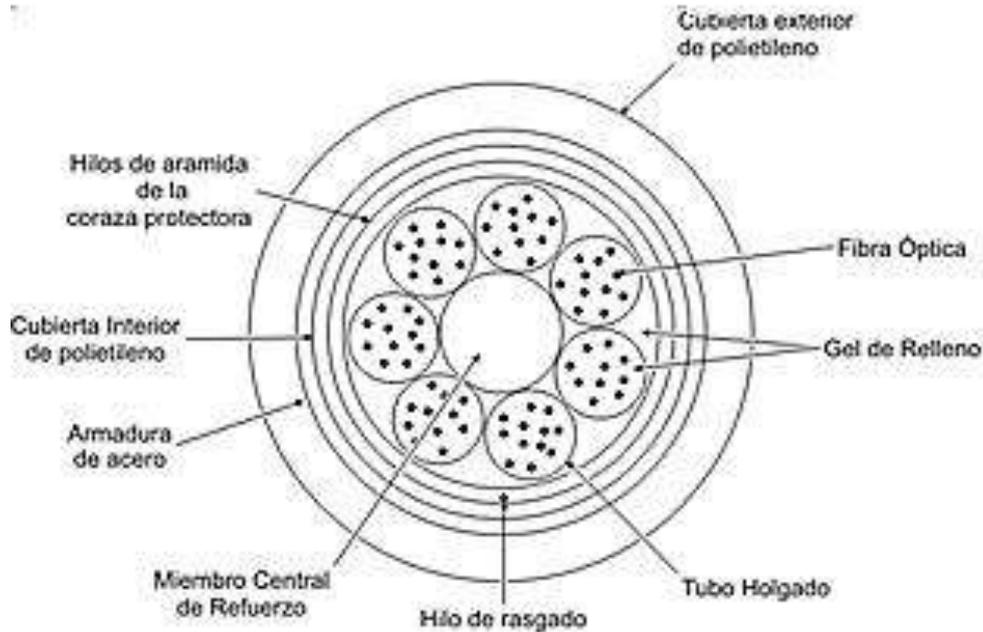


Figura No. 8.55 Sección transversal de cables ópticos submarinos.

Fuente: Benito, F., *Así es la Red de cables Submarinos que lleva Internet a todo el mundo*, Omicrono. 2017. Fibra óptica. (2018). Disponible: <http://telecomunicaciones.conocimientos.com.ve> 2018 12 fibra-optica.html

8.20 Atenuación de la señal óptica

La atenuación en una fibra óptica corresponde a la pérdida de potencia que sufre la señal luminosa al propagarse a través de ella. También es conocida como pérdida de potencia óptica. Este parámetro es uno de los más referenciados de una fibra óptica, ya que permite determinar la distancia máxima que puede propagarse la señal óptica por una fibra antes de requerirse su regeneración (máxima separación entre repetidores).⁽³⁷⁾

En el proceso de diseño e implementación de una red óptica, hay que tener muy en cuenta la atenuación que la fibra óptica le presenta a la señal luminosa de determinada longitud de onda, para saber cuántos repetidores se requieren en los enlaces respectivos, ya que a medida que el número de repetidores sea menor, se reduce los costos de implementación de los enlaces, así como los de su mantenimiento y operación.

La atenuación en las fibras ópticas se debe esencialmente a las impurezas e imperfecciones del material del núcleo de las fibras y a la longitud de onda de la señal luminosa a propagarse por las mismas. Existen otras pérdidas en el tendido de un enlace óptico, que hay que tener presente para el diseño del mismo, tales como: las interfaces entre el emisor de luz y la fibra, la de esta con el detector de luz; los empalmes; las conexiones entre la fibra y los diferentes dispositivos existentes en la trayectoria del enlace (repetidores, conmutadores,

divisores, entre otros); la de los acopladores; las producidas por los mismos dispositivos intermedios; las curvaturas y dobleces que se presenten en el tendido del cable, entre otras.

Como ya se ha referenciado, las unidades en las cuales se expresa la atenuación de las fibras ópticas son: dB / m. Para determinar la atenuación en una fibra óptica, se emplea la expresión indicada en la ecuación 8.17. Para determinar la atenuación total de la fibra (en dB), se multiplica el valor del resultado de la ecuación mencionada por la longitud total de la fibra en kilómetros.

$$\langle 8.17 \rangle \quad \alpha = \frac{10 \log_{10}(P_{in} / P_{out})}{L} \quad (dB / km)$$

α : atenuación (dB / km)

P_{in} : potencia óptica de entrada (w)

P_{out} : potencia óptica de salida (w)

L : longitud de la fibra (km)

Ejemplo 8.7

Determinar la potencia de salida de la señal óptica en el tramo de una fibra de 5 kilómetros, si su atenuación es de 0.25 dB / m y la potencia óptica de entrada es de 4 m .

Solución:

Aplicando la ecuación 8.17

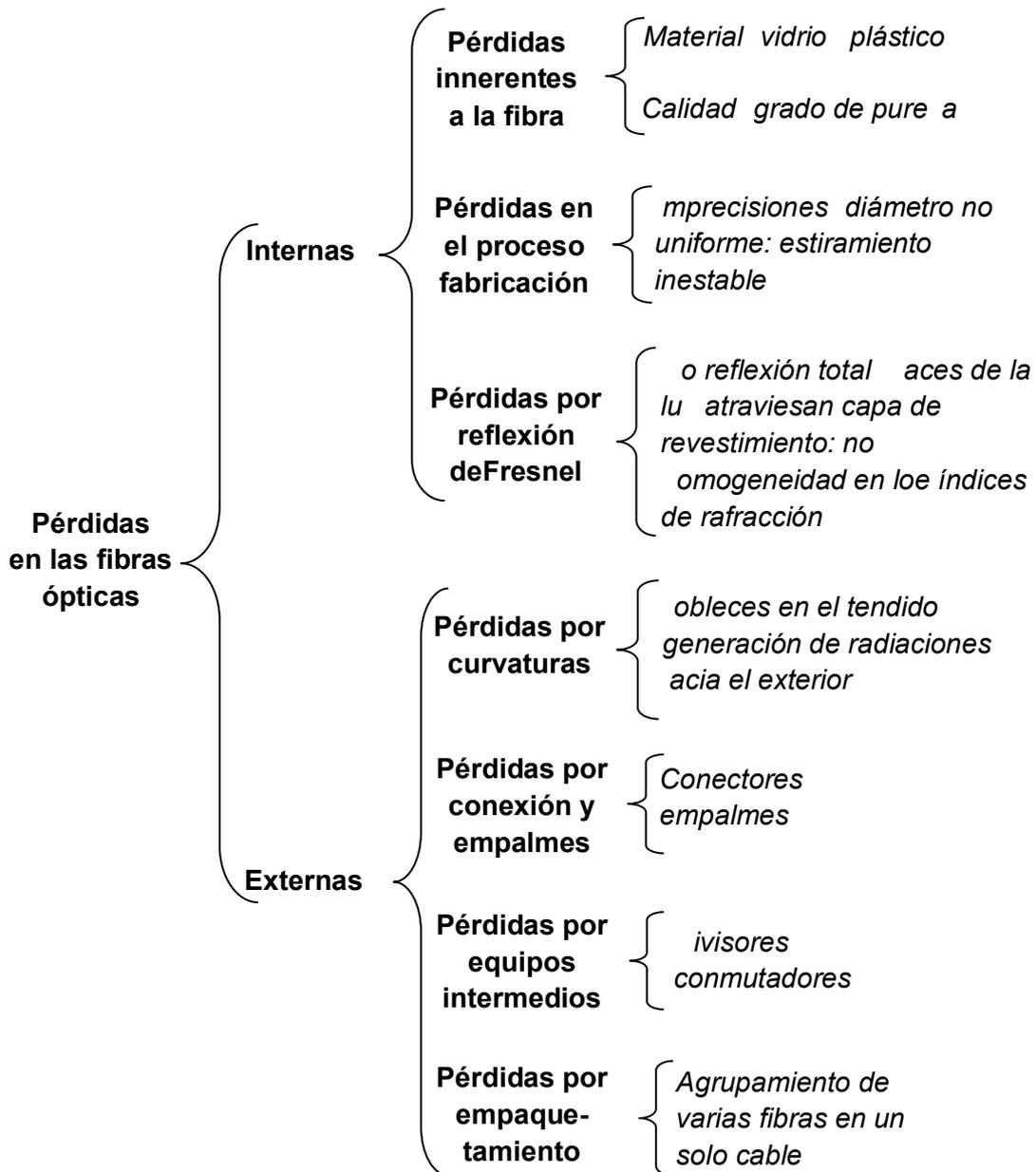
$$0.25 \text{ dB / km} = \frac{10 \log_{10}(P_{in} / P_{out})}{5} \Rightarrow P_{in} / P_{out} = 10^{0.125} = 1.33$$

$$P_{out} = P_{in} / 1.33 = 4 \text{ mW} / 1.33 = 3 \text{ mW}$$

Cada fibra óptica tiene un valor específico de atenuación dado por el fabricante respectivo. Por lo tanto, para un proceso de cálculo de pérdidas por atenuación de una fibra óptica, se debe acudir al catálogo correspondiente donde entre las diversas características de la fibra (técnicas, mecánicas y funcionales) se encuentra este valor, para una longitud de onda explícita de la señal, y en las condiciones de funcionamiento en el cual es válido este valor de atenuación. ⁽⁵⁶⁾

Como se puede apreciar de la curva continua de la figura No. 4.55, la atenuación de valor menor se presenta para el caso de que se propague, por esa fibra óptica, una señal luminosa de 1.500 nm de longitud de onda, la cual pertenece a la tercera ventana de operación.

A continuación, se hace una síntesis de los principales tipos de pérdidas que por lo general se presentan en toda fibra óptica y el tendido del enlace de esta. ⁽³⁴⁾



En la figura No. 8.9 se grafica la relación existente entre las diferentes pérdidas, por absorción y dispersión (Rayleigh), que se pueden presentar en una fibra óptica y la longitud de onda para fibras ópticas monomodos. De esta curva se

puede determinar valores de atenuación generalizados, no muy prácticos para cálculos de requerimiento muy precisos.

A continuación, se referencia la forma de calcular algunas de las pérdidas de los cables ópticos relacionadas anteriormente. Las otras pérdidas, en su mayoría, se encuentran por lo general en los catálogos de las fibras ópticas correspondientes y frecuentemente algunas de ellas están incluidas en el valor de la atenuación de estas. ⁽³⁸⁾

a.) *pérdidas por dispersión de Rayleigh* : se deben a la difracción (dispersión) que sufre la señal de luz, debido a las variaciones en la densidad óptica, composición y estructura molecular que se presenten en la fibra, originadas esencialmente en el mismo proceso de su construcción, así como por las impurezas existentes en la misma. En la figura No. 8.98 se ilustra una curva, en la que se puede hacer una determinación aproximada de estas pérdidas, en función de la longitud de onda que se transfiera por la fibra.

La intensidad de dispersión de Rayleigh, que sufre el haz de luz que se transmite por una fibra óptica, depende del tamaño de las partículas y de la longitud de onda de la señal óptica transmitida.

En la ecuación 8.18 se indica la forma de calcular la intensidad de la luz dispersa por una pequeña partícula en una señal óptica: ⁽³⁹⁾

$$\langle 8.18 \rangle \quad I = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2d^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{D}{2} \right)^6$$

I : Intensidad de la luz dispersa de la partícula (A)

*I*₀ : Intensidad de la luz de la partícula (A)

λ : Longitud de onda de la señal óptica (m)

d : Distancia a la partícula (m)

θ : Ángulo de dispersión (grados)

n = índice de refracción del núcleo de la fibra

D : diámetro de la partícula (m).

Tal como se puede observar en las curvas de pérdidas mostradas en la figura No. 8.86, las pérdidas por dispersión de Rayleigh son de menor valor a medida de que las longitudes de onda sean mayores. En la tabla No. 8.10 se relacionan

unos valores típicos de las pérdidas por absorción y por efecto Rayleigh para la segunda y tercera ventana de longitud de onda.

λ (nm)	Absorción	Rayleigh
1.300	0.05 dB/km	0.25 dB/km
1.550	0.09 dB/km	0.15 dB/km

Tabla No. 8.10 Pérdidas intrínsecas típicas: fibras ópticas monomodos

Fuente: Santa Cruz, O. M., *Parámetros de transmisión: Redes ópticas*, 2018, p.18

b.) *Pérdidas por reflexión de Fresnel*: como se indicó anteriormente, se presenta cuando algunos de los haces de la señal de luz atraviesan la capa de revestimiento de la fibra, presentándose pérdidas de la intensidad de la señal óptica que se está propagando a través del núcleo de la misma. La ecuación 8.19 indica la forma de calcular estas pérdidas.

$$\langle 8.19 \rangle \quad r_f = 10 \log_{10} \left[\frac{2 + n_1 / n_2 + n_2 / n_1}{4} \right] (dB)$$

r_f : pérdidas por reflexión de Fresnel (dB)

n_1 : índice de refracción del núcleo

n_2 : índice de refracción del revestimiento

Ejemplo No. 8.8

Para una fibra óptica cuyos índices de refracción, del núcleo y de la capa de revestimiento, son 1.4 y 1.3 respectivamente, calcular las *pérdidas por reflexión de Fresnel*.

Solución:

Empleando la ecuación 8.19

$$r_f = 10 \log_{10} \left[\frac{2 + n_1 / n_2 + n_2 / n_1}{4} \right]$$

$$= 10 \log_{10} \left[\frac{2 + 1.4 / 1.3 + 1.3 / 1.4}{4} \right] \approx 0.006 \text{ (dB)}$$

c.) *érdidas por empaquetamiento*: como también se mencionó anteriormente, se presentan en el caso del agrupamiento de varias fibras en un solo cable óptico. La ecuación 8.20 indica la forma de calcular estas pérdidas.

$$\langle 8.20 \rangle \quad e_p = 20 \log_{10} \left[\frac{\text{área activa}}{\text{área total}} \right] \text{ (dB)}$$

e_p : *pérdidas de empaquetamiento en cada fibra*

área activa : *área transversal ocupada por la fibra*

área total : *área transversal ocupada por todo el cable*

d.) *érdidas por curvaturas*: se presentan por las curvas que sufre el núcleo de la fibra (de radio de algunos pocos centímetros o menos), debido a la presión que ejercen las capas protectoras que lleva el cable y o producidas en la misma fabricación de la fibra y o en el proceso de instalación del cable, entre otras causas. El valor de este tipo de pérdidas depende del radio de la curvatura que tenga o sufra la fibra y de la longitud de onda de la señal transmitida a través de esta. En la figura No. 8.56 se muestran unas curvas que indica las pérdidas por curvatura que sufre una fibra óptica en función de la longitud de onda, para diferentes radios de curvaturas. ⁽⁴⁰⁾

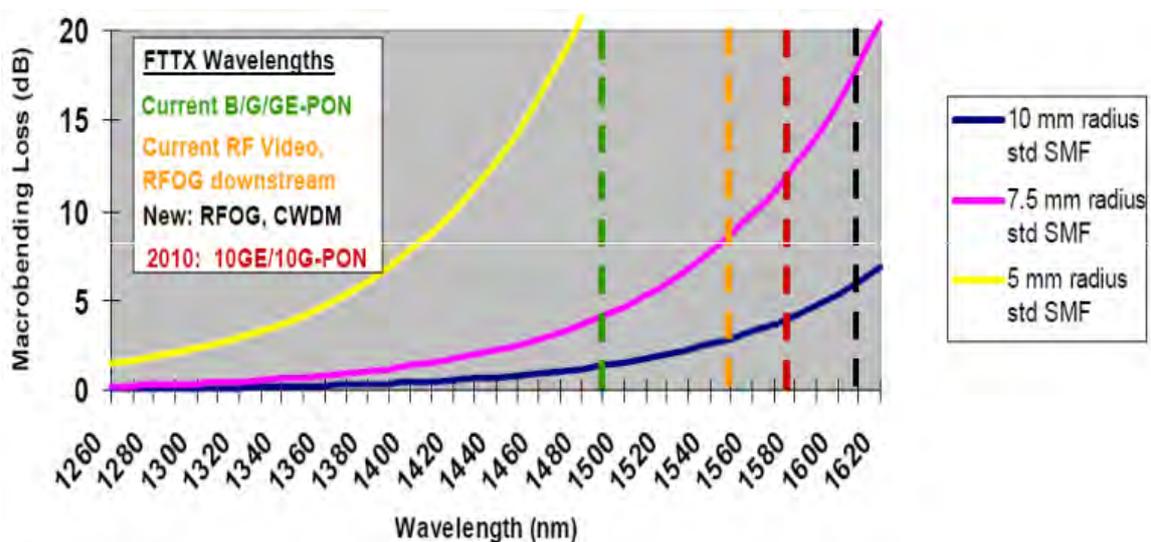


Figura No. 8.56 Pérdidas por curvatura.

Fuente: Cruz, R. F., *Fibras ópticas: Monomodo y Multimodo optimizadas frente a las curvaturas*, Furu a a. 2018.

Como se puede observar en la gráfica de pérdidas por curvatura, a medida que el arqueado de la fibra sea más pronunciado (radio de curvatura menor), las pérdidas son mayores. Así mismo a medida que la longitud de onda de la señal óptica, que se está transmitiendo, sea mayor menor son las pérdidas por curvatura.

Ejemplo No. 8.9

Determinar las pérdidas por curvatura de un enlace óptico de longitud de onda de 1.560 nm, para el caso de una curvatura de: a.) 10 mm y b.) 7.5 mm.

Solución:

Utilizando las curvas indicadas en la figura 4.104:

1.) Para una curvatura de 10 mm: 3 dB (aproximado)

2.) Para una curvatura de 7.5 mm: 8 dB (aproximado)

Las pérdidas producidas por las curvaturas generadas en el tendido del trayecto se deben: en primer lugar, por la energía disociada del frente de la onda en un punto en el que la velocidad angular de la fase del haz de luz, en el trayecto de la curvatura, excede la velocidad permitida por el medio para la luz. En segundo lugar, a la descompesación de los perfiles de los modos entre segmentos curvados y rectos de la onda, estas pérdidas son conocidas como puras y de transición respectivamente (ver figura No. 8.57).⁽⁴¹⁾ .

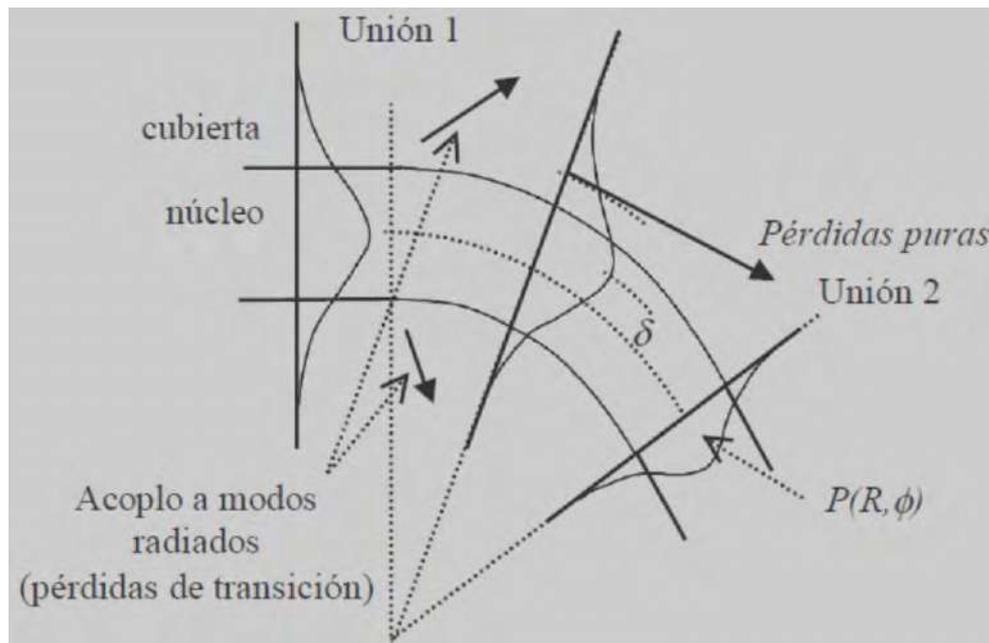


Figura No. 8.57 Representación esquemática de las pérdidas pura y de transición

Fuente: Badar, A.H., *Bent slab ray theory for power distribution in core and cladding of bent multimode optical fibres* Journal of IEEE Proceedings, vol 138, No.1, p. 11.

e.) *Pérdidas por empalme*: dependen principalmente del tipo de empalme, mecánico o por fusión. Un empalme mecánico, el cual consiste esencialmente en un conector pequeño, en forma de cilindro, de unos 6 cm de largo y 1 centímetro de diámetro, que alinea dos fibras desnudas y las asegura mecánicamente, origina pérdidas entre 0.1 a 0.8 dB. Un empalme por fusión, el cual emplea una máquina empalmadora de fusión, la cual alinea con bastante precisión las dos fibras y genera un pequeño arco eléctrico para fusionarlas, genera menos pérdidas, por lo general menores de 0.1 dB.

Ejemplo No. 8.10

La potencia inyectada a un enlace óptico a través de un diodo laser es de 0.8m y la potencia recibida en el otro extremo del enlace es de 6.96 u . La longitud del enlace es de 14 m, el cual se ha logrado mediante carretes del cable óptico de 5 m con una fibra de 0.6 dB m de pérdidas y con pérdidas de acoplamiento entre el emisor óptico y el cable óptico de 8 dB y entre el cable óptico y el receptor óptico de 2.8 dB. Determinar el número de empalmes requeridos y las pérdidas totales de los mismos.

Solución:

1. Número de empalmes.

Se emplean tres tramos de cable: de 5 m los dos primeros tramos y de 4 m el tercero. Por lo tanto, se requieren solo de dos empalmes ya que el último tramo ya llega al final del enlace.

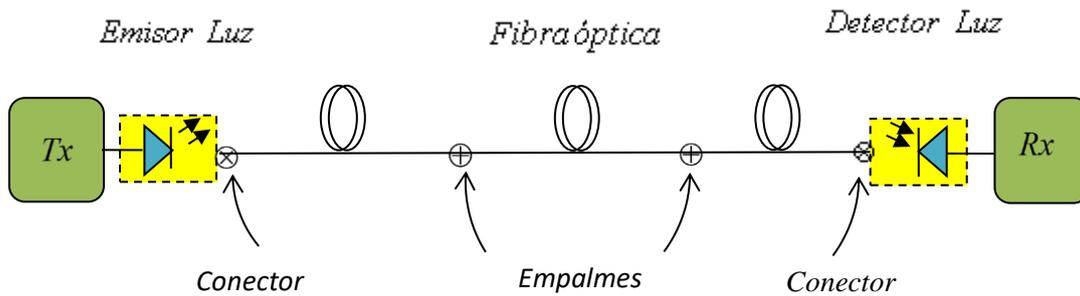


Figura 8.58 Un enlace óptico simple

2. Pérdidas por los dos empalmes:

$$P_{RX} (dB_{\mu W}) = P_{TX} (dB_{\mu W}) - L_{Total}(dB)$$

$P_{RX} (dB_{\mu W})$: Potencia en el extremo del enlace en $dB_{\mu W}$

$P_{TX} (dB_{\mu W})$: Potencia en el inicio del enlace en $dB_{\mu W}$

$L_{Total}(dB)$: Pérdidas totales del enlace en dB

$$P_{RX} (dB_{\mu W}) = 10 \log_{10} (6.96 \mu W / 1.0 \mu W) \approx 8.43 (dB_{\mu W})$$

$$P_{TX} (dB_{\mu W}) = 10 \log_{10} (800 \mu W / 1.0 \mu W) \approx 29.03 (dB_{\mu W})$$

$$L_{Total}(dB) = P_{TX} (dB_{\mu W}) - P_{RX} (dB_{\mu W}) = 29.03 - (8.43) = 20.6 (dB)$$

$$L_{Total}(dB) = L_{FO} (dB) + L_{C's} + L_{E's}$$

$$\begin{aligned} L_{E's} &= L_{Total}(dB) - L_{FO} (dB) - L_{C's} \\ &= 20.6 dB - (14 km \times 0.6 dB / km) - (8 + 2.8) dB = 1.4 (dB) \end{aligned}$$

En promedio cada uno de los dos empalmes tiene unas pérdidas de 0.7 dB, al parecer son de tipo mecánico,

8.21 Medición de atenuación en la fibra óptica

Una de las mediciones más comunes en un enlace óptico es la atenuación o pérdidas que se presenta en los diferentes tramos del enlace. Para esta medición se dispone especialmente de los medidores de potencia óptica (OLTs) y de los reflectómetros ópticos (OTDR).

8.21.1 Medidor de potencia óptica

Un OLTs (Optical Loss Test Set: Conjunto de medida de pérdidas ópticas), esta conformado esencialmente por: una fuente de luz estable con emisiones de diferentes longitudes de onda y un medidor de potencia, con posibilidad de determinar la corriente que emite la fuente. Para mayor confiabilidad de los resultados, se recomienda que las medidas de potencia deban hacerse en forma bidireccional y en todas las longitudes de ondas previstas de transmisión. En la figura No. 8.59 se muestran unos OLTsexistentes en el mercado



Figura No. 8.59 Sets de medidores de potencia óptica OLTs.

Fuente: OLTs. (2019). Disponible: <https://es.aliexpress.com/wholesale-optical-power-meters.html>

Para determinar la atenuación total del enlace se realizan básicamente los siguientes pasos: (42)

1. Se mide la potencia de salida del OLT que se va a utilizar como fuente de luz. Para ello se coloca otro OLT como medidor de potencia a la salida del que se va

a utilizar como fuente de luz, sintonizados ambos dispositivos a la misma longitud de onda y utilizando los mismos jumper y acopladores a ser utilizados en la medición de la atenuación total. Se activa la fuente de luz y se mide su potencia de salida, la cual corresponde a la que va a ser utilizada como entrada a la entrada del enlace total.

2. Se mide la potencia en extremo final del enlace, colocando en el extremo inicial del enlace un OLT funcionado como fuente de luz y en el otro extremo otro OLT funcionado como medidor de potencia (ver figura No. 8.60). Se activa la fuente de luz y se mide la potencia en el extremo final del enlace, con el respectivo medidor, ambos dispositivos sintonizados a la misma longitud de onda.

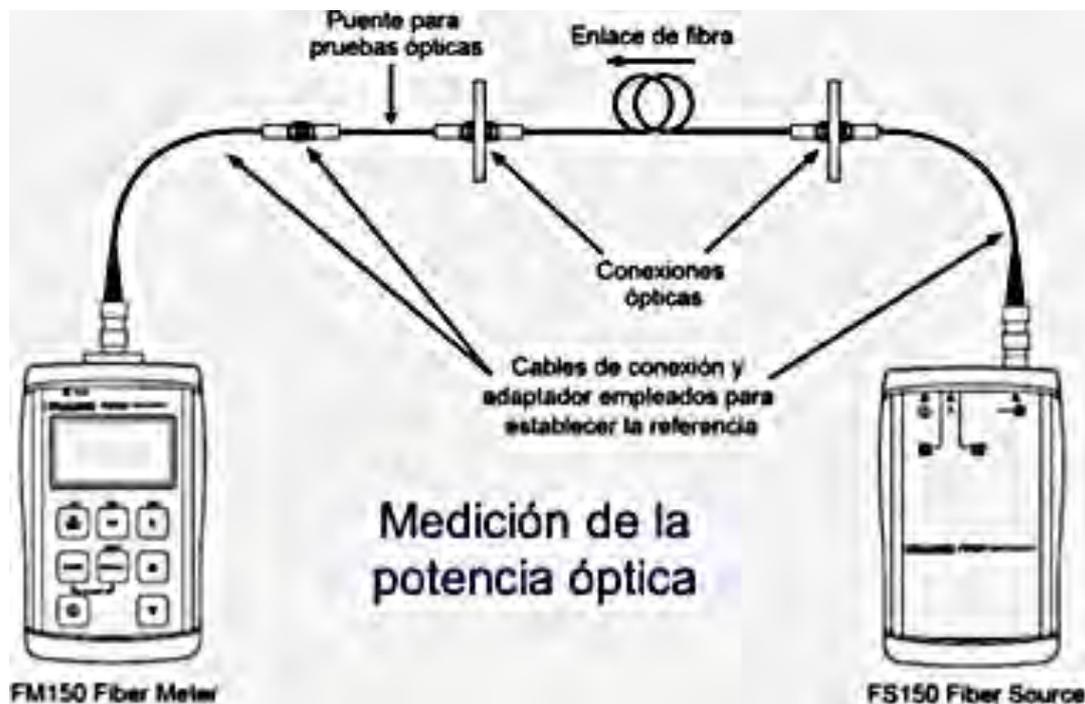


Figura No. 8.60 Medición de atenuación total de un enlace óptico
Fuente: Matesanz, M. A., "Medición de atenuación total de un tramo (Medición de potencia)",
Conectónica, 2017, p. 5.

3. A la potencia medida en el extremo final del enlace hay que agregarle la potencia pérdida por el acoplador y jumper utilizado en este extremo, la que corresponde a las pérdidas que producen estos elementos, las cuales deben ser determinadas previamente.

4. La atenuación total del enlace corresponde a la diferencia de potencias (la suministrada a la entrada menos la potencia definitiva a la salida del enlace).

5. En el caso de que en el enlace únicamente existan empalmes, la sola atenuación de la fibra óptica corresponderá a la atenuación total del enlace menos las atenuaciones de los empalmes existentes en el mismo.

Ejemplo No. 8.11

Supóngase un enlace óptico de 5 km sin empalmes. La potencia medida en la salida de la conexión óptica del extremo inicial del enlace, al lado derecho del esquema indicado en la figura 4.107, donde se encuentra la fuente óptica (OLT trabajando como generador óptico), es de 680 μW y la potencia registrada en el OLT funcionando como medidor de potencia extremo posterior del enlace es de 262 μW y las pérdidas del acoplador y del jumper utilizado en este extremo es de 1.8 dB. Determinar las pérdidas por km de la fibra utilizada en el enlace.

Solución:

$$P_{out}(dB_{\mu W}) + L_{acople}(dB) = P_{in}(dB_{\mu W}) - L_{FO}(dB)$$

$P_{out}(dB_{\mu W})$: Potencia registrada en el OLT (medidor de potencia)

$L_{acople}(db)$: Pérdidas del acoplador y del jumper del OLT
(medidor de potencia)

$P_{in}(dB_{\mu W})$: Potencia de entrada a la fibra dada por el OLT
(fuente óptica)

$L_{FO}(dB)$: pérdidas del tramo total de la fibra óptica

$$L_{FO}(dB) = P_{in}(dB_{\mu W}) - P_{out}(dB_{\mu W}) - L_{acople}(dB)$$

$$\begin{aligned} L_{FO}(dB) &= 10 \log_{10}(680 \mu W / 1 \mu W) - 10 \log_{10}(262 \mu W / 1 \mu W) - 1.8 dB \\ &= 2.25 dB \end{aligned}$$

$$L_{FO}(dB / km) = 2.25 dB / 5 km = 0.45 (dB / km)$$

8.21.2 Reflectómetro óptico

Un OTDR (Optical Time Domain Reflectometer): Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo está conformado esencialmente por una fuente luminosa y un receptor-analizador óptico. Es utilizado para estimar la longitud de la fibra, y su atenuación, incluyendo pérdidas por empalmes y conectores. También puede ser utilizado para detectar fallos, tales como roturas de la fibra. En la figura No. 8.61 se ilustra un OTDR. ⁽⁴³⁾



Figura No. 8.61 Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR)

Fuente: Manual: OTDR A 7270, Yokogawa, 2018.

Su operación consiste básicamente en conectarlo al extremo inicial del enlace óptico y en el otro extremo del enlace poncharlo con un conector reflector óptico. Al activarlo, una serie de pulsos ópticos se inyecta a la fibra que la recorre hasta su final. Posteriormente el equipo recibe y analiza las señales que han sido retornadas, reproduciendo en su pantalla una gráfica *Atenuación vs. distancia*, en donde quedan registradas las atenuaciones existentes en la fibra, tales como por curvaturas, empalmes, entre otras. La intensidad del pulso retornado es integrada como una función del tiempo, y representada en función de la longitud de la fibra.

Mediante la ecuación 8.21 se puede calcular las pérdidas totales (atenuación A_{Total}), para el caso de que el enlace solo cuente con empalmes y conexiones

$$\langle 8.21 \rangle \quad A_{Total} = \alpha_{FO}L + \sum_{i=1}^n \alpha_{ei} + \sum_{j=1}^m \alpha_{cj}$$

α_{FO} : Atenuación nominal de la fibra óptica por km (dB / km)

L : Longitud total de la fibra óptica (km)

n : n – ésimo empalme

α_{ei} : atenuación nominal del i – ésimo empalme (dB)

m : m – ésimo conector

α_{cj} : atenuación nominal del j – ésimo conector (dB)

Ejemplo No. 8.12

Determinar las pérdidas por empalme que tiene un enlace óptico de 19 m, el cual utiliza una fibra de 9 125 un, con una señal luminosa en 1.330 nm de longitud de onda. Las pérdidas totales del enlace son de 21.8 dB, el de la fibra es de 0.46 dB m, las pérdidas de las interfaces de la fibra con el emisor y detector de luz es de 10 dB y los tramos de los carretes de la fibra son de 5 m.

Solución:

De acuerdo con la información relacionada en la tabla No. 4.7, donde se indica los alcances de las fibras ópticas (m) en función de la longitud de onda de la señal luminosa y del tipo de fibra, para el caso de la fibra y la longitud de onda a ser utilizadas no se requiere de repetidora para el alcance de este enlace.

Como no se dice lo contrario el enlace no dispone de ningún dispositivo intermedio, por lo tanto, se puede aplicar la ecuación 8.21:

$$21.8 \text{ dB} = (0.56 \text{ dB / km})(19 \text{ km}) + \sum_{i=1}^n \alpha_{ei} + 10 \text{ dB}$$

$$\text{Pérdidas totales por empalmes } \sum_{i=1}^n \alpha_{ei} = 1.16 \text{ dB}$$

Para un enlace de 19 m con carretes de 5 m de fibra se requieren 4 tramos de cable: 3 de 5 m y 1 de 4 m. Por lo tanto, se requieren de 3 empalmes. Suponiendo que las pérdidas de cada uno de los empalmes son igual, entonces cada uno de ellos tendrán una pérdida de 0.39 dB

8.22 Ancho de banda de las fibras ópticas

En términos generales, como se ha venido mencionando, corresponde a la capacidad del medio de transmisión para transportar información. En el caso de la fibra óptica se da en valores normalizado a un kilómetro y corresponde a la menor anchura de banda de la fibra óptica que el fabricante recomienda para su operación. El valor más típico de ancho de banda de las fibras ópticas es el 80 MHz x m. Sin embargo, hay fibras con ancho de banda mayor.

Las pérdidas de una fibra óptica son inversamente proporcionales a su ancho de banda. De tal manera que a mayor ancho de banda las pérdidas serán menores. El ancho de banda de la fibra óptica monomodo es mayor que el de multimodo.

Para el caso de fibra monomodo su ancho de banda está limitado por el ancho de banda modal y el por el ancho de banda cromática. En la ecuación 8.22 se relaciona la expresión para calcular el ancho de banda de una fibra monomodo.

$$\langle 8.22 \rangle \quad B_{total} = \frac{1}{B_{modal}^2} + \frac{1}{B_{cromática}^2}$$

Para el caso de fibra multimodo su ancho de banda está limitado por la dispersión total de los pulsos en la fibra o sea por ensanchamiento del pulso. Si la dispersión es grande, los pulsos adyacentes se interpolan entre sí, produciéndose interferencias entre los símbolos, lo cual es un factor limitante para la capacidad de transmisión de la fibra. A mayor tasa de transmisión binaria, se reduce el periodo de la señal de pulsos y por lo tanto se incrementa el efecto de la dispersión. Como solo se requiere transmitir el componente fundamental del pulso que corresponde a la onda cuadrada, para el caso de transmisión de pulsos (señal digital), entonces el ancho de banda B de la fibra es igual al inverso del periodo T de la señal de pulsos (ver ecuación 8.23).

$$\langle 8.23 \rangle \quad B = \frac{1}{T}$$

Para el caso más crítico, que corresponde cuando se presenta la máxima velocidad de transmisión de pulsos, se tiene que la dispersión total Δt (retardo del pulso) es igual a la mitad del periodo T (ver figura No.8.62 y ecuación 8.24).

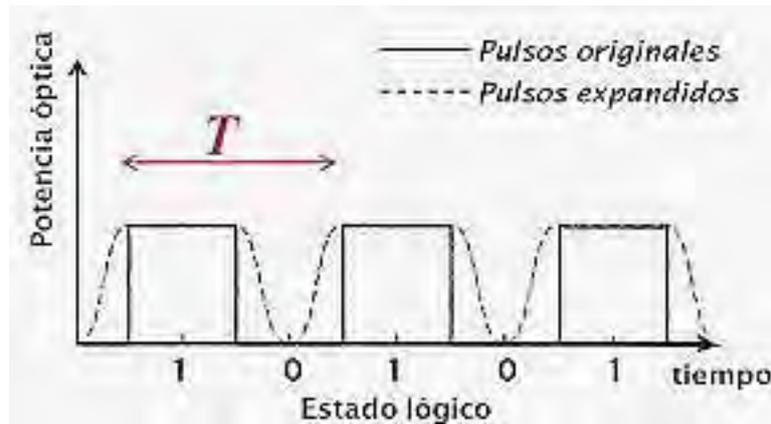


Figura. No. 8.62 Pulsos originales y pulsos expandidos.

Fuente: Características de las fibras ópticas. (2019). Disponible:
<http://www.conectronica.com/fibra-optica/curso-fibra-optica/caracteristicas-de-las-fibras-opticas>.

$$\langle 8.24 \rangle \quad \Delta t = \frac{T}{2}$$

Si se despeja el periodo T de la ecuación 8.24 y se reemplaza en la ecuación 8.23, se tiene que el ancho de banda de la fibra esta dada por la ecuación 8.25.

$$\langle 8.25 \rangle \quad B = \frac{1}{2\Delta t}$$

Según Nyquist, la máxima capacidad de transmisión C nominal para un canal de fibra óptica, para señales digitales, esta dado por el doble de su ancho de banda (ver ecuación 8.26)

$$\langle 8.26 \rangle \quad C = 2B$$

Generalmente, para las fibras ópticas, el ancho de banda se indica por kilómetro (MHz x kilómetro). En la tabla No. 8.11 se relaciona algunos valores de este ancho de banda para diferentes características estructurales y de operación de las fibras ópticas. ⁽⁴⁵⁾

Diámetro del Núcleo μm	Recubrimiento μm	NA	Atenuación dB/km 850nm	Ancho de banda Mhz-Km
1000	1250	0.20	10	20
800	1000	0.20	10	20
600	750	0.20	10	20

600	620	0.37	6	9
400	500	0.20	10	20
200	240	0.26	10	20
200	230	0.37	6	17
125	200	0.29	5	20
100	150	0.20	5	25
100	150	0.20	5	25
100	140	0.29	5	20

Tabla No. 8.11 Anchos de banda (MHz x kilómetro) para diferentes características estructurales y de operación de las fibras ópticas.

Fuente: Tipos de fibra óptica. (2019). Disponible: <http://lafibraoptica-peru.com/tipos-de-fibra-optica-las-fibras-multimodos>

Ejemplo No.8.13

En un enlace óptico de 5 km de trayecto, se transmite una aplicación digital con velocidad de 622 Mbps, determinar el ancho de banda óptico por kilómetro requerido mínimo de la fibra.

Solución:

Utilizando la ecuación 4.26:

$$B = \frac{C}{2} = \frac{622 \text{ Mbps}}{2} = 311 \text{ MHz}$$

$$B(\text{MHz} \cdot \text{km}) = 311 \times 4 = 1.244 \text{ MHz} \cdot \text{km}$$

Ejemplo No. 8.14

Calcular la capacidad (velocidad) máxima de transmisión binaria que puede soportar un enlace óptico de 48 km de trayectoria, si el ancho de banda máximo de la fibra es de 25.69 GHz. m.

Solución:

Aplicando la ecuación 4.26 para ancho de banda en: MHz x kilómetro:

$$\begin{aligned} C &= 2B(\text{MHz} \cdot \text{km}) / \text{km} \\ &= 2 \times 25.69 (\text{GHz} \cdot \text{km}) / 48 (\text{km}) = 1.07 (\text{Gbps}) \end{aligned}$$

Como se puede apreciar del ejemplo anterior, la capacidad máxima de transmisión que puede soportar un enlace óptico es inversamente proporcional a la distancia del trayecto del enlace.

8.23 Tiempo de subida de total del pulso óptico

Corresponde al tiempo total que requiere el pulso óptico para ocupar todo el trayecto de la fibra del enlace, desde que el pulso sale del emisor óptico hasta que el detector óptico lo reproduce.

Todo pulso cuadrado tiene un tiempo de subida hasta que obtiene su valor estacionario (ver figura No. 8.63). Esta situación se presenta tanto en los emisores como en los detectores ópticos, lo que afecta la tasa de transmisión máxima, ya que estos tiempos limitan la rapidez a la que se transmiten los pulsos, limitando así la velocidad de transmisión de estos. ⁽⁴⁶⁾

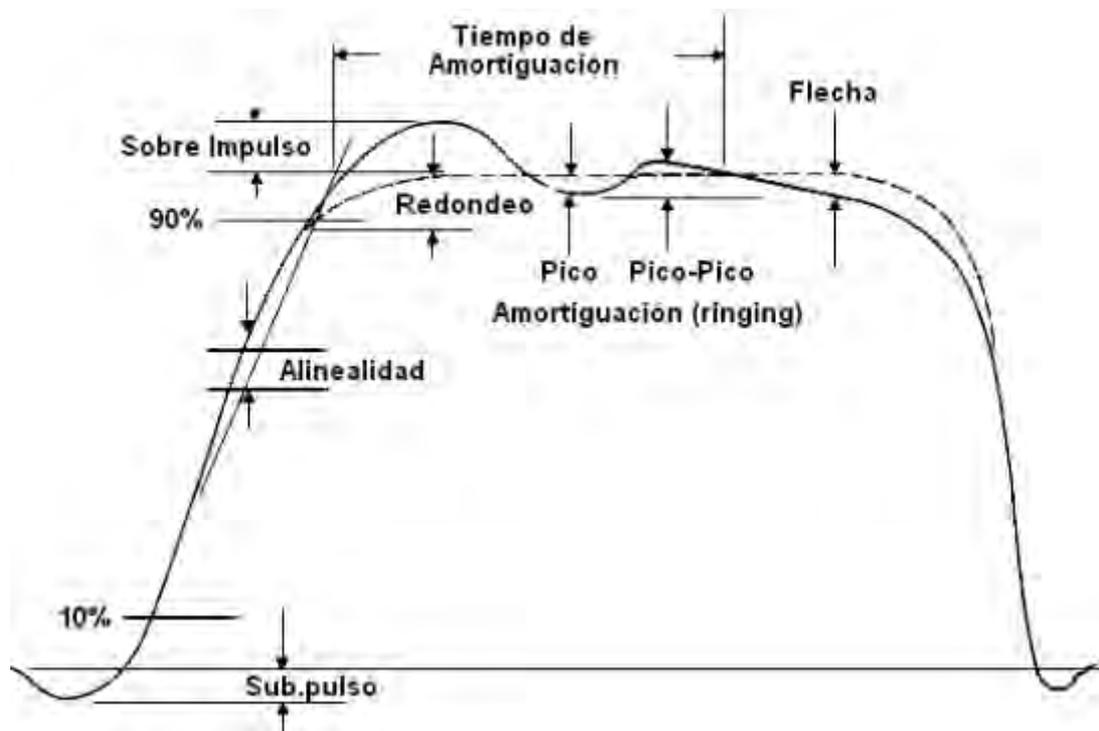


Figura No. 8.63 Tiempo de subida de un pulso cuadrado

Fuente: Caracterización de un Pulso. (2019). Disponible:
<http://1.frm.utn.edu.ar/medidase2/variopulso.pdf>.

El tiempo de subida total del pulso óptico está constituido: por el tiempo de subida cuando el pulso sale del emisor óptico (tiempo de subida del transmisor), por el tiempo de subida cuando el pulso llega al detector óptico y por el tiempo que requiere el pulso para dispersarse en toda la fibra. En la ecuación No. 8.27 se

indica la forma de calcular el tiempo de subida total del pulso (tiempo que dura el pulso en el enlace total).

$$\langle 8.27 \rangle T_T = \sqrt{T_{TX}^2 + T_{RX}^2 + T_f^2}$$

Donde:

T_T : tiempo de subida total del pulso (s)

T_{TX} : tiempo de subida del transmisor (s)

T_{RX} : tiempo de subida del receptor (s)

T_f : tiempo de dispersión del pulso en la fibra (s)

Ejemplo No. 8.15

Calcular la tasa de transmisión de datos máxima que puede soportar un enlace óptico de 50 m, el cual dispone de una fibra que dispersa los pulsos hasta 95 ns (tiempo de dispersión del pulso en toda la fibra) y de un transmisor que tiene un tiempo de subida de 48ns, y un receptor con 70 ns de tiempo de subida. Considerese que los pulsos son cuadrados (NR).

Solución:

Se aplica la ecuación No. 8.27:

$$T_T = \sqrt{T_{TX}^2 + T_{RX}^2 + T_f^2} = \sqrt{48^2 + 70^2 + 95^2} = 127.39 \text{ ns}$$

Cada bit ocupa 50km: 1bit / 50 km

$$f_b = \frac{45 \text{ km}}{127.39 \times 10^9 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ bit}}{50 \text{ km}} = 7.85 \text{ Mbps}$$

Ejemplo No. 8.16

Para un enlace óptico de 10 m, el cual utiliza una fibra que tiene un ancho de banda 480 MHz- m detreminar.

a.) La dispersión en ns m

b.) El tiempo total de subida de un pulso.

Solución:

a.) De acuerdo con la ecuación No. 8.24 la dispersión total de un pulso es (teniendo de presente que para este caso el ancho de banda esta dada en Hz-m y la dispersión en segundos metro):

$$\Delta t = \frac{1}{2B} = \frac{1}{2(480 \times 10^6) \text{ Km} / \text{s}} = 1.04 \text{ ns} / \text{km}$$

b.) Tiempo total de subida del pulso, también se puede calcular:

$$T_T = (\text{dispersión total por km})(\text{distancia total en km})$$

$$T_T = (1.04 \text{ ns} / \text{km})(10 \text{ km}) = 10.4 \text{ ns}$$

Ejemplo No. 8.17

Un enlace óptico de 30 m de distancia utiliza un detector óptico con un tiempo de subida de 2ns y un emisor de luz con un tiempo de subida de 1ns. La tasa de transmisión de datos es de 250 Mbps, con código NR . Determinar:

- a.) La máxima dispersión permitida (retardo total).
- b.) La dispersión producida por la fibra (retardo).
- c.) La dispersión máxima aceptable de la fibra (retardo).
- d.) El ancho de banda óptico de la fibra (en m).

Solución:

a.) La máxima dispersión permitida:

b.) La dispersión producida por la fibra (ecuación No. 4.37):

$$T_T \equiv \Delta t = \sqrt{T_{TX}^2 + T_{RX}^2 + T_f^2} = \sqrt{1^2 + 2^2 + T_f^2} = 4 \text{ ns}$$

$$T_f^2 = 16 - 5 = 11 \Rightarrow T_f = 3.32 \text{ ns}$$

c.) La dispersión máxima aceptable de la fibra:

$$T_f / km = 3.32 \text{ ns} / 30 \text{ km} = 0.1107 \text{ ns} / km$$

d.) El ancho de banda óptico de la fibra (por m):

$$B(km) = \frac{1}{2(0.1107 \text{ ns} / km)} = 4.52 \text{ GHz} \cdot km$$

8.24 Dispersión cromática

La dispersión cromática corresponde al retardo (deformación) espectral que sufre un pulso óptico a medida que se propaga por una fibra óptica. Este fenómeno se debe a la diferencia de retardo que se presenta entre las longitudes de ondas de mayor valor con las de las longitudes de ondas cortas. En la figura No. 8.64 se ilustra el ancho original de un pulso y el del pulso con dispersión cromática.

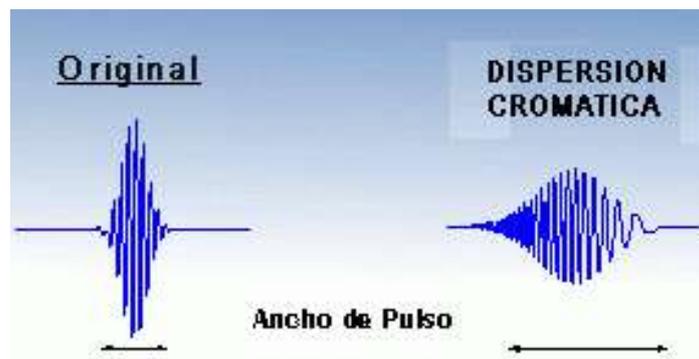


Figura No. 8.64 Ancho original de un pulso y el de un pulso con dispersión cromática.

Fuente: Ryan, J. *Optical-fiber selection considerations in an evolving system technologies*. Lightwave September 10, 2016.

La dispersión cromática está formada por la suma de dos componentes: la dispersión inherente al material de la fibra y la dispersión originada por el efecto de la guía de onda presente en la fibra. En la figura No. 4.66 se muestran las curvas correspondientes, tanto: de la dispersión de material y de guía de onda, así como resultante de estas dos que corresponde a la dispersión cromática total presente en la fibra óptica, dependiendo de la longitud de onda de la señal óptica

que se propaga por dicha fibra. La longitud de onda indicada en la figura No. 8.65 corresponde a aquella donde no se presenta dispersión cromática (1.310 nm).

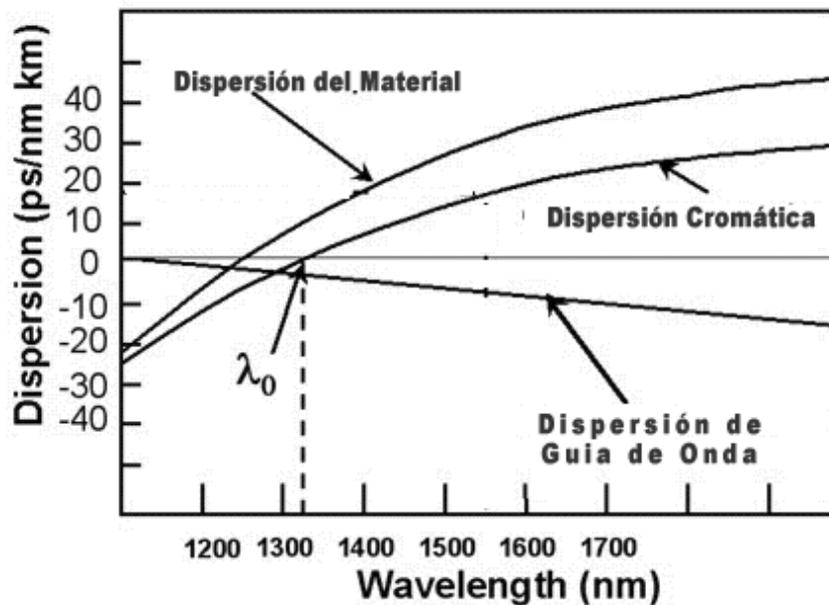


Figura No. 8.65 Dispersión cromática en una fibra óptica.
 Fuente: Ryan, J. "Optical-fiber selection considerations in an evolving system technologies". Lightwave, September 10, 2016.

La unidad de medida para la dispersión cromática es del ps nm⁻¹ km⁻¹ que indica que un pulso con una anchura espectral de un nanómetro se ensancha por un picosegundo por cada kilómetro que viaja".⁽⁴⁷⁾

La expresión matemática para calcular la dispersión cromática de los pulsos ópticos cuando se propagan por la fibra óptica está indicada en la ecuación 8.28.⁽⁴⁸⁾

$$\langle 8.28 \rangle D_c(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] (ps / nm.km)$$

Donde :

$D_c(\lambda)$: Dispersión cromática (ps / nm.km)

S_0 : Pendiente de dispersión cero (ps / nm² .km)

λ : Longitud de onda (nm)

λ_0 : Longitud de onda de dispersión cero (nm)

$$1.301 .5 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1.321 .5 \text{ nm}$$

$$S_0 \leq 0.092 (ps / nm.km)$$

El retardo total (dispersión total) Δt que sufre un pulso óptico al propagarse por la fibra, también se puede calcular en función de la dispersión cromática (ver ecuación 8.29)

$$\langle 8.29 \rangle \Delta t = D_C(\lambda) \times \Delta_\lambda \times d$$

Donde:

Δt : Retardo total del pulso (ps)

$D_C(\lambda)$: Dispersión cromática (ps/nm.km)

Δ_λ : Ancho espectral del pulso (nm)

d : Distancia recorrida del pulso (km)

Ejemplo 8.18

Si a través de una fibra óptica, se propaga un pulso óptico a 1.450 nm con un ancho espectral de 0.03 nm, determinar el retardo total (dispersión total) que sufre el pulso al recorrer 12 m.

Solución:

Por facilidad, la dispersión cromática que sufre el pulso a 1.450 nm se determina utilizando las curvas mostradas en la figura No. 4.64.

$$D_C(\lambda = 1.450 \text{ nm}) = 10 \text{ (ps / nm.km)}$$

Utilizando la ecuación 4.28, el retardo total que sufre el pulso es de:

$$\Delta t = 10 \text{ ps / (nm.km)} \times (0.03 \text{ nm}) \times (12 \text{ km}) = 3.6 \text{ ps}$$

Ejemplo No. 8.19

Un enlace óptico, la fibra óptica empleada tiene una dispersión cero para una señal óptica de 1.310 nm de longitud de onda y la pendiente de dispersión cero de 0.05 ps (nm²x m),. Determinar:⁽⁴⁹⁾

a.) La dispersión total de 46 m de la línea, para el caso de estar servida por una fuente cuyo ancho espectral del haz luminoso es de 0.2 nm a una longitud de onda de 1.600nm.

- b.) El ancho de banda de la fibra.
- c.) El producto ancho de banda por distancia de la fibra.

Solución

- a.) Dispersión total (retardo total)

Se calcula primero la dispersión cromática (ecuación 4.28)

$$D_C(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] = \frac{0.05}{4} \left[1.600 - \frac{1.310^4}{1.600^3} \right] \approx 11 \text{ (ps / nm.km)}$$

También se había podido determinar esta dispersión cromática a través de la curva indicada en la figura 4.64, para una longitud de onda de 1.600 nm, pero es más preciso empleando la ecuación.

Retardo en los 46 m de recorrido:

$$\Delta t = 11 \text{ (ps / nm.km)} \times (0.2 \text{ nm}) \times (46 \text{ km}) = 101.2 \text{ ps}$$

- b.) Ancho de banda de la fibra (ecuación 4.25):

$$B = \frac{1}{2\Delta t} = \frac{1}{2(101.2 \text{ ps})} = 4.94 \text{ GHz}$$

- c.) Producto ancho de banda por distancia (Ancho de banda por kilómetro):

$$B(\text{km}) = 4.94 \text{ GHz} \times 46 \text{ km} = 227.24 \text{ GHz.km}$$

8.25 Compendio de características de la fibra óptica

En la tabla No. 8.12 se relacionan los valores típicos de atenuación y de ancho de banda, de las fibras ópticas de acuerdo con el tipo de núcleo y revestimiento de estas. ⁽⁵¹⁾

Núcleo/revestimiento	Atenuación	Ancho de banda	Aplicaciones/Notas
Multimodo de índice gradual	@850/1300 nm	@850/1300 nm	
50 125 micrones (OM2)	3 1 dB m	500 500 MHz- m	Para láser para redes LAN GbE

50 125 micrones (OM3)	3 1 dB m	2000 500 MHz- m	Optimizada para CSEL de 850 nm
50 125 micrones (OM4)	3 1 dB m	4700 500 MHz- m	Optimizada para CSEL de 850 nm 10Gb s
62.5 125 micrones (OM1)	3 1 dB m	160-200 500 MHz- m	Fibra para red LAN (FDDI)
100 140 micrones	3 1 dB m	150 300 MHz- m	Obsoleto
Monomodo	@1310/1550 nm	@1310/1550 nm	
9 125 micrones (OS1, B1.1, o G.652)	0.4 0.25 dB m	100 Terahertz	Fibra estándar monomodo, telecomunicaciones T por cable, redes LAN de larga distancia y alta velocidad
9 125 micrones (OS2, B1.3, o G.652)	0.4 0.25 dB m	100 Terahertz	Fibra de pico de agua reducido (L P)
9 125 micrones (B2, o G.653)	0.4 0.25 dB m	100 Terahertz	Fibra con dispersión desplazada (DSF)
9 125 micrones (B1.2, o G.654)	0.4 0.25 dB m	100 Terahertz	Fibra con corte desplazado (CSF)
9 125 micrones (B4, o G.654)	0.4 0.25 dB m	100 Terahertz	Fibra con dispersión desplazada no nula (N - DSF)
Multimodo de índice escalonado	@850 nm	@850 nm	
200 240 micrones	4-6 dB m	50 MHz- m	Núcleo de vidrio con revestimiento <i>cladding</i> de plástico
Redes LAN y enlaces de baja velocidad			
Fibra óptica de plástico (POF)	@ 650 nm	@ 650 nm	
1 mm	1 dB m	5 MHz- m	Enlaces de corta distancia y de baja velocidad vehículos

Tabla No. 8.12 Atenuación y ancho de banda de las fibras ópticas de acuerdo al tipo de núcleo y revestimiento de las mismas.

Fuente: Catálogo "Guide To Fiber Optics - Premises Cabling", The Fiber Optic Association, Inc. 2018.

PREGUNTAS y EJERCICIOS

CAPÍTULO 8

Preguntas:

1. Cuál es el concepto que se tiene de la fibra óptica Cuál es su estructura básica
2. Los principales principios en los cuales se fundamentó el diseño de la *fibra óptica* y su posterior construcción y funcionamiento fueron: el *principio de uygens*, la *ley de la reflexión*, el *fenómeno de la refracción*, la *ley de Snelly la reflexión total* de las ondas En que consiste cada uno de estos principios
3. Qué se entiende por índice de refracción Cómo se puede determinar el índice de refracción de los medios
4. Cuál es la razón por lo cual la permeabilidad relativa de los medios dieléctricos es aproximadamente a uno
5. Cuál es la condición esencial por la cual se presenta reflexión total de una onda que incide en un medio determinado
6. Qué se entiende por apertura numérica (NA: *umerical Apertura*) en una fibra óptica
7. Qué se entiende por el ángulo de aceptación total, en una fibra óptica Haga una representación gráfica de este ángulo.
8. Qué se entiende por las ventanas de operación en las fibras ópticas Cuáles son los valores promedios de estas ventanas
9. Cuál es uno de los criterios más referenciados para clasificar o tipificar las fibras ópticas
10. Cómo se logra obtener un índice escalonado y un índice gradual en una fibra óptica Qué característica de funcionamiento ofrece cada uno de estos tipos de índices de refracción en las fibras ópticas
11. Cuáles son los diferentes tipos en los que se clasifican las fibras ópticas, según el criterio de la clase de dispersión que le producen a la señal óptica que por ellas se propaga
12. De qué depende, fundamentalmente, el número de modos de propagación que pueden presentarse en una fibra óptica
13. Qué se entiende por el diámetro máximo permisible del núcleo de una fibra óptica De qué depende el requerimiento del espesor de este diámetro

14. La *fibra óptica* tiene una inmensa variedad de aplicaciones. Cuáles son de estas aplicaciones las más referenciadas

15. La *fibra óptica* por sus características estructurales (delgadez y flexibilidad) y funcionales (gran ancho de banda y altas velocidades de transmisión) es muy pretendida para ser utilizada en las redes de los diferentes sistemas de comunicaciones. Cuáles son de estas redes las más referenciadas

16. Cuál es la razón fundamental por la cual los sistemas sensoriales eléctricos no son convenientes su utilización donde existen altas tensiones y o señales interferentes

17. Cuáles son los principales sistemas sensoriales en los cuales se utiliza fibra óptica para el transporte de las señales monitoreadas

18. Otras de las grandes ventajas de la utilización de la fibra óptica como fuente luminosa, es que el calor que origina es despreciable y es exenta a cortos circuitos. Cuál es la razón esencial por la cual se presenta esta situación

19. Por qué la fibra óptica es muy apropiada para ser utilizada en intervenciones médicas Cuáles son estas intervenciones

20. En la tabla No. 4.2 se indica los alcances de las fibras ópticas (en kilómetros) dependiendo de la longitud de onda de la señal luminosa y del tipo de la fibra. Cuál es el alcance máximo en cada una de las longitudes de onda y a qué tipo de fibra corresponde

21. De qué depende, esencialmente, la estructura de un cable óptico Explicar el porqué de estas estructuras para cada caso.

22. Qué tipo de empalmes ópticos existen principalmente En qué consiste cada uno de ellos Cuáles son las pérdidas típicas que presentan cada uno de ellos

23. En qué consiste cada uno de los dos principales tipos de fabricación de fibra óptica Describa sus correspondientes procesos.

24. Cuáles son las principales condiciones mecánicas que deben cumplir los cables ópticos, incluyendo a las fibras ópticas que estos cables contienen

25. Qué se entiende por atenuación de la señal óptica Cuáles son los principales tipos de atenuación que se pueden presentar en un tendido de fibra óptica Cuál es la razón que se presenten estas pérdidas en cada uno de estos casos

26. Cuáles son las razones por las cuales las fibras ópticas pueden ofrecer un ancho de banda grande y una tasa de transmisión binaria mucho mayor que los demás medios de transmisión

27. ¿Qué se entiende por tiempo de subida total del pulso? Por qué el tiempo de subida del transmisor y del receptor afecta la velocidad de transmisión de datos en un enlace óptico?

28. A qué corresponde la dispersión del pulso óptico en la fibra? Esta dispersión se produce de igual forma en todo tipo de fibra óptica y por qué?

29. Si cada pulso óptico, a una longitud de onda determinada, ocupa en cada momento toda la fibra, por qué en una misma fibra se puede mandar varias señales ópticas en un mismo momento?

30. ¿Qué se entiende por dispersión cromática de un pulso que se propaga por una fibra óptica y a qué se debe su presencia?

Ejercicios:

1. Una fibra óptica está conformada por un núcleo con un índice de refracción de 1.43 y con una capa de revestimiento de 1.35, determinar:

- El ángulo crítico.
- El ángulo de refracción si el ángulo de incidencia del rayo de luz es de 48° .
- La apertura numérica (NA).
- El ángulo de aceptación total.
- El ancho total del cono de aceptación.
- El ancho del cono de aceptación.

2. Determinar el ángulo crítico para que exista reflexión en una fibra óptica con un núcleo de índice de refracción de 1.4, y si el ancho del cono de aceptación es de 94.6° .

3. Una fibra óptica está conformada por un núcleo y una capa de revestimiento cuyos índices de refracción son 1.6 y 1.55 respectivamente, determinar:

- La velocidad de la luz en el núcleo y en el revestimiento.
- El ángulo crítico para un rayo que se mueve del núcleo al revestimiento.
- La apertura numérica.
- El ángulo máximo (a partir del eje de la fibra) al que se acepta la luz.

4. Para una fibra óptica cuyo núcleo tiene un índice de refracción de 1.29 y su revestimiento de 1.18, determinar:

- Las constantes dieléctricas del núcleo y el revestimiento.
- La velocidad de la luz en el núcleo y el revestimiento.
- El ángulo crítico.
- La apertura numérica.
- El ángulo máximo.
- El ancho del cono de aceptación.

5. Determinar la intensidad de la dispersión cromática que originan cada uno de los tres tipos de fibras ópticas monomodo: SMF, DSF y N DF. Para una señal de longitud de onda de 1.300nm.

6 Determinar la dispersión total (retrazo o incremento de tiempo) que se presenta en un enlace óptico de 50 m, si utiliza una fibra con una dispersión cromática de 8.34 ps nm. m y una fuente óptica de 2.1 nm de anchura

7. Determinar el diámetro del núcleo de una fibra óptica que se encuentra trabajando con una señal de longitud de onda de 1.48um, si las constantes de refracción son 1.6 y 1.4 del núcleo y de la capa de revestimiento, respectivamente. Para el caso de que la fibra:

- a.) Sea monomodo
- b.) De dos modos

8. Determinar el diámetro máximo que podría tener el núcleo, para una señal óptica de longitud de onda de 1.36 micrometros, de una fibra con propagación monomodo, con índice de refracción en su núcleo de 1.65 y en su revestimiento de 1.54.

9. Para una fibra óptica cuyos índices de refracción, del núcleo y de la capa de recubrimiento, son 1.58 y 1.49 respectivamente, calcular las *pérdidas por reflexión de resnel*.

10. Si el índice de refracción del revestimiento de una fibra óptica es de 1.38 y sus *pérdidas por reflexión de resnel* son 0.054 dB, determinar el índice de refracción de su núcleo.

11. Determinar las pérdidas por reflexión de Fresnel para el caso de una fibra óptica cuyos índices de reflexión, del núcleo y de la capa de revestimiento, son de 1.6 y 1.5 respectivamente.

12. Un enlace óptico de 6 m tiene un ancho de banda de 1.3 GHz- m, determinar la capacidad máxima (velocidad) de transmisión binaria que puede soportar dicho enlace.

13. Determinar la longitud máxima que puede tener un enlace óptico, si su capacidad de transmisión es de 1 Gbps y su ancho de banda es de 26 GHz- m.

14. Determinar la capacidad (velocidad) máxima de transmisión que puede soportar un enlace óptico de 52 m de trayectoria, si el ancho de banda máximo de la fibra es de 26.2 GHz. m.

15. Determinar la dispersión total que se presenta en la fibra de un enlace óptico de 48 m de longitud, la cual tiene una dispersión cromática de 8.96 ps nm⁻¹ m. El enlace dispone de una fuente luminosa con un ancho espectral de 2.2 nm.

16. Calcular la velocidad máxima de transmisión de un enlace óptico de 45 m que utiliza una fibra de 27.21 GHz, en la banda de 1.550 nm.

17. En un enlace óptico de 48 m los pulsos se dispersan hasta 110 ns. Determinar la tasa de transmisión de datos, si el tiempo de subida del transmisor es de 45 ns y el del receptor es de 70 ns. Los pulsos son cuadrados (NRZ).

18. Una fibra de un enlace óptico de 7 m tiene un ancho de banda de 550 MHz-m, determinar la dispersión que se presenta en la fibra en ns m y el tiempo de subida total del pulso.

19. Un enlace óptico de 32 m utiliza un emisor con tiempo de subida de 3 ns y un detector con tiempo de subida de 4 ns. El código empleado es NRZ con una tasa de transmisión de 260 Mbps, determinar:

- a.) La máxima dispersión permitida.
- b.) La dispersión producida por la fibra.
- c.) La dispersión máxima aceptable de la fibra.
- d.) El ancho de banda óptico de la fibra (en m).

20. El producto ancho de banda por distancia es de 520 MHz-m de una fibra óptica. Determinar la distancia máxima que se puede utilizar entre repetidoras, en el caso de requerirse un ancho de banda de 100 MHz, para un modo de transmisión en particular.

21. Determinar la tasa de transmisión de datos máxima, para el caso de un enlace de fibra óptica de 50 m, si se utiliza un transmisor que tiene un tiempo de subida de 48 ns y un receptor que tiene un tiempo de subida de 72 ns, con un código de línea NRZ.

22. Un enlace óptico, la fibra óptica empleada tiene una dispersión cero para una señal óptica de 1.310 nm de longitud de onda y la pendiente de dispersión cero de 0.05 ps (nm²x m). Determinar: ⁽⁴⁹⁾

- a.) La dispersión total de 52 m de la línea, para el caso de estar servida por una fuente cuyo ancho espectral del haz luminoso es de 0.3 nm a una longitud de onda de 1.500 nm.
- b.) El ancho de banda de la fibra.
- c.) El producto ancho de banda por distancia de la fibra.

23. Se desea transmitir una señal de T en banda base a un centro de control de tráfico situado a 2.350 metros, a través de un enlace de fibra óptica (ver figura No.4.65). Para ello se ha decidido situar a pie de cámara un transmisor óptico con potencia de 16 dBm y en el centro de control un receptor óptico con sensibilidad de potencia de -28dBm. El enlace se hará con una longitud de onda de 1.310 nm, requiriéndose 4 empalmes, cuyas pérdidas de cada uno es de 0.15 dB, y con conectores (uno con el transmisor y el otro con el receptor) de 0.7 dB cada uno. La fibra óptica para emplearse tiene una pérdida de 3.2 dB m. Determinar el margen de seguridad del enlace. ⁽⁵²⁾

Conector

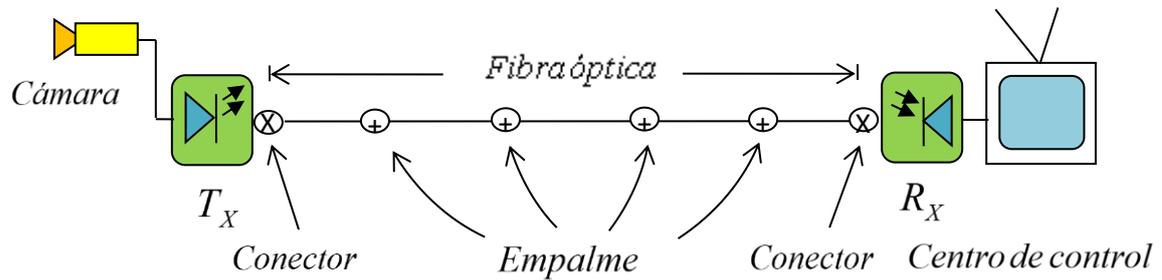


Figura No. 8.66 Enlace de FO con centro de control T

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 8

- (1) Cable submarine: Historia. (2019). Disponible:
<http://blogthinbig.com/cables-submarinos-historia> .
- (2) Otonari, C.M Tangdionga, E. Wang, H. Misani, D. Loquai, S. Ruglov, R. Charbonnier, B. Ouzzif, M. Greiss, I. Jiemann, R.O. Gaudino, A. M. Poonen, J., *Recent Results from the European Project: Multi-gigabit Transmission over 100 km Core Diameter Plastic Optical Fibers* vol. 29., No.2., January 2017, pp190-193.
- (3) Jiemann, O. Krauser, J. Lamoreaux, P.E. Daum, *Handbook of Optical Short-Range Transmission Systems*". 2nd ed., 2017, Springer, pp. 491-492.
- (4) Bauer, F. Heitfall, G., *University Physics: Modern Physics*", McGraw Hill, 2017, pp. 87-88.
- (5) Raymond Serway, Jewett J. *Physics for scientists and engineers* (6th ed.). Belmont CA: Thomson-Brooks Cole, 2017, pp. 143-144.
- (6) Goshkin N. I. Shirévich M. G., *Manual de Física Moderna*". Editorial Mir, 2016. pp. 209-210.
- (7) DeCusatis Casimer, *Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking*" Elsevier Academic Press, 2017, pp. 10-11.
- (8) Seo, S. Naoya, N. Masato, S. Renichi, S. Hiroazu, S., " *valuation of signal-to-noise ratio in optical fiber links*". Furukawa Review. 2017, pp.24-25.
- (9) Young H. D. Freedman R. A., *Física Universitaria*", Editorial Pearson Educación, México, 2017, pp. 210-211.
- (10) Santa Cruz, O., *Principios Generales del Sistema de Fibra Óptica*", 2018, pp. 9-10
- (11) Bates, Regis J., *Optical Signaling and Networking Handbook* ", Nueva York : McGraw-Hill, 2016, pp. 10-11.
- (12) Urrutia Sanhueza, P., *El efecto de dispersión en las fibras ópticas*", Ingeniería Electrónica del Pacífico S.A., 2017, pp.88-89.
- (13) Raymond Serway, Jewett J. *Physics for scientists and engineers* (6th ed.). Belmont CA: Thomson-Brooks Col, 2017, 189-190.

(14) Schulz, P.C. "Fabrication of optical waveguides by the outside vapor", deposition process, IEEE. 2016.

(15) Blaine, R., "Sistemas Electrónicos de Comunicaciones", Segunda edición, Thomson, pp. 888-889.

(16) Blumenthal, D. J., "All-optical Label Switching for the Future Internet". (2019). Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/235888275> All-Optical Label Switching for the Future Internet

(17) Ivarez, M. Berrocal, J. González, F. Pérez, R. Román, I. Álvarez, E. "Broadband Technologies and their Convergence", Telecable España, 2016, pp. 12-14.

Red CAT HFC. (2019). Disponible: <http://www.aula.ii.info/ampliacion/t3-acceso-resid-B-A.htm>.

(18) Catalog: "Installing fiber-optic cable in premises applications". Cabling Installation Maintenance. 2017.

(19) The Fiber Optic Association - Tech Topics. "Guide to fiber optics premises Cabling". FOA. 2017.

(20) Riviera F. J., "Diseño y construcción de un enlace optoelectrónico" Profesor-investigador Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2016, pp. 38-40.

(21) LANshac : Terminación de fibra óptica. Cables to Go: Guía para conectores de fibra óptica, 2017.

(22) Conectores de fibra óptica. (2019). Disponible: <http://es.slideshare.net/AndresMonroy1/conectores-de-fibra-ptica-y-terminoencogible>.

(23) Acopladores ópticos. (2019). Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml>

(24) Empalme por fusión. (2019). Disponible: <http://www.fibraoptica hoy.com/blog/empalme-por-fusion>.

(25) Thomycz, B., "Fiber optic: foundations, techniques, and applications". Third Edition, McGraw Hill, pp. 146-148.

(26) Empalme mecánico. (2019). Disponible: <http://www.gonzalonazareno.org/certired/p10f/p10f.html>.

(27) Catálogo "Como hacer un empalme mecánico de fibra óptica", Televes, 2018.

- (28) Estandarizado por la ITU-T (Internacional Telecommunication Union Telecommunication sector), en la recomendación G.694.2 en el año 2012.
- (29) Fabricación y materiales la fibra óptica. (2019). Disponible:
<http://lafibraoptica.peru.com/fabricacion-y-materiales-de-la-fibra-optica> .
- (30) Córdoba, M. Castellarin, E., *procesos de fabricación de fibras ópticas*” Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática, Ingeniería Industrial, Universidad de Belgrano, Departamento de Investigación marzo 2017, p. 10-12.
- (31) Como se fabrica la fibra óptica. (2019). Disponible:
<http://www.xataciencia.com/tecnologia/como-se-fabrica-la-fibra-optica>
- (32) Catalog. *iber optic Testing ans ac .com*”. 2018.
- (33) Características mecánicas. (2019). Disponible:
<http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml>.
- (34) Molina-Fernández, I. Ang emert-Pérez, J. G. Ortega-Moñux, A. Bosisio, R. G. *lanar ig t ave Circuit Six- ort Tec nique for ptical Measurements and C aracteri ations*”, Fello , IEEE, and e u, Fello , IEEE 2016
- (35) azovs i, L.G. Sha , .T. Gutierrez, D. Cheng, N. ong, S. ., *ext- eneration on ptical Access et or , urnal of ig t ave Tec nology*, vol. 25, n. 4, 2017, pp. 3428-3430
- (36) Recomendación ITU-T G.694.2. (2018). Disponible:
[.asga.com.br/.../003_20-20Mux_20Demux_20-20Espanhol.p..](http://www.asga.com.br/.../003_20-20Mux_20Demux_20-20Espanhol.p..)
- (37) ao, S. Ben oo, S.J. Mu herjee, B. Dixit, S., *All ptical ac et s itc ing for metropolitan area net or s: oportunities and c allenges,*” IEEE Commun. Mag., 2016, pp 39-40.
- (38) Manual: OTDR A 7270, o oga a, 2017.
- (39) Marcuse, D. *Curvature loss formula for optical fiber*”, Society of America. o. 66, No 3, pp. 216-217.
- (40) Gauthier, R. C., *T eorical and experimental considerations for a singlemode fiber optical bend type sensor*”, Applied Optics, ol. 36, No 25, pp. 6264-6265.
- (41) *Bent slab ray t eory for po er distribution in core and cladding of bent multimode optical fibres*” Journal of IEEE Proceedings, vol 138, No.1, pp. 10-11.
- (42) Lain. J. M., *Curso de ibra ptica*”. Telnet. 2018, pp.76-77.
- (43) Manual: OTDR A 7270, o oga a, 2017.

(44) Jardón, H. Linares, R., *Fiber Optic Communication Systems*", AlfaOmega, 2016, pp.71-73.

Fibra óptica. (2018). Disponible: <http://es.slideshare.net/yussting/fibra-optica-1431491>.

(45) Características de las fibras ópticas. (2019). Disponible: <http://www.conectronica.com/fibra-optica-curso-fibra-optica-caracteristicas-de-las-fibras-opticas>.

(46) Caracterización de un Pulso. (2019). Disponible: http://www1.frm.utn.edu.ar/medidase2/medidase2_varios_pulso.pdf.

(47) Ryan, J. *Optical-fiber selection considerations in evolving system technologies*". Lightwave on September 10, 2014.

(48) Dispersión cromática. (2019). Disponible: <http://lafibraoptica Peru.com/la-dispersion-cromatica-en-la-fibra-optica>

(49) Ejercicios enlaces de fibra. (2019). Disponible: <http://studyres.es/doc/2885054/ejercicios-2--enlaces-de-fibra-C3-B3ptica>

(50) Pinto García, R. A. Cabezas, A. F., *Sistemas de Comunicaciones Ópticas Monografía* ", Universidad Militar Nueva Granada, 2017, pp. 37-38 64-65 69-70.

(51) Catálogo "Guide to Fiber Optics Premises Cabling", The Fiber Optic Association, Inc. 2018.

(52) Cálculo de un enlace de fibra óptica. (2019). Disponible: <http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/optical/cap2/fibra-9.htm>

CAPÍTULO 9.

TENDIDOS DE CABLEADO ÓPTICO

9.1 Introducción

Debido al gran desarrollo tecnológico que ha tenido la fibra óptica, y todos los demás dispositivos ópticos que conforman este tipo de redes, logrando óptimos resultados en los servicios que prestan, ha generado toda una revolución en el mundo de las telecomunicaciones, orientando las tendencias de los proyectos de implementación de las redes que prestan este servicio, hacia la utilización del cableado óptico, para cualquier tipo de cobertura, siendo de especial acogida para el caso de aquellas de grandes e inmensas distancias. A este tipo de redes se les denominan *autopistas de la información*", ya que permiten velocidades de transmisión de datos del orden de los cientos de Tbps.

La temática de este capítulo se emplaza esencialmente a referenciar los principales y más conocidos tipos de tendidos del cableado óptico, orientada a los de grandes distancias, indicando los procedimientos y aspectos básicos de cada uno de ellos. Así mismo se hace referencia de algunos de los aspectos generales a tener pendiente, para cualquiera que sea el tipo de tendido. Finalmente, complementando lo visto en el capítulo anterior, se indica los criterios y procedimientos básicos para definir las características estructurales y dimensionales de los enlaces ópticos.

Al igual que los otros medios de transmisión de datos, la fibra óptica está normalizada por varios organismos internacionales de control que le establecen recomendaciones y estándares de su estructuración física, de sus características funcionales y requerimientos de instalación. Entre estos organismos se destacan:

- ITU: International Telecommunication Union
- ANSI: American National Standards Institute.
- EIA: Electronics Industry Association.
- TIA: Telecommunications Industry Association.
- ISO: International Standards Organization.
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

En el caso colombiano entre otras instituciones que establece normas para la instalación de los tendidos de cableado óptico esta la CRC: Comisión de Regulación de Comunicaciones.

9.2 Tipos de tendidos del cable óptico

Entre los principales tendidos de cableado óptico, para exteriores y distancias grandes, se cuenta con los que a continuación se relacionan:

- Tendido aéreo.
- Tendido subterráneo o canalizado.
- Tendido submarino.

9.2.1 Tendido aéreo

Existente diferentes técnicas que se utilizan para realizar los tendidos de los cables ópticos en forma aérea. Entre estas principales técnicas se tienen las que a continuación se relacionan.

9.2.1.1 Tendido aéreo a través de torres de la red eléctrica

En la generalidad de los casos, el tendido aéreo, tanto del cableado óptico, como de los otros medios de transmisión de datos guiados, se realiza aprovechando la infraestructura de las redes eléctricas aéreas, que son las que tienen más presencia y cubrimiento. La implementación de una infraestructura propia para el tendido aéreo del cableado de una red, además de los costos que demanda, presenta cierto grado de dificultades en los trámites para lograr los permisos respectivos, así como de la disponibilidad de los espacios requeridos.

En el tendido del cableado óptico a través de la infraestructura de las redes eléctricas aéreas, se emplean comúnmente tres tipos de cables ópticos, los cuales se relacionan a continuación.

1. Tendido con cable ADSS

Los cables ópticos auto sustentados totalmente dieléctricos ADSS (*All dielectric Self-Supported*), se suspenden de las líneas de alta tensión. Con estos cables se prescindió del requerimiento de los cables mensajeros, disminuyendo los costos. Estos cables evitan las interferencias de las redes eléctricas, así como las caídas de descargas atmosféricas debido a que no contienen elementos conductores. Además, cuentan con una capa externa de polietileno que cubre al cable,

protegiéndolo de la intemperie, y así mismo el elemento de tensión, atracción y sustentación es de material dieléctrico (ver figura No. 9.1). ⁽¹⁾

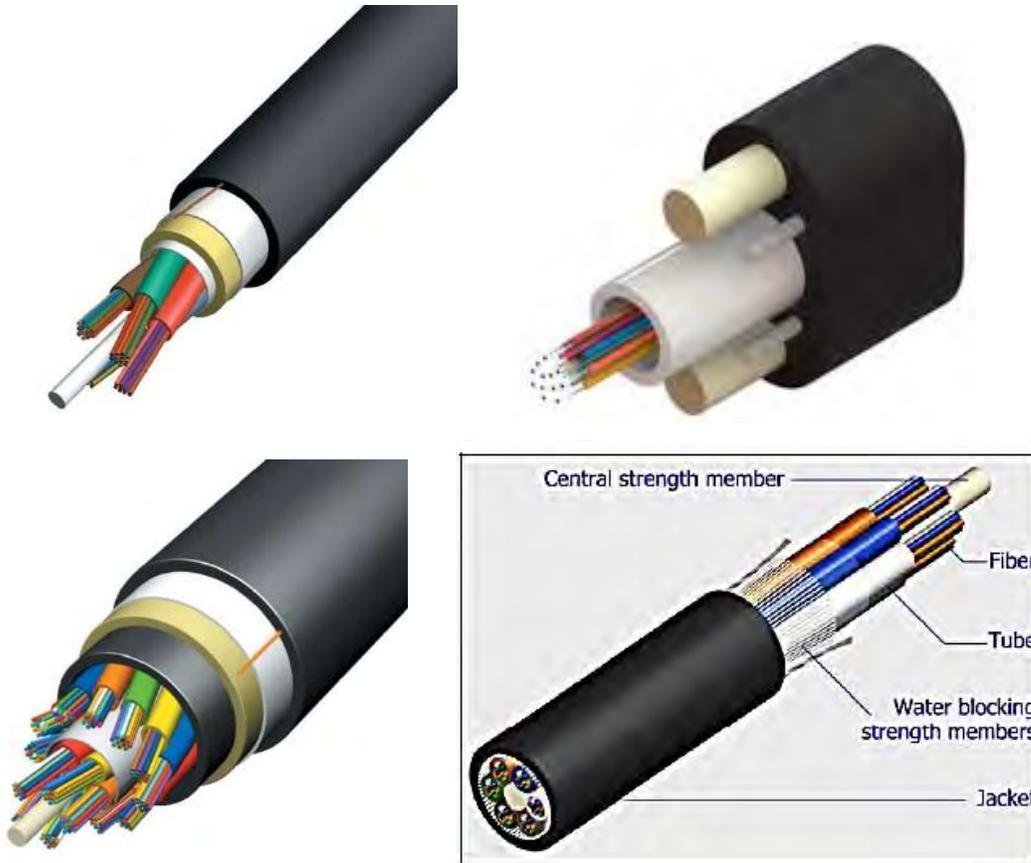


Figura No. 9.1 Fig. Cable óptico ADSS, para tendido aéreo.

Fuente: Catálogos "S S Series All dielectric Self-Supporting Fiber Cable", Teldor, 2017. ADSS Mini-Span FiberOptic Cable, 2017.

2. Tendido con cable OPGW

En los cables de guarda con fibras ópticas OPGW (Optical Ground Wire), se tiene que las fibras se extienden, holgadamente, a lo largo del interior de tubos de aluminio, de tal forma que no quedan expuestas a esfuerzos mecánicos externos. El interior de estos tubos se encuentra relleno de un compuesto tixotrópico, con el propósito de reducir la fricción en las superficies de las fibras y ofrecerle protección frente a la humedad. Por lo general este tipo de cable óptico se puede extender hasta 10 m, sin necesidad del cable de guarda que disponga la red eléctrica.

Los OPG son cables mixtos compuestos por la parte óptica (las fibras ópticas) y una parte metálica (el tubo de aluminio) constituyéndose en un sistema de tierra. Se instalan en las extremidades superiores de los postes o torres de la red eléctrica de alto voltaje. El tubo de aluminio suministra una alta conductividad eléctrica, lo cual permite la disipación de las descargas atmosféricas o de las corrientes accidentales que se presenten. Las cantidades típicas de fibras ópticas que contienen estos cables OPG son: 6, 12, 16, 24 o 48. Cada fibra óptica es cubierta por una capa plástica para protegerla de las anomalías ambientales y de la manipulación de las mismas (ver figura No. 9.2).⁽²⁾

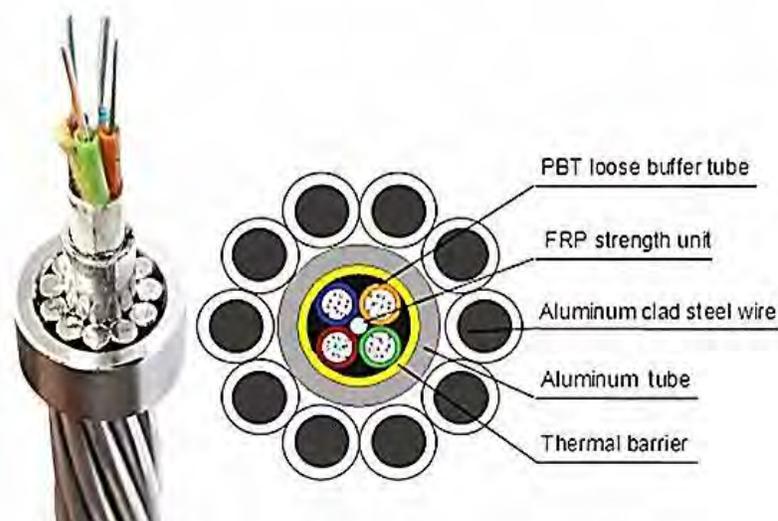


Figura No. 9.2 Cables ópticos OPG , para tendido aéreo.

Fuente: Catálogo OPG Cable System”, Prysmian, 2017 Cables ópticos OPG . (2019).

Disponible: <http://www.furukawa.co.jp/spanish/hat/2016/ene/140604.htm>.

<http://www.rnmnetconnect.com/portfolio-item/pbt-loose-tube-optical-ground-wire-opg-cable/>.

En todas las torres, el cable de guarda de los cables OPG , se ponen a tierra a través de la misma torre. En el caso de que la capa exterior del OPG sea de acero recubierto de aluminio, los herrajes que se requieren para la fijación de estos cables deberán ser también de acero recubiertos de aluminio. En el caso de que la capa exterior del OPG sea de aleación de aluminio los herrajes también deben ser de este material.

Preferiblemente los conectores de bajada y los demás dispositivos de fijación, deben ser de una estructura que no permitan que el OPG haga contacto directo con la torre. En la figura No. 9.3 se exponen unas imágenes donde se muestra la suspensión simple con sujeción a Tilla y con sujeción “cuello de cisne”. ⁽³⁾

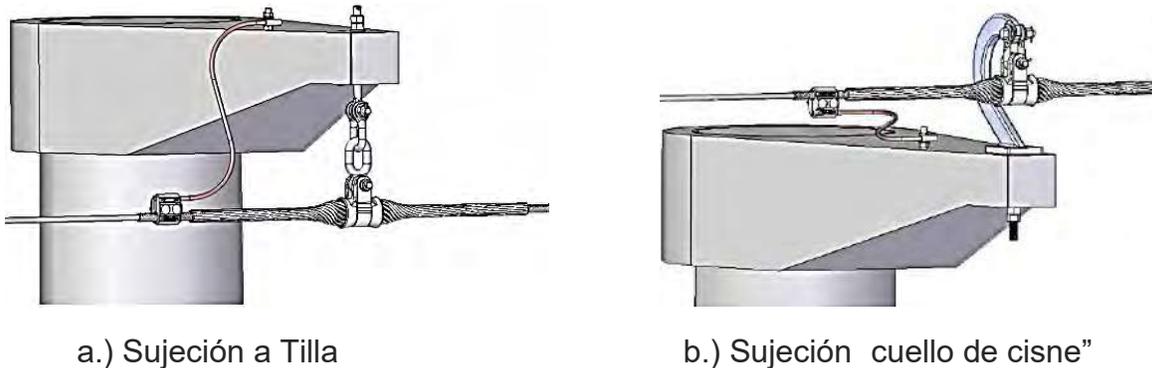
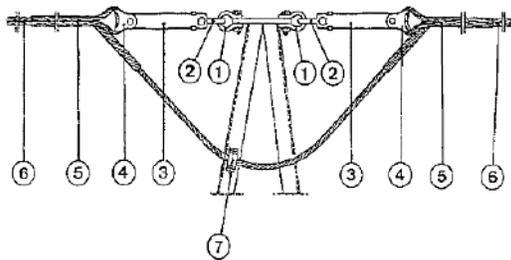


Figura No. 9.3 Suspensión simple con sujeción a Tilla y con sujeción "cuello de cisne".

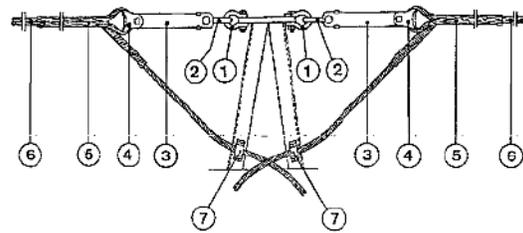
Fuente: Soluciones OPG . (2019). Disponible:

http://www.preform.com.ar/PDF/Soluciones_20OPG.pdf.

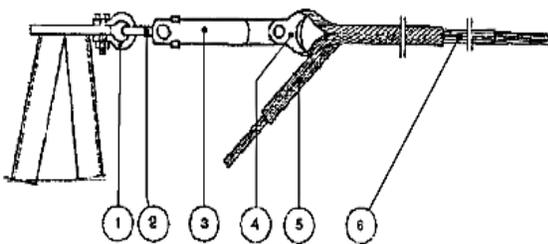
Los herrajes y las piezas de sujeción a la torre del cable OPG se ajustan generalmente a los montajes indicados en la figura No. 9.4. ⁽⁴⁾



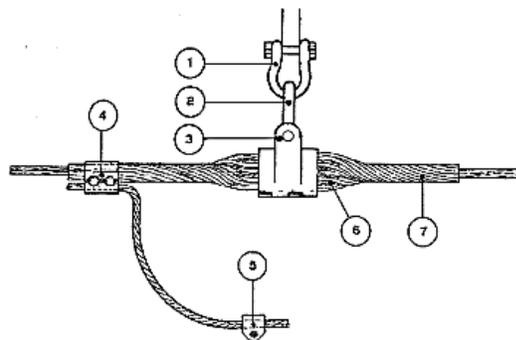
a.) Herraje conjunto bi-amarre pasante



b.) Herraje conjunto bi-amarre bajante



c.) Herraje conjunto amarre final



d.) Herraje conjunto suspensión

Figura No. 9.4 Herrajes y piezas de sujeción a la torre del cable OPG

Fuente: Especificación de CFE E0000-21, para Cables de Guarda con fibras ópticas integradas. 2017.

Para los herrajes conjunto bi-amarre pasante y bajante se tiene: 1, 2: Grillete recto; 3: Tirante; 4: Guardacabos; 5: Empalme de protección; 6: Retención de anclaje; Grapa de sujeción a tierra.

Para los herrajes conjunto amarre final y de suspensión se tiene: 1: Grillete recto; 2: Eslabón revirado; 3: Grapa de suspensión armada; 4: Grapa de conexión paralela; 5: Grapa de conexión a torre; 6: Inserción de goma; 7: arillas preformadas.

3. Tendido con cable Lashed

El cable *as ed* ostenta una estructura totalmente dieléctrica y no cuenta con un elemento de tracción propio para su soporte, requiriendo para ello de un cable metálico al cual este forzado. La instalación del cable *as ed* requiere de mayor tiempo y demanda más costos que otros cables sustentados, pero demandan un costo más bajo en su construcción, debido a que este proceso es más simple. En la figura No. 9.5 se muestra unas imágenes de cables tipo *as ed*.

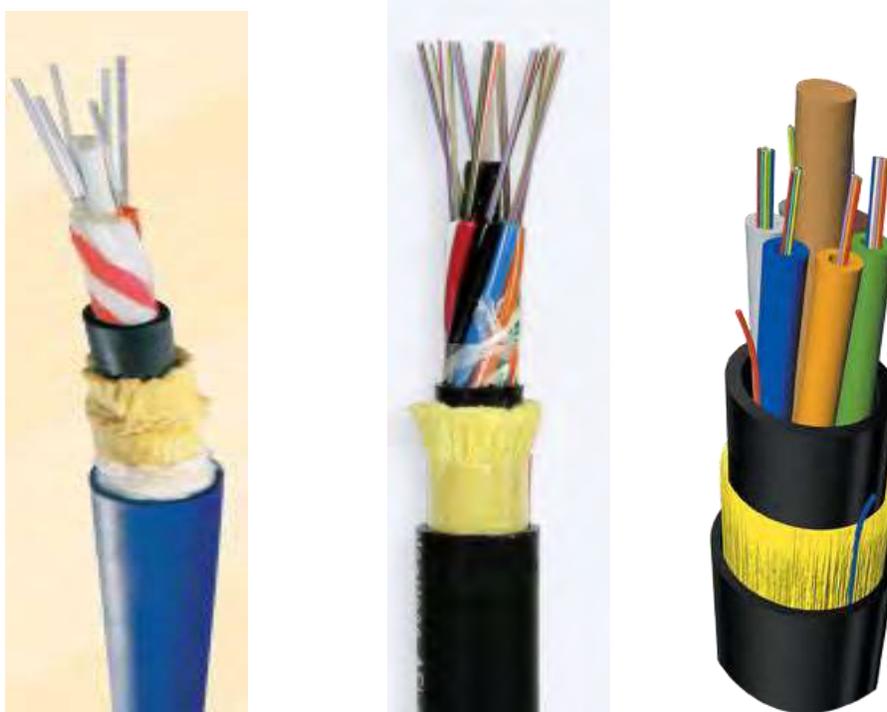


Figura No. 9.5 Cables tipo Lashed.

Fuente: Cables Lashed. Catálogo: *Aerial Iber optic Cable*", 2017

En la tabla No. 9.1 se relacionan las principales características funcionales de los tres tipos de cables ópticos, vistos anteriormente, los cuales son algunos de los que se utilizan para tendido aéreo de las redes ópticas.

Tabla comparativa de cables			
Características	ADSS	OPGW	LASHED
Confiabilidad	Alta	Alta	Baja
Independencia de pararrayo	Total	Total	Ninguna
Sobre carga estructural	Pequeña	Razonable	Pequeña
Instalación en sistema nuevo	Simple	Simple	Media
Instalación en sistema existente	Simple	Compleja	Compleja
Trabajo con tensión enganchada	Simple	Compleja	Compleja
Facilidad de mantenimiento	Fácil	Difícil	Difícil
Costo de producto	Bajo	Alto	Bajo
Costo de instalación	Bajo	Alto	Muy alto
Costo total del sistema	Bajo	Alto	Alto
Transferencia de esfuerzo para Fibras con el tiempo	Bajo	Medio	Alto

Tabla No. 9.1 Principales características funcionales de los cables: ADSS OPGW LASHED.

Fuente: Redes PON. (2019). Disponible: http://itel.info/UA-Redes_PON_Instalacion

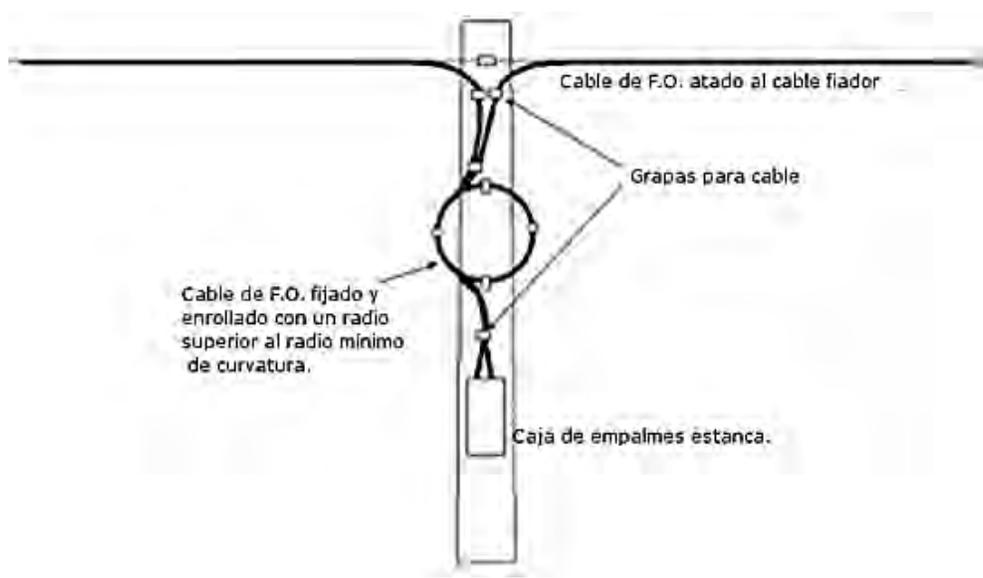
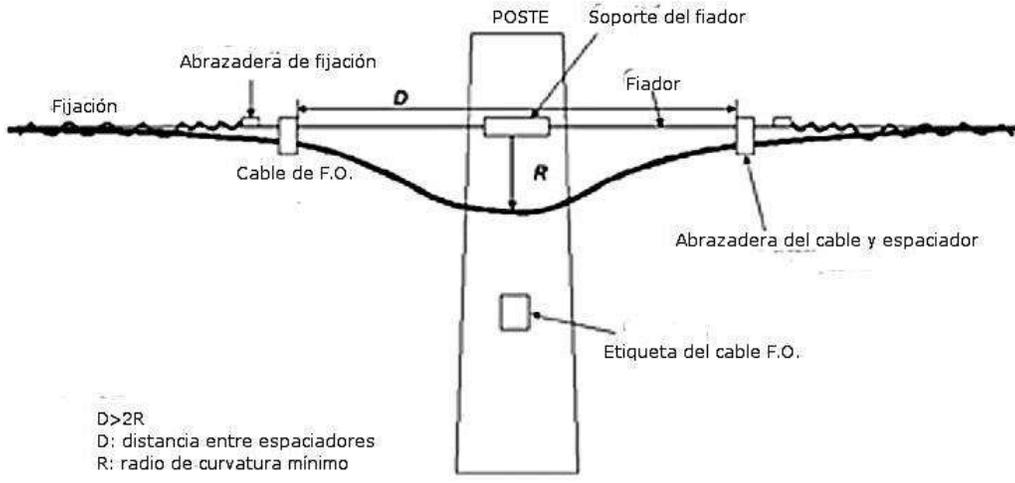
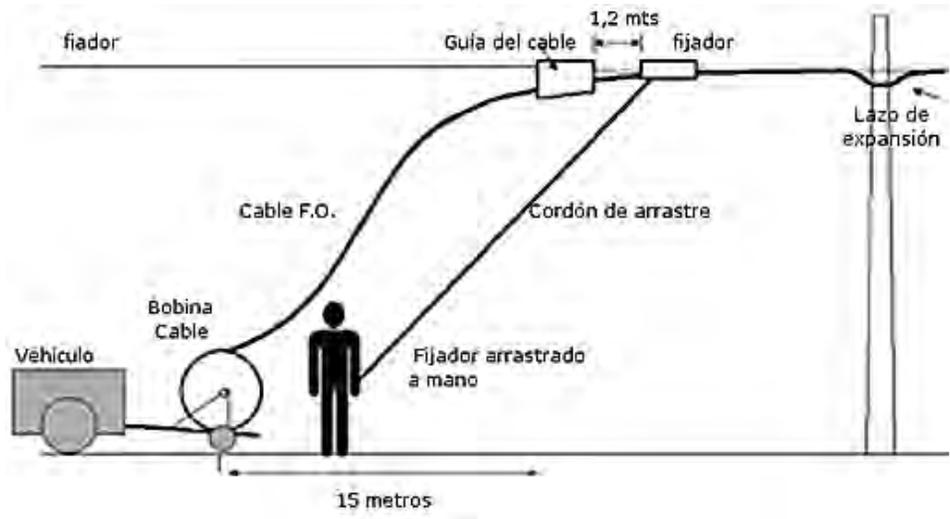
9.2.1.2Tendido aéreo a través de postes

Para el caso del tendido del cable óptico a través de postes exclusivos para este tendido, el proceso del tendido del cable óptico comúnmente cuenta con las siguientes etapas y consideraciones principales: ⁽⁵⁾

- Instalar los postes (de madera o de cemento o metálicos de tipo tubular), de una altura de unos nueve metros, con una separación no mayor a los 90 metros entre ellos.
- Instalar el cable fiador, normalmente de acero, destinado a sujetar al cable óptico, soportando los esfuerzos mecánicos que se producen.
- Instalar, provisionalmente, la guía del cable y el fijador al cable fiador, con separación entre ellos de 1.2 metros (valor típico).

- Llevar el cable óptico hasta la guía del cable y el fijador, mediante el cordón de arrastre, manteniendo la distancia de seguridad de la bobina de cable óptico (carrete) con respecto al fijador (unos 15 metros).
- Colocar las abrazaderas de fijación y asegurar el fijador al fiador.
- Atar, temporalmente, el cable óptico al fiador mediante las abrazaderas de fijación, para mantener temporalmente el cable óptico sobre el fijador.
- Ajustar el fijador para asegurar una operación adecuada.
- Asegurar un cabo de tiro al fijador para realizar el tiraje, del cable óptico, a mano o vehicularmente.
- Comenzar la operación de jaloneo a mano, tirando del fijador a una velocidad constante y sin brusquedad, y conduciendo el vehículo que lleva el carrete, de tal manera que se mantenga la distancia de seguridad.
- Cuando se alcance un poste debe detenerse el tendido. Se desconectan el fijador y la guía y se mueven al otro lado del poste. El hilo del fijador se termina con una abrazadera y se forma con el cable óptico un lazo de expansión (si se requiere).
- Cada vez que se han situado el fijador y la guía en el otro lado del poste y se ha completado el lazo de expansión, se continúa con la operación del fijador.
- Colocar donde se requieran etiquetas de aviso de presencia de cable óptico.
- En caso de requerirse cajas de empalmes, esta se debe instalarse en cada uno de los respectivos postes.

En la figura No. 9.6 se ilustra algunas de las etapas, relacionadas anteriormente, que se deben desarrollar en el proceso del tendido aéreo de un cable óptico a través de postes.



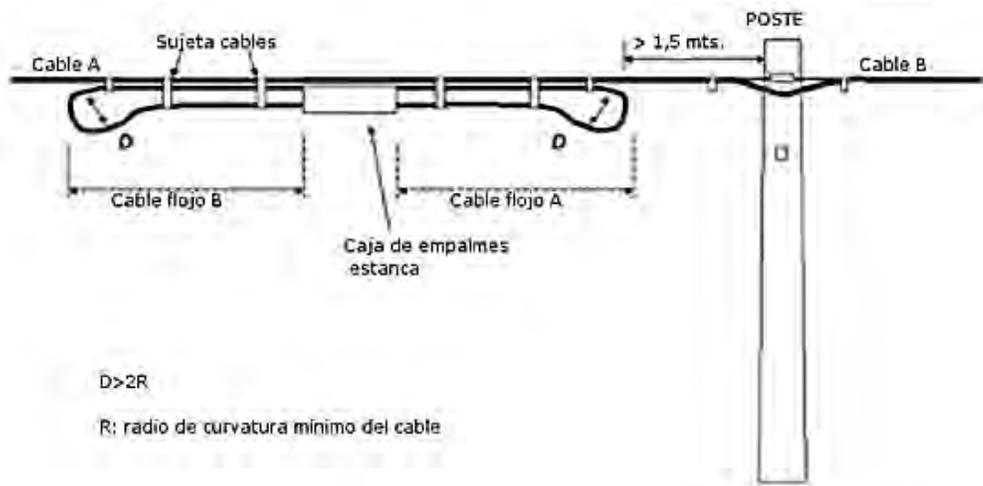
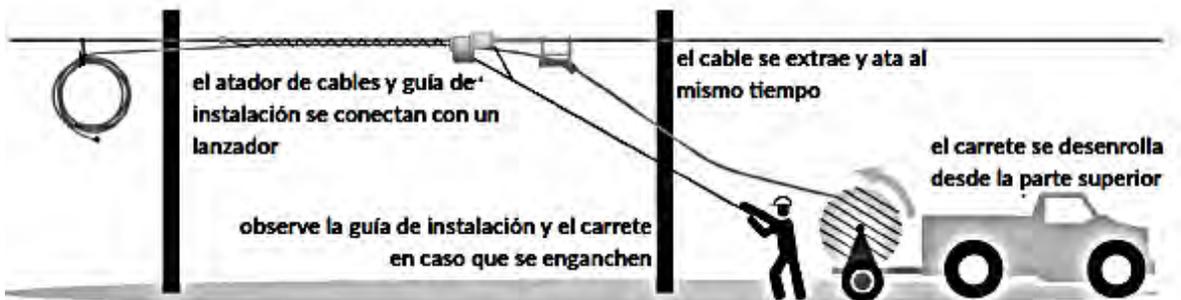


Figura No. 9.6 Diagramas de las principales etapas de un tendido en postes de un cable óptico.

Fuente: Conectrónica: Catálogo: *Tecnología y elementos de conexión y conectividad*, 2017.

En la figura No. 9.7 se hace una representación esquemática del tendido aéreo del cable óptico utilizando postes, mediante el método del carrete fijo con arrastre vehicular y con arrastre manual.



a) Arrastre vehicular



b.) Arrastre manual

Figura No.9.7 Tendido aéreo de cable óptico en postes con método de carrete fijo.

Fuente: Fuente COMMSCOPE Manual de construcción y aplicaciones de banda ancha. (2020).

Disponible: <https://www.commscope.com/globalassets/digizuite/2519-fiber-optics-const-manual-co-107147-es-mx.pdf?r=1>

Recientemente se ha venido generalizando, para la instalación del cable óptico en tendido aéreo y subterráneo, el *método de soplado*, cuyo proceso se fundamenta esencialmente en introducir el cable óptico, atado en su extremo por un cable de arrastre, en un micro-tubo, al cual se le inyecta, mediante un compresor, un flujo de aire a presión, lo cual crea unas condiciones favorables de deslizamiento del cable dentro del micro-tubo, requiriéndose una fuerza de arrastre mínima (ver figura No. 9.8). ⁽⁶⁾

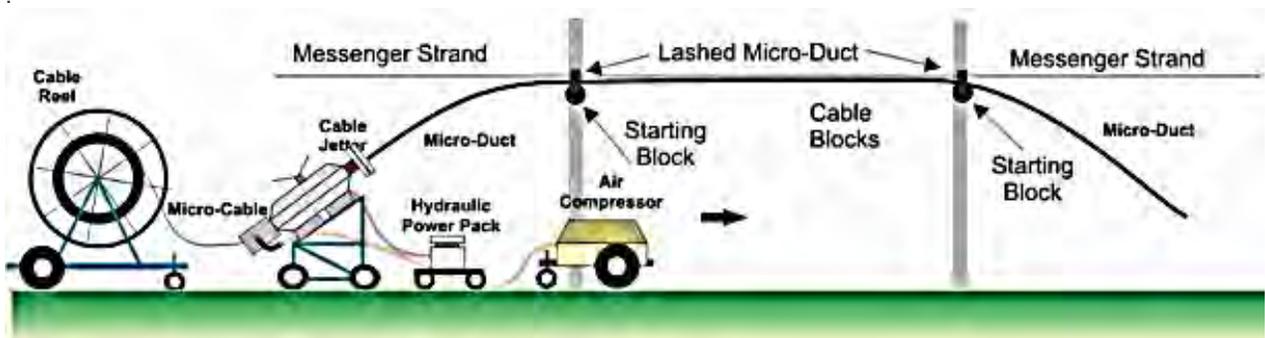


Figura No. 9.8 Método de soplado para instalación de cable óptico en tendido aéreo.

Fuente: Sterlite: Manual *Aerial Fiber Cable Lacing Methods*, 2018

También existen cables ópticos auto-soportados con cable mensajero incorporado, los cuales no requieren del cable fiador para su tendido. Estos cables pueden ser extendidos entre postes con separación hasta 150 metros. En la figura No. 9.9 se ilustra un tipo de cable óptico auto soportado.



Figura No. 9.9 Cable óptico auto-soportado.

Fuente: ETB, Anexo G1-3.4 Políticas para red de fibra óptica aérea”, 2016.

Especialmente cuando los recorridos de los tendidos aéreos del cable óptico son extensos, es muy común la utilización de vehículos cableros para transportar los respectivos carretes. También se presenta casos en que los carretes, que contienen al cable óptico, sean posicionados en forma aérea, en la trayectoria del tendido, y el tirado se realiza mediante robot de arrastre. En la figura No. 9.10 se ilustran unas imágenes de un vehículo para instalación y de un vehículo cablero, así como de instalaciones con carrete en posición aérea.



Figura No. 9.10 Imágenes de un vehículo para instalación y de unocablero, y carretes ópticos para tendido aéreo.

Fuente: apardiel, P. J., *iseño de una red de acceso mediante fibra óptica*", Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid, p. 50,2017 Curso fibra óptica. (2019). Disponible:<http://www.conelectronica.com/fibra-optica/curso-fibra-optica/tipos-de-instalacion-de-fibra-optica>.

En base a los resultados de estudios estadísticos, se tiene estimado que el periodo de vida de un tendido aéreo de cable óptico, es en promedio de unos 30 años, dependiendo de las condiciones climáticas de la región que cubre el tendido y de los procesos de mantenimiento que se aplique a todos los elementos que conforma el tendido, fuera de las posible anomalías externas que se puedan presentar.

9.2.2 Tendido subterráneo

Existente diferentes técnicas que se utilizan para realizar los tendidos de los cables ópticos en forma subterránea, entre estas principales técnicas se tienen las que a continuación se relacionan. ⁽⁷⁾

9.2.2.1 Tendido manual

La denominación de esta técnica se debe a que el proceso de tendido se realiza de manera manual, donde el cable es introducido a la sección de canalización a partir de la caja de paso (arqueta) inicial del tendido, donde un operario, ubicado en la siguiente arqueta (dentro o fuera), jalonea al cable óptico, al cual previamente se le ha interconectado un cable de atracción. Para el proceso de operación de este tendido se requiere, generalmente, de tres operadores: uno ubicado al inicio del tendido, donde se encuentra el carrete del cable óptico a ser tendido, al cual le corresponde controlar el avance y parada del proceso de tendido; otro que es el encargado de jalonear el cable óptico (del cual ya se mencionó al comienzo de la descripción de este proceso) y un tercero ubicado en la arqueta final del tendido, el cual contiene el extremo inicial del cable de atracción, y puede ir reconociendo el avance del tendido y apoyar a la solución de los problemas que se puedan presentar (ver fig. No. 9.11).

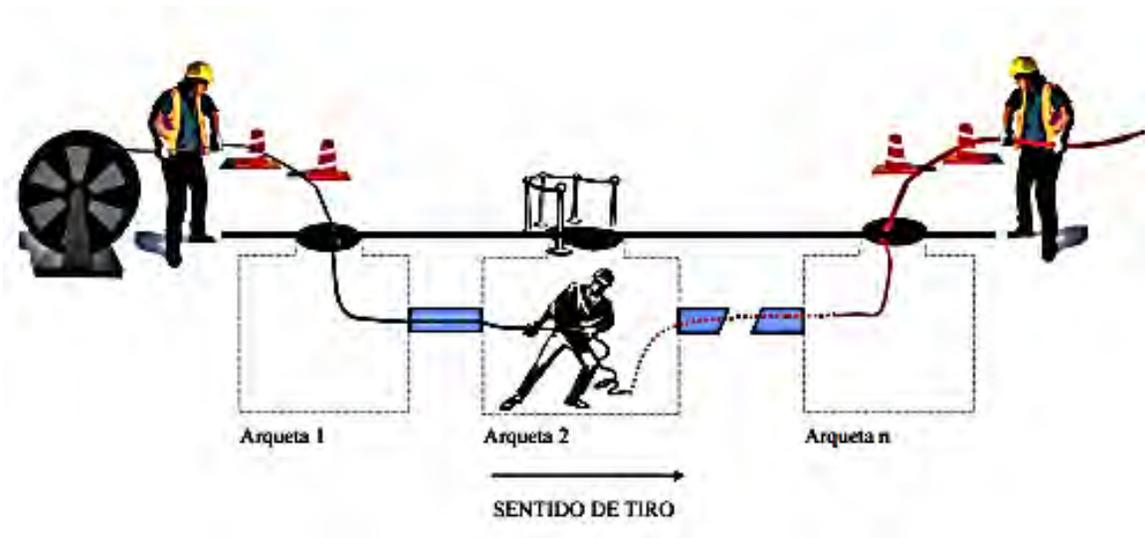


Figura No. 9.11 Tendido subterráneo manual del cable óptico.

Fuente: Instalaciones subterráneas. (2019). Disponible: <http://electrica.mx/category/instalaciones-subterranas>.

Cuando la caja de paso no es lo suficientemente holgada para permitir que el jaloneo del cable óptico se realice desde su interior, lo cual sucede con mucha frecuencia, este se realiza por fuera de ella. En la figura No. 9.12 se exponen unas imágenes donde se muestran el proceso del jaloneo del cable óptico, por fuera de la caja de empalme, en un tendido de tipo manual.



Figura No. 9.12 Proceso de jaloneo por fuera de la caja de empalme en tendido subterráneo manual.

Fuente: Manual *Soluciones de Telecomunicaciones para Operadores*, Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia TIC, 2017.

9.2.2.2 Tendido mediante método de soplado

Este método es muy similar al empleado en el caso del tendido aéreo, relacionado anteriormente, con la diferencia de que en el aéreo el cable óptico se extiende, en forma de suspensión, sobre torres o postes, mientras que para el caso de tendido subterráneo el cable óptico se extiende dentro de canales o zanjas subterráneas.

El método de soplado ofrece gran eficiencia y alta seguridad en la instalación del cable óptico, ya sea en tendido aéreo o subterráneo, debido a que el aire a presión inyectado al microtubo consigue reducir sustancialmente el rozamiento del cable óptico que se desplaza por dicho tubo. Entre el logro de eficiencia se encuentra la disminución de los tiempos de instalación, ya que se aumenta la velocidad del proceso de tendido. La seguridad se refiere a que se reduce sustancialmente el riesgo de ruptura o deformación del cable óptico, ya que se requiere menos esfuerzos en el arrastre de dicho cable. En la figura No. 9.13 se ilustra un tendido subterráneo de cable óptico empleando el método de soplado.

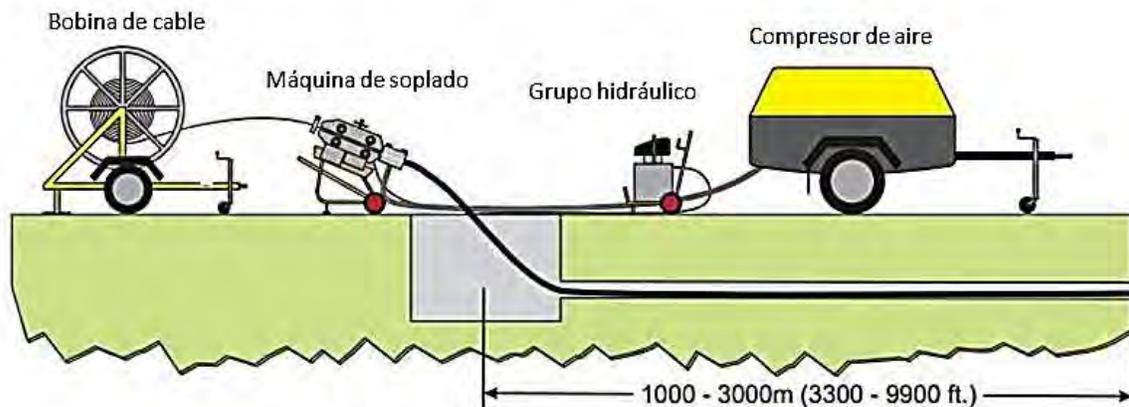


Figura No. 9.13 Tendido subterráneo de cable óptico utilizando método de soplado.

Fuente: Instalación y tendido de cables ópticos. (2019). Disponible:
<http://arganogroup.com/component/2/itemlist/category/1-instalacion-y-tendido-de-cables>.

9.2.2.3 Consideraciones generales en tendidos subterráneos

Se han publicado varias consideraciones a tener en cuenta en un tendido subterráneo de cable óptico, a continuación, se relacionan algunas de ellas: ⁽⁸⁾. ⁽⁹⁾

- Las zanjas se extenderán con una profundidad y anchura de acuerdo con las exigencias del terreno y a la ubicación de la línea del tendido, así como a la cantidad y dimensionamiento de los tubos que se utilizarán para el recorrido del cable óptico. Tanto la profundidad como la anchura de las zanjas, por general, tienen un mínimo

de un metro y veinte centímetros respectivamente, para el caso de un solo ducto, en el tendido óptico, de unas dos pulgadas de diámetro. En la figura 9.14 se ilustran unas imágenes de diferentes canaletas y zanjas para tendidos de diversos cables ópticos.

Las canaletas se realizan, habitualmente, sobre áreas peatonales y su profundidad y anchura son menores que para el caso de las zanjas, y la cantidad y diámetros de los tubos es también menor. Por lo general las canaletas son de tendido corto y corresponde a los tramos finales del tendido óptico, para la interconexión de los respectivos usuarios (residencial y o edificios).



Figura No. 9.14 Zanjas para tendidos de diferentes cantidades y dimensiones de tubos para tendidos subterráneos de cables ópticos.

Fuente: Fiberoptical infrastructure. (2019). Disponible: <https://www.fiberinc.com/projects/city-of-fort-myers-fiber-optic-infrastructure>. Catálogo "Soluciones Tx", Optral, 2017.

- Los ductos para utilizar para el tendido deben ser exclusivos para el cable óptico. Preferiblemente de tipo metálicos o de P C, de diámetro entre unas dos a cuatro pulgadas. El número estos ductos depende de la cantidad de cables ópticos a extender en el tendido. En algunos casos estos ductos van dentro de un tubo de tipo corrugado. En la figura No. 9.15 se ilustran dos imágenes, de las cuales la primera corresponde a la de un tubo corrugado con cuatro ductos de cuatro pulgadas cada uno y la segunda contiene varios tubos con diferente cantidad y dimensiones de ductos P C para tendidos de cables ópticos.



Figura No. 9.15 Tubos P C con tubos con diferentes ductos, para tendido de cables ópticos.

Fuente: Revinca,; *Manual de Sub-ductos de para ira ptica ormas e nstalación de Sub-ductos de para ibra ptica*, 2018.

- Las cajas de paso (arquetas), para el caso de los tendidos subterráneos de los cables ópticos, se encuentran distanciadas en promedio a unos 120 metros entre ellas, dependiendo de las dificultades, físicas, legales, y demás anomalías que se presentan para el tendido de la red óptica. El tipo y dimensionamiento de estas cajas varia, dependiendo de la cantidad y dimensionamiento de tubos con que cuenta el tendido. En la figura No. 9.16 se expone, una caja de paso con caja de empalme.

También un valor típico de la profundidad de las arquetas es de 1.50 metros, sin excluir otras posibles profundidades. Hay que tener presente, que tanto para el enrollado del cable de reserva como para el del tendido en general, el radio de curvatura debe ser mayor de 20D (20 de su diámetro). Así mismo es recomendable que los terminales de los tubos sobresalgan unos 25 cm en el interior de la arqueta respectiva. Se deben considerar las cajas de empalme necesarias. ⁽¹⁰⁾

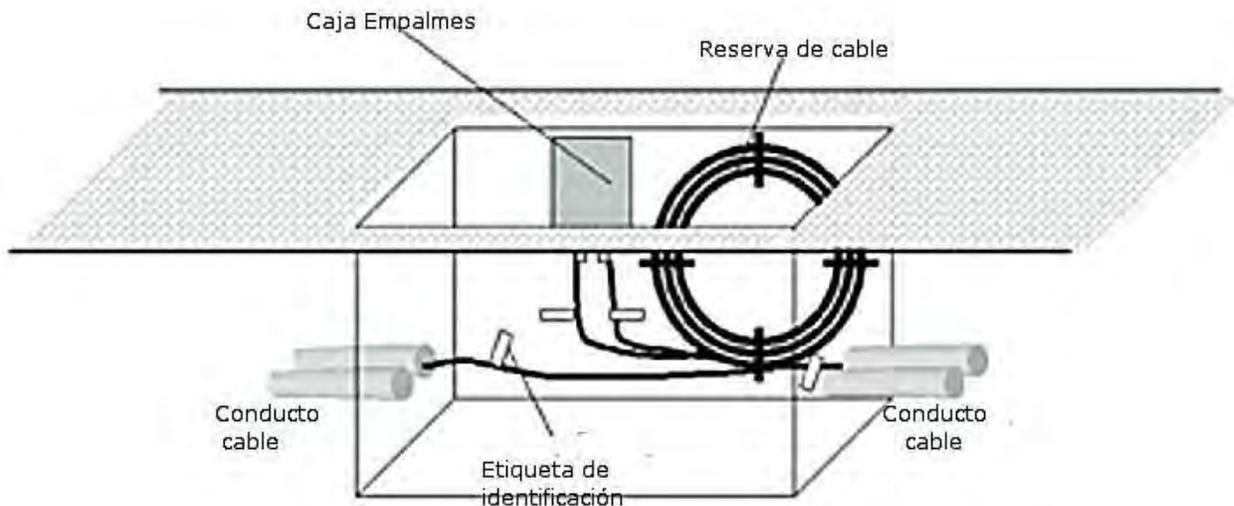


Figura No. 9.16 Cajas de paso de un tendido subterráneo de cable óptico.

Fuente: Public Temp Store. (2019).

Disponible: <http://www.aguasantafesinas.com.ar/C/C/PublicTempStorage/3940551.pdf>. Iberdrola: Catálogo "Guía de instalación de los cables ópticos subterráneos", 2016.

- Los carretes del cable óptico deben tener una elevación, preferiblemente, de unos 15 cm del suelo, sobre soportes especiales, que ofrezcan una buena facilidad de giro de estas. La extracción del cable óptico se hace por rotación del carrete alrededor de su eje, con salida del cable por la parte superior del carrete (ver figura No. 9.17). La longitud de cable óptico por carrete depende de las distancias del tendido contratado, y de los estándares que al respecto tengan los fabricantes de los mismos, siendo unos valores típicos de 3 a 8 m por carrete con un máximo promedio de unos 13 m. Sin embargo los fabricantes proveedores de cables ópticos, también suministran longitudes de cable por carrete de acuerdo a lo solicitado por el cliente.



Figura No. 9.17 Posicionamiento de los carretes de cable óptico.

Fuente: Proyecto ejecutivo *“Iiego rescripciones Técnicas articulares”*, Consell Insular de Menorca, 2017.

- Dentro de las posibilidades, se recomienda la utilización de maquinarias o dispositivos que faciliten el proceso de tendido y que permita garantías sobre la integridad del cable óptico, tales como el *“al a carretes con freno”* y la *“caja almacenamiento”*. Para el almacenamiento del cable óptico, se debe garantizar el cumplimiento del radio mínimo de curvatura (ver figura No. 9.18). No obstante estos dispositivos, así como otros, utilizados con frecuencia para tendidos subterráneos de cable óptico, también se emplean para tendido aéreo. Para el tendido en forma manual se debe con anterioridad preparar el cable guía de tracción a ser utilizado. Para el caso del método de soplado, se debe realizar todos preparativos correspondientes requeridos para tal fin, indicados en el manual de operación que el fabricante de la máquina de soplado disponga.



a.) Alza carretes con freno

b.) Caja almacenamiento

Figura No. 9.18 Dispositivos facilitadores del tendido de cable óptico.

Fuente: Instalaciones subterráneas. (2019). Disponible: <http://electrica.mx/category/instalaciones-subterranas>.

El estirado del cable óptico debe hacerse sin brusquedad y mantener su velocidad de manera uniforme y en caso de necesidad lubricar el cable. Disponer de las poleas y rodillos necesarios para facilitar el arrastre del cable a través de los conductos y arquetas del trayecto. Así mismo se debe prever de la longitud necesaria de los cables ópticos sean lo suficientes para la realización de los empalmes fuera de la arqueta.

- Al final del tendido, en la subestación de distribución, se debe contar con el gabinete óptico correspondiente. Debe recordarse que los gabinetes de distribución o empalme de cable óptico no debe compartirse para cables conductores, para evitar posibles inducciones y anomalías eléctricas sobre las fibras ópticas. Así mismo debe preverse dejar cable de reserva, enrollado circularmente, garantizando la permanencia del radio mínimo de curvatura. En la figura No. 9.19 se muestran unos gabinetes distribuidores de fibras ópticas de fijación en pared.

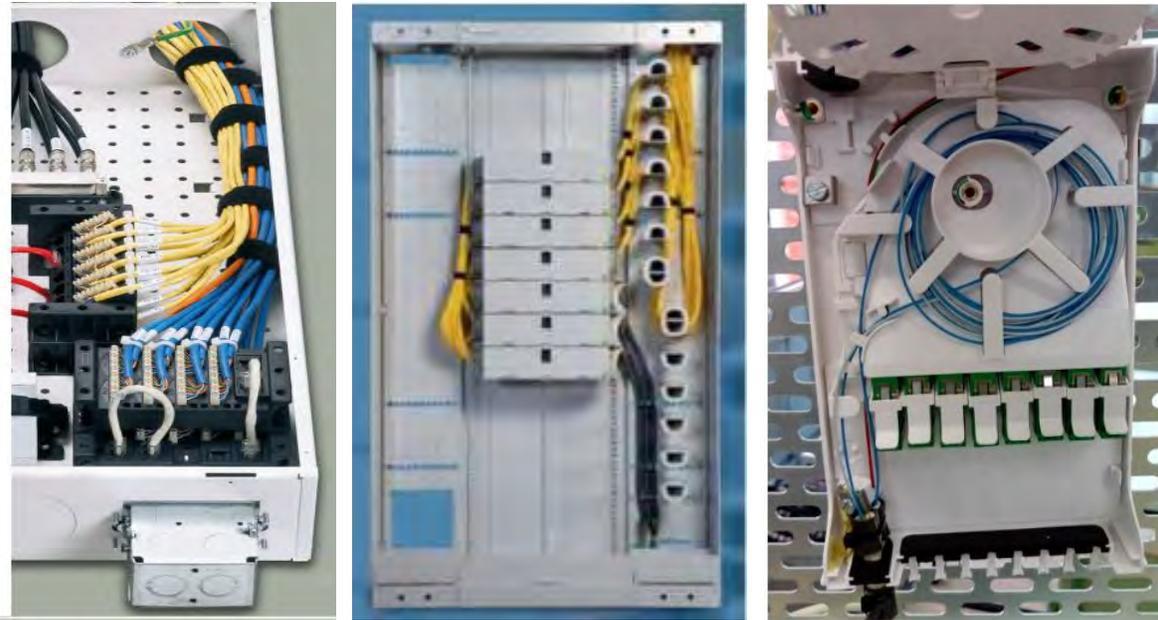


Figura No. 9.19 Gabinetes distribuidores de fibras ópticas de fijación en pared.

Fuente: Te Connectivity: Catálogo *Redes de nueva generación*", 2017.

Finalizado el tendido del cable óptico deberá realizarse una verificación del mismo, mediante el refractómetro óptico en el dominio del tiempo OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer* , con el fin de comprobar que no haya sufrido daño alguno el cable (roturas o radios de curvatura excesivos, entre otros). Se debe tener presente colocar las tapas respectivas en cada una de las arquetas, con previo grapado del cable óptico, el sellado de las aperturas de los tubos del tendido para protegerlo de la entrada de materiales y agentes externos anómalos (agua, roedores, entre otros) y colocar las identificaciones que sean necesarias. En la figura No. 8.61 se ilustra la imagen de un OTDR. En el numeral 9.6 se hace una descripción general del funcionamiento del OTDR.

Mientras que el periodo de vida previsto de un tendido de cable óptico aéreo es de unos 30 años, para el de tendido subterráneo sin ducto es a lo máximo igual, dependiendo de las condiciones del suelo (principalmente la humedad) y a otros factores anómalos como los roedores. Si el cable óptico va dentro de un ducto, como se indicó anteriormente y se aplica los correspondientes protocolos de mantenimiento y conservación, este periodo puede ser mayor, alrededor de los 50 años. ⁽¹¹⁾

9.2.2.4 Pérdidas por curvaturas

Sea cual fuese el tipo de tendido del cable óptico, aéreo, subterráneo, submarino o de cualquier otra forma, hay que tener mucho cuidado con la presencia de curvas excesivas o dobleces muy pronunciados, especialmente cuando el núcleo es de vidrio, ya que podría romperse o quebrarse. Hay que tener presente que para tendidos largos se utiliza fibras con núcleo de vidrio, ya que presentan atenuaciones muy inferiores que las fibras con núcleo de plástico. Esta situación no es tan crítica para el caso de cables coaxiales o de pares trenzados.

No solo existe la posibilidad de que la fibra óptica se rompa por una curvatura excesiva (en el caso de fibra de vidrio), sino que también la señal de luz, que viene por el núcleo (*core*), choque con mayor medida sobre la capa de revestimiento (*cladding*), originando pérdidas de energía de la señal. Esta pérdida es denominada como atenuación por micro curvatura. ⁽¹²⁾

Para conocer el radio máximo de curvatura permisible (R_c) que puede tener un cable óptico, se debe consultar en el *atas eef*. Este radio depende de las características estructurales y dimensionales del cable óptico. El valor de este radio, en caso de no disponer de la información del fabricante, se puede estimar con la ecuación 9.1.

$$\langle 9.1 \rangle R_c = 20D$$

Donde: D corresponde al diámetro externo de la chaqueta del cable.

En la figura No. 9.20, en la parte superior se expone un enrollado de cable óptico, indicando el correspondiente radio de curvatura (R_c), así como el tendido subterráneo de un cable óptico con presencia de una curvatura, y en la parte inferior la de una curvatura en una instalación interna de cable óptico.

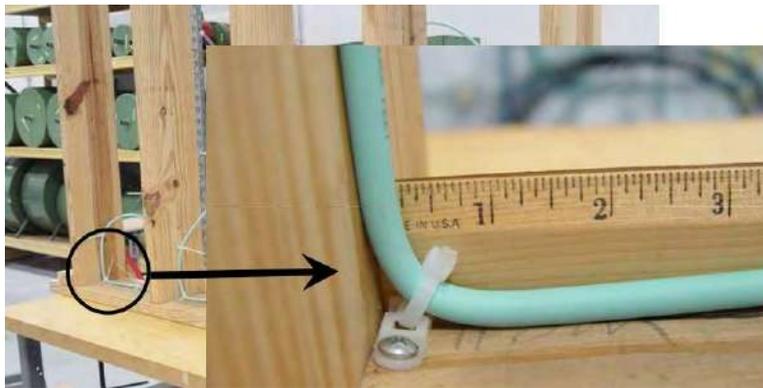
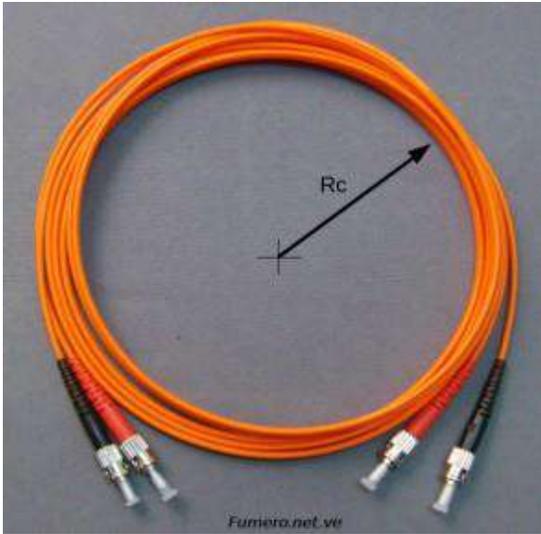


Figura No. 9.20 Radio de curvatura de un enrollado de cable óptico y curvaturas en tendidos e instalaciones de cable óptico.

Fuente: Radio de curvatura. (2019). Disponible: <http://www.fibraoptica.com/blog/radio-de-curvatura> ..Flávio, R., "Fibras ópticas optimizadas frente a curvaturas", Furu a a, 2017.

Para calcular las pérdidas por curvatura existen expresiones matemáticas que contemplan todas las características estructurales y funcionales de la fibra óptica, así como todos los factores relevantes que causan estas pérdidas. Sin embargo, existen gráficas, como la indicada en la figura No. 7.94, donde se puede tener una aproximación del valor de las pérdidas por curvatura, en función del radio de curvatura que sufra el cable óptico, para el caso de que la fibra óptica esté operando con un haz de luz de longitud de onda de 1.310 nm (segunda ventana). En la figura No. 4.56 se ilustran unas curvas donde se puede determinar las pérdidas por curvatura en las fibras ópticas tipo monomodo: SM (*Single Mode*) para tres radios

de curvatura diferentes y dependiendo de la longitud de onda de la señal que se encuentre transmitiendo.

Los diámetros de cada una de las fibras ópticas varían dependiendo del dimensionamiento de los diámetros de su: núcleo, capa de revestimiento, capa de recubrimiento y tubo o capa de protección. Cuando la fibra cuenta con una capa plástica de protección se le conoce como fibra de estructura ajustada y cuando es un tubo plástico se le denomina de estructura holgada. En la tabla No. 5.2 se relacionan los diámetros típicos de los diferentes componentes de una fibra óptica y de su protección, todos en micrómetros. ⁽¹³⁾

Número	Núcleo (um)	Revestimiento (um)	Recubrimiento (um)	Tubo o protección (um)
I	8 a 10	125	250 o 500	900 o 2.000
II	50	125	250 o 500	900 o 2.000
III	62.5	125	250 o 500	900 o 2.000
IV	85	125	250 o 500	900 o 2.000
V	100	140	250 o 500	900 o 2.000

Tabla No. 5.2 Diámetros comunes de los diferentes componentes de una fibra óptica y de su protección.

Fuente: Chomyez, B., "Instalaciones de fibra óptica", 2017, p. 29.

Se debe identificar esmeradamente las dimensiones de los diámetros de los componentes de la fibra, para determinar el diámetro final de la fibra, y de esta forma estimar su radio de curvatura máxima que puede aplicarse en su proceso de instalación y montaje.

Otro de los aspectos que hay que tener en cuenta es que: si el diámetro del núcleo de la fibra aumenta se reduce la atenuación en la misma e incrementándose por lo tanto el alcance (longitud del cable) que le permite lograr a la señal de luz que se transmite por ella, sin requerimiento de repotenciarla (repetidor). En la tabla No. 9.3 se indican los valores de estos parámetros funcionales de la fibra, adicionando la apertura numérica AN de la misma, en función del diámetro del núcleo de la fibra.

Tamaño de la fibra (um)	Atenuación de la fibra (dB/km)	AN	Longitud del cable (km)
50 / 125	4.0	0.20	0.20
50 / 125	3.0	0.20	0.27
50 / 125	2.7	0.20	0.30
62.5 / 125	4.0	0.29	1.30
62.5 / 125	3.7	0.29	1.50
100 / 140	5.0	0.29	1.50
100 / 140	4.0	0.29	1.80

Tabla No. 9.3 Algunos parámetros de funcionamiento de las fibras ópticas en función del diámetro del núcleo.

Fuente: Chomyez, B., "Instalaciones de fibra óptica", 2017, p. 29.

9.2.2.5 Cálculo del radio de curvatura

El radio de curvatura de cualquier tipo de trayectoria (carretera, tendido de un determinado cable: incluyendo el de la fibra óptica, o el del recorrido de un medio), está definida por la ecuación 9.2 y el cual se indica en la figura No. 9.21: ⁽¹⁴⁾

$$\langle 9.2 \rangle \rho = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta \theta} = \frac{ds}{d\theta}$$

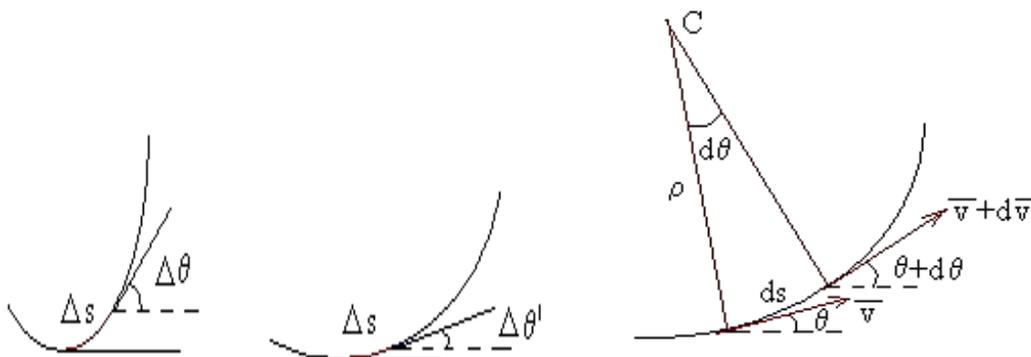


Figura No. 9.21 Definición del radio de la curvatura de cualquier trayecto o tendido.

Fuente: Puig Adam P., *Comprehensive Calculus Applied to Physics and Technique*. Biblioteca Matemática, 2014, p. 286

Para graficar el radio de curvatura de una trayectoria se realiza el siguiente proceso:

- ✓ Se define un punto dentro del espacio de la curvatura y se traza la tangente sobre el mismo y así mismo la normal correspondiente.
- ✓ Se escoge otro punto, dentro de la curvatura y muy próximo al anterior, trazando sobre este punto la tangente y la normal respectiva.
- ✓ El punto donde se crucen las dos normales corresponde al punto denominado centro de la curvatura C. La longitud de cada una de estas normales, desde cada uno de los dos puntos al centro C, equivale a la longitud del radio de curvatura.

El ángulo que forman las dos normales es: $d\theta$

La longitud del arco entre los dos puntos seleccionados corresponde a lo indicado en la ecuación 9.3:

$$(9.3) ds = \rho d\theta$$

Tomando como referencia lo representado en la figura No. 9.22, se puede deducir la expresión matemática para calcular el radio de curvatura de un trayecto o tendido dado, tal como se indica a continuación:

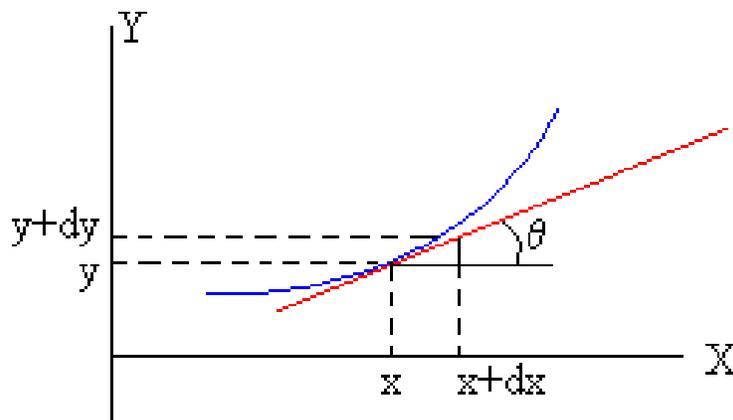


Figura No. 9.22 Cálculo del radio de curvatura

Fuente: Puig Adam P., *Comprehensive Calculus Applied to Physics and Technique*. Biblioteca Matemática, 2012, p. 287

$$\langle 9.4 \rangle \tan \theta = \frac{dy}{dx}$$

$$\langle 9.5 \rangle ds \approx \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx$$

Teniendo de presente la definición del radio de curvatura dada en la ecuación 9.2:

$$\langle 9.6 \rangle \rho = \frac{ds}{d\theta} = \frac{\sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx}{d(\tan^{-1}(dy/dx))} = \frac{\sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx}{\left(\frac{d^2 y}{dx^2} dx\right) \div \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)} = \frac{\left(1 + (dy/dx)^2\right)^{3/2}}{\frac{d^2 y}{dx^2}}$$

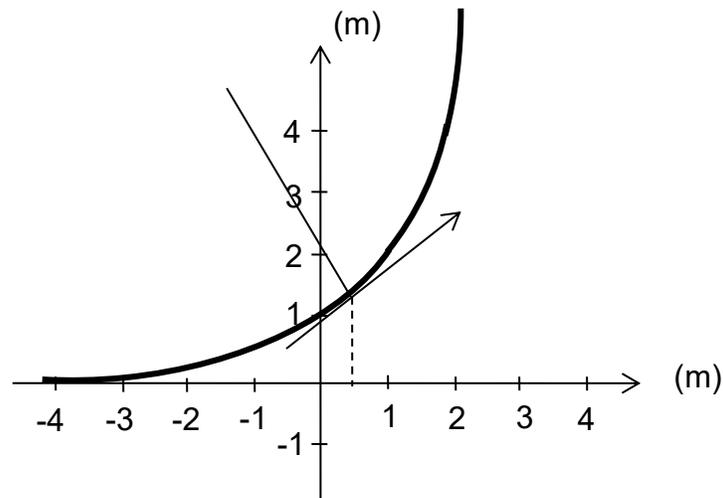
Ejemplo No. 9.1

Determinar el radio de curvatura del tendido de un cable óptico en el punto $x = 0.5$ metros, si la función de la trayectoria es de:

$$y = 2^x$$

Solución:

Se grafica la forma del trayecto del tendido del cable óptico, según la función relacionada anteriormente, para visualizar la curvatura:



Empleando la ecuación 9.6 y reemplazando en $x = 0.5$ metros.

$$\langle 9.6 \rangle \rho = \left\{ \frac{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \right\}_{x=0.5} = \frac{\left(1 + (2^{0.5} \ln 2)^2\right)^{3/2}}{2^{0.5} (\ln 2)^2} = 4.04 \text{ m}$$

Se consulta con el *atas eet* del cable óptico empleado, para verificar si este radio está entre el rango permitido.

9.2.2.6 Redes de cableado óptico terrestre

Debido a los enormes beneficios que ofrece la fibra óptica, en cuanto a la transferencia de información con respecto a los otros medios de transmisión, como en el *mayor ancho de banda* (por lo tanto mayor velocidad de transmisión), en la *menor atenuación*, en el *mejor aislamiento electromagnético*, en la *mayor separación entre repetidores*, en el *menor tamaño y peso*, en la *mejor facilidad de manejo y su tendido*, en la *menor latencia*, entre otros, se ha constituido en el medio de transmisión más solicitado para conformar los tendidos de las redes de comunicación en los países, así como entre países e entre continentes, tanto en tendidos terrestres (subterráneos y aéreos) o submarinos. ⁽¹⁵⁾

A manera de referencia en la figura No. 9.23 se exponen unos mapas donde se indica las principales redes de cableado óptico terrestre existentes en: Europa, Gran Bretaña, Estados Unidos, Chile y Colombia.



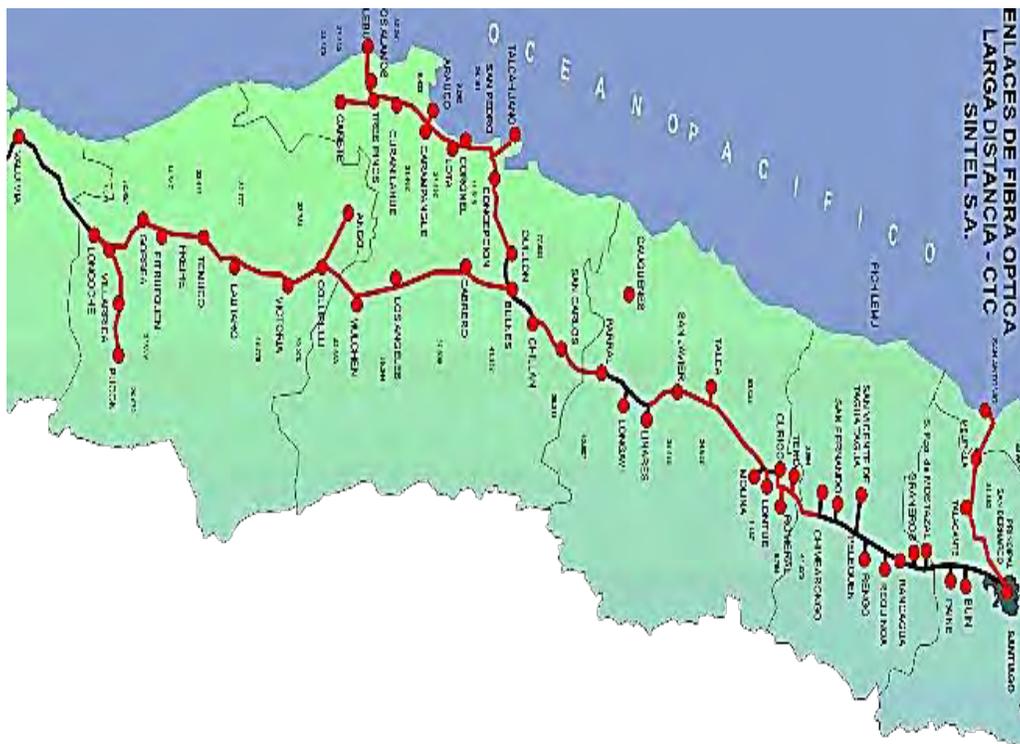
a.) Principales redes terrestre de cableado óptico en Europa.



b.) Principales redes terrestre de cableado óptico en la Gran Bretaña.



c.) Principales redes terrestre de cableado óptico en Estados Unidos.



d.) Principales redes terrestre de cableado óptico en Chile



e.) Principales redes terrestre de cableado óptico en Venezuela .



e.) Principales redes terrestre de cableado óptico en Colombia.

Figura No. 9.23 Principales redes de cableado óptico terrestre existentes en:
Europa, Gran Bretaña, Estados Unidos, Chile y Colombia.

Fuente: Atlas cables cables ópticos. (2019). Disponible:

https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/m.dodge/cybergeography/atlas_cables.html "United Kingdom Transatlantic and International Capabilities", Cable Wireless, 2016 Net or s-amplia-cobertura-en-fibra-óptica. (2019). Disponible:

<http://www.colombia.com/tecnologia/noticias/sdi/100058/ifx-net-or-s-amplia-cobertura-en-fibra-optica..>

9.2.3 Tendido submarino

El tendido submarino de una red óptica submarino es aquel que se realiza entre dos o más puntos a través del lecho marítimo. La estructura básica de las redes de ópticas de tendido submarino está conformada por dos componentes fundamentales:⁽¹⁶⁾

- *Componente terrestre:* lo conforma todos los equipos y dispositivos terminales, en ambos lados del tendido óptico, tales como las fuentes de alimentación; generadores y o detectores de señales de luz; transmisores y o receptores de las señales eléctricas que contienen la información; sistemas de monitoreo y control; entre otros.
- *Componente marítimo:* lo conforma el cable óptico y todos los demás equipos y dispositivos que se requieren para que la red pueda realizar las interconexiones de manera efectiva, tales como: repetidores; divisores; conmutadores; multiplexores; entre otros.

Las redes ópticas submarinas han tenido un gran interés en la interconexión entre los continentes, compitiendo con las comunicaciones satelitales, ya que ofrecen menor latencia y mayor ancho de banda.

9.2.3.1 Barcos cableros

Entre los diferentes recursos y dispositivos que se requieren para realizar los tendidos submarinos se encuentra los llamados buques cableros. Son buques exclusivos y especializados en el tendido y reparación de cables de comunicaciones submarinas o de energía eléctrica. La tripulación que disponen estos buques es un personal de alta formación y experiencia en el tendido de los cables submarinos y en la navegación de estos. También disponen de equipos y dispositivos de alta tecnología para el tendido adecuado y preciso del cableado en el lecho marino.

Estos buques presentan en su estructura ciertas particularidades que permiten ser fácilmente identificados, tales como de disponer, tanto en la proa como en la popa, de rampas para realizar la recogida y el tendido del cable. En la figura No. 9.24 se exponen unas imágenes donde se indica la estructura básica de estos barcos cableros.





Figura No. 9.24 Corte esquemático de barcos cableros

Fuente: TE SubCom, (2019). Disponible: <https://ingenieromarinero.wordpress.com/2018/03/10/20-buques-cablero-y-sistema-de-posicionamiento-para-offshore/>.

Por lo general los componentes básicos de un barco cablero son los siguientes: ⁽¹⁵⁾

- *Tanque para cables*: es un gran tanque de tipo circular donde se almacena el cable a ser tendido, ocupando gran parte del interior del barco. En la figura No. 9.25 se ilustra unas imágenes de tanques de cable óptico dentro de un barco cablero.



Figura No.9.25 Tanques de cable de un barco cableero.

Fuente: Buques cableros. (2019).

Disponible: <https://ingenieromarinero.wordpress.com/2018/03/10/20-buques-cableros-y-sistema-de-posicionamiento-para-offshore/>.

- *Sistema de tendido o recuperación del cable:* corresponde a todos las maquinarias y dispositivos (grúas, cadenas, poleas, rodillos, entre otros) entre los cuales pasa el cable óptico a ser tendido o el que se esté recuperando. Estas maquinarias controlan la tensión, la velocidad y la longitud es tendido o izado (ver figura No. 9.26).



Figura No. 9.26 Sistema de tendido o recuperación del cable.

Fuente: Buques cableros. (2019). Disponible:

<https://ingenieromarinero.wordpress.com/2018/03/10/20-buques-cableros-y-sistema-de-posicionamiento-para-offshore/> ..

- *Sistema de medición y monitoreo de transmisión óptica:* corresponde a todos los equipos y dispositivos de medición y monitoreo permanente, de funcionamiento de la fibra durante todo el trayecto del tendido, para asegurar un enlace correcto. En caso de detectar fallas se suspende el tendido hasta remediar la anomalía. En la figura No. 6.27 se muestra una imagen donde se puede apreciar un sistema de medición y monitoreo, el cual transmite señales de prueba, en todo momento, a la estación terrestre a través del cable que se está tendiendo para probar su correcto funcionamiento. (17)



Figura No. 6.27 Sistema de medición y monitoreo de la fibra óptica durante el tendido.

Fuente: Bates, Regis J *Optical Splicing and Testing Handbook*. Nueva York : McGraw-Hill, 2017, p. 10.

- **Banco de empalme:** corresponde al sitio de trabajo donde se realizan los empalmes e instalación de los repetidores y demás dispositivos que sean necesario, en el proceso de tendido del cable óptico. Este sitio dispone de todos los equipos y dispositivos especializados que se requieren para tal fin. En lo posible, el cable que se va a tender ya tiene incorporados todos los repetidores, divisores, conmutadores, empalmes y demás elementos que se requieran para todo el tendido, y estos trabajos se realizan generalmente en tierra. En la figura No. 9.28 se aprecia una zona de instalación de repetidores ópticos y empalme a bordo de un barco cablero.



Figura No. 9.28 onas de empalme en un barco cableo.

Fuentes: Tendido cable submarino. (2018). Disponible:

<https://www.google.com.co/search?q=Tendido+cable+submarino+bi+1024>.

Barnes, S. Frish, T. Schartz, J., *Time as come for ta ing innovation under ater: t e o and y of ne repeater*, 2017, p.21.<http://www.eldiario.es/turing/vigilancia+y+privacidad/BELLA-conectara-Latinoamerica-Europa-Unidos/0398610529.html>.

- *Sistema de posicionamiento y control del barco*: corresponde a todos los instrumentos de comando del barco, el cual se encuentra completamente computarizado. Dispone además de la ayuda de sistema de posicionamiento dinámico (PD) vía satelital. En la figura No. 9.29 se ilustra una imagen de un puesto de comando computarizado de un barco cableo.



Figura No. 9.29 Puesto de comando de un barco cablero.

Fuente: Buques cableros. (2019). Disponible:

<https://ingenieromarinero.wordpress.com/2018/03/10/20-buques-cableros-y-sistema-de-posicionamiento-para-offshore/>.

9.2.3.2 Robot de arrastre y tendido

Debido a las grandes profundidades que se encuentra el lecho marítimo (en algunos casos más de 10 mil de metros) es imposible realizar los trabajos de excavación y tendido del cable óptico mediante buzos humanos, requiriéndose por lo tanto de robots submarinos no tripulados que sean capaces de realizar estas tareas. Estos robots deben estar equipados con todos los dispositivos especiales que puedan realizar las excavaciones y demás que se requieran, tales como brazos manipuladores, herramientas, cámaras y sensores, entre otros, para que puedan ejecutar los tendidos del cable en forma correcta, a través de control remoto. Este control se realiza desde los barcos cableros a través de un cable denominado umbilical, que interconecta a la central de comando y el robot respectivo. En la figura No. 9.30 se ilustran unas imágenes que muestran unos robots submarinos para tendido de cable óptico, unos a bordo del barco cablero y otros ya sumergidos en el lecho marino. ⁽¹⁸⁾

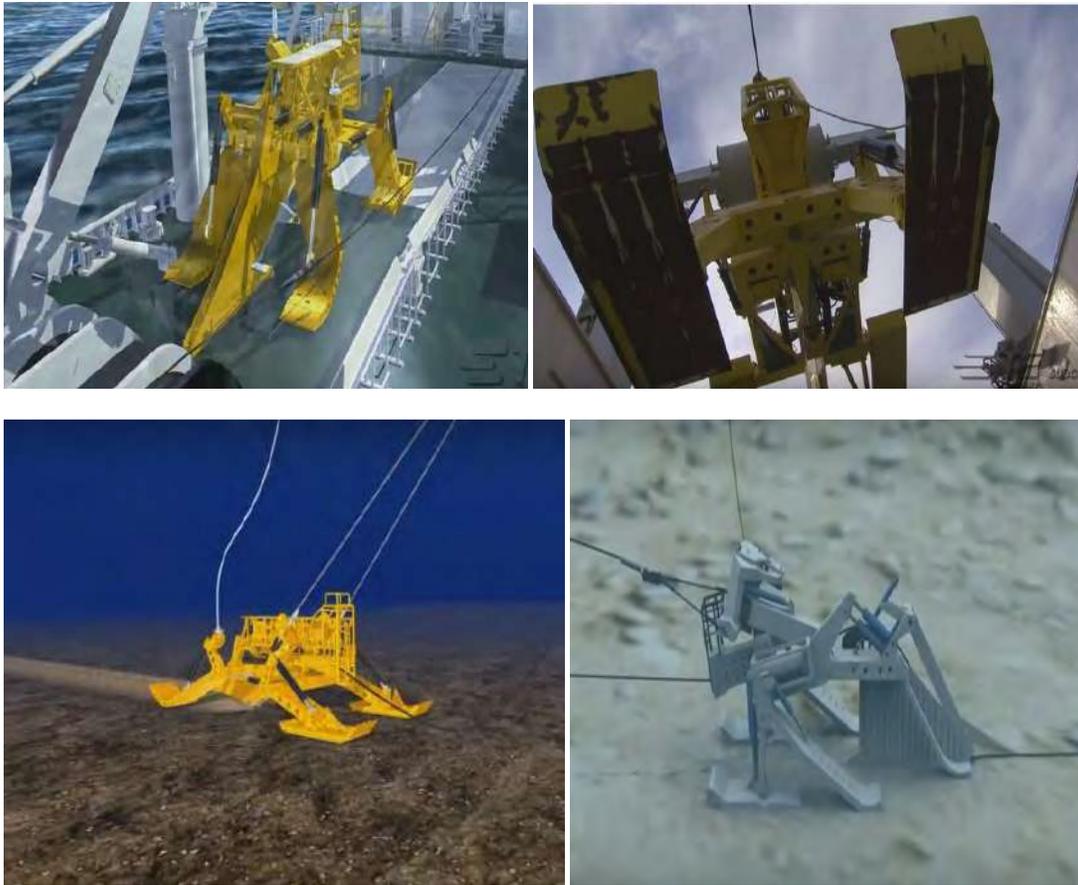


Figura No. 9.30 Robots para tendido submarino de cable óptico.

Fuente: Cables submarinos. (2019). Disponible:

http://cablesm.fr/libroscables_coaxiales_submarinos_fbd353a2.pdf. Taringa net. (2019)

Disponible: <https://youtube.com/watch?v=61DHTgFqa0>

<http://taringa.net/posts/ciencia-educacion/18169225/Como-es-la-puerta-de-entrada-de-Internet-a-la-Argentina.html>.

En la figura No. 9.31 se muestra unas imágenes donde se puede apreciar el barco cablero y los robots que realizan el tendido por el lecho de la superficie marítima.

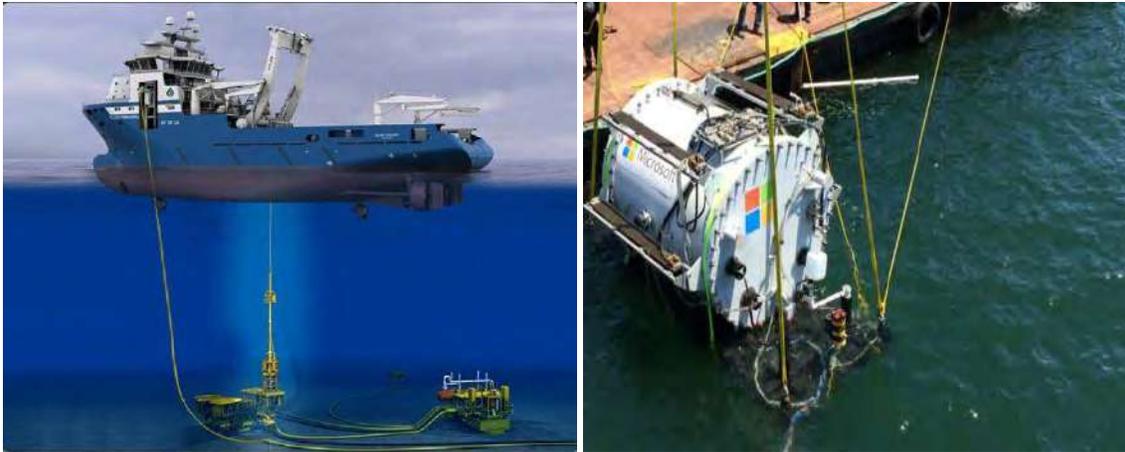


Figura No. 9.31 Imagen del barco cableero y de un robot sumergido y otro a sumergirse.

Fuente: Cable submarino. (2019) Disponible: <http://.Blogs.20minutos.es/retario/tag/cable-submarino> .

9.2.3.3 Aspectos en el tendido

A continuación, se relacionan algunos de los aspectos fundamentales que se deben tener en cuenta y o se presentan en los procesos del tendido de los cables ópticos submarinos, los cuales se aplica, en formar similar, para cualquier otro tipo de cable: (19), (20)

- En primer lugar, se realiza una inspección minuciosa de la ruta prevista para el tendido del cable óptico, teniendo como finalidad del resultado del estudio: minimizar el impacto ambiental y maximizar la protección del cable. Este estudio se realiza mediante procesos de sondeos al subsuelo marítimo, lográndose obtener records topográficos del mismo. En la figura No. 9.32 se ilustra una imagen donde se indica el levantamiento de mapas del fondo marítimo.

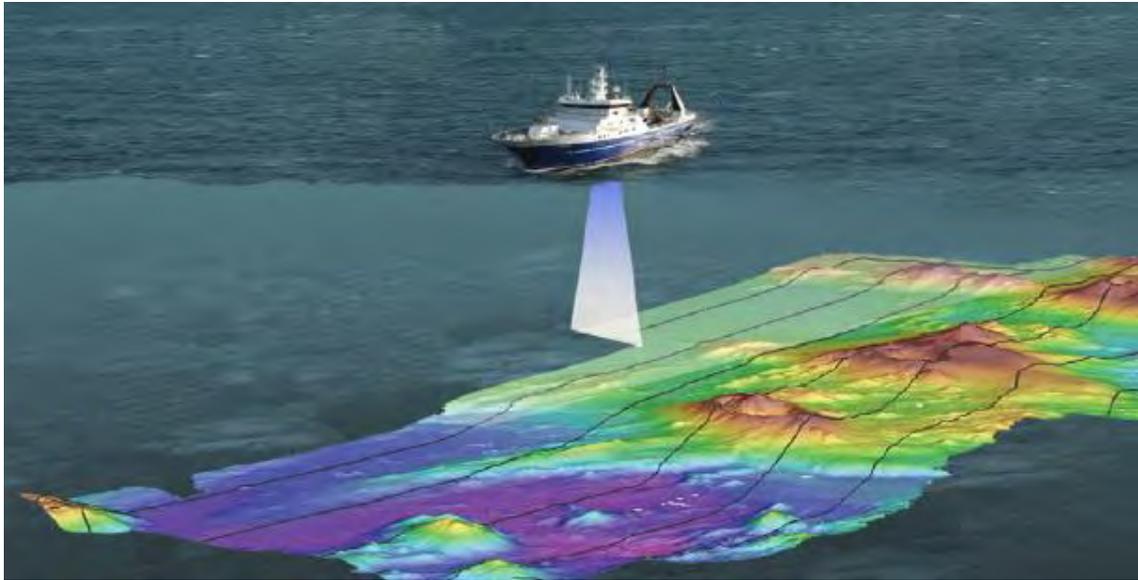
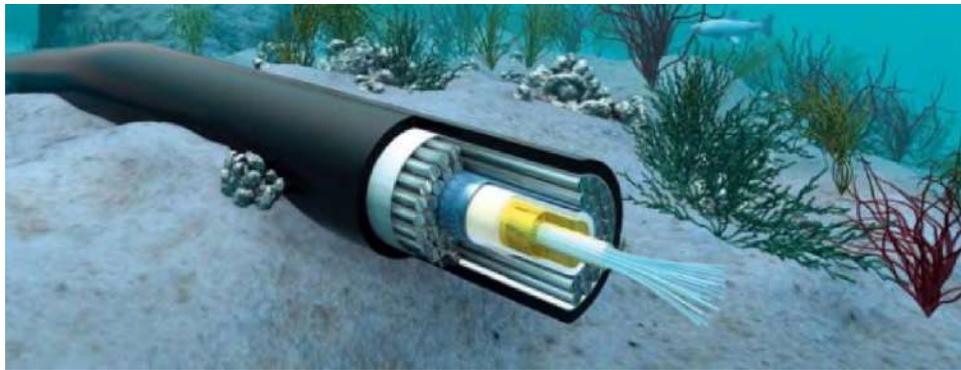
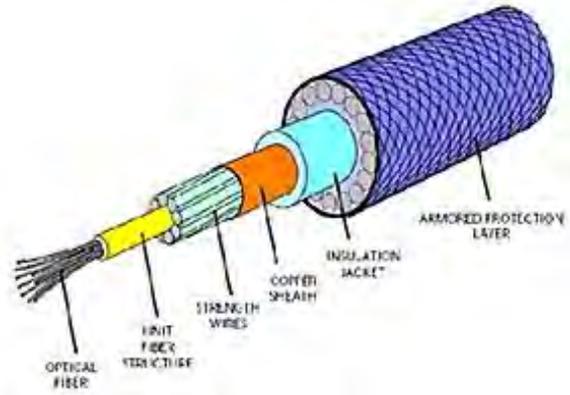


Figura No. 9.32 Proceso de levantamiento de mapas del suelo marítimo.

Fuente: National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), 2017

- En base a los resultados de los estudios de sondeos iniciales se define una ruta provisional. Esta ruta debe tener el permiso correspondiente de las autoridades competentes, para ser utilizada para el tendido del cableado.
- Una vez que se haya logrado el permiso de la utilización de la ruta y de la realización del proceso de implementación del tendido del cableado, se procede a la realización de otro sondeo para ultimar detalles y requerimientos definitivos de la ruta final.
- Diseño final de las características específicas de la ruta a ser empleada para el tendido del cableado y definición de las condiciones físicas, mecánicas y eléctricas del cableado, así como de todos los elementos y dispositivos que se necesitan para una óptima instalación y protección del cable, así como de un seguro y eficiente funcionamiento de este. En la figura 9.33 se indica algunos de los diferentes tipos de cables ópticos para tendido submarino y así mismo algunos de los diversos dispositivos que se requieren en el tendido, tales como derivadores y repetidores ópticos. Entre las empresas más reconocidas que fabrican cables ópticos submarinos están: Ericsson, Alcatel, NSU, entre otras.



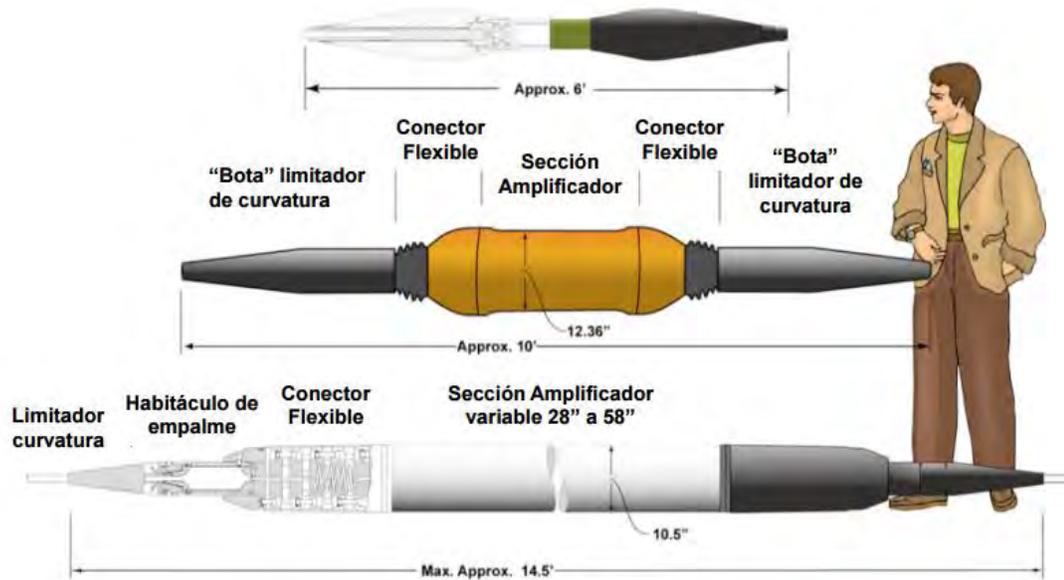
a.) Cables ópticos submarinos



b.) Derivador óptico y repetidor óptico



c.) Repetidores ópticos



d.) Componentes básicos de un repetidor óptico.

Figura No. 9.33 Tipos de cables, derivadores y repetidores ópticos.

Fuente: Chiesa, L. Manterola, M. Alberto, C., *Criterios para el tendido de redes de fibra óptica y verificación de su funcionamiento*, 2017. Manual: *Cable totalmente dieléctrico autosoportadoA SS*, aveOptics, 2017. Fuente: <https://www.iscpc.org/documents/id/1749>

El almacenamiento del cable en el barco requiere de unas características de manejo y colocación muy especiales, donde se asegure que el radio de curvatura se mantenga por encima de su valor crítico y las tensiones de jaleo sean suaves y uniformes. En la figura No. 9.34 se ilustran unas imágenes donde muestra la colocación del cable submarino en plataforma del barco cablero y su almacenamiento en el tanque para cables.





Figura No.9.34 Colocación del cable submarino en plataforma del barco cablero.

Fuente: Casimer, C. *Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking*. Elsevier Academic Press 2015. *Oceano está lleno de fibra óptica*. (2019). Disponible: http://www.ucontrol.com.ar/forosmf-off-topic-el-oceano-esta-lleno-de-fibra-optica_

En aguas someras el tendido del cable, generalmente, lo realizan buzos especializados en esta labor, enterrándolo en zanjas, generalmente, de 1 metro de ancho y de una proximidad de 1.5 metros. Las zanjas se realizan mediante agua a presión y en otros casos se requiere arado. Para el resto de la ruta (fuera de la plataforma continental, en el lecho marítimo 2.000 metros o más) general se realiza solamente el tendido del cable mediante robots controlados desde del barco. En el lecho marítimo el riesgo de afectación del cable, por factores externos, es mínimo. La velocidad del tendido y enterramiento del cable en la plataforma continental es de unos pocos kilómetros por día y el tendido en aguas internacionales es de unos cientos de kilómetros por día, dependiendo esencialmente de las condiciones marítimas de la ruta del tendido. En la figura 9.35 se exponen unas imágenes, donde se indica la excavación sobre el litoral de la parte inicial de la ruta del tendido del cable submarino, así como los de los preparativos para la iniciación del enterramiento del cable submarino sobre la plataforma continental.



Figura No. 9.35 Imágenes excavación sobre el litoral, preparativos para la iniciación del enterramiento del cable submarino sobre la plataforma continental y tendido correspondiente en esta trayectoria inicial

Fuente: Sea or s. N . www.iscpc.org. (2019). Disponible: www.vtv.gov.ve articulos 2017 10 24 se-inicio-tendido-del-nuevo-cable-submarino-hacia-margarita-

fotos-5020.html. Cable submarino entre Brasil y EU. (2019). Disponible:
<http://mundoejecutivoexpress.mx/tecnologia/2018/03/09/telefonica-instalara-cable-submarino-entre-brasil-eu>.

En la figura inmediatamente anterior se aprecia un esquema del tendido de la red óptica submarina, donde se indica la existencia de repetidores de amplificación óptica, cuya distancia de separación oscila entre los 30 y 50 kilómetros, para el caso de fibras monomodos. Los repetidores indicados en esta figura son de carácter referencial. Como podemos apreciar en el mencionado esquema existirán fibras ópticas para transmisión y otras para recepción, de forma independientes.

En la figura No. 9.36 se muestra un tendido de boyas que sostienen el cable óptico entre la superficie terrestre y el barco cablero, así como la adhesión de las boyas al cable óptico y una parte del cable donde se encuentra una repetidora óptica. Todo esto al comienzo del proceso de tendido.



Figura No. 9.36 Parte inicial del tendido submarino del cable óptico.

Fuente: Mantenimiento y construcción de redes fibra ópticas. (2019). Disponible: <http://grupomaxicable.com.gt/portfolio-view/asesoria-mantenimiento-y-construccion-de-redes-hfc-y-fibra-optica> ..

- Cerca de las costas, los cables requieren de mayor protección, debido a que están expuestos a la navegación de los barcos, a las actividades náuticas que realizan las personas, a la presencia de posibles depredadores marítimos, entre otros factores. Es por esta razón que estos cables cuentan con mayor cantidad de elementos de protección, haciendo que su estructura sea más robusta. A estos cables comúnmente se les denomina *cables armados*. Para el resto del tendido (en aguas profundas) el cable cuenta con menos elementos protectores, siendo por lo tanto menos robustos, conociéndose como *cables ligeros*. En la figura No. 9.37 se muestran unas imágenes del tendido y posterior enterramiento del *cable armado* en la plataforma continental, por parte de los buzos especializados en este tipo de instalación, así como la de la sumersión del robot en las aguas marítimas. Estadísticamente se tiene registrado que la velocidad promedio de enterramiento del *cable armado* es de 0.2 m hora.

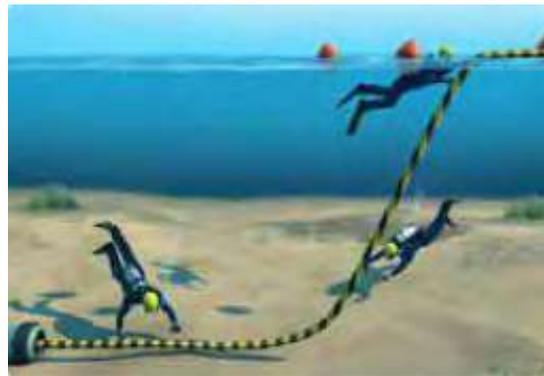


Figura. No.9.37 lintervención de los buzos en el tendido y posterior posicionamiento del cable submarino en la plataforma continental y la sumersión del robot en las aguas marítimas.

Fuente: einte mil leguas de cable submarino. (2019). Disponible: <http://cromo.com.uy/veinte-mil-leguas-cable-submarino-n696006> Submarine net or s. (2018). Disponible: <http://submarinenet.org/s.com/stations/blog>.

Dependiendo, en parte de las características eléctricas del cable (especialmente de su atenuación), de las alteraciones topográficas de la plataforma marítima (ondulaciones), de las dobleces a que está sometido el cable (por la no linealidad de la ruta) y a la distancia del tendido, entre otros factores, se requiere que estos tendidos dispongan de repetidores, los cuales regenerarán la señal que se transfieren por el cable y amplifican su intensidad. Como dato referencial se requiere de un repetidor por cada 40 kilómetros de tendido (en promedio). Este valor se reduce o se aumenta dependiendo de las condiciones, tanto del cable como de la ruta del tendido, expuestas anteriormente. En la figura No. 9.33 se indican unas imágenes de repetidores de cable óptico submarino y algunos repetidores actuales a escala comparativa.

Con el propósito de contextualizar las características y componentes estructurales básicos de una red de cableado óptico submarino, en la figura No. 9.38 se ilustra un esquema de la configuración habitual de una red de cableado submarino.

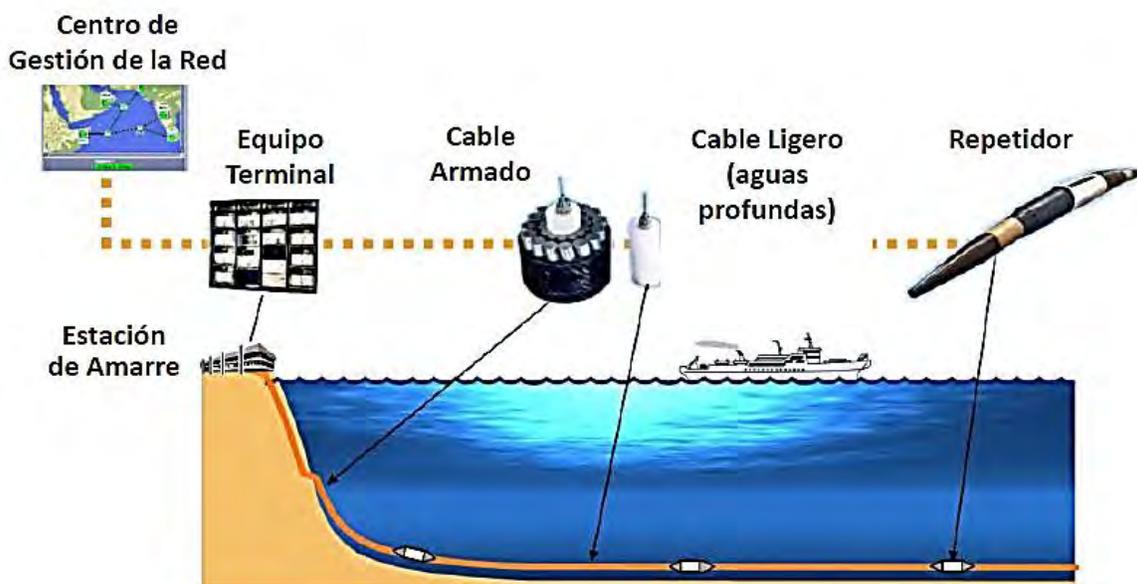
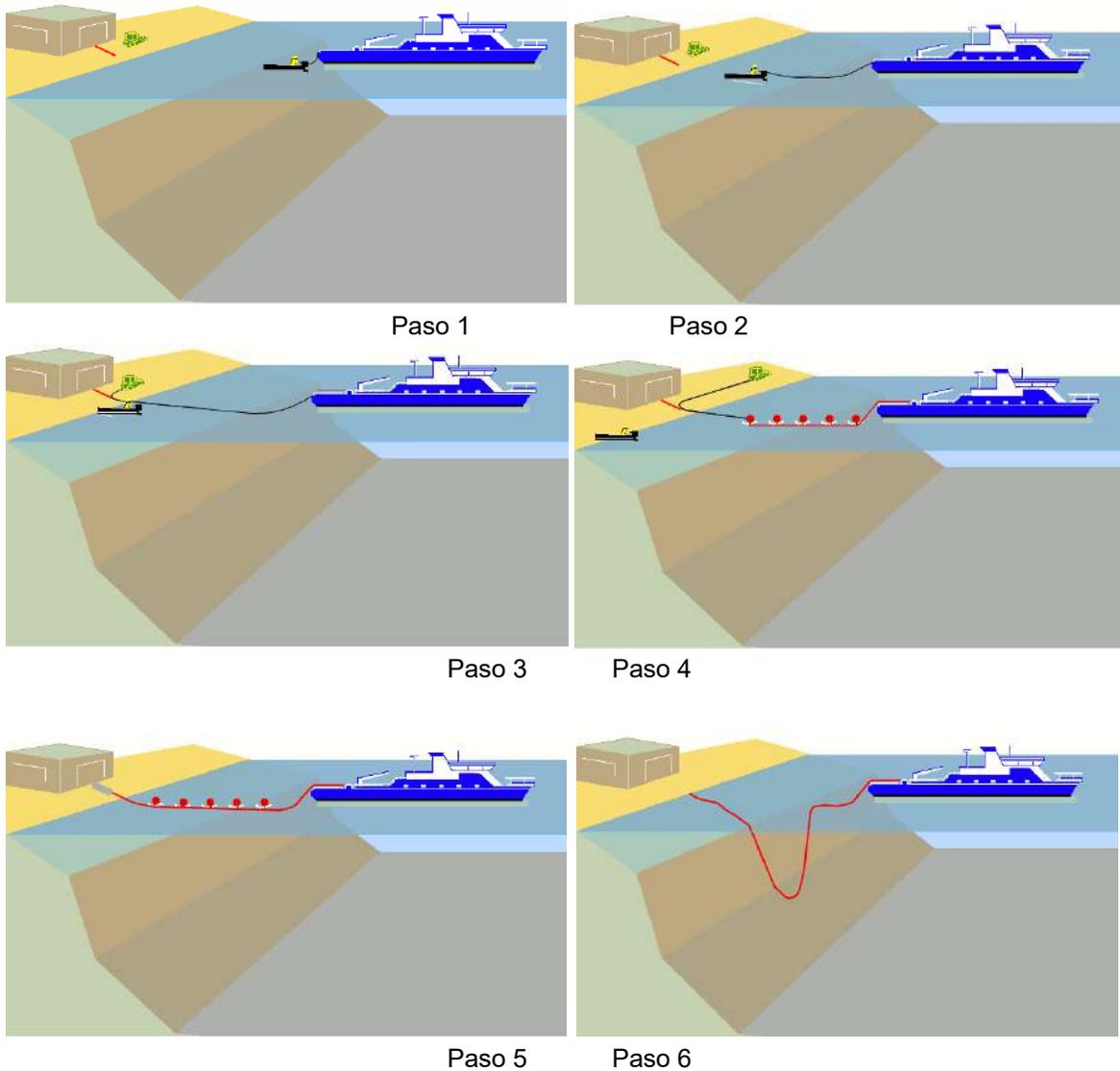


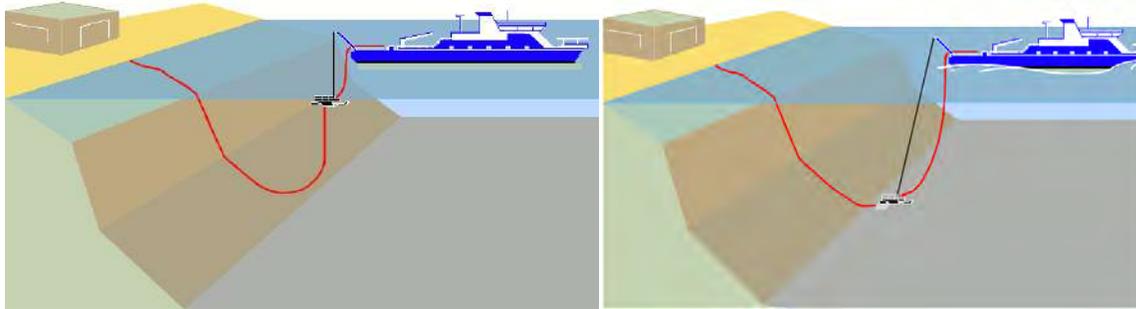
Figura No. 9.38 Esquema de la configuración habitual de una red de cableado submarino.

Fuente:U Cable Protection Committee and Alcatel-Lucend Submarine Network, 2016.

9.2.3.4 Proceso de tendido del cable óptico

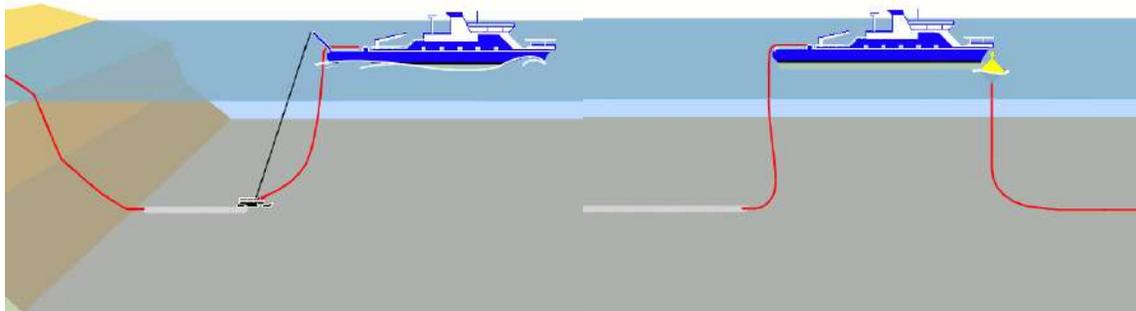
Con el propósito fundamental de dar una idea general del proceso de instalación de un cable óptico submarino, en la figura No. 9.39 se muestra una secuencia de las principales etapas del tendido del mismo, haciendo resaltar que el proceso requiere de una complejidad operacional de alta tecnología.





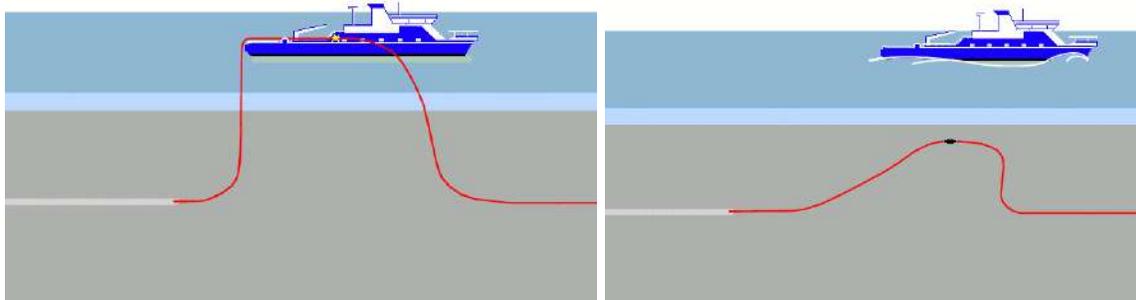
Paso 7

Paso 8



Paso 9

Paso 10



Paso 11

Paso 12

Figura No. 9.39 Secuencia de las principales etapas del enterramiento y tendido de un cable submarino.

Fuente: Tendido cable submarino. (2019). Disponible:
http://www.radiolatinamerica.no/noticias/noruega_start_230.

Paso 7 : el cable submarino es enterrado en el trayecto inicial parte litoral del de uno del extremo de la ruta y una embarcación auxiliar empieza a arrastrar el cable acerado, que jalará al cable submarino que se encuentra enrollado en la tarima del barco cableador.

Paso 8 : la embarcación auxiliar continúa con el arrastre del cable, que jalará al cable submarino hasta el litoral de la parte inicial de la conexión total.

aso : terminación del arrastre, en el trayecto marítimo, del cable acerado e interconexión con vehículo auxiliar terrestre que se encargara de seguir tirando dicho cable de arrastre.

aso : iniciación del tirado del cable submarino sobre las aguas marítimas, soportado por flotadores que evitarán el hundimiento del cable submarino y de esta forma facilitará su desplazamiento.

aso : terminación del recogido del cable submarino, desde el barco cablero, hasta el litoral donde se realizará el empalme con la parte que se encuentra ya enterrado en la superficie costera.

aso : liberación del cable submarino una vez que se haya realizado el empalme entre el tramo terrestre y el traído del barco cablero.

aso : enterramiento del cable armado en la plataforma continental y sumersión del robot encargado del tendido del cable submarino en el lecho marítimo.

aso : proceso de tendido del cable submarino sobre el lecho marítimo a través del robot especializado para tal labor.

aso : terminación del tendido del cable submarino sobre el lecho marítimo hasta el otro extremo de la conexión (otro litoral).

aso : ascenso del robot al barco cablero y recibo del tramo de cable submarino, del extremo final de la conexión, una vez este tramo haya sufrido el mismo proceso de instalación del que se le aplico al del extremo del trayecto inicial.

aso : empalme entre el cable submarino que ha sido tendido desde el extremo inicial y el tramo correspondiente al tramo final de la conexión total.

aso : una vez se haya realizado el empalmen entre los dos tramos se suelta el cable, adicionándole una pesa, para su sumersión hasta el lecho marítimo.

Durante todo el proceso de instalación del cable submarino se le realizará un monitoreo y control permanente, desde el barco cablero y o desde los litorales. En figura No. 9.40 se ilustran tres imágenes, donde en una se representa una central de monitoreo y control del proceso de instalación del cable submarino y en las otras dos la instalación de los flotadores al cable submarino, en la parte inicial del proceso de tendido y finalmente el tendido en el mar del cable óptico marítimo.



Figura No.9.40 Central de monitoreo y control del proceso de tendido de un cable submarino. Instalación de los flotadores en el cable submarino: tendido en el lecho marítimo del mismo.

Fuente: Tendido cable submarino. (2019). Disponible: <https://www.google.com.co/search?q=Tendido+cable+submarino+bi+1024+Alcatel-+ucent>.

En algunos casos el tendido se hace entre diferentes puntos terminales, para lo cual se requiere de unidades de derivación (branching units). En la figura No 9.41 se ilustra un tendido entre tres sitios terminales.

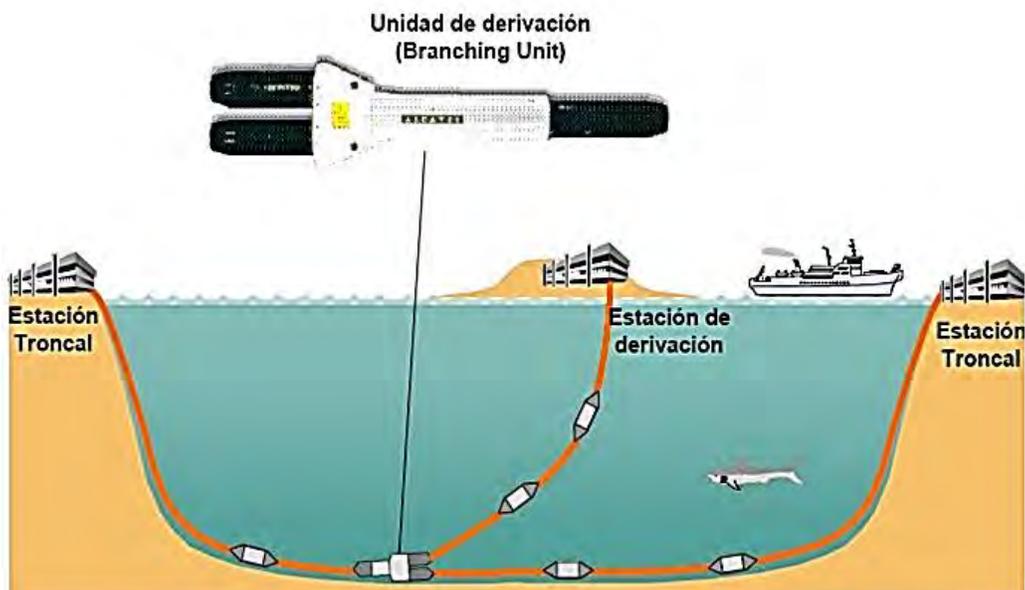


Figura. No. 9.41 Tendido entre terminales múltiples.

Fuente: Butrón, D. Gutiérrez, D. González, A., "Instalación de Fibra óptica", 2016.

9.2.3.5 Proceso de tendido en ambos sentidos

En algunas ocasiones el proceso de tendido del cable óptico submarino se realiza en ambos sentidos, empleándose por lo tanto el mismo equipamiento para cada uno de los tendidos. En el punto de encuentro de los respectivos barcos cableros, se hará el empalme correspondiente de los tramos del tendido, y después de comprobar que el enlace funciona correctamente sumergen los dos extremos de los cables conectados. Con este proceso se requiere prácticamente del doble de recursos para la instalación del tendido, pero el tiempo empleado en el mismo se podrá reducir alrededor de la mitad. En la figura No. 9.42 se muestra un esquema simplificado del proceso de instalación en ambos sentidos, simultáneamente.

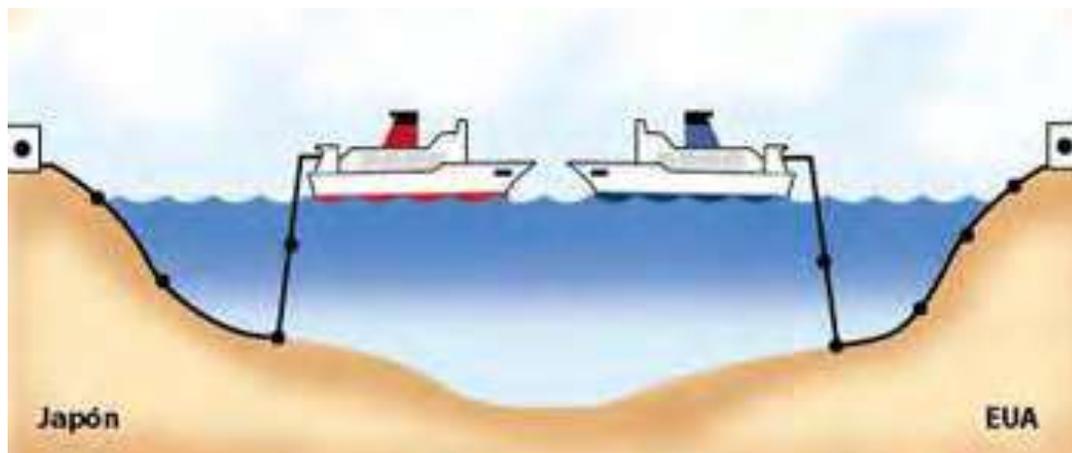


Figura No. 9.42 Instalación de cable submarino en ambos sentidos.

Fuente: De la O Cruz, P., "450 mil kilómetros de cable bajo el mar", Cómputo Académico UNAM, 2018.

9.2.3.6 Marco legal de los tendidos submarinos

Los tendidos de los cables submarinos requieren de los permisos respectivos de los países destinatarios de estas implementaciones. Existen también tratados internacionales que amparan la realización de estos tendidos. A continuación, se relacionan algunos de estos tratados: ⁽²¹⁾

- The International Convention for the Protection of Submarine Cables (1884).
- The Geneva Conventions of the Continental Shelf and High Seas (1958).

- United Nations Convention on Law of the Sea (1982).

De acuerdo a los tratados internacionales se han establecido ciertas disposiciones que definen los límites del mar, desde las aguas territoriales a las zonas económicas exclusivas y hasta alta mar. En la figura No. 9.43 se indica las limitaciones de estas principales zonas.

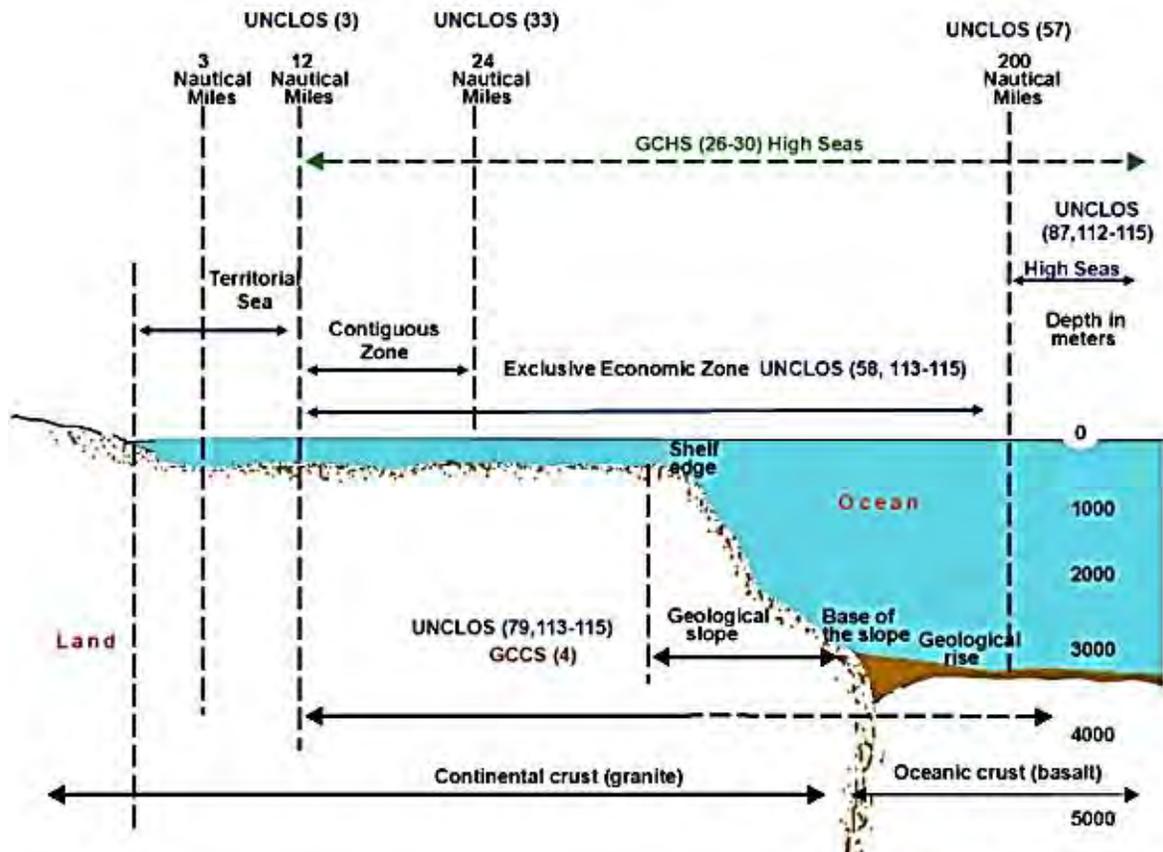


Figura No. 9.43 Límites legales del mar desde las aguas territoriales a las zonas económicas exclusivas y hasta alta mar.

Fuente: Doug Burnett. .iscpc.org. Consultado en mayo 2018.

9.2.3.7 Principales redes de cableado óptico submarino existente

El auge que ha tenido las redes ópticas, debido a las características funcionales que ofrece, tales como: mayor ancho de banda, altas tasas de transmisión de datos, bajos índices de latencia, reducción de ruido, entre otras, ha impulsado a la proliferación de estas redes en todo el mundo, incluyendo las redes ópticas submarinas. Actualmente existen por lo menos 70 sistemas de cableado submarino de fibra óptica, más otros que se encuentran en proceso de instalación y en

proyectos mediatos. Se calcula que unos 500 mil kilómetros de cable óptico existen en tendidos submarinos, interconectando todos los continentes del planeta. ⁽²²⁾

A manera de referencia, a continuación, se relacionan algunos de las principales redes de cableado submarino óptico existentes, de los cuales varios de ellos ya se han mencionado en el capítulo anterior.

1. C M B S : ⁽²³⁾

- *Año de inauguración:* 1.999
- *Trayectoria:* Estados Unidos, Islas Azores, Portugal, España y Sicilia (Italia).
- *longitud total:* 10.000 kilómetros.
- *proprietarios:* AT T, PT Comunicaciones, TATA Communications, Telecom SA Limited and Verizon Business.
- *Capacidad total de diseño:* 320 Gbps.

En la figura No. 9.44 se expone la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino COLUMBUS III.



Figura No. 9.44 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino: COLUMBUS III.

Fuente: International Cable Protection Committee 1999 - 2017 Disclaimer Site Map

2. S A-M - (South East Asia-Middle East- West Europe 3)⁽²⁴⁾

- *Año de inauguración:* 2.000

- *Cubrimiento actual*: parte desde Alemania y une 39 puntos del globo hasta llegar a Japón y a Australia
- *ongitud total*: 40.000 kilómetros (actualmente es la más larga del mundo).
- *ropietarios*: France Telecom y China Telecom (administrador: Singtel)
- *Capacidad total de diseño*: 100 Gbps.

En la figura No. 9.45 se expone la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino S A-M - , tal como se ilustra también en la figura No. 8.1.

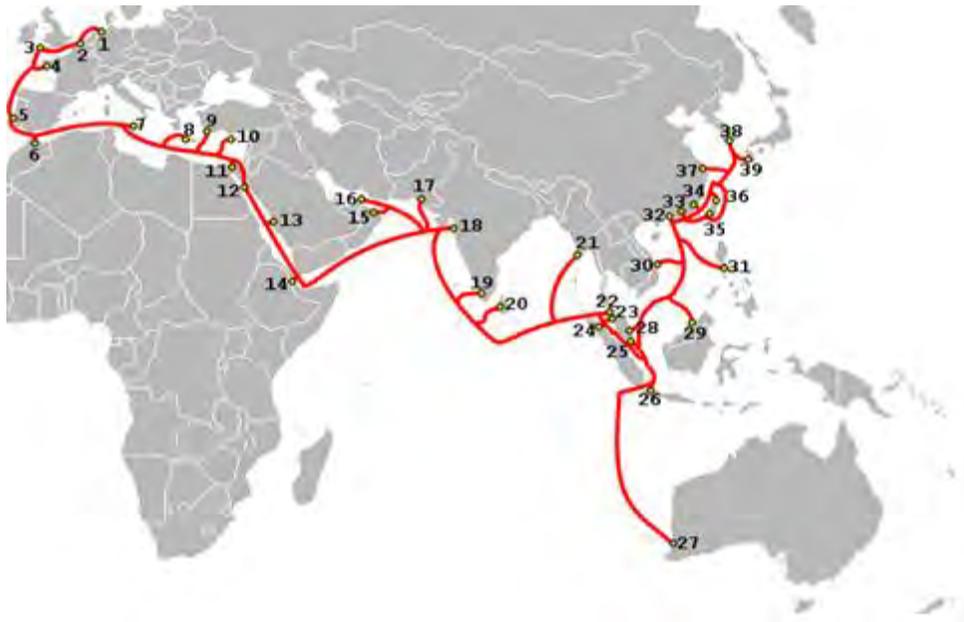


Figura No. 9.45 Configuración del sistema del tendido de la red del cable óptico submarino: S A-M -

Fuente: Huurdeman, A.A., "The World Wide History of Telecommunications". John Wiley & Sons. 2017, p. 463.

3. SAM- (Sur América-1): ⁽²⁵⁾

- *Año de inauguración*: 2.001
- *Cubrimiento actual*: Estados Unidos, Puerto Rico, Guatemala, Brasil, Argentina, Chile, Perú, Ecuador y Colombia
- *ongitud total*: 25.000 kilómetros en forma de anillo (incluido 2.000 kilómetros del tramo terrestre al sur del continente).

- *ropietarios*: Telefónica S.A. y TE Connectivity.
- *Capacidad total de diseño*: 1.92 Tbps.

En la figura No. 9.46 se muestra la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino SAM-1



Figura No. 9.46 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino: SAM-1.

Fuente: Tyco Telecommunications, 2017

4. Maya- (26)

- *Año de inauguración*: 2.000.

- *Cubrimiento actual:* Estados Unidos, México, Guatemala, Panamá, Colombia.
- *longitud total:* 4.323 kilómetros.
- *propietarios:* AT T, Telmex y Hondutel.
- *Capacidad total de diseño:* 95 Gbps.

En la figura No. 9.47 se ilustra la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino Maya-1



Figura No. 9.47 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
Maya-1

Fuente: *Submarine Cable Map* www.submarine-cable-map.com *telegeography.com*.

5. ARC S- (AmericasRegionCaribbean Ring System)⁽²⁷⁾

- *Año de inauguración:* 2002
- *Cubrimiento actual:* Estados Unidos, Las Bahamas, Islas Turcas y Caicos, República Dominicana, Puerto Rico, Curazao, Venezuela, Colombia, Panamá, Costa Rica, Nicaragua, Honduras, Guatemala, Belice y México.
- *longitud total:* 10.000 kilómetros en forma de anillo.
- *propietario:* Telecomunicaciones Columbus Net or
- *Capacidad total de diseño:* 960Gbps.

En la figura No. 9.48 se ilustra la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino ARC S- .



Figura No. 9.48 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino: ARCOS-1.

Fuente: Cables submarinos. (2019). Disponible: <http://blogthinkbig.com/cables-submarinos-historia/>.

6. S A-M - (South East Asia-Middle East- est Europe 4): (28)

- *Año de inauguración:* 2.006
- *Cubrimiento actual:* Francia, Italia, Argelia, Túnez, Singapur, Malasia, Tailandia, Bangladesh, India, Sri Lanka, Paistán, Emiratos Árabes Unidos, Arabia Saudí y Egipto
- *ongitud total:* 20.000 kilómetros
- *ropietario:* Alcatel-Lucent Submarine Networks
- *Capacidad total de diseño:* 100 Gbps.

En la figura No. 9.49 se indica la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino S A-M - .



Figura No. 9.49 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
S A-M -

Fuente: *South Asia-Middle East-Europe*. Sri Lanka Telecom..2018.

7.SAT- ASC SAFE (*South Atlantic East Africa Submarine Cable South Africa East*)^{(29). (30)}

- *Año de inauguración:* 2.006.
- *Cubrimiento actual:* Portugal, España, Islas Canarias, Oeste Africano, Sur África, Sait Paul, Savanne, India y Malasia.
- *longitud total:* 28.000 kilómetros.
- *propietarios:* France Telecom, Nitel, TCI, AT T y SNL .
- *Capacidad total de diseño:*3.84Tbps.

En la figura No. 9.50 se expone la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino SAT- ASC SAFE.



Figura No. 9.50 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
SAT-3/WASC SAFE.

Fuente: Sat-3/WASC SAFE. (2019). Disponible:

<http://www.flagtelecom.com/index.cfm?channel=4328&NewsID=27318>

8. A -AM(*an-American*)⁽³¹⁾

- *Año de inauguración:* 2010
- *Cubrimiento actual:* Puerto Rico, Aruba, Venezuela, Colombia, Panamá, Ecuador, Perú y Chile.
- *Longitud total:* 14.490 kilómetros.
- *Propietarios:* Consorcio del Cable Submarino Panamericano.
- *Capacidad total de diseño:* 40 Gbps.

En la figura No. 9.51 se muestra la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino CCS.



Figura No. 9.51 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
PAN-AM.

Fuente: Fibras ópticas submarinas. (2019). Disponible:
<https://es.scribd.com/doc/33899891/FIBRAS-OPTICAS-SUBMARINAS>.

9. *lobe- et* ⁽³²⁾

- *Año de inauguración:* 2012
- *Cubrimiento actual:* Boca de Ratón (Florida USA), Venezuela, Brasil y Colombia
- *ongitud total:* 22.000 kilómetros.
- *ropietarios:* Brasil Telecom.
- *Capacidad total de diseño:* 12Tbps.

En la figura No. 9.52 se muestra la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino Globe-Net. .



Figura No. 9.52 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino: Glo-Net.

Fuente: Cable de fibra óptica submarino Glo.Net. (2019).

Disponible: <http://itusersmagazine.com> 2012 10 09 globenet-optimiza-su-sistema-de-cable-de-fibra-optica-submarino .

10. Alba-1 ⁽³³⁾

- *Año de inauguración:* 2012
- *Cubrimiento actual:* Siboney (Cuba), xxxx (Jamaica) y Guaira (enezuela).
- *ongitud total:* 1.800 ilómetros (Cuba a enezuela) y 245 ilómetros (Cuba a Jamaica).
- *ropietarios:* Alcatel-Lucent, Shanghai Bell y Telecomunicaciones Gran Caribe SA (propiedad de los gobiernos de enezuela y Cuba).
- *Capacidad total de diseño:* 323 Mbps.

En la figura No. 9.53 se muestra la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino Alba-1.



Figura No. 9.53 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
Alba-1.

Fuente: Cable submarino Cuba - Venezuela. (2019). Disponible:
<https://www.ecured.cu/Cable-submarino-Cuba-Venezuela>.

11. AM - (34)

- *Año de inauguración:* 2015
- *Cubrimiento actual:* Florida (USA), República Dominicana, Puerto Rico, Colombia y Brasil.
- *longitud total:* 17.800 kilómetros.
- *propietarios:* AlcatelLucentyAmérica Móvil(operador Claro).
- *Capacidad total de diseño:* 50Tbps.

En la figura No. 9.54 se muestra la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino AM - .



Figura No. 9.54 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
AM -1

Fuente: AM - *roject*", Economist ith data Telex, 2018

12. CCS (*acific Caribbean Cable System*) ⁽³⁵⁾

- *Año de inauguración*: 2016
- *Cubrimiento actual*: Jac sonville (Florida USA), Islas de Tórtola, Puerto Rico, Aruba, Curazao, Cartagena, María Chiquita y Balboa (Panam), Manta (Ecuador).
- *ongitud total*: 6.000 ilómetros.

- *Propietarios:* Cable Wireless Communications, Setar, Telconet, Telefónica Global Solutions y United Telecommunication Services (UTS).
- *Capacidad total de diseño:* 80 Tbps.

En la figura No. 9.55 se muestra la configuración global del tendido de la red del cable óptico submarino CCS.



Figura No. 9.55 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino: PCCS.

Fuente: "Pacific Caribbean Cable System", Telefónica Colombia, 2018.

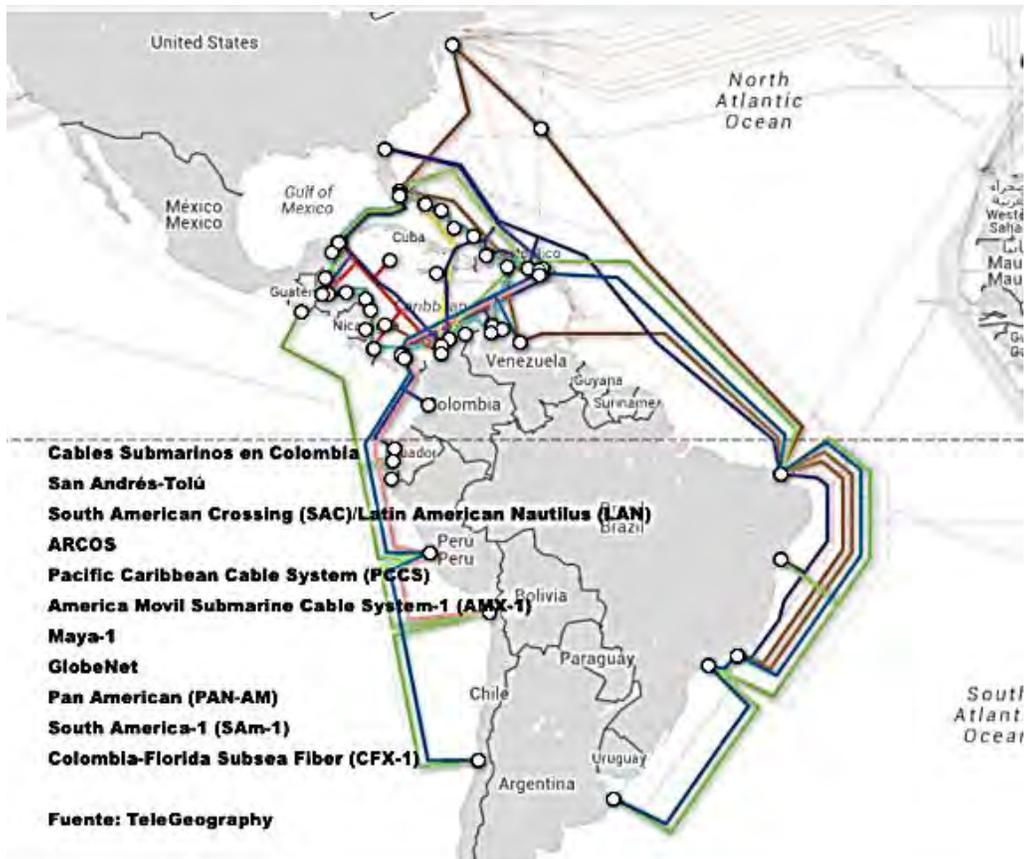
9.2.3.8 Cables ópticos submarinos que conectan a Colombia

Según el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) de Colombia, este país cuenta actualmente con once cables ópticos submarinos que lo conectan con el mundo exterior. Estos cables son:⁽³⁶⁾

- San Andrés - Tolú.
- SAC (South American Crossing).
- LAN (Latin American Nautilus).
- ARCOS (Americas Region Caribbean Ring System).
- PCCS (Pacific Caribbean Cable System).
- AM -1 (America Movil Submarine System).
- Maya-1.
- Globe-Net.

- PAN-AM (Pan American).
- SAM-1 (South America-1).
- CF -1 (Colombia-Florida Subses Fiber).

En la figura No. 9.56 se muestra en la parte superior las principales redes de cable óptico submarino que conectan a Colombia y en la parte inferior estas redes adicionándole las redes terrestres.



a.) Principales redes ópticas submarinas que conectan a Colombia



b.) Principales redes ópticas submarinas y terrestres en Colombia.

Figura No. 9.56 Redes de cable óptico submarino que conectan a Colombia.

Fuente: Tele-Geography CRC MinTIC, (2019). Disponible: <http://telecomunicaciones-peru.blogspot.com.co/2018/01/cables-submarinos-en-latinoamerica.html>.

El cable óptico submarino entre San Andrés y Tolú, de una longitud de 824 kilómetros, inaugurado a finales 2010 y de propiedad del Ministerio de las TIC a través de Compartel, cuenta actualmente con cinco principales operadores conectados a este cable: Sol Cable isión (operador local), Colombia Telecomunicaciones, Telefónica Móviles Colombiana S.A., ETB y Comcel S.A, que interconectan a San Andrés, a través de la estación ubicada en Tolú, con el territorio continental colombiano. ⁽³⁷⁾

En la figura No. 9.57 se indica el tendido de la red del cable óptico submarino *T e loba Crossing et or* , la cual también interconecta con Colombia.



Figura No. 9.57 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
T e loba Crossing et or .

Fuente: Solomon Chen. *As loba Crossing Cras ed, xecutives ot oan Relief, ension ayouts.* all Street Journal. p. B1 2017.

9.2.3.9 Mapa mundial de los cables ópticos submarinos.

Sin contar con los enlaces de gran alcance que se vienen implementando desde el año 2015, en la figura No.9.58 se hace una representación del mapamundi referente a algunas de las principales redes de cable óptico submarino existentes en el globo terrestre.

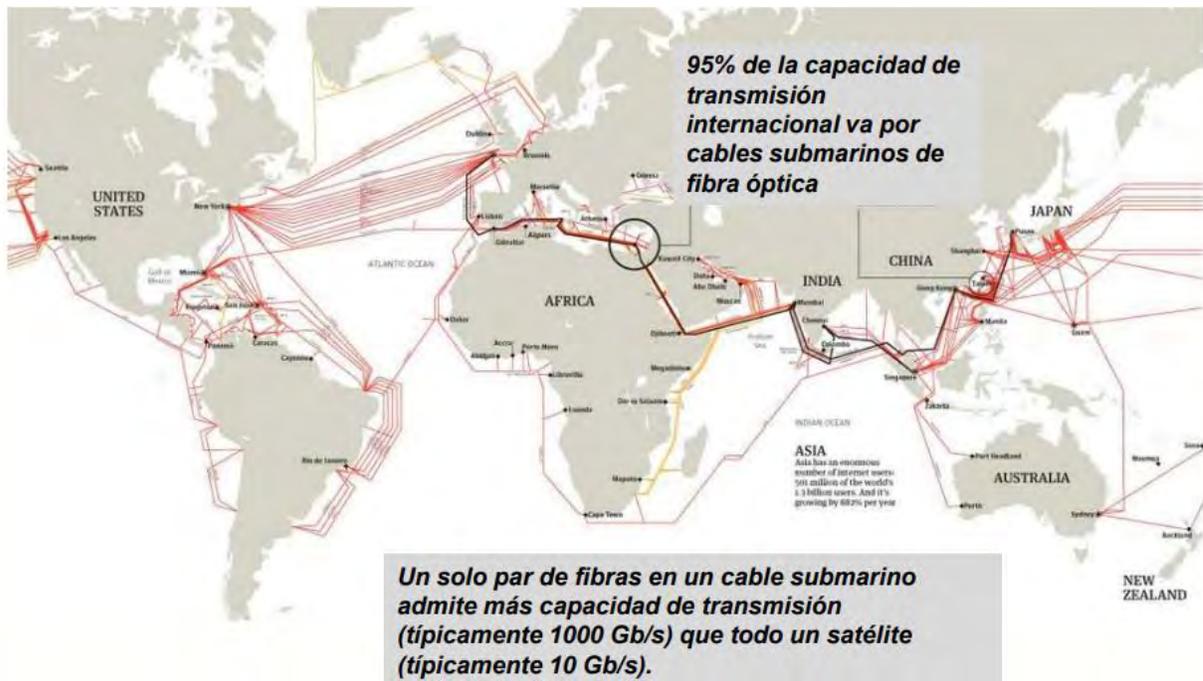


Figura No. 9.58 Mapamundi de algunas de las principales redes de cable óptico submarino existentes en el globo terrestre.

Fuente: Mapamundi cable óptico submarino. (2019). Disponible:

<http://itx.blogspot.com.co/2018/01/principales-cables-submarinos-en-america.html>.

Estos cables ópticos se destacan por su inmensa capacidad de transmisión de datos que ofrecen a las comunicaciones entre continentes, permitiendo transferencias de información muy rápida, segura y confiable. Se ha podido comprobar que un mensaje que se trasmite por un cable óptico submarino de longitud de 6.000 kilómetros se demora en ir y volver unos 60 milisegundos. (38)

Se ha estimado que actualmente cerca del 99% de las comunicaciones por Internet que se realizan entre continentes, se ejecutan a través de las redes de cableado óptico submarino.

Las grandes empresas de telecomunicaciones e inversionistas han orientado su interés en la implantación de nuevos cables ópticos submarinos y o en la complementación o actualización que los que tienen en operación. Lo anterior ha también incrementado el interés de las empresas que prestan el servicio del tendido de estos cables, entre las que se encuentran principalmente las siguientes:

9.2.3.10 Recientes redes de cableado óptico submarino.

Debido al gran auge que ha tenido la utilización de las redes ópticas con tendido submarino, en las comunicaciones entre naciones y continentes, se ha incrementado el interés por la implementación de estas. A continuación, se relacionan algunos de los principales proyectos de cableado óptico submarino que recientemente se han implementado y los que se encuentran en desarrollo de ejecución.

1. MAREA⁽³⁹⁾

- *Fecha de iniciación - terminación:* finales del 2016 - comienzo del 2019
- *Puntos de enlace:* Virginia del Norte (EE UU) hasta Sopela (España). A partir de ahí se distribuirán por otros centros de Europa, África, Oriente Medio y Asia. Esta conexión entrará a España por la localidad vizcaína de Sopela.
- *Longitud total:* 6.600 kilómetros.
- *Propietarios:* Microsoft, Facebook y Telefónica (operador Telxius).
- *Capacidad total de diseño:* 160 Tbps (velocidad más grande existente).

La infraestructura de Marea será abierta, permitiendo la operación con la tecnología de múltiples fabricantes. En la figura No. 9.59 se expone la configuración global, que tendrá finalmente, el tendido de la red del cable óptico submarino *Marea*.



Figura No. 9.59 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino: *Marea*.

Fuente: Cable entre Sopela y EEUU. (2019). Disponible:

<https://www.eitb.eus/es/noticias/tecnologia/detalle/4897821/cable-sopela-ee-uu-cable-fibra-optica-facebook-microsoft>

2.1.2.1. B. A (Building Europe in to Latin America)⁽⁴⁰⁾

- **Fecha de iniciación - terminación:** comienzos del 2016 - mediados del 2019
- **Puntos de enlace:** Fortaleza (Brasil) y Sines (portugal), al final tendrá un tendido terrestre que unirá a Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Chile, Argentina y varios puntos de Brasil, y un tendido submarino que unirá a Fortaleza (Brasil) con el continente europeo, a través de Lisboa (Portugal).
- **Longitud total:** 10.000 kilómetros (parte submarina)
- **Propietarios:** el tendido enlace submarino, denominado *IslaLin*, estará a cargo de Telebras (el antiguo operador gubernamental de comunicaciones de Brasil) e IslaLin (una empresa especialista en desplegar y operar redes de cables submarinos de España)
- **Capacidad total de diseño:** 72Tbps (cable submarino)

En la figura No. 9.60 se expone la configuración global, que tendrá finalmente, el tendido de la red del cable óptico submarino *Bella*.



Figura No. 9.60 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
Bella.

Fuente: Bella conectará Latinoamérica Europa. (2019).

Disponibile: http://www.eldiario.es/turing-vigilancia-y-privacidad/BELLA-conectara-Latinoamerica-Europa-Unidos_0_398610529.html.

. *BR SA* (Brasil USA)⁽⁴¹⁾

- *Fecha de iniciación terminación:* finales de 2016 finales del 2019
- *Lugares de enlace:* Virginia Beach (USA), San Juan (Puerto Rico), Fortaleza y Río de Janeiro (Brasil)
- *Longitud total:* 11.000 kilómetros
- *Propietario:* Telefónica
- *Capacidad total de diseño:* 80 Tbps.

En la figura No. 9.61 se representa la configuración global, que tendrá finalmente, el tendido de la red del cable óptico submarino *Brusa* y *Marea*



Figura No. 9.61 Configuración del tendido de la red del cable óptico submarino:
Brusa y Marea

Fuente: Cable submarino Brusa. (2019). Disponible: <http://www.ticbeat.com/innovacion/un-nuevo-cable-submarino-de-fibra-optica-conectara-brasil-con-eeuu>.

9.3 Estructura básica de un enlace óptico submarino

La estructura fundamental de un enlace óptico submarino está conformada por los siguientes componentes básicos:⁽⁴²⁾

1. *dry land* (Planta seca: Estación terrestre): *Cable Landing Station* (Estación de aterrizaje de cable), en cada extremo del enlace.
2. *wet land* (Planta húmeda: Red submarina).

Las estaciones terrestres cuentan con los siguientes componentes básicos:

- *Wavelength Termination Equipment* (Wavelength Termination Equipment): Equipo de Terminación de longitud de onda,
- *Power Feed Equipment* (Power Feed Equipment): Equipo de alimentación de energía.
- *Line Terminal Equipment* (Line Terminal Equipment): Equipo terminal de línea.
- *Network Protection Equipment* (Network Protection Equipment: Equipo de protección de red).
- *Transmission Line Amplifier* (Amplificador de transmisión de línea).
- *Terrestrial City PoP* (Terrestrial City PoP: punto de conexión terrestre).

La red submarina está conformada fundamentalmente por los siguientes dispositivos básicos, entre otros:

- *Repeaters* (repetidores): de acuerdo, esencialmente, a la distancia del tendido.
- *Branching unit* (unidad de ramificación): de acuerdo a los diferentes puntos de conexión final del enlace.
- *Gain equalization* (ganancia de ecualización).

En la figura No. 9.62 se ilustra la estructura básica de un enlace de cableado óptico submarino.

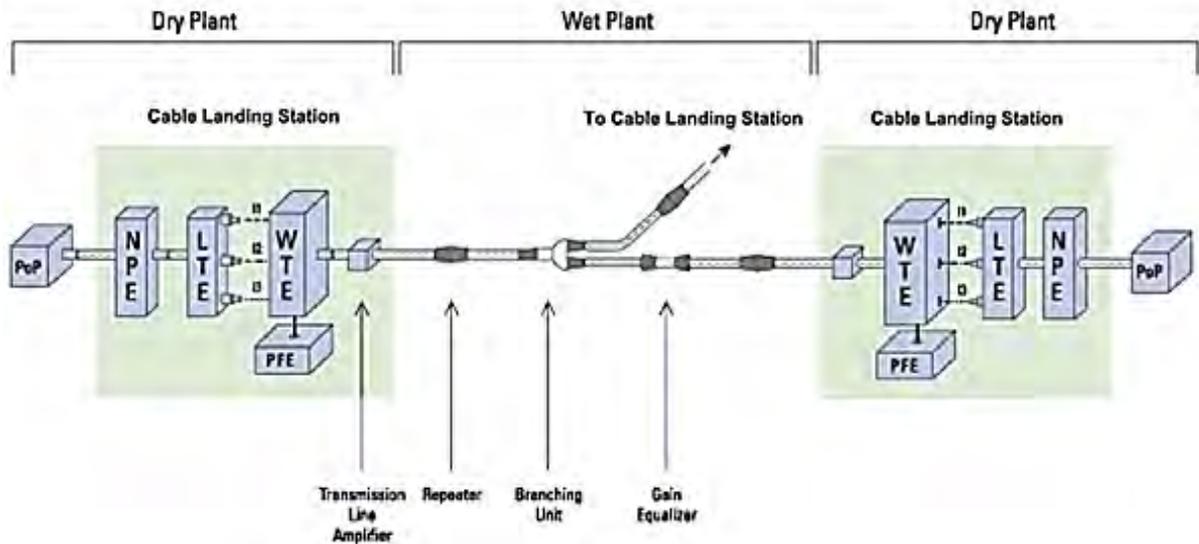


Figura No. 9.62 Estructura básica de un enlace óptico submarino.

Fuente: Enlace óptico submarino. (2019). Disponible:
<http://www.submarinenet.com/stations.blog>.

9.4 Aspectos básicos para el diseño de enlaces ópticos

Los procesos de diseño de las redes ópticas tanto terrestres como submarinas, son muy similares, diferenciándose esencialmente en las características estructurales de los componentes de protección que deben poseer los dispositivos de los tendidos submarinos.

Entre los aspectos básicos que se deben tener presente para el diseño de una red óptica, en términos generales, se relacionan a continuación.

9.4.1 Requerimientos del enlace

En el diseño de un enlace óptico se debe contar con los siguientes requerimientos de funcionamiento básicos: ⁽⁴³⁾

- *Capacidad del enlace*: cuantificada en bits por segundos (f_b : velocidad de bit) en el caso de que el enlace sea digital, o en ancho de banda (B) si el enlace es análogo.
- *Calidad del enlace*: ponderada en la tasa de error de bit permitida (BER: *Bit Error Rate*) para el caso de enlace digital, o en la razón de señal a ruido (S) si el enlace es análogo.

- *longitud total del enlace*: generalmente expresada en kilómetros.

9.4.2 Pérdidas en el enlace

Las pérdidas de los enlaces ópticos se deben, fundamentalmente, a las características propias del tipo de la fibra óptica a emplearse, a las diferentes conexiones que se le debe realizar al tendido del enlace y a las particularidades del recorrido de este. Complementando lo indicado en el numeral 4.29, donde se hace referencia a las pérdidas que se presentan en las señales ópticas, a continuación, se indican las principales pérdidas que se originan en los tendidos de los enlaces ópticos. En el numeral 5.8 y en el numeral 5.9, al final de este capítulo, se relacionan otras pérdidas que ocasionalmente se presentan y la forma de calcular las pérdidas por acoplamiento entre fuente y fibra ⁽⁴⁴⁾

- *Pérdidas por atenuación*: corresponden a aquellas que genera la fibra óptica, para la longitud de onda a que va a hacer transmitida la señal luminosa. Esta atenuación se debe básicamente a la absorción que las impurezas de la fibra generan a la intensidad luminosa de la señal y en gran medida al fenómeno de esparcimiento de Rayleigh (dispersión de la luz) que sufre la misma. La atenuación depende de la longitud de la señal luminosa transmitida, para el caso de que se utilice la tercera ventana (1.550 nm) la atenuación está entre los 0.2 a 0.3 dB/km, para fibra monomodo, mientras que para 1.300 nm la atenuación esta entre los 0.4 a 0.5 dB/km, para el mismo tipo de fibra. Hay que resaltar la gran diferencia que existe con las atenuaciones que presentan los cables coaxiales. Por ejemplo, para una señal con frecuencia de 500 MHz, un cable coaxial le puede presentar 50 dB/km o mayor.
- *Pérdidas por conexiones*: corresponden a las que presentan los conectores e interfaces que se utilizan en el enlace (el rango típico está entre los 0.5 a 1.0 dB) y a los empalmes que deben realizarse a la fibra a lo largo de la longitud del enlace (el rango típico está entre los 0.05 a 0.1 dB).
- *Pérdidas por la dispersión temporal*: modal en fibras multimodo y cromática en la fibra monomodo. Esta dispersión se genera por el ensanchamiento de los pulsos, para el caso de las señales digitales, y por la deformación de la señal, para el caso de señales análogas.
- *Pérdidas por la no linealidad*: en la propagación de la señal luminosa, generando componentes luminosos adicionales. A este fenómeno se le denomina FWM (*Four Wave Mixing*) y se presenta con mayor notoriedad en los enlaces ópticos de multiplexación por división de longitud de onda DWDM (*Dense Wavelength*

ivision Multiplexing), títimamente se está reduciendo este fenómeno (no linealidad) limitando a ciertos niveles de intensidad a DM a través del uso de fibras N DSF (*on ero ispersión S ifted iber*), trabajando, principalmente, en la tercera ventana óptica.

- *érdidas por curvatura o dobleces pronunciados*: que sufre el cable óptico en el tendido del enlace. Estas curvaturas no deben sobrepasar el radio máximo de curvatura permisible (R_c), cuyo valor, por tipo de cable óptico, se encuentra en el *atas eet* respectivo, como se indicó anteriormente.

También debe considerarse las intensidades de ruido que se pueden introducir en el enlace, especialmente cuando en el mismo se emplean dispositivos electrónicos, como es el caso de repetidores electroópticos, entre otros.

9.4.3 Aspectos de implementación

Para el diseño de un enlace óptico se debe tener como referencia dos aspectos fundamentales de lograr en la implementación de este:

- Garantizar que se obtenga el nivel de potencia requerido en el extremo de la recepción del enlace.
- Lograr que el distorsionamiento total, que sufra la señal en todo el recorrido del enlace, no sea perjudicial para su fiel recuperación.

9.4.4 Cálculo de potencia en la recepción teórico ideal

Teniendo en cuenta la potencia de transmisión y las pérdidas a presentarse a lo largo del enlace, comprendido entre el transmisor luminoso (emisor de luz) y el receptor (detector de luz), sin ningún tipo de amplificación, ramificación y o conmutación intermedia, se ha llegado a que la potencia en el detector de luz se puede calcular empleando la ecuación 9.7: ⁽⁴⁵⁾

$$\langle 9.7 \rangle P_{RX} = P_{TX} - (L_F)l - (L_C)N_C - (L_E)N_E - L_L - L_D$$

Donde:

P_{RX} : Potencia luminosa de entrada en el detector óptico en dBm.

P_{TX} : Potencia luminosa de salida en el emisor óptico en dBm.

L_F : Pérdidas por atenuación en la fibra en dB/km.

l : Longitud del enlace entre el transmisor y el receptor en km.

L_C : Pérdidas por conector en dB.

N_C : Número de conectores entre el transmisor y el receptor.

L_E : Pérdidas por empalme en dB.

N_E : Número de empalmes entre el transmisor y el receptor.

L_L : Pérdidas por no linealidad en dB.

L_D : Pérdidas por curvatura o dobles en dB.

El valor requerido de potencia en el detector óptico depende de tipo de detector a ser utilizado, este valor lo indica el fabricante de este, cuyos valores típicos se encuentran entre: -10 dBm y -12 dBm.

9.4.5 Cálculo de potencia en la recepción teórico real

Es conveniente tener en cuenta que la ecuación 9.7 corresponde a un cálculo teórico estimado ideal. Por lo tanto, hay que adicionarle márgenes y penalidades por los cambios y anomalías que se puedan presentar, tanto en la estructura de la red como en el funcionamiento de sus dispositivos. Entre estos márgenes y penalidades se tienen, entre otros:

9.4.5.1 Márgenes del enlace (Mar)

Entre los principales márgenes que se deben considerar en un enlace óptico, se tienen los siguientes:

- *Márgenes del cableado óptico*: corresponden a la compensación a las pérdidas que hay que tener en cuenta por todas las variaciones y deterioros que posteriormente pueda sufrir el cableado, tales como: incremento de empalmes y conexiones futuras, por ampliaciones o ramificaciones posteriores previstas; por la degradación del cable y conectores, entre otras.

- *Márgenes de equipos*: corresponden a la compensación a las pérdidas que hay que tener en cuenta debido a las decaencias de la intensidad de la potencia luminosa inyectada a la fibra, por envejecimiento de los dispositivos empleados como generadores de luz, así como a la reducción de las características de funcionamiento de los demás dispositivos ópticos y o optoelectrónicos empleados en la red.
- *Margen de seguridad*: corresponde a un valor de ganancia adicional que se le asigna al enlace para mayor confiabilidad en el diseño del mismo. Este valor por lo general no es menor a 3 dB.

Hay que tener de presente que cualquier valor de ganancia adicional (márgenes) que se le asigne al cálculo del enlace, se requiere de un incremento de mejoramiento de las características de funcionamiento de los diferentes dispositivos y elementos que conforma la red óptica (mayor potencia luminosa y menos pérdidas), lo que demanda mayores costos de esta.

9.4.5.2 Penalidades del enlace (Pn)

Entre las principales penalidades que se le aplican al enlace óptico, se tienen los siguientes: ⁽⁴⁶⁾

- *Penalidad por dispersión*: corresponde a la compensación por las pérdidas como consecuencia a la reflexión que generalmente se presenta en el interfaz entre la fuente luminosa y la fibra óptica. El valor típico de esta penalidad es de unos 0.5 dB.
- *Penalidad de dispersión*: corresponde a la compensación por las pérdidas como consecuencia a la deformación de los pulsos por dispersión, lo que implica una disminución en la intensidad de la señal en el detector de luz (receptor). Los fabricantes de los cables ópticos consideran estas pérdidas y las relacionan como *parámetro de dispersión* o como *tolerancia de dispersión* (ps nm) Un valor típico de esta penalidad está en el orden de los 0.5 dB.

Incluyendo los márgenes y penalidades considerados anteriormente y para una tasa de error BER (*Bit Error Rate*), para el caso de comunicaciones digitales, o para una relación de potencia a ruido S/N, para el caso de comunicaciones análogas, dada, el detector óptico requiere de una potencia mínima, denominada sensibilidad del detector, la cual se puede calcular su cumplimiento según la ecuación 9.8. El valor de potencia mínima calculada en el detector debe ser por lo menos igual a la

sensibilidad del mismo, valor suministrado por el fabricante del detector, generalmente dado en dBm.

$$\langle 9.8 \rangle P_{RX \min} = P_{TX} - (L_F)l - (L_C)N_C - (L_E)N_E - L_L - L_D - Mr - Pn$$

Donde:

$P_{RX \min}$: Potencia luminosa de entrada en el detector óptico en dBm.

P_{TX} : Potencia luminosa de salida en el emisor óptico en dBm.

L_F : Pérdidas por atenuación en la fibra en dB/km.

l : Longitud del enlace entre el transmisor y el receptor en km.

L_C : Pérdidas por conector en dB.

N_C : Número de conectores entre el transmisor y el receptor.

L_E : Pérdidas por empalme en dB.

N_E : Número de empalmes entre el transmisor y el receptor.

L_L : Pérdidas por no linealidad en dB.

L_D : Pérdidas por curvaturas o dobleses en dB.

Mr : Márgenes totales en dB.

Pn : Penalidades totales en dB.

9.4.6 Factores a considerar en el diseño final del enlace

Son varios los factores que se deben definir en el diseño de un enlace óptico. Cada enlace en particular reviste su propia particularidad, sin embargo, a manera de referencia en la tabla No. 9.4 se relacionan los principales de estos aspectos, que se presentan en términos generales en la gran mayoría de los diseños de los enlaces ópticos.⁽⁴⁷⁾

Factores de diseño	Características / Opciones
Longitud del enlace	En kilómetros
Tipo de fibra	Monomodo Multimodo
Tipo de detector óptico (receptor)	PIN APD

Sensibilidad del detector óptico	Expresada en dBm
Potencia óptica que le llega al detector	Expresada en dBm
Potencia óptica que puede soportar el detector	Expresada en dBm
Longitud de onda de operación	850 1.300 1550 nm
Tipo de emisor óptico (transmisor)	Led Láser
Potencia óptica de salida del transmisor	Expresada en dBm
Código de modulación	NR R entre otros.
Tasa de error	alores típicos 10^{-9} 10^{-12}
Velocidad de transmisión	Expresada en Gbps Tbps
Relación señal a ruido	Expresada en dB
Número de conectores	Pérdidas en conectores en dB
Número de empalmes	Pérdidas por empalmes en dB
Restricciones ambientales	Humedad Temperatura Luz solar
Restricciones mecánicas	Aplicaciones interiores y o exteriores
Radios de curvatura	Pérdidas de curvatura en dB

Tabla No 9.4 Factores principales a considerar en un diseño de un enlace óptico.
Fuente: Ásquez García, C. Sánchez Pena, J.M., *Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticas*,
Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III, Madrid, 2018.

Ejemplo No. 9.2

Determinar la longitud máxima permisible que puede tener un enlace óptico, si cuenta con los siguientes dispositivos y se le exige el cumplimiento de los parámetros de funcionamiento también indicados a continuación: ⁽⁴⁸⁾

- Carretes de cable óptico de 5 m cada uno.
- Emisor óptico: diodo láser (LD) en 1.550 nm.
- Potencia suministrada a la fibra: 0 dBm.
- Sensibilidad del detector óptico: -32 dBm.
- Pérdida por atenuación en la fibra óptica: 0.2 dB / m.
- Pérdida por empalme: 0.09 dB.
- Pérdida total de conectores en el enlace: 2.2 dB.
- Margen total: 3.5 dB.
- Penalidades totales: 1.6dB.

Solución:

Aplicando la ecuación 9.9:

$$\langle 9.9 \rangle L_{per\max.} = l_{\max} \times L_{k\max}$$

Donde:

$L_{per\max.}$: Pérdida máxima permitida en el enlace, en dB

l_{\max} : Longitud máxima posible del enlace, en km

$L_{K\max}$: Pérdidas máximas por kilómetro, en dB / km

Entonces:

$$\langle 9.10 \rangle l_{\max} (km) = \frac{L_{per\max.} (dB)}{L_{k\max} (dB / km)}$$

$$\langle 9.11 \rangle L_{per\max} (dBm) = P_{TX} (dBm) - L_{Ctotal} (dB) - M_r (dB) - P_n (dB) - S (dBm)$$

$$\langle 5.12 \rangle L_{K\max} (dB / km) = \frac{(L_F \times l_{cr}) + L_E}{l_{cr}}$$

Donde:

P_{TX} : Potencia suministrada a la fibra (dBm)

L_{Ctotal} : Pérdidas por por conectores total, en dB

M_r : Margen total, en dB

P_n : Penalidades totales, en dB

S : Sensibilidad del detector óptico, en dBm

L_F : Pérdidas por atenuación en la fibra, en dB / km

l_{cr} : Longitud del cable por carrete, en km

L_E : Pérdidas por empalme, en dB

Reemplazamos valores:

$$L_{per\max} (dB) = 0 dBm - 2.2 dB - 3.5 dB - 1.6 dB - (-32 dBm) = 24.7 dBm$$

$$L_{K\max} (dB/km) = \frac{(0.2 dB/km \times 5 km) + 0.09 dB}{5 km} = 0.218 dB/km$$

$$l_{\max} (km) = \frac{24.7 (dBm)}{0.218 (dB/km)} = 113.3 km$$

Esta es la distancia máxima que puede alcanzar este enlace óptico, con los dispositivos y condiciones de funcionamiento enunciados, para asegurar una confiable comunicación entre el emisor y el detector del enlace. Para mayor distancia se requería regenerar la señal a través de un amplificador o repetidor óptico, en el caso de tendido submarino, y o repetidor o amplificador electroóptico o preferiblemente óptico, para un tendido terrestre.

Ejemplo No. 9.3

Calcular el ancho espectral del láser a utilizar para la distancia máxima del enlace óptico del ejemplo No. 5.2, teniendo como referencia las siguientes características funcionales:⁽⁴⁹⁾

- Periodo de bit: 410 ps.
- Coeficiente de dispersión (para una fibra óptica estándar NDSF: *on ispersión S ifted iber*): 22ps (nm. m) a 1.550 nm.

Solución:

Aplicando las ecuaciones 5.13 y 5.14:

$$\langle 5.13 \rangle \quad w (nm) = \frac{D_{p\max} (ps)}{C_d (ps/nm \times km) \times l_{\max} (km)}$$

$$\langle 5.14 \rangle \quad D_{p\max} = \frac{T}{2}$$

Donde:

w : Ancho espectral del láser, en nm

$D_{p_{\max}}$: Dispersión máxima de pulso (modal), en ps

C_d : Coeficiente de dispersión de la fibra, en ps/nm × km

l_{\max} : Distancia máxima del enlace, en km

T : Periodo de bit, en ps

Reemplazando valores:

$$D_{p_{\max}} = \frac{410}{2} = 205 \text{ ps}$$

$$w \text{ (nm)} \leq \frac{205 \text{ ps}}{(22 \text{ ps/nm} \times \text{km}) \times (113.3 \text{ km})} \leq 0.082243 \text{ nm}$$

Lo anterior exige que se deba utilizar un diodo láser igual o menor de 0.082243 nm de ancho espectral, para lograr el enlace en las condiciones y características enunciadas.

Ejemplo No. 9.4

Determinar si es factible el enlace óptico trabajando en las siguientes condiciones y características de funcionamiento y de disponibilidad: ⁽⁵⁰⁾

- Longitud del enlace: 26 m.
- Carretes de cable óptico de 5 m.
- Potencia suministrada a la fibra: - 4.5 dBm.
- Sensibilidad del detector óptico: - 32 dBm.
- Tipo de fibra óptica: multimodo (gradual de ancho de banda $B_0 = 1.2 \text{ GHz} \cdot \text{m}$).
- Longitud de onda: 1.300 nm.
- Pérdidas de atenuación: 0.48 dB/m máximo.
- Pérdida total de conectores: 2.2 dB.
- Margen total (Margen de confiabilidad): 3 dB.
- Penalidades totales: 1dB.
- Pérdida por empalme: 0.1 dB.
- velocidad de transmisión: 34,368 Mbps (flujo PDH E3 para 480 canales telefónicos).
- Pérdidas por no linealidad: 1 dB.

- Pérdidas por curvatura: 0.7 dB
- Código de línea: 5B 6B.
- Coeficiente de dispersión cromática: 3.3ps nm. m.
- Ancho espectral: 8.6 nm a -3 dB del diodo láser.
- Considerar como dispersión máxima modal: 0.5 T

Solución:

1. Factibilidad del enlace con respecto a los efectos de dispersión (nodal y cromática):

a.) *Velocidad de transmisión de línea*

Para una codificación de línea de 5B 6B:

$$\langle 9.15 \rangle f_b = \frac{\text{Velocidad de transmisión}}{\text{Código de línea}} = \frac{34,368}{5/6} = 41.24 \text{ Mbps}$$

b.) *eriodo de bit:*

$$\langle 9.16 \rangle T = \frac{1}{41.24 \text{ Mbps}} = 24.25 \text{ ns}$$

c.) *istancia máxima debido a la dispersión modal:*

$$\langle 9.18 \rangle l_{\text{mod}} = \frac{\text{Ancho de banda por kilómetro}}{\text{Ancho de banda del enlace}} = \frac{B_0 \text{ (MHz.km)}}{B_w \text{ (MHz)}}$$

En el peor de los casos se tiene que:

$$\langle 9.19 \rangle B_w = 0.44 / \text{dispersión modal} = \frac{0.44}{D_{P_{\text{max}}}}$$

$$D_{P_{\text{max}}} = \frac{T}{2} = \frac{24.25 \text{ ns}}{2} = 12,125 \text{ ns} \Rightarrow B_w = \frac{0.44}{12,125 \text{ ns}} = 36.29 \text{ MHz}$$

Reemplazando valores:

$$l_{\text{mod}} = \frac{B_0 \text{ (GHz.km)}}{B_w \text{ (MHZ)}} = \frac{1.2 \text{ GHz.km}}{36.29 \text{ MHZ}} = 33.1 \text{ km}$$

d.) *distancia máxima debido a la dispersión cromática:*

$$\langle 9.20 \rangle l_{\text{crom}} = \frac{\text{(Dispersión modal máxima)}}{\text{(Ancho espectral del diodo láser)(Coeficiente de dispersión)}}$$

$$= \frac{D_{p_{\text{max}}} \text{ (ns)}}{w \text{ (nm)} C_d \text{ (ps/nm} \times \text{km)}} = \frac{12,125 \text{ ns}}{(8,6 \text{ nm})(3,6 \text{ ps/nm} \times \text{km)}} = 391,63 \text{ km}$$

En cuanto a los efectos de dispersión, como se puede observar de los resultados anteriormente obtenidos, la dispersión nodal es la que limita la longitud máxima de un enlace óptico, antes de requerirse una regeneración (repetidor) de la señal, ya que es mucho mayor que la cromática. Con respecto a los efectos de dispersión se puede advertir que el enlace de longitud de 26 m, para el caso que se está analizando, es factible ya que la distancia máxima permitida por la dispersión nodal (33.1 m), la cual es mayor que la distancia proyectada del enlace, sin requerirse de repetición.

2. Factibilidad del enlace con respecto al requerimiento de la intensidad con que debe llegar la señal luminosa al extremo del enlace (al detector óptico):

$$P_{RX \text{ min}} = P_{TX} - (L_F)l - (L_C)N_C - (L_E)N_E - L_L - L_D - Mr - Pn$$

$$= -4.5 \text{ dB}_m - (0.48 \text{ dB/km})(26 \text{ km}) - 2.2 \text{ dB} - (5 \text{ emp.})(0.1 \text{ dB/emp.})$$

$$- 1 \text{ dB} - 0.7 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - 1 \text{ dB} = -25.38 \text{ dBm}$$

Como se puede observar la señal llegaría con una intensidad 25.38 dBm, valor que está por encima del requerido por la sensibilidad del detector (- 32 dBm). Por lo tanto, es factible el enlace propuesto, respecto también al requerimiento de la intensidad con que debe llegar la señal luminosa al extremo del enlace (al detector óptico).

3. Factibilidad del enlace con respecto al ensanchamiento total:

a.) Ensanchamiento modal:

$$\langle 9.21 \rangle E_{\text{mod}} = \frac{0.44l(\text{km})}{B_0(\text{GHz}\cdot\text{km})} = \frac{(0.44)(26)\text{km}}{1.2\text{GHz}\cdot\text{km}} = 9.53\text{ ns}$$

b.) Ensanchamiento cromático:

$$\langle 9.22 \rangle E_{\text{crom}} = C_{\text{dcrom}} \times w \times l = 3.3(\text{ps} / \text{nm}\cdot\text{km}) \times 8.6(\text{nm}) \times 26(\text{km}) = 0.738\text{ ns}$$

El ensanchamiento total sería de: 10,27ns, donde el gran porcentaje corresponde al ensanchamiento modal. Como este valor es el 42.35 del periodo del bit, y el valor máximo de dispersión modal es de 0.5 T, se puede considerar, también, factible el enlace con respecto al ensanchamiento total que se pueda presentar.

a que el ensanchamiento total previsto a presentarse en el enlace está relativamente cerca de la dispersión modal máxima permitida, sería conveniente revisar las condiciones de funcionamiento del enlace para reducir un poco más el ensanchamiento previsto. de los posibles parámetros a cambiar, podría ser el del aumento del ancho de banda por kilómetro de la fibra.

Con respecto a las factibilidades consideradas, se puede concluir que el enlace propuesto es posible realizarlo.

En la tabla No. 9.5 se relacionan algunos de los principales estándares de rendimiento y el rango típico de sus posibles valores, según estadísticas, de los sistemas y enlaces ópticos existentes.

Tipo de Red	Tipo de Fibra	Tipo de Emisor	Longitud de onda (nm)	Potencia del emisor (dBm)	Sensibilidad del detector (dBm)	Margen del enlace (km)
Transmisión	Monomodo	Láser	1310 1550	3 a -6	- 30 a - 45	30 a 40
	Monomodo	D D	1550	20 a 0	- 30 a - 45	40 a 50

de oz						
Transmisión de Datos	Multimodo	Led				
	Multimodo	CSEL	850	-3 a -15	-15 a - 30	3 a 25
Transmisión de Datos	Multimodo					
	Monomodo	Láser	1310	-0 a -20	-15 a -30	10 a 25
CAT (AM)	Monomodo	Láser	1310 1550	10 a 0	0 a - 10	10 a 20

Tabla No. 9.5 Principales estándares de rendimiento se los sistemas enlaces ópticos.

Fuente: *Guía de Referencia para Remises de Cableado de Fibra Óptica*, The Fiber Optic Association, Inc. (FOA), 2017.

Ejemplo No. 9.5

Para el enlace óptico indicado en la figura No. 9.63, determinar cuál debe ser la potencia mínima que debe ser suministrada a la fibra para que poder utilizar un detector luminoso de sensibilidad -30 dBm. ⁽⁵¹⁾

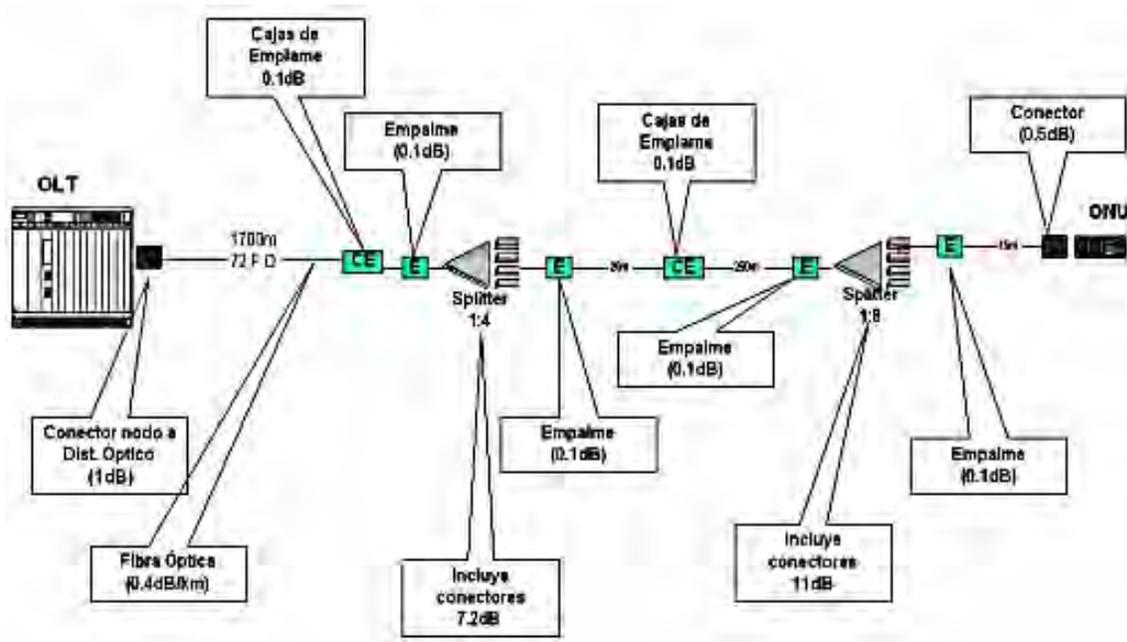


Figura No. 9.63 Estructura básica de un enlace óptico.

Fuente: Abreu, M. Castagna, A. Cristiani, P. unino, P. Roldós, E. Sandler, G., *Características generales de una Red de fibra óptica al hogar (FTTH)*", Universidad de Montevideo, 2016, p.43

Solución:

$$P_{RX} (dBm) = P_{TX} (dBm) - \text{Pérdidas totales}$$

$$P_{TX} (dBm) = P_{RX} (dBm) + \text{Pérdidas totales}$$

Para este ejemplo solamente se contempla las pérdidas indicadas en el enlace. No se consideran los demás parámetros indicados en la ecuación 8.3. Teniendo en cuenta todos los tramos del tendido, la distancia total del enlace es de 1985 m

$$P_{RX} (dBm) = -30 \text{ dBm}$$

Pérdidas totales = Fibra óptica + Conectores + Cajas de empalmes

+ Empalmes + Splinters =

$$(1,985 \text{ km})(0.5 \text{ dB / km}) + (1.5 \text{ dB}) + (0.2 \text{ dB}) + (0.4 \text{ dB}) + (18.2 \text{ dB}) = 21.29 \text{ dB}$$

$$P_{TX} (dBm) = -30 \text{ dBm} + 21.24 \text{ dB} = -8.76 \text{ dBm}$$

9.5 Detección y corrección de error

Uno de los problemas de mayor interés que se presenta en las comunicaciones radica en el deterioro que puedan sufrir las señales que se transmiten, incluyendo desde luego las ópticas. Existen diversas técnicas o métodos para poder detectar y reconstruir tales señales, esencialmente para el caso de transmisiones digitales.

Esta detección y corrección de errores es más eficiente, en cuanto a ocupación de canal y tiempos totales de transmisión, cuando no se requiere retransmisión de las señales. Por lo tanto, las técnicas que realizan esta función son más adecuadas, en tal sentido, si se implementan en el receptor.

Por lo general la calidad de un enlace, incluyendo los de fibra óptica, se suele tomar como parámetro de calidad la tasa de error (BER). Este parámetro es estadístico y mide los bits erróneos detectados, con respecto a la cantidad de bits transmitido, en un determinado periodo de tiempo. Uno de los factores que incrementa la calidad

de un enlace óptico es la *relación en potencia de la señal a ruido óptico* (OSNR: Optical Signal to Noise Ratio) y la cual guarda una reciprocidad directa con el BER, y es más fácil de determinar. La OSNR se mide en dB.

Entre otros factores que afectan la OSNR de un enlace óptico y por tanto al BER, se pueden particularizar, principalmente, los siguientes: ⁽⁵²⁾

- Las características estructurales y técnicas de la fibra (atenuación, dispersión cromática y PMD)
- Las características de funcionamiento y transmisión (formato de modulación, banda espectral, número de canales y la separación entre los mismos).
- Las características de los dispositivos del enlace (amplificadores, filtros ópticos, splinters, entre otros)

Unas de las técnicas muy recurrentes en las comunicaciones ópticas, para detectar y corregir errores, son las denominadas *corrección de errores hacia adelante* (FEC: *Forward Error Correction*), las cual permiten la corrección en el receptor sin requerirse retransmisión de las señales (códigos). Estas técnicas también son muy utilizadas en las comunicaciones satelitales y en las emisiones de televisión digital terrestre (TDT), entre otros enlaces y radiodifusiones.

Esta técnica básicamente consiste en añadir al código original unos bits de redundancia. La secuencia de datos que salen del generador digital llega al codificador que está encargado de añadir los bits de redundancia, obteniéndose lo que se denomina *palabra código*, la cual es enviada al receptor, mediante el medio de transmisión (canal) correspondiente y éste, a través del decodificador respectivo obtendrá la secuencia de datos original, aplicando los algoritmos de corrección de errores adecuados. Los dos principales tipos de codificación usados son: ⁽⁵³⁾

- Códigos bloque. La paridad en el codificador se introduce mediante un algoritmo algebraico aplicado a un bloque de bits. El decodificador aplica el algoritmo inverso para poder identificar y, posteriormente corregir los errores introducidos en la transmisión.
- Códigos convolucionales. Los bits se van codificando tal y como van llegando al codificador. Cabe destacar que la codificación de uno de los bits está enormemente influenciada por la de sus predecesores. La decodificación para este tipo de código es compleja ya que, en principio, es necesaria una gran cantidad de memoria para estimar la secuencia de datos más probable para los bits recibidos. En la actualidad se utiliza para decodificar este tipo de códigos *algoritmo de Viterbi*, por su gran eficiencia en el consumo de recursos.”

Al aumentar, por redundancia, el número de bits al código original, se supone que se estaría disminuyendo las velocidades de transmisión (tasa binaria) y recargando los procesos de transmisión del código resultante, pero en la realidad esta técnica

reduce notablemente los requerimientos binarios de transmisión, ya que no se realiza retransmisión de los códigos para lograr la detección y corrección de errores.

Para reducir la BER se hace indispensable la utilización de la técnica FEC, especialmente para las transmisiones de ultra velocidades (como es el caso de los enlaces ópticos). Existe una relación directa entre el incremento de la velocidad que ofrece el canal (la fibra óptica) y el de la OSNR, y por lo tanto con el de la BER y con el de la de FEC. Se tiene, por ejemplo, que para lograr un incremento de velocidad de 40 Gbps a 100 Gbps se hace necesario un aumento de la OSNR en unos 4 dB y que para pasar de 10 Gbps a 100 Gbps se requiere que la OSNR se incremente en por lo menos 10 dB.

El rendimiento en el punto de recepción del enlace, expresado en la relación: energía en bit / densidad de ruido $((E_b / N_0)(dB))$, depende del tipo de modulación a ser utilizado en la transmisión y del BER definido y por lo tanto del FEC a implementarse. Las recomendaciones IESS-308, identifica estos valores. Por ejemplo: si se va a utilizar modulación PS con una BER 10^{-6} y una FEC 3/4, el rendimiento es de unos 7.6 dB.

De lo anterior se puede deducir que:

- Si no se usa *FEC*, pero se mantiene el *BER* y el mismo tipo de modulación, entonces se requiere aumentar (E_b / N_0) , o sea E_b , lo que implica incrementar la potencia de transmisión, para compensar la carencia de *FEC*.
- Si no se usa *FEC*, y se mantiene el valor de (E_b / N_0) y el tipo de modulación, entonces se aumenta la probabilidad de error: *BER*, o sea que se incrementa la posibilidad de error en el enlace.

En la figura No. 9.64 se ilustra un diagrama donde se indican, otra vez, los principales factores y dispositivos que regularmente existen en un enlace óptico y en la ecuación 9.23 se relaciona la forma de calcular la distancia máxima que puede alcanzar un enlace óptico, teniendo en cuenta estos componentes, incluyendo la presencia de la FEC.

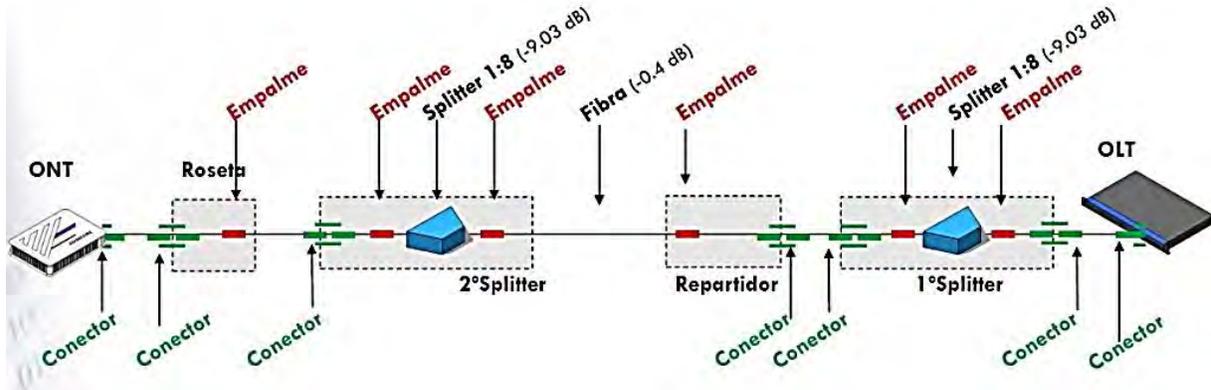


Figura No. 9.64 Componentes principales de un enlace óptico típico
Fuente: Catálogo de Servicios *Redes Inteligentes: Telnec*, 2018.

$$\langle 9.23 \rangle D_{\max} (km) = \frac{[P_{TX} (dB) - S (dB) + FEC (dB) - M_r (dB)] - [\sum A_S (dB) + \sum A_e (dB) + \sum A_C (dB)]}{A_{FO} (dB / km)}$$

Donde:

$D_{\max} (km)$: Distancia máxima del enlace \wedge $P_{TX} (dB)$: Potencia óptica transmitida a

$S (dB)$: Sensibilidad del detector óptico \wedge $FEC (dB)$: Rendimiento por corrección de error

$M_r (dB)$: Margen de confiabilidad \wedge $A_S (dB)$: Atenuación por Splitter (incluyendo repartidores)

$A_e (dB)$: Atenuación por empalme \wedge $A_C (dB)$: Atenuación por conector

$A_{FO} (dB / km)$: Atenuación de la fibra óptica por kilómetro

Ejemplo No. 9.6

Determinar la distancia máxima del enlace óptico indicado en la figura No. 9.64, Teniendo en cuenta los valores de los parámetros de funcionamiento indicados en el enlace, y el resto de los valores son los siguientes:

- Potencia óptica transmitida: - 1.2dBm
- Sensibilidad del detector óptico: -34dBm
- Rendimiento de corrección de error (FEC): 8 dB
- Margen de confiabilidad: 2 dB
- Atenuación por empalme: 0.15 dB
- Atenuación del conector de la fibra al emisor óptico: 1.4 dB
- Atenuación del conector de la fibra al detector óptico: 0.6 dB
- Atenuación de cada conector en el resto del enlace: 1.2 dB

- Atenuación por repartidor: 6 dB

Nota: Para este enlace no se consideran las otras pérdidas posibles (Penalidad total, Pérdidas por no linealidad, Pérdidas por curvatura,) las cuales no se relacionan en la ecuación 9.16.

Solución:

Aplicando la ecuación 9.16

$$P_{TX} (dB) = -1.2 dB_m - 30 dB = -31.2 dB$$

$$S (dB) = -34 dB_m - 30 dB = -64 dB$$

$$D_{\max} (km) = \frac{[-31.2 - (-64) + 8 - 2](dB) - [2(9.03) + 6 + 6(0.15) + (1.4 + 0.6 + 5(1.2))](dB)}{(0.4)(dB/km)}$$

$$= 14.7 km$$

En caso de no disponer de FEC, el enlace no es posible realizarlo (desde el punto de vista de cálculo), si los demás parámetros se mantienen si modificación alguna.

9.6 Funcionamiento básico del OTDR

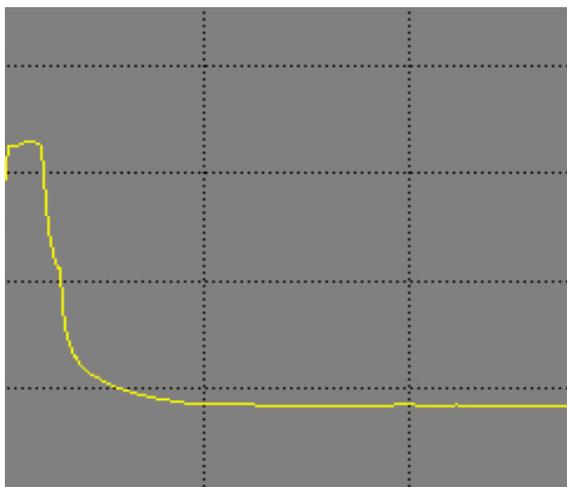
Como se mencionó en el numeral 9.2.2.3 *Consideraciones generales en tendidos subterráneos*, finalizado el tendido del cable óptico, sea cual fuese el tipo de tendido, deberá realizarse una verificación de este, mediante el refractómetro óptico en el dominio del tiempo OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer* , con el fin de comprobar que no haya sufrido daño alguno el cable (roturas o radios de curvatura excesivos, entre otros).

Complementado lo que se ha mencionado anteriormente sobre el OTDR, su funcionamiento se fundamenta en la emisión de un pulso de luz láser muy estrecho (entre 10 nanosegundos y 10 microsegundos) a lo largo de la fibra. Debido a que en el extremo final de la fibra se le coloca un conector reflector, la emisión enviada es reflejada y detectada por el OTDR.

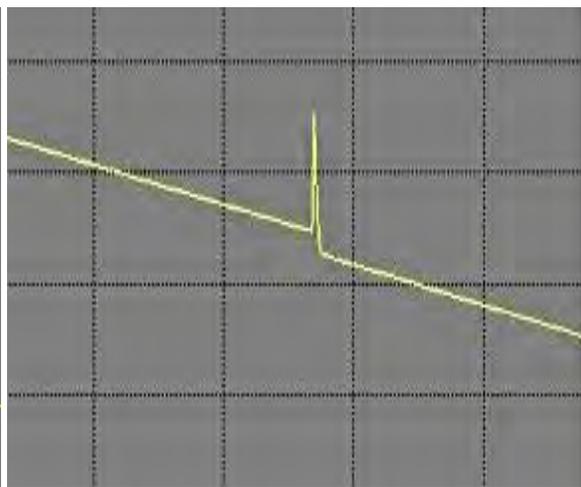
La intensidad del pulso retornado es integrada como una función del tiempo, y representada en función de la longitud de la fibra, mediante un algoritmo especial, reproduciéndose en la pantalla del OTDR una gráfica *Atenuación vs distancia*, donde

se registran las diferentes atenuaciones existentes en el tendido del enlace, tales como: por curvatura, empalmes, conectores, entre otras. Estas atenuaciones se deben a los efectos de dispersión de Rayleigh, a las reflexiones por cambio de índice de refracción (reflexiones de Fresnel) como es el caso de los conectores ópticos, así como por las variaciones del diámetro modal que se presentan a lo largo del tendido de la fibra. ⁽⁵⁴⁾

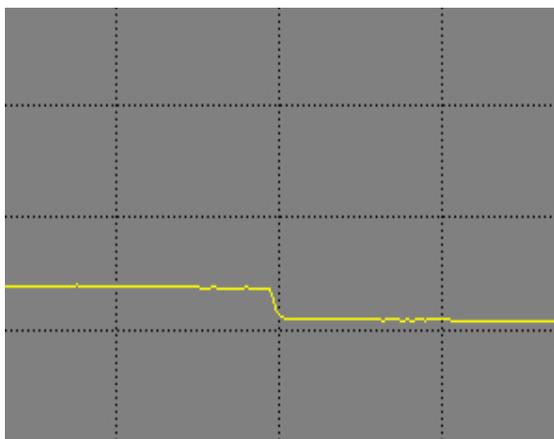
En la figura No. 9.65 se ilustran las muestras de los algunos de los diferentes eventos que se pueden presentar en el proceso de verificación de un enlace óptico y que son registrados en el OTDR



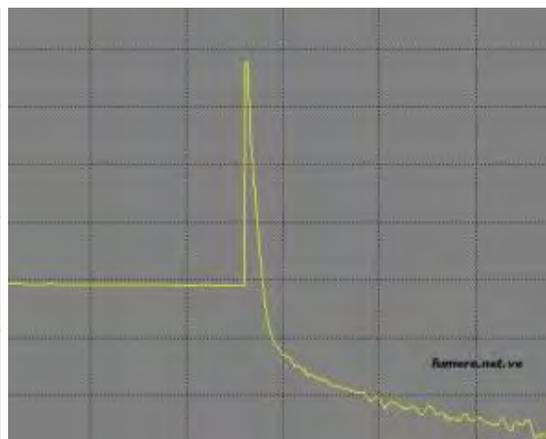
Muestra de fibra Muerta



Muestra de un conector



Muestra de un Empalme



Muestra del final de la fibra

Figura No. 9.65 Muestras de algunos de los eventos registrados en un OTDR como consecuencia del proceso de verificación de un enlace óptico

Fuente: Gráficas de un OTDR. (2018). Disponible: <https://www.fibraoptica hoy.com/blog/graficas-de-un-otdr>

Cuando el enlace es corto, regularmente se presenta el fenómeno denominado Ghosts (Fantasma), el cual consiste en la presencia del evento del fin de fibra óptica (lado izquierdo) el cual se vuelve a repetir en el lado derecho pero atenuado. (ver figura No. 9.66)

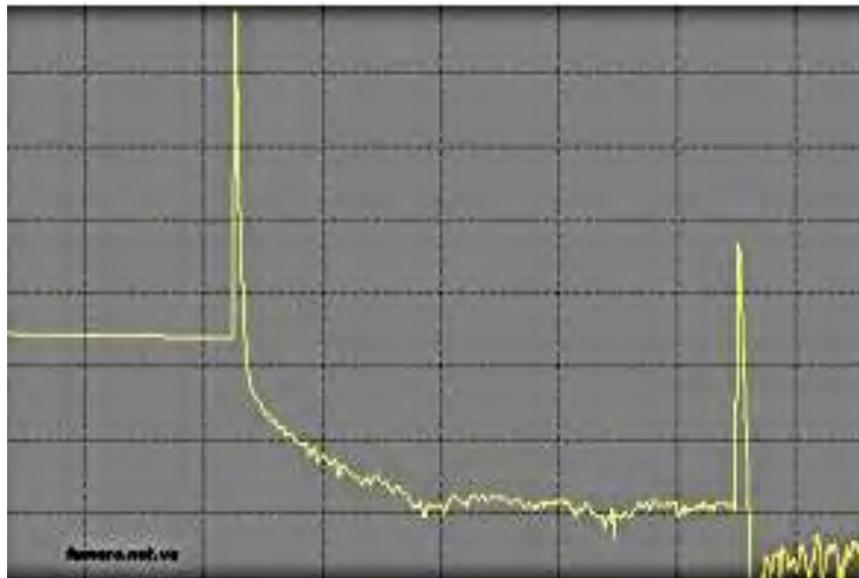


Figura No. 9.66 Muestra del evento Ghosts en la verificación de un enlace óptico

Fuente: Gráficas OTDR. (2019). Disponible: <https://www.fibraoptica hoy.com/blog/graficas-de-un-otdr>

En la figura No. 9.20 se muestra la imagen de uno de los diferentes tipos de OTDR existentes en el mercado. En la figura No. 9.67 se ilustran otras imágenes de OTDR s de tipo portátil, de la gran gama de este tipo de dispositivos.



Figura No. 9.67 Imágenes de OTDR s de tipo portátil

Fuente OTDR Portátil. (2019). Disponible: <https://www.fibraoptica.com> otdr-portatil-con-interfaz-grafica <http://www.fs.com> es c otdr-34

9.7 Redes ópticas inteligentes

El número de suscriptores cada día mayor y la demanda creciente de nuevos y eficientes servicios a hacia las redes de transmisión de datos, requieren de estas una gestión más compleja y una estructura con mayor flexibilidad y de altísima capacidad de respuesta, que se ajuste a las exigencias y coberturas que demanden sus usuarios.

Para que las redes, cualquiera que sea estas, incluyendo las ópticas, correspondan a las actuales y futuras exigencias, se hace necesario que estas redes cuenten con inteligencia. Esto se logra mediante la incorporación, en las redes, de dispositivos y equipos inteligentes, capaces de ajustarse automáticamente a estos nuevos y crecientes requerimientos, así como de la disponibilidad de software de gestión que permita controlar y manejar eficientemente las complejidades de funcionamiento de las mismas.

Los elementos básicos que conforman la estructura de una red inteligente son esencialmente los siguientes: ⁽⁵⁵⁾

1. Sistema de gestión

Este sistema corresponde a una cantidad de computadoras encargadas de manejar el servidor y el software de cliente de toda la gestión de la red. Estos sistemas generalmente están conectados a un NMS (*Network Management System*) o a un OSS (*Operation Support System*) de mayor jerarquía.

2. *Red de gestión*

Corresponde a una red propia y exclusiva para la realización de la gestión de toda la infraestructura de la red gestionada. Esta red está interconectada entre el sistema de gestión y las cabeceras o Hubs que están siendo gestionados. Una alternativa, para optimizar la utilización de la infraestructura de la red propiamente dicha, es implementar una VLAN (VLAN virtual) sobre la red IP existente.

3. *Las compuertas*

Son los dispositivos pertenecientes al sistema de gestión poseídos en las cabeceras u Hubs de la red gestionada. Estos dispositivos interconectan a los transpondedores de las cabeceras u Hubs de la red gestionada con la LAN de gestión.

4. *Transpondedores*

Corresponden a aquellos dispositivos de las cabeceras u Hubs de la red gestionada, que se conectan con las compuertas IP de la red del sistema de gestión.

En la figura No. 9.68 se ilustra un diagrama de la composición básica de la arquitectura de una red inteligente.

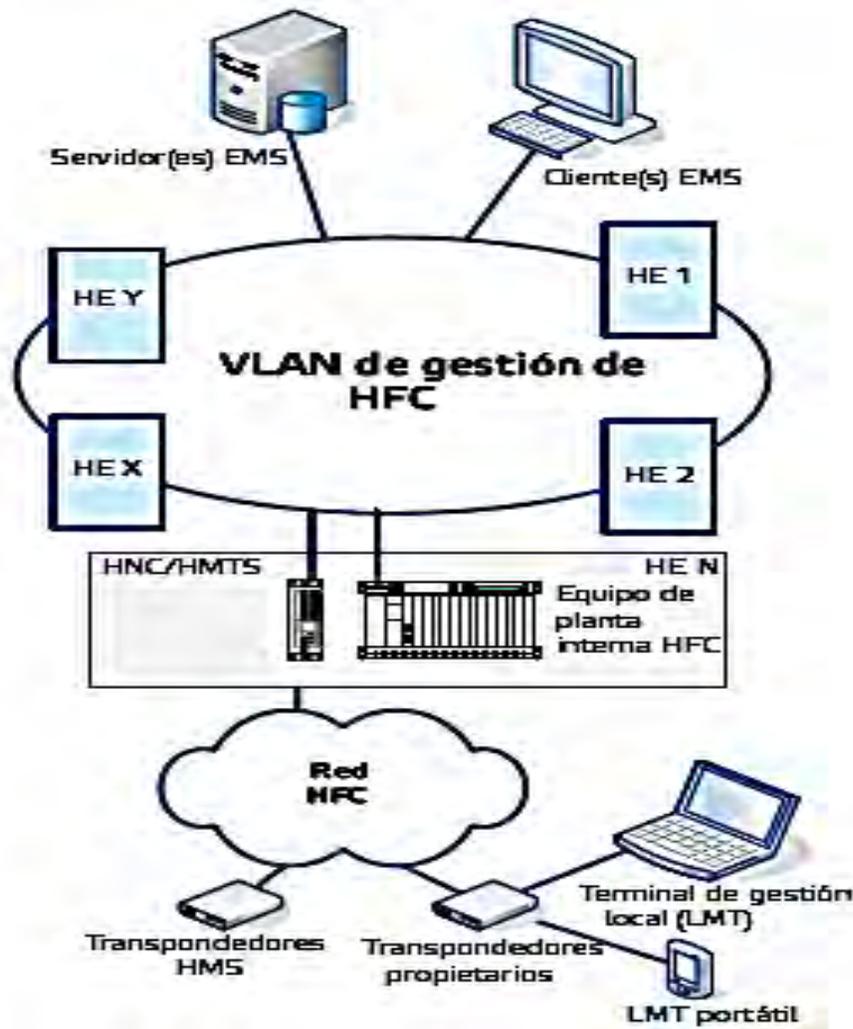


Figura No. 9.68 Arquitectura básica de una red inteligente

Fuente: Catálogo Redes Inteligentes. *Visión general de una red inteligente*. Teleste. 2017.

Para lograr obtener nodos y amplificadores inteligentes, en la red HFC, se requiere de la disponibilidad de controles suficientes de RF en el software de gestión. Estos nodos y amplificadores proporcionan, entre otras, las siguientes características de funcionamiento en la red inteligente:

- Permiten un monitoreo de acceso a la red de manera eficiente.
- Facilita el aislamiento rápido de los problemas que se puedan presentar en la red.
- Identifica y trata los problemas de subida antes de que estos afecten por los servidores de la red.
- Proporcionan compatibilidad con los sistemas HMS (*Hard are Meets Software*), permitiendo la integración de la red con cualquier sistema de gestión.

Se podría puntualizar que una red inteligente es aquella que cuenta con equipos, dispositivos y software de gestión que monitorean y controlan a toda la red.

9.8 Pérdidas por acoplamiento entre fibras con características diferentes

Se aclara que no se han mencionado las correspondientes pérdidas por la utilización de los diferentes dispositivos que en las redes de amplia cobertura se requieren, tales como: amplificadores, repetidores, conmutadores, multiplexores, entre otros. Solamente se han referenciado las pérdidas más comunes que se presentan en los enlaces entre dos puntos.

En algunos enlaces, donde se realicen acoplamiento entre fibras con características diferentes, se presentan estas pérdidas adicionales, además de las producidas por el empalme respectivo. Entre las situaciones más frecuentes donde se presentan estas pérdidas, entre otras, se tienen las siguientes:

- *Pérdidas por diferencia de diámetro del núcleo entre las fibras:* Se presentan cuando se van a acoplar dos fibras de diferentes diámetros, adicionalmente a las pérdidas por empalme. Cuando el diámetro del núcleo de la fibra transmisora es menor que el de la receptora, no se presenta estas pérdidas, ya que el haz de luz que se propaga por la fibra transmisora es completamente recibido por la fibra receptora. Si el caso es lo contrario si se presenta este tipo de pérdidas, las cuales se pueden calcular mediante la ecuación 9.24 (ver figura 9.69).

-

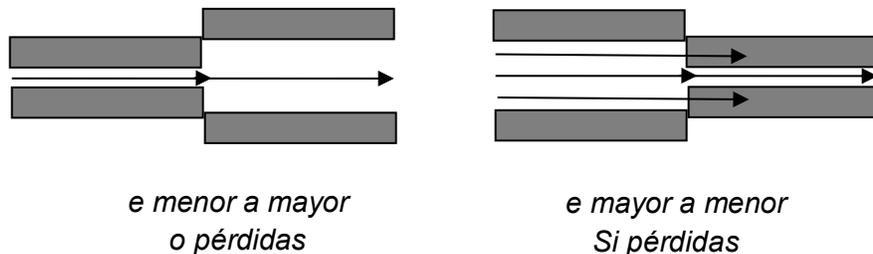


Figura No. 9.69 Pérdidas por diferencia de diámetro entre las fibras.

$$\langle 9.24 \rangle L_{dm} (dB) = 10 \log_{10} \frac{A_T}{A_R} = 20 \log_{10} \frac{D_T}{D_R} = 20 \log_{10} \frac{R_T}{R_R}$$

Donde :

L_{dm} : Pérdidas por diferencia de diámetro entre las fibras.

A_T , D_T , R_T : área transversal, diámetro y radio del núcleo de la fibra transmisora respectivamente.

A_R , D_R , R_R : área transversal, diámetro y radio del núcleo de la fibra receptora respectivamente.

Se ha podido determinar que para diferencias del 5% , entre los diámetros de las fibras que se acoplan, no generan pérdidas por más de 0.5 dB.

Ejemplo No. 9.7

En un enlace óptico se requiere conectar dos fibras ópticas multimodo, la fibra transmisora es de 100 140 micrones y la de la receptora es de 62.5 125 micrones. Las pérdidas por atenuación, para 1.300 nm de longitud de onda, de cada una de las fibras es de 1.0 dB / m. La potencia inyectada a la entrada de la fibra es de 150 mW , determinar la potencia al final del enlace, si la longitud del mismo es de 25 m.

Solución:

Para este enlace solo se consideran las pérdidas de atenuación que presenta la fibra óptica y el acoplamiento de entre la fibra de mayor diámetro con la de menor, ya que no existen empalmes y la potencia dada de transmisión corresponde a la entregada al fibra después del conector (el que une la salida del transmisor óptico con la entrada al fibra) y la potencia de llegada, a determinar, es antes del conector (el que une la salida de la fibra con la entrada al receptor óptico) (ver figura No. 9.70)

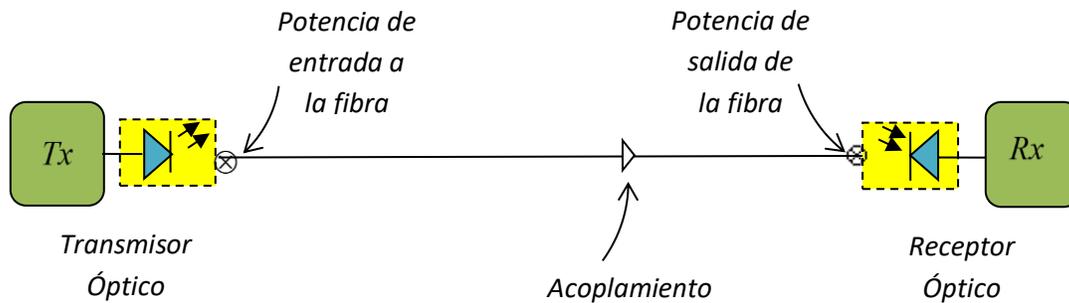


Figura No. 9.70. Enlace óptico del ejemplo 5.7.

$$P_{RX} (dB_m) = P_{TX} (dB_m) - L_{FO} (dB) - L_{dm} (dB)$$

Donde :

P_{RX} : Potencia antes del conector en recepción.

P_{TX} : Potencia despues del conector en transmisión.

L_{FO} : Pérdidas por atenuación de la fibra óptica.

L_{dm} : Pérdidas por diferencia de diámetro entre las fibras.

$$P_{TX} (dB_m) = 10 \log_{10} 150 = 21.76 \text{ dBm}$$

$$L_{dm} (dB) = 20 \log_{10} (100 / 62.5) = 4.08 \text{ dB}$$

$$P_{RX} (dB_m) = 21.76 \text{ dBm} - (1)(25) \text{ dB} - 4.08 \text{ dB} = -7.32 \text{ dB}_m$$

El resultado indica que existirá una muy buena intensidad de señal de llegada.

- **érdidas por diferencia en el índice de refracción entre las fibras:** Estas pérdidas se presentan también en el acople entre dos fibras de diferente índice de refracción, además de las generadas por el respectivo empalme. En las fibras multimodo no aparecen estas pérdidas cuando el índice de refracción de la fibra receptora es mayor que el de la fibra transmisora. En caso contrario se presentan estas pérdidas las cuales se pueden calcular mediante la ecuación 9.25.⁽⁵⁶⁾

$$\langle 9.25 \rangle L_n (dB) = 10 \log_{10} \left[\frac{1 + 2 / \alpha_R}{1 + 2 / \alpha_T} \right]$$

Donde :

L_n : Pérdidas por diferencia en el índice de refracción

α_R : Perfil de índice de refracción de la fibra receptora

α_T : Perfil de índice de refracción de la fibra transmisora

El perfil de índice de refracción de la fibra óptica corresponde a la variación del índice en la sección transversal de la fibra, es decir a lo largo del diámetro del núcleo de la misma. Tal como ya se ha mencionado existen básicamente dos perfiles de índices de refracción en las fibras ópticas: el escalonado y el gradual. ⁽⁵⁷⁾

En el *escalonado* el índice de refracción es constante en todo el trayecto del diámetro del núcleo. Este tipo de perfil es utilizado en las fibras monomodo (ver figura No. 9.71).

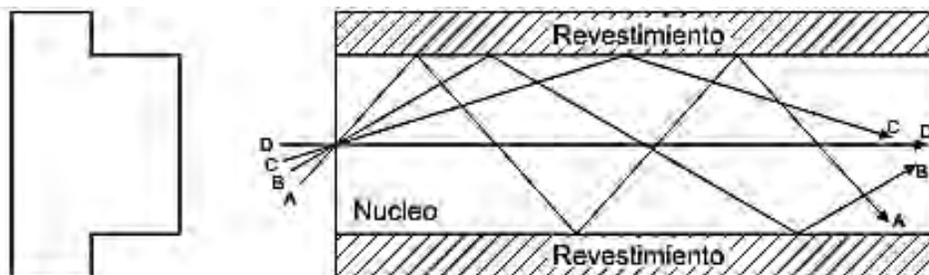


Figura No. 9.71 Perfil de índice de refracción escalonado

Fuente: Propiedades de la fibra óptica. (2019). Disponible:

<https://textoscientificos.com/redes-fibraoptica-propiedades>

En el *gradual* el índice de refracción en el revestimiento es constante, pero en el núcleo varía gradualmente de forma parabólica, cuyo valor máximo del índice se encuentra en el centro del núcleo. Este tipo de perfil es utilizado en las fibras multimodo ya que reduce la dispersión de las señales producidas por la variación de las velocidades para las distintas longitudes de onda en la fibra (ver figura No. 9.72).

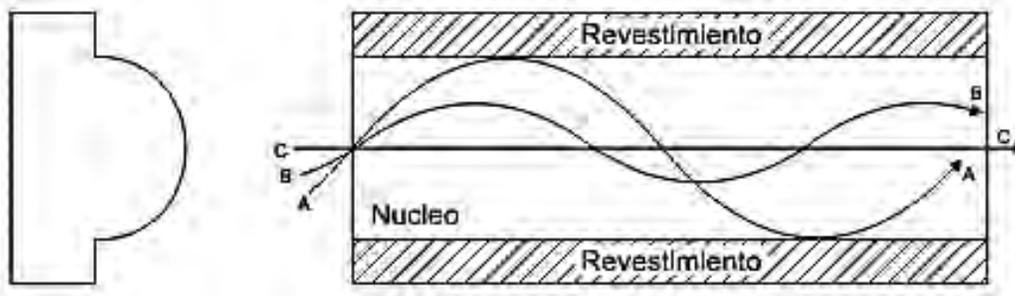


Figura No. 9.72 Perfil de índice de refracción gradual

Fuente: Propiedades de la fibra óptica. (2019).

Disponible: <https://www.textoscientificos.com/redes-fibraoptica/propiedades>

Estadísticamente se ha confirmado que, para el caso de comunicaciones, no existen pérdidas significativas, siempre y cuando la diferencia entre los índices de refracción de los núcleos de las fibras que se acoplan no sea tan considerable.

Érdidas por diferencia entre las aperturas numéricas entre las fibras: Se presentan en las fibras multimodos y solamente si la apertura numérica de la fibra receptora es menor que la de la fibra transmisora (ver figura No. 9.73).

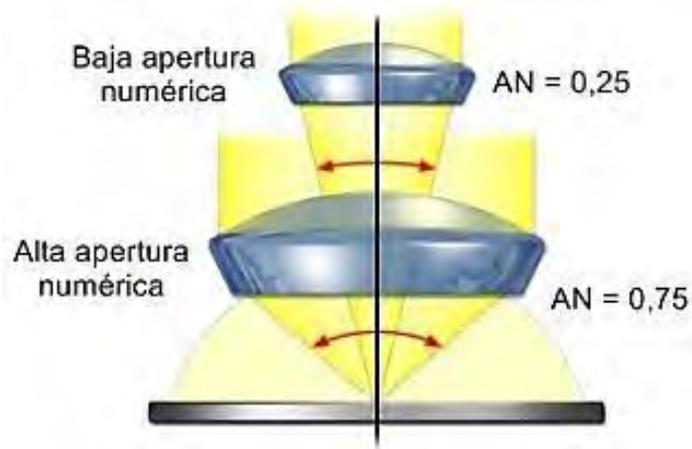


Figura No. 9.73 Pérdidas por diferencia de apertura numérica
 Fuente: Histoptica. Portal dedicado al mundo de la óptica. (2019). Disponible:
<https://histoptica.com/apertura-numerica-an-o-na>

Para calcular estas pérdidas se emplea la expresión indicada en la ecuación 9.26.

$$(9.26) L_{NA} (dB) = 20 \log_{10} \left[\frac{NA_T}{NA_R} \right]$$

Donde:

L_{NA} : Pérdidas por diferencia en la apertura numérica.

NA_T : Apertura numérica en la fibra transmisora

NA_R : Apertura numérica en la fibra receptora.

Ejemplo No. 9.8

Dos fibras multimodos se acoplan. La fibra transmisora tiene los siguientes índices de refracción $n_1 = 1,473$ y $n_2 = 1,423$ y la fibra receptora $n_1 = 1,544$ y $n_2 = 1,52$

Determinar las pérdidas en el acople por diferencia en las aperturas numéricas.

Solución:

Aplicando la ecuación 9.26, pero antes se determinan las aperturas numéricas de cada una de las fibras.

$$NA_T = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = \sqrt{1,473^2 - 1,423^2} = 0.379$$

$$NA_R = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = \sqrt{1,544^2 - 1,52^2} = 0.272$$

$$L_{NA}(dB) = 20 \log_{10} \left[\frac{NA_T}{NA_R} \right] = 20 \log_{10} \left[\frac{0.379}{0.272} \right] = 2.88 \text{ dB}$$

9.9 Pérdidas en acoplamiento entre fuente a fibra

Debido a que por lo general el ángulo del haz de luz emitido por la fuente óptica es mayor que el ángulo de aceptación de la fibra, entonces se presentan pérdidas en este acople. El ángulo de aceptación depende de la apertura numérica y del radio del núcleo de la fibra (ver figura No. 9.74). ⁽⁵⁸⁾

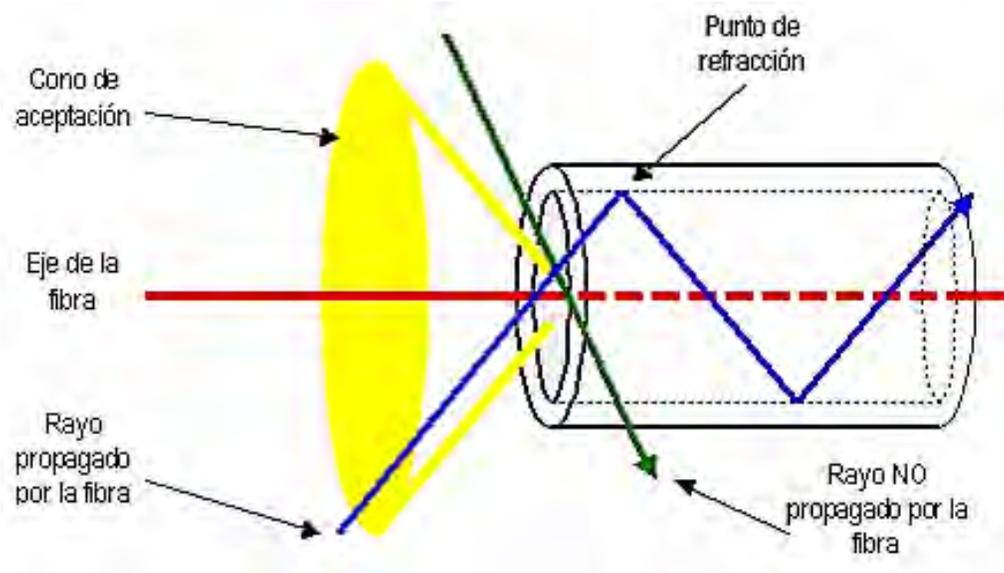


Figura No. 9.74 Pérdidas en acoplamiento entre fuente y fibra.

Fuente: Fubrasoptastic92. (2019). Disponible:

<http://fibrasoptastic92.blogspot.es/1406580592/cono-de-aceptacion>

Dependiendo del tipo de perfil que tenga la fibra, las pérdidas en el acoplamiento fuente a fibra, se emplea la expresión relacionada en las ecuaciones 5.27 y 5.28.

- Pérdidas de acople entre la fuente y la fibra de índice escalonado:

$$\langle 9.27 \rangle L_{acop.} (dB) = -10 \log_{10} \left[NA^2 \left(\frac{a}{r_s} \right)^2 \right] \quad (r_s > a)$$

Donde:

NA : Aperturanumerica en la fibra

a : Radio del núcleo de la fibra

r_s : Radio de la fuente óptica.

- Pérdidas de acople entre la fuente y la fibra de índice gradual:

$$\langle 9.28 \rangle L_{acop.} (dB) = -10 \log_{10} \left[NA^2 \left(\frac{a}{r_s} \right)^2 \left(\frac{a}{a+2} \right) \right] \quad (r_s > a)$$

Donde:

NA : Aperturanumerica en la fibra

a : Radio del núcleo de la fibra

r_s : Radio de la fuente óptica.

Según registros comerciales los diodos LED s tienen un diámetro de la fuente entre 20 a 65 um y el de los diodos LASER s entre 5 a 20 um .

Ejemplo No. 9.9

Una fibra óptica con índices de refracción de $n_1 = 1.50$ y $n_2 = 1.48$ y de dimensiones $a = 125 \mu\text{m}$, se acopla a una fuente óptica de radio $10 \mu\text{m}$. Determinar las pérdidas por acople si la fibra es de perfil escalonado.

Solución:

Aplicando la ecuación 9.27, pero antes se determinan NA.

$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} = \sqrt{1.50^2 - 1.48^2} = 0.245$$

$$L_{acop.} (dB) = -10 \log_{10} \left[NA^2 \left(\frac{a}{r_s} \right)^2 \right] = -10 \log_{10} \left[(0.245)^2 \left(\frac{9}{10} \right)^2 \right] \approx 13.13 \text{ dB}$$

9.10 Pérdidas por micro curvaturas

Las micro curvaturas en las fibras ópticas se deben a las irregularidades que se presentan en su longitud, entre otras causas por el efecto del empaquetamiento de las mismas en un solo cable óptico. Las pérdidas por micro curvaturas se originan por el cambio de ángulo de propagación que produce las irregularidades en la longitud de la fibra, haciendo que parte de los rayos se radien y no se propaguen por dentro de la fibra y por lo tanto la radiación que se propaga por la fibra pierde parte de su intensidad. (ver figura No. 9.75) ⁽⁵⁹⁾

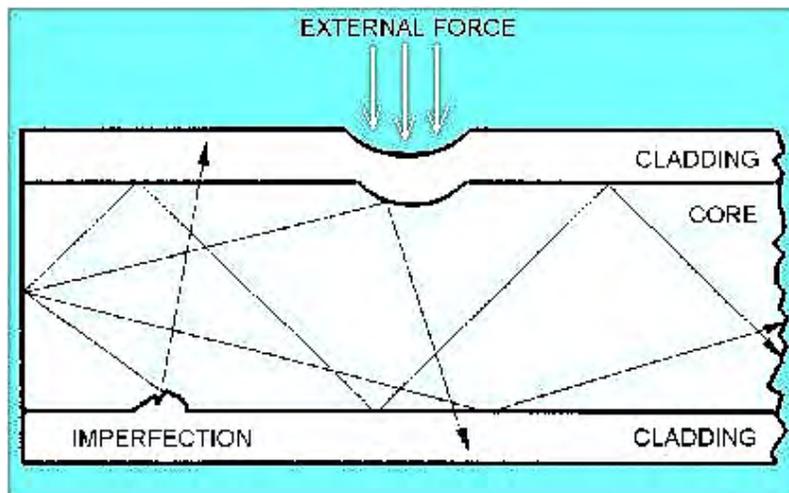


Figura No. 9.75 Pérdidas por micro curvaturas en la fibra óptica

Fuente: Pérdida por microcurvatura (Fibra óptica). (2019). Disponible: <https://glosarios.servidor-alicante.com/.../perdida-por-microcurvatura>

A este tipo de pérdidas también se conoce como *pérdidas por radiación* en las curvas. Los valores típicos de este tipo de pérdidas pueden llegar a estar entre 1 a 2dB m. A medida que existan mayor cantidad de modos de propagación se incrementa el valor de estas pérdidas, ya que menor será la concentración del modo sobre el eje de la fibra, lo que presentará mayor tendencia a perder energía hacia el exterior en las micro curvaturas. ⁽⁶⁰⁾

El coeficiente de pérdidas correspondiente a las pérdidas por micro curvaturas está dado por la expresión indicada en la ecuación 9.29. ⁽⁶¹⁾

$$\langle 9.29 \rangle \frac{P_{out}}{P_{in}} = e^{-\phi_R Z}$$

Donde :

P_{out} : *Potencia de salida de la micro – curvatura*

P_{in} : *Potencia de entrada de la micro – curvatura.*

ϕ_R : *Factor de atenuación por doblaje*

Z : *Longitud de la micro – curvatura.*

$$\langle 9.30 \rangle \phi_R = c_1 e^{-c_2 r}$$

c_1 y c_2 *son dos constantes arbitrarias*

independientes del radio r de la curvatura

Las mayores pérdidas por micro curvatura se presentan cuando el valor del radio de la curvatura presenta un valor denominado *radio crítico*, cuya determinación se logra mediante la ecuación 5.31

$$\langle 9.31 \rangle r_C (m) = \frac{3n_2 \lambda}{4\pi(NA)^3}$$

Como se puede observar de la ecuación inmediatamente anterior, el *radio crítico* es directamente proporcional a la longitud de onda, pero inversamente proporcional a la apertura numérica. Por lo tanto, es más conveniente trabajar con fibras con NA mayores y con menores valores de longitud de onda.

Ejemplo No. 9.10

Determinar el radio crítico de la curvatura de una fibra multimodo de 62.5 125 μm , si cuenta con un NA de: 0.275, funcionando a una longitud de onda de: 1.340 μm y con $n_2 = 1.51$

Solución:

Aplicando la ecuación 9.31

$$r_c(m) = \frac{3(1.51)(1.340 \times 10^{-6})}{4\pi(0.275)^3} \approx 23.23 \mu\text{m}$$

PREGUNTAS y EJERCICIOS

CAPÍTULO 9

Preguntas:

1. Al igual que los otros medios de transmisión de datos, la fibra óptica está normalizada por varios organismos internacionales de control que le establecen recomendaciones y estándares de su estructuración física, de sus características funcionales y requerimientos de instalación. Cuáles son los principales de estos organismos

2. Entre los principales tendidos de cableado óptico, para exteriores y distancias grandes, se cuenta con los que a continuación se relacionan:

- Tendido aéreo.
- Tendido subterráneo o canalizado.
- Tendido submarino.

Describe en forma puntual cuales son las particulares esenciales que caracterizan a cada uno de estos tipos de tendido de cableado óptico.

3. Existen diferentes técnicas que se utilizan para realizar los tendidos de los cables ópticos en forma aérea. Cuáles son estas principales técnicas y qué característica fundamental tienen los cables ópticos que en cada una de ellas se utilizan

4. Para el caso del tendido del cable óptico a través de postes exclusivos para este tendido, el proceso del tendido del cable óptico comúnmente cuenta con unas etapas y consideraciones principales. Cuáles son

5. Existen diferentes técnicas que se utilizan para realizar los tendidos de los cables ópticos en forma subterránea. Cuáles son estas principales técnicas y en que consiste cada una de ellas

6. Finalizado el tendido del cable óptico deberá realizarse una verificación de este, mediante el refractómetro óptico en el dominio del tiempo OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*). En qué consiste este equipo

7. Sea cual fuese el tipo de tendido del cable óptico, aéreo, subterráneo, submarino o de cualquier otra forma, hay que tener mucho cuidado con la presencia de curvas excesivas o dobleces muy pronunciados. Cuáles son estos cuidados

8. Cuáles son los enormes beneficios que ofrece la fibra óptica, en cuanto a la transferencia de información con respecto a los otros medios de transmisión

9. El tendido submarino de una red óptica submarino es aquel que se realiza entre dos o más puntos a través del lecho marítimo. La estructura básica de las redes de ópticas de tendido submarino está conformada por dos componentes fundamentales. Cuáles son estos componentes

10. Debido a las grandes profundidades que se encuentra el lecho marítimo (en algunos casos más de 10 mil de metros) es imposible realizar los trabajos de excavación y tendido del cable óptico mediante buzos humanos, requiriéndose por lo tanto de robots submarinos. Cuáles son las principales labores que estos robots realizan

11. Con el propósito fundamental de dar una idea general del proceso de instalación de un cable óptico submarino, en la figura No. 5.39 se muestra una secuencia de las principales etapas del tendido del mismo, haciendo resaltar que el proceso requiere de una complejidad operacional de alta tecnología. Describa puntualmente las etapas de este proceso.

12. Los tendidos de los cables submarinos requieren de los permisos respectivos de los países destinatarios de estas implementaciones. Existen también tratados internacionales que amparan la realización de estos tendidos. Indique cuáles son algunos de estos tratados y cuál es tema central de los mismos.

13. Según el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) de Colombia, este país cuenta actualmente con once cables ópticos submarinos que lo conectan con el mundo exterior. Elabore una tabla donde se relacionen estos cables indicando sus principales características estructurales y funcionales.

14. Defina cuáles son los componentes básicos de las estructuras fundamentales de los enlaces ópticos submarinos.

15. Los procesos de diseño de las redes ópticas tanto terrestres como submarinas, son muy similares, diferenciándose esencialmente en las características estructurales de los componentes de protección que deben poseer los dispositivos de los tendidos submarinos. Cuáles son estas diferencias fundamentales

16. Cuáles son los aspectos básicos que se deben tener presente para el diseño de una red óptica, en términos generales, cualquiera que sea su tipo de tendido

17. Es conveniente tener en cuenta que la ecuación 8.2 corresponde a un cálculo teórico estimado ideal de un enlace óptico. Por lo tanto, hay que adicionarle márgenes y penalidades por los cambios y anomalías que se puedan presentar, tanto en la estructura de la red como en el funcionamiento de sus dispositivos.

Cuáles son estos principales márgenes y penalidades que hay que tener en cuenta y por qué

18. Unas de las técnicas muy recurrentes en las comunicaciones ópticas, para detectar y corregir errores, son las denominadas *corrección de errores hacia adelante* (FEC: *forward Error Correction*), las cuales permiten la corrección en el receptor sin requerirse retransmisión de las señales (códigos). En qué consisten estas técnicas

19. Describa la estructura y funcionamiento de la multiplexación óptica por división en longitud de onda (ODM, *Optical Wavelength Division Multiplexing*).

19. ¿Cuál es la razón por la cual se ha fomentado la implementación de las redes ópticas inteligentes? ¿Cuáles son los elementos fundamentales que conforman la estructura básica de una red óptica inteligente?

Ejercicios:

1. Para el caso de un cable óptico, cuya parte de su tendido se indica en la figura No. 9.76, determinar el radio de curvatura en el punto $x = 0$.

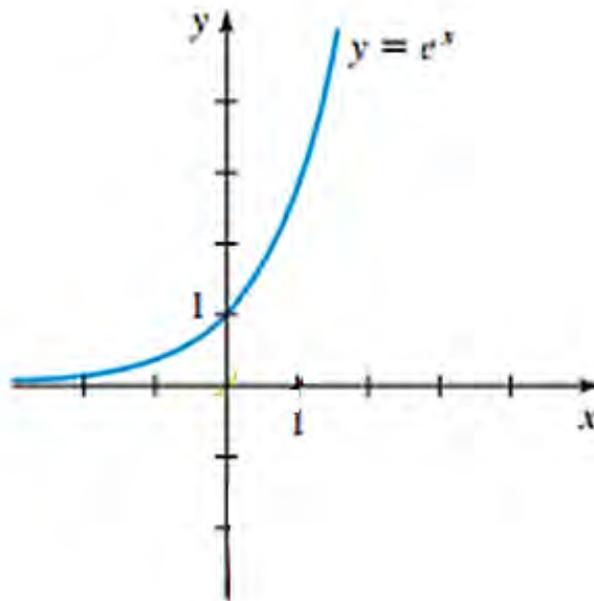


Figura No. 9.76 Parte del tendido de un cable óptico.

2. Para un enlace óptico se exige el cumplimiento de los parámetros de funcionamiento relacionados a continuación. Determinar la longitud máxima permisible que puede tener el enlace dentro de estas exigencias.

- Carretes de cable óptico de 6 m cada uno.
- Emisor óptico: diodo láser (LD) en 1.300nm.
- Potencia suministrada a la fibra: -0.12dBm.
- Sensibilidad del detector óptico: -30dBm.
- Pérdida por atenuación en la fibra óptica: 0.3 dB m.
- Pérdida por empalme: 0.12 dB.
- Pérdida total de conectores en el enlace: 3.2 dB.
- Margen total: 2.5 dB.
- Penalidades totales: 1.8 dB.

3. Para el enlace del ejercicio inmediatamente anterior, determinar en cuanto hay que incrementar la potencia suministrada a la fibra para aumentar la longitud del enlace en 30 m más.

4. Para el enlace indicado en los ejercicios inmediatamente anteriores, calcular el ancho espectral del láser, teniendo como referencia las siguientes características funcionales:

- Periodo de bit: 399ps.
- Coeficiente de dispersión (para una fibra óptica estándar NDSF: *non dispersion shifted fiber*): 24ps (nm. m) a 1.300nm

5. Determinar si es factible el enlace óptico trabajando en las siguientes condiciones y características de funcionamiento y de disponibilidad:

- Longitud del enlace: 30 m.
- Carretes de cable óptico de 6 m.
- Potencia suministrada a la fibra: 0dBm.
- Sensibilidad del detector óptico: -29dBm.
- Tipo de fibra óptica: multimodo (gradual de ancho de banda $B_0 = 1.2$ GHz. m).
- Longitud de onda: 1.300 nm.
- Pérdidas de atenuación: 0.5 dB m máximo.
- Pérdida total de conectores: 3.2 dB.
- Margen total (Margen de confiabilidad): 4 dB.
- Penalidades totales: 1dB.
- Pérdida por empalme: 0.12 dB.
- velocidad de transmisión: 34,368 Mbps (flujo PDH E3 para 480 canales telefónicos).

- Pérdidas por no linealidad: 1 dB.
- Pérdidas por curvatura: 0.9 dB
- Código de línea: 5B 6B.
- Coeficiente de dispersión cromática: 3.3ps nm. m.
- Ancho espectral: 8.6 nm a -3 dB del diodo láser.
- Considerar como dispersión máxima modal: 0.5 T.

6. Para el enlace del ejercicio inmediatamente anterior, determinar en cuanto hay que incrementar la potencia suministrada a la fibra para aumentar la longitud del enlace en 10 m más.

7.. Determinar la distancia máxima del enlace óptico indicado en la figura No. 9.64, teniendo en cuenta los valores de los parámetros de funcionamiento indicados en el enlace, y el resto de los valores son los siguientes:

- Potencia óptica transmitida: - 1.0 dBm
- Sensibilidad del detector óptico: -30 dBm
- Rendimiento de corrección de error (FEC): 8 dB
- Margen de confiabilidad: 3 dB
- Atenuación por empalme: 0.2dB
- Atenuación del conector de la fibra al emisor óptico: 1.8 dB
- Atenuación del conector de la fibra al detector óptico: 0.9 dB
- Atenuación de cada conector en el resto del enlace: 1.4 dB
- Atenuación por repartidor: 7 dB

Nota: Para este enlace no se consideran las otras pérdidas posibles (Penalidad total, Pérdidas por no linealidad, Pérdidas por curvatura,) las cuales no se relacionan en la ecuación 9.16.

8. Para el enlace del ejercicio inmediatamente anterior, determinar en cuanto hay que incrementar la potencia suministrada a la fibra para aumentar la longitud del enlace en 5 m más.

9. Dos fibras ópticas multimodo 62,5 125 (Tx) y 50 125 (Rx) se acoplan entre sí . Si la potencia inyectada a la fibra transmisora es de 130 m y el factor de atenuación dado por el fabricante para las dos es de 0,49 dB m, calcular la potencia que llegaría al detector óptico, separado de la fuente óptica 150 m,

10. Una fibra monomodo de índice escalonado de $9.125 \mu\text{m}$, se conecta a una fuente óptica que le inyecta una señal de luz de 1.550 nm con una potencia de 300 u . Determinar la potencia al final de la fibra de una longitud de 82 m .

11. Dos fibras multimodos se acoplan. La fibra transmisora tiene los siguientes índices de refracción $n_1 = 1.49$ y $n_2 = 1.46$ y la fibra receptora $n_1 = 1.52$ y $n_2 = 1.50$

Determinar las pérdidas en el acople por diferencia en las aperturas numéricas.

12. Una fibra óptica con índices de refracción de $n_1 = 1.48$ y $n_2 = 1.46$ y de dimensiones $9.125 \mu\text{m}$, se acopla a una fuente óptica de radio $12 \mu\text{m}$. Determinar las pérdidas por acople si la fibra es de perfil escalonado.

13. Una fibra multimodo de $62.5 \text{ } 125 \mu\text{m}$, si cuenta con un NA de: 0.282 , funcionando a una longitud de onda de: 1.30 nm y con $n_2 = 1.51$, determinar el radio crítico de la curvatura de la fibra

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 9

- (1) Teldor, Catalog *S S Series All dielectric Self-Supporting Fiber Cable*", 2018.
- (2) Prysmian, Catalog *Cable System*", 2017
- (3) Overhead Ground Wire, Aerial Multi Core Fiber Cable of OPG . (2019). Disponible: . [sd fiber cable.com](http://www.sd-fiber-cable.com)
- (4) Especificación de CFE E0000-21, para Cables de Guarda con fibras ópticas integradas. 2017.
- (5) Conectrónica, Catálogo: *Tecnología y elementos de conexión y conectividad*", 2017.
- (6) Sterlite, Manual *Aerial Fiber Cable Lacing Methods*", 2017.
- (7) Instalaciones subterráneas. (2019). Disponible: <http://www.electrica.mx/category/instalaciones-subterranas> .
- (8) Revinca: *Manual de Sub-ductos de para fibra óptica formas e instalación de Sub-ductos de para fibra óptica*", 2017, pp. 34-35
- (9) Ministerio de las TICs, *Plan de Montaje e instalación de la Red de Telecomunicaciones en fibra óptica*", Mesa sectorial de Telecomunicaciones, Ministerio de las TICs, 2017.
- (10) Iberdrola, Catálogo *Guía de instalación de los cables ópticos subterráneos*", 2017.
- (11) City of fort Myers fiber optic infrastructure. (2019). Disponible: <https://www.fortmyers.com/projects/city-of-fort-myers-fiber-optic-infrastructure> .
- (12) Flavio, R., *Fibras ópticas optimizadas frente a curvaturas*", Furuta, 2017, pp.65-66.
- (13) Chomyez, B., *Instalaciones de fibra óptica*", John Wiley & Sons, 2017, pp. 29-30.

(14) Puig Adam P., *Comprehensive Calculus Applied to Physics and Technique*. Biblioteca Matemática, 2015, pág. 286-287

(15) Butrón, D. Gutiérrez, D. González, J., *Fiber optic installation*, McGraw Hill, 2016, pp.76-77.

(16) Buques cableros. (2019). Disponible:
<https://ingenieromarinero.wordpress.com/2018/03/10/20-buques-cableros-y-sistema-de-posicionamiento-para-offshore/>

(17) Bates, Regis J. *Optical Signaling and Metrology Handbook*. Nueva York: McGraw-Hill, 2014, pp. 9-10.

(18) Lozano, H. Gilly, A., *Development and initial investigation of new robotic flexible modular flexible fins*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2016. pp. 962-963.

(19) National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), 2017.

(20) UNCABLE Cable Protection Committee and Alcatel-Lucent Submarine Networks, 2014.

(21) Lecoy, P., *Fiber-Optic Communications*, John Wiley Sons, 2016, pp. 189-191.

(22) Mintic. (2019). Disponible:<http://www.mintic.gov.co/portal/6043-articulo-8920.html>.

(23) International Cable Protection Committee 1999 - 2017 Disclaimer Site Map

(24) Huurdeman, A.A., *The World History of Telecommunications*. John Wiley Sons. 2017. pp. 462-463.

(25) Telxins cable Puerto Rico. Inc. *Administración en el tema de Cableado Licencia SC - C- - -*. 2018.

(26) Submarine-cable-map. (2019). Disponible: telegeography.com.

(27) Goetz, J. Leyendeker, H. Frederik Obermaier, F., *British Officials have Arrived Reacting Access To Internet And Telephone Communications*, 2018, pp. 98-99

(28) S A-M - *et or Administration System S A-M - et or Administration System*. BSNL Sanchar Nigam Limited. 2018

(29) SAT- SA upgraded to bps and bps . Retrieved August

(30) Esselaar, S. Gill ald, A. Sutherland, E., *The regulation of undersea cables and landing stations*, International Development Research Centre IDRC, 2016, pp. 5-6.

(31) FIBRAS-OPTICAS-SUBMARINAS. (2019). Disponible:
<https://es.scribd.com/doc/33899891>

(32) Sistema de cable de fibra óptica submarino. (2019). Disponible:
<http://itusersmagazine.com/2012/10/09/globenet-optimiza-su-sistema-de-cable-de-fibra-optica-submarino/>.

(33) Cable submarino Cuba -enezuela. (2019). Disponible:
<https://www.ecured.cu/Cable-submarino-Cuba-enezuela>.

(34) *AM - roject*", Economist ith data Telex, 2017

(35) *acific Caribbean Cable System*", Telefónica Colombia, 2018

(36) Tele-Geography CRC MinTIC, 2017.

(37) Todos por un nuevo país" Sala de prensa MinTIC, 2016.

(38) Cables submarinos. (2018). Disponible: <http://www.yoro.obu.es/los-cables-submarinos-que-llevan-internet-a-todo-el-mundo/>.

(39) Marea nuevo cable submarino. (2019). Disponible:
<http://www.adslzone.net/2018/05/26/marea-nuevo-cable-submarino-microsoft-facebook-telefonica-eeuu-espana/>.

(40) Bella conectará Latinoamérica, Europa y Estados Unidos. (2019). Disponible:
http://www.eldiario.es/turing-vigilancia-y-privacidad/BELLA-conectara-Latinoamerica-Europa-Unidos_0_398610529.html.

(41) Nuevo cable submarino de fibra óptica Brasil- EEUU. (2019). Disponible:
<http://www.ticbeat.com/innovacion-un-nuevo-cable-submarino-de-fibra-optica-conectara-brasil-con-eeuu/>.

- (42) Bridge the world of Communication Hua ei, *The o er of Submarine nformation Transmission*", Hua ei Marine Net or s, 2017.
- (43) Chassemlooy, . Popola, . Rajbhandari, S., *ptical ireless Communications: System and C annel Mondelling it Matlab*", CRC Press: Taylor Francis Group, 2016, pp. 23-24.
- (44) atiyar, S. *ptical iber Communication*", S. . ataria Sons, Publisher of Engineering Computer Boo s, 2017, pp. 67-68.
- (45) Cálculo enlace de fibra óptica. (2019). Disponible: <http://es.slideshare.net/luisanibaldiazvera/clculo-de-un-enlace-de-fibra-ptica>.
- (46) Recomendación G.651 del CC TT T -T.
- (47) ásquez García, C. Sánchez Pena, J.M., *ispositivos y Medios de Transmisión pticas*", Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III, Madrid, 2017, pp.325-326.
- (48) Cálculo enlace de fibra óptica. (2019). Disponible: <http://es.slideshare.net/luisanibaldiazvera/clculo-de-un-enlace-de-fibra-ptica>.
- (49), (50) Rivas. G. Benitez, G. Centurión, P., *Comunicaciones ptica: cálculo de un enlace de fibra óptica*", Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Asunción, 2017, pp. 209-211.
- (51) Abreu, M. Castagna, A. Cristiani, P. unino, P. Roldós, E. Sandler, G., *Características enerales de una Red de ibra ptica al ogar (FTTH)*", Universidad de Montevideo, 2018. p.43-44
- (52) inzer P. Essiambre R., *Advanced optical modulation formats*". Proceedings of the IEEE. ol 94, N 5, mayo de 2016.
- (53) ang Ch. S lar D. Johnson D. *or ard rror-Correction Coding* . Crosslin the Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology. The Aerospace Corporation. 2017.
- (54) Gráficas OTDR. (2019). Disponible: <https://.fibropticalhoy.com/blog/graficas-de-un-otdr>
- (55) Teleste: Catálogo Redes Inteligentes. *Visión general de una red inteligente*". 2017.

(56), (59), Pinto García, R. A. Cabezas, A. F., *Sistemas de Comunicaciones ópticas Monografía* ", Universidad Militar Nueva Granada, 2016, pp. 55-54 55-56

(57) Poer, J. *Optical communication system*". Boston: McHill Gra . 2014, pp.196-198.

(58) Propiedades de la fibra óptica. (2019). Disponible:

<https://www.textoscientificos.com/redes-fibraoptica-propiedades>

(60) Poer, J. *An introduction to fiber optic systems*". Boston: McGra Hill. 2014, pp. 49-51. .

(61) Martin Pereda, J. A. *Sistemas y Redes ópticas de Comunicaciones*". Madrid: Pearson Educación, 2016, pp.187-188.

CAPÍTULO 10.

COMPONENTES BÁSICOS DE LOS ENLACES ÓPTICOS

10.1 Introducción

Los enlaces o redes ópticas, cualquiera que sea su tipo de tendido, están conformados básicamente por similares elementos que conforman cualquier enlace o red de comunicaciones. La particularidad es que, para estos enlaces ópticos, debido a que sus componentes actualmente son totalmente ópticos, no demandan alimentación eléctrica alguna para su funcionamiento, lo que representa una gran ventaja correspondiente a los otros tipos de redes o enlaces, especialmente para el caso de los tendidos submarinos.

En este capítulo se relacionarán los principales componentes de los enlaces ópticos, describiendo su concepción, estructura, características técnicas y funcionales esenciales, en concordancia con las descripciones que al respecto se han hecho en los anteriores capítulos.

10.2 Emisores ópticos

Las señales de información que manejan tanto los equipos transmisores como los receptores, en los sistemas de comunicaciones convencionales, son señales eléctricas (análogas o digitales). Por lo tanto, para un enlace donde el medio de transmisión es la fibra óptica, se requiere de un dispositivo, en el extremo inicial de la transmisión del enlace, que convierta las señales eléctricas en señales de luz (ópticas). A estos dispositivos se les denominan *emisores de ópticos*.

Existen diferentes emisores ópticos, que en esencia son diodos que generan haces de luz, con una determinada longitud de onda cuando reciben una señal eléctrica, entre los cuales se pueden resaltar los siguientes: ⁽¹⁾

- *Los diodos emisores de luz (Light Emitting Diode):* cuando un diodo LED se polariza en forma directa los electrones se recombinan con los huecos en el dispositivo, produciéndose una liberación de energía en forma de fotones (partículas portadoras de todas las formas de radiación electromagnética), que producen un efecto denominado electroluminiscencia, es decir un haz de luz, cuyo color depende a la energía de los fotones.

El tamaño de un Led es muy pequeño (de unos 5 mm de diámetro) y por lo general requieren de unos 2 voltios para empezar a funcionar. En la figura No. 10.1 se ilustra unas imágenes de diodos Led s (de uso general, denominados, pilotos), donde en la primera imagen se indican sus principales componentes estructurales. En la tabla No. 10.1 se identifican los elementos fundamentales que conforman a un Led convencional.

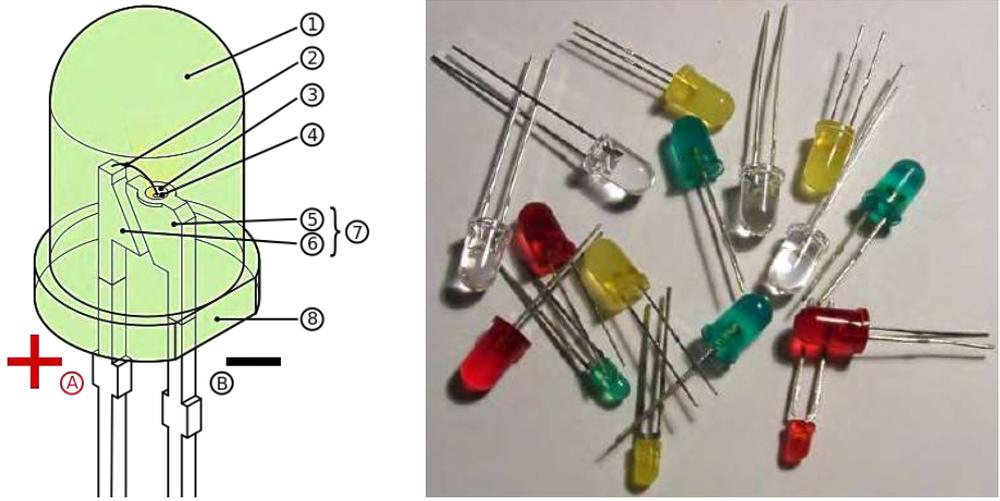


Figura 10.1 Imágenes de diodos Led s convencionales (pilotos)
 Fuente: Diodos láser convencionales. (2019). Disponible: http://ecured.cu/Diodo_led/.

Signo	Elemento	Signo	Elemento	Signo	Elemento
A	Ánodo	3	Cavidad reflectora	6	Poste
B	Cátodo	4	Fin semiconductor	7	Marco conductor
1	Lente / encapsulado	5	Yunque	8	Borde plano
2	Hilo conductor				

Tabla No. 10.1 Identificación elementos de un LED
 Fuente: Shubert, E. Fred, *Light Emitting Diodes*, Cambridge University Press, 2016.

- **Los diodos láser:** son aquellos que emiten luz láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*: amplificación de luz por emisión estimulada de radiación). Estos diodos son los que generalmente se utilizan para las emisiones ópticas en las diferentes aplicaciones por fibra óptica, ya que ofrecen mayor eficiencia y confiabilidad en su operación. Existe una gran variedad de

diodos Láser, dependiendo de su composición estructural. En la tabla No. 10.2, se relacionan algunos de estos diodos. ⁽²⁾

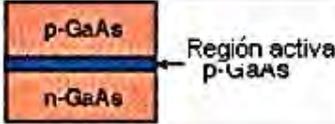
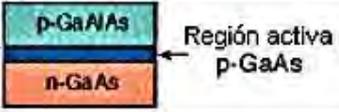
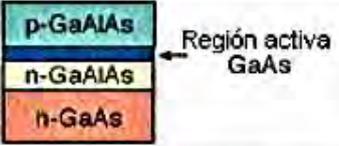
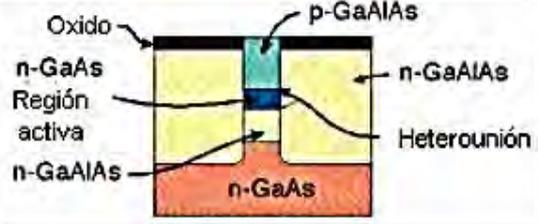
Tipo de Láser	Estructura del láser	Confinamiento de la radiación
Homounión		 <p>Pequeño confinamiento en el plano del papel</p>
Heterounión simple		 <p>Confinamiento bueno en una cara del plano perpendicular</p>
Doble heterounión		 <p>Confinamiento de la radiación buena en ambas caras del plano perpendicular</p>
Línea basada en la ganancia		
Heterounión enterrada (Geometría de línea basada en índices)		<p>Confinamiento de la radiación buena en ambos planos, horizontal y vertical</p>

Tabla No. 10.2 Tipos de diodos láser dependiendo de su conformación estructural.

Fuente: asuhio, A., *Categorías de diodo láser*, Justin Heard. Tokio. 2017.

En la figura No. 10.2 se ilustra unas imágenes donde en la primera de ellas se muestra unos diodos Láser y en la segunda los elementos estructurales básicos de los mismos, así como su cono de emisión de luz.

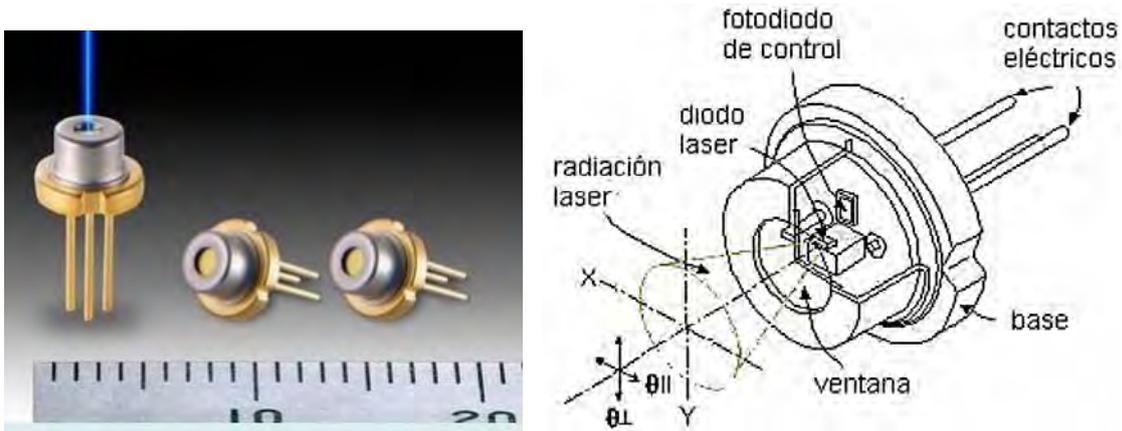
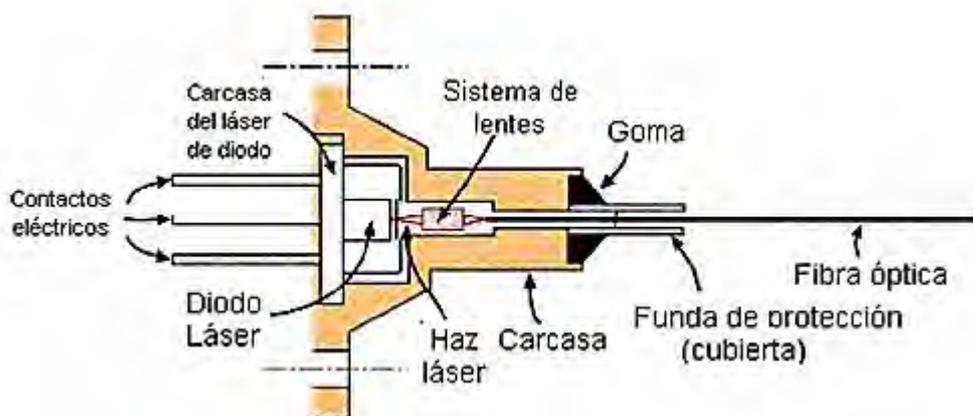


Figura No.10.2 Imágenes diodos láser.

Fuente: Catálogo *Tecnología y elementos de conexión*, Conectónica, 2017.

La emisión luminosa de un *diodo áser* convencional puede lograr potencias de salida óptica de entre unos 20 a40 vatios, dependiendo de la corriente inyectada, con una alta eficiencia de unos 0.9 A (0.9 vatios de potencia luminosa por amperio de señal eléctrica de entrada). Hay que anotar que los *diodos áser*, además de ser utilizados para las comunicaciones a través de *fibra óptica*, ofrece una amplia gama de aplicaciones, tales como: investigación biológica, análisis espectral, interferometría, metrología, sensoria, diagnósticos e intervenciones médicas y odontológicas, lectores CD D C, interconexiones ópticas entre circuitos integrados, impresoras láser, escáneres, sensores, pantalla laser, iluminación, entre otras muchas más.

En la figura No. 10.3 se muestran unas imágenes donde la superior corresponde al corte longitudinal de un diodo Láser, indicándose los principales componentes del mismo e interconectado a una fibra óptica, y la inferior el montaje sobre la tarjeta correspondiente.



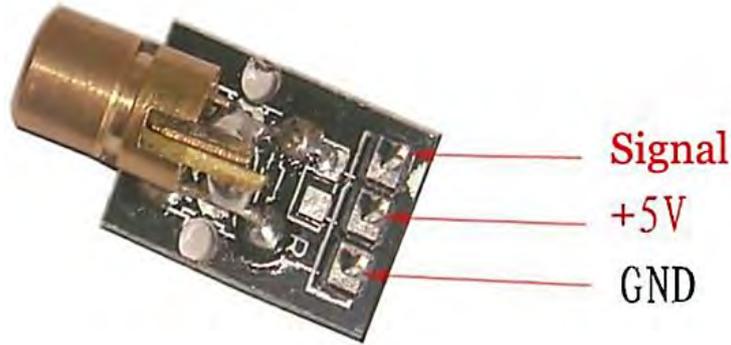


Figura No. 10.3 Composición básica estructural y montaje de un diodo láser.
 Fuente: Moloney J. et al., "Quantum design of semiconductor active materials: laser and amplifier applications", 2015, p. 24

En la tabla No. 10.3 se relacionan las principales características, en forma comparativa y en valores típicos, de los diodos láser versus los diodos Led.

Diodo Láser	Diodo Led
Ancho espectral: 0.5 a 6 nm	Ancho espectral: 20 a 60nm
Corriente: 150 mA	Corriente: 50 mA
Potencia de salida: 100 mW	Potencia de salida: 5 mW
Apertura numérica: 0.25	Apertura numérica: 0.4
Emisión coherente de luz (unidireccional)	Emisión incoherente de luz (múltiples direcciones)
Velocidad de modulación: 2 GHz	Velocidad de modulación: 200 MHz
Fuente luminosa de fibras ópticas (kilómetros)	Fuente luminosa de fibras ópticas (metros)
Menor dispersión entre los fotones emitidos	Mayor dispersión entre los fotones emitidos
Periodo de vida: 50.000 horas	Periodo de vida: 10.000 horas
Construcción más compleja y costosa	Construcción más simple y económica.

Tabla No. 10.3 Características comparativas entre diodo Láser y diodo Led.
 Fuente: Catálogo Cable de fibra óptica, Connecting the world assets", Orbcomm, 2018.

Los fotones emitidos por un diodo Láser (LD) poseen longitudes de onda muy cerca entre sí, produciendo un tipo de luz monocromática. Los fotones emitidos por un diodo Led poseen mayores dispersiones entre sus longitudes de onda. Lo anterior origina que el ancho del espectro, en longitud de onda, emitido por un diodo Láser sea mucho menor que el de un diodo LED (ver figura No. 10.4).

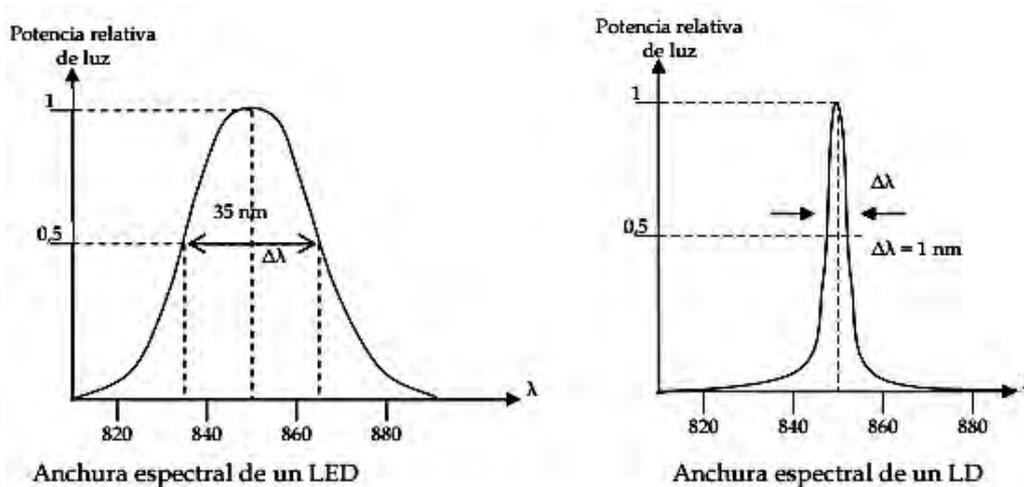


Figura No. 10.4 Espectro del diodo LED y del diodo láser (LD), en longitud de onda.

Fuente: Cabezas, A. F. Pinto Garcia, R. A., *Monografía Sistemas de comunicaciones ópticas*, Ingeniería de Comunicaciones, Universidad Militar Nueva Granada, 2017, p.80.

La estructura de un diodo Láser es mucho más compleja que la de un diodo Led, cuyo número y tipos de capas que conforman estas estructuras dependen del tipo de diodo Laser, tal como se puede apreciar en la tabla No. 10.2. En la figura No. 10.5 se muestra la estructura de un diodo Láser típico, donde se muestran las diferentes capas con la región activa del mismo, así como su potencia de salida en función de la corriente inyectada. ⁽³⁾

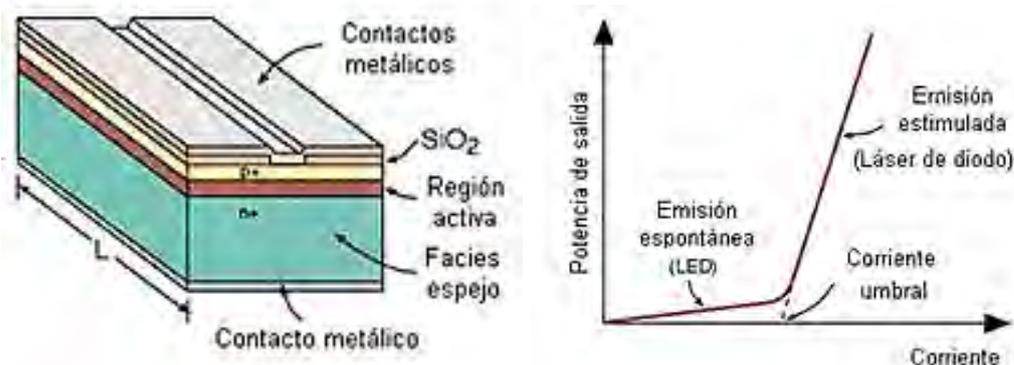


Figura No. 10.5 Estructura básica de un diodo Láser típico y su potencia de salida en función de la corriente inyectada.

Fuente: Various Types of Laser Diodes.(2019). Disponible: <http://biofiz.semmelweis.hu/run/dl.php?id=1188>

Para la conversión de energía eléctrica en óptica, se aprovecha las propiedades de los materiales semiconductores respecto a las dos bandas de energía que poseen: la banda de valencia (nivel bajo de energía) y la banda de conducción

(nivel alto de energía), las cuales se encuentran separadas por una diferencia de energía.

La energía eléctrica está conformada por partículas que contienen masa y carga eléctrica (electrones), mientras la energía electromagnética, en la cual se encuentra la de la luz, está conformada por partículas que no contienen masa ni carga y que se propagan a una velocidad constante (la de la luz), a estas partículas se le denomina fotones (*quantum de energía*).

Los átomos están conformados por electrones que giran siempre dentro de uno o más niveles de energía denominados órbitas, alrededor del núcleo de cada uno de los respectivos átomos. Para que los electrones (con carga negativa) se mantengan girando en sus propias órbitas sin abandonarlas, cambiando de un nivel de energía a otro, el núcleo del átomo (con carga positiva) ejerce una fuerte influencia para retenerlos. ⁽⁴⁾

Los electrones de las órbitas más alejadas del núcleo del átomo están más expuestos a abandonar su órbita, ya que el correspondiente núcleo le ejerce menos fuerza de retención. Estos electrones poseen mayor cantidad de energía que los que están más cerca del núcleo.

Por sí solo es casi improbable que un electrón deje su propia órbita para trasladarse a otra órbita más externa (de mayor nivel de energía). Para que esto suceda se requiere de algún factor externo. Cuando esto se presenta la tendencia intrínseca es recuperar de forma inmediata el electrón perdido y así mantener el equilibrio de carga atómica (misma cantidad de electrones negativos que de protones positivos).

En los materiales semiconductores, cuando un electrón pasa de una órbita de baja energía (banda de valencia) a una órbita de alta energía (banda de conducción), se produce una absorción de energía, y cuando sucede lo contrario (recuperación del equilibrio atómico) se genera energía que corresponde a la de un fotón. En la ecuación 10.1 se expresa la forma de calcular la energía de un fotón y en la figura No. 10.6 se muestra un diagrama de la forma de la generación de un fotón. ⁽⁵⁾

$$\langle 10.1 \rangle \quad E = hf = \frac{hC}{\lambda} = E_C - E_V \text{ (Joules)}$$

E : Energía del fotón(J)

h : Constante de Planck ($6,62606957 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \approx 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

f : Frecuencia del fotón (1/s)

C : Velocidad de la luz en el medio ($2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

λ : Longitud de onda del fotón (m)

E_C : Energía de un electrón, cuando se encuentra en la banda de conducción(J)

E_V : Energía de un electrón, cuando se encuentra en la banda de valencia (J)

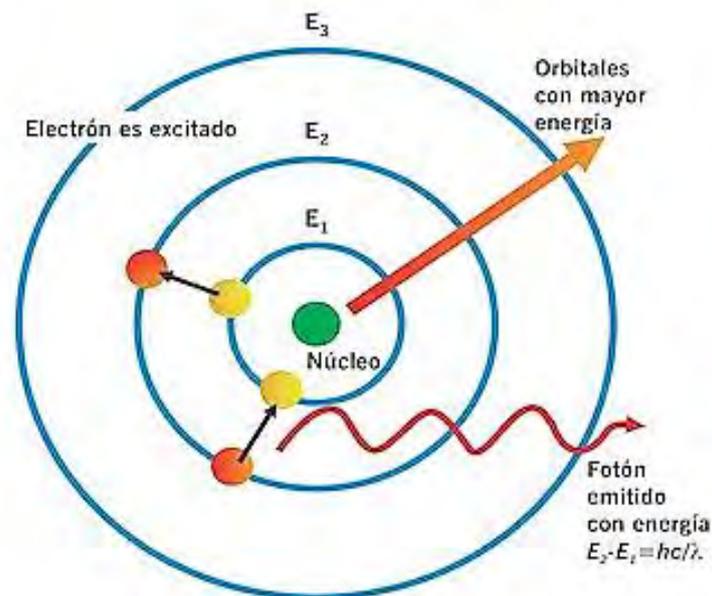


Figura No. 10.6 Emisión de un fotón

Fuente: Emisión de un Fotón. (2019). Disponible:

<http://saberesyciencias.com.mx> 2018 01 07 como-se-produce-la-luz

Los fotones de alta energía generan luz azul con una longitud de onda corta y los de baja energía generan luz roja con una longitud de onda larga. Una unidad común de energía, tanto para la eléctrica (electrones) como para la óptica (fotones), es el electrón-voltio (eV) en vez de julios (J). La relación entre estas dos unidades está indicada en la ecuación 10.2.

$$\langle 10.2 \rangle \quad 1eV = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

El producto entre la constante de Planck y la velocidad de la luz da un valor único, el cual se puede expresar en electrón-voltios o en julios:

$$\langle 10.3 \rangle \quad hC = 1.99 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m}$$

$$\langle 10.4 \rangle \quad hC \approx 1.24 \times 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m} = 1.24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}$$

Por lo tanto la energía asociada a un fotón se puede expresar según se indica en la ecuación 10.5, donde se relaciona la energía del fotón con su longitud de onda. ⁽⁶⁾

$$\langle 10.5 \rangle \quad E(\text{eV}) = 1.24 / \lambda(\mu\text{m})$$

Ejemplo No. 10.1

Teniendo como referencia las definiciones y equivalencias anotadas anteriormente, respecto a la energía asociada a un fotón, deducir la expresión de las ecuaciones: 6.2, 6.3, 6.4 6.5.

Solución:

a. Ecuación 10.2:

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= qV = (1,602 \times 10^{-19} \text{ C})(W / A) = 1,602 \times 10^{-19} (\text{C} / \text{A}) W \\ &= 1,602 \times 10^{-19} [c / (\text{C} / \text{s})] W = 1,602 \times 10^{-19} \text{ W} \cdot \text{s} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

b. Ecuación 6.3:

$$hC = (6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1,9878 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m} \approx 1.99 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m}$$

c. Ecuación 6.4:

$$\begin{aligned} hC &= 1.99 \times 10^{-25} \text{ J} \cdot \text{m} = (1.99 \times 10^{-25})(1 \text{ eV} \cdot \text{m} / 1,602 \times 10^{-19}) \\ &= 1,242197253 \times 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m} \approx 1.24 \times 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m} = 1.24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m} \end{aligned}$$

d. Ecuación 6.5:

$$E = \frac{hC}{\lambda} = \frac{1.24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}}{\lambda \mu\text{m}} \Rightarrow E(\text{eV}) = 1.24 / \lambda(\mu\text{m})$$

La ecuación inmediatamente anterior es la forma más utilizada para expresar la energía de los fotones en términos de electrón-voltios y la longitud de onda en micrómetros.

Ejemplo No. 10.2

Una estación de radiodifusión emite, en su frecuencia de transmisión, fotones con una energía de alrededor de $4,2436 \times 10^{-7} \text{ eV}$. Determinar la frecuencia de la señal transmitida.

Solución:

Desde la ecuación 10.5

$$E(\text{e.V}) = 1.24 / \lambda(\mu\text{m}) \Rightarrow \lambda(\mu\text{m}) = 1.24 / E(\text{eV})$$

$$= \lambda(\mu\text{m}) = 1.24 / 4,2436 \times 10^{-7} (\text{eV}) = 2,922 \times 10^6 (\mu\text{m})$$

$$\lambda(\text{m}) = 2,922 \text{ m} \Rightarrow f(\text{Hz}) = C / \lambda = (3 \times 10^8 \text{ m/s}) / 2,922 \text{ m}$$

$$f(\text{MHz}) \approx 102.7 \text{ MHz}$$

Ejemplo No. 10.3

Determinar la energía asociada a una señal de luz que incide en una fibra óptica monomodo tipo SMF (*Standar Single Mode fiber*), la cual le genera una dispersión cromática de 8 (ps nm- m).

Solución:

Desde la figura No. 8.11 que indica las curvas de dispersión cromática de algunos tipos de fibras ópticas monomodo, se puede determinar que la longitud de onda de la señal para una fibra tipo SMF, con 8 (ps nm - m) de dispersión cromática, es de 1.400 (nm) aproximadamente.

Aplicando la ecuación 10.5:

$$E(\text{e.V}) = 1.24 / \lambda(\mu\text{m}) = 1.24 / 1.4 (\mu\text{m}) = 08857 (\text{e.V})$$

10.3 Detectores ópticos

Los *detectores ópticos*, igualmente conocidos como *foto diodos* o *fotodetectores*, son dispositivos semiconductores que generan una señal eléctrica dependiendo de la intensidad de luz (u otra señal electromagnética) que reciben. Pueden estar

basados en el efecto fotoeléctrico, o en el fotovoltaico, o en el fotoelectro-químico o en la fotoconductividad. ⁽⁷⁾

Para el caso de las redes de comunicación ópticas, se utilizan *fordiodos* basados en el efecto fotoeléctrico, cuya función, como se mencionó anteriormente, es convertir la potencia óptica recibida a una corriente eléctrica de salida. El funcionamiento, descrito en forma elemental, consiste en que las uniones P-N de estos diodos originan un flujo de corriente cuando captan un fotón, cuya intensidad de corriente depende de los materiales constitutivos de estos *fordiodos* y de la longitud de onda de la señal de luz que le llega.

En la figura 10.7 se ilustran las curvas correspondientes a la respuesta espectral (A : amperios de salida versus vatios luminosos de entrada) de los fordiodos basados en el efecto fotoeléctrico, con respecto a la longitud de onda de la señal óptica incidente, para diferentes tipos de fordiodos, de acuerdo al tipo de material con que están constituidos.

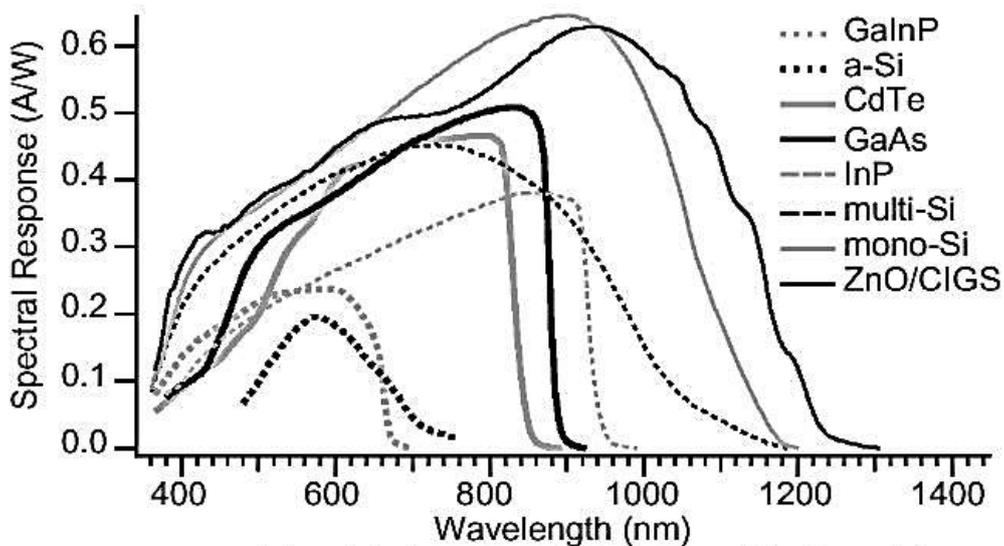


Figura No. 10.7 Repuesta espectral (A) con respecto a la longitud de onda de la señal óptica para diferentes tipos de *fordiodos*.

Fuente: Curso *etectores fotoeléctricos* , Instrumentación Astronómica, 2016 2017, p. 13

Ejemplo No. 10.4

Determinar la respuesta (A) de los fordiodos: CdTe y GaAs, con respecto a la longitud de onda de la señal óptica incidente de 850 nm. ,

Solución:

Teniendo como referencia las curvas indicadas en la figura 4.19, para los fordiodos referenciados conseñales ópticas de una longitud de onda de 800 nm, tenemos:

a.) CdTe: aproximadamente 0.61 (A).

b.) GaAs: aproximadamente 0.04 (A).

Para que los *fotodiodos* trabajen en forma altamente eficiente, en las redes de comunicaciones ópticas, deben cumplir con los siguientes parámetros de funcionamiento:

- ue posean un bajo nivel de ruido.
- ue ofrezcan un amplio ancho de espectro de longitud de onda. Es decir que respondan de manera uniforme y rápida en todas las longitudes de onda de la señal óptica que recibe.
- ue posea una alta estabilidad a las variaciones de temperatura.
- ue sean ergonómicamente aptos para integrarlas a las redes ópticas.

La eficiencia de los *fotodiodos* se determina mediante la relación existente, entre la cantidad de electrones (corriente eléctrica) que genera versus la cantidad de fotones recibidos (potencia óptima de entrada). Los *fotodiodos* son dispositivos basados en la unión de dos zonas (P-N) de un mismo semiconductor con dopado inverso, los cuales generan una corriente o voltaje cuando reciben una señal luminosa.

Un diodo PN corresponde a la unión de dos zonas de un material semiconductor, una dopada con una gran cantidad de impurezas positivas (huecos) zona P y la otra con impurezas negativas (electrones) zona N (ver figura No. 10.8).

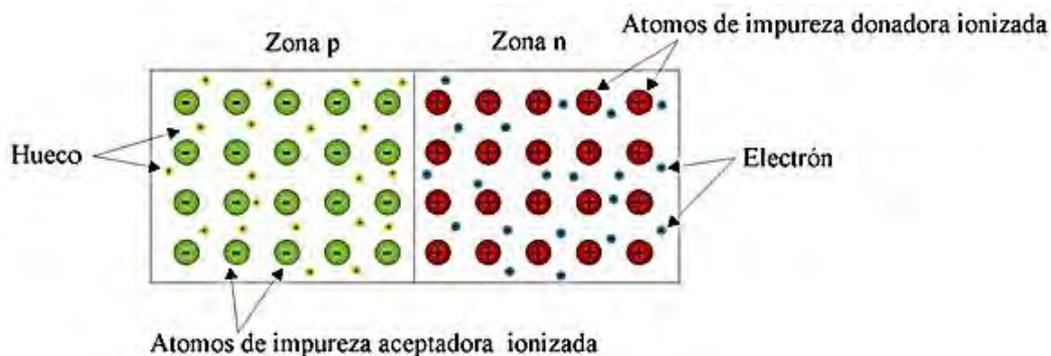


Figura No. 10.8 Diodo de unión PN

Fuente: Teoría del diodo. (2019). Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/teoria-del-diodo/teoria-del-diodo.shtml>

Cuando un diodo es polarizado en forma inversa, se presenta una región de deplexión (de carga) en la unión entre sus dos zonas (P y N), donde se han intercruzado electrones de la zona N a la zona P y huecos de la zona P a la zona N, dando lugar a la presencia de pares electrones-huecos en esta región (ver figura 10.9).

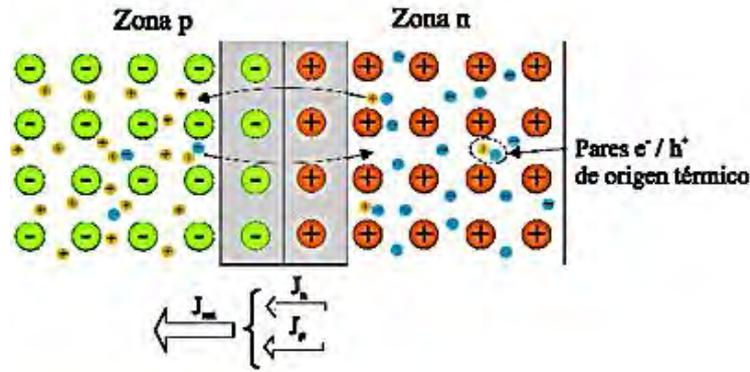


Figura 10.9 Diodo de unión PN con polarización inversa

Fuente: Teoría del Fotodiodo. (2019). Disponible: <http://trabajos-pdf5.teoria-del-diodo.teoria-del-diodo.shtml>

10.3.1 Funcionamiento del fotodiodo

Al incidir un fotón sobre la región de deplexión (de carga), del fotodiodo con una energía $E(\text{fotón}) \geq hf$, éste es absorbido generándose un par electrón-hueco (e^-, h^+) . Como consecuencia al campo eléctrico generado por la diferencia de tensión aplicada en el circuito, los electrones y huecos se ponen en circulación produciéndose una corriente eléctrica (corriente fotónica) (ver figura No. 10.10).
(8)

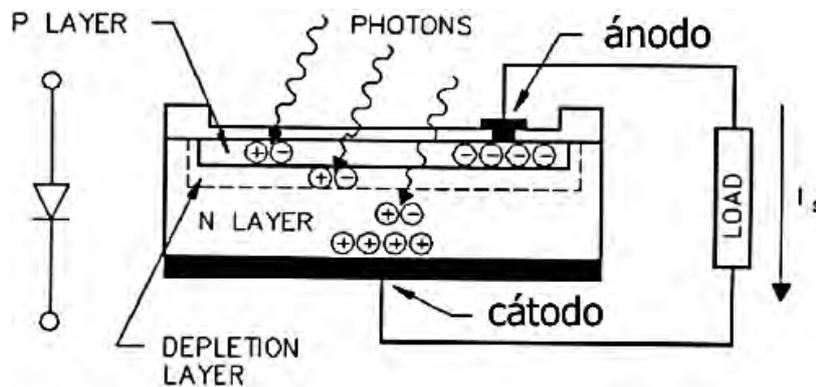


Figura No. 10.10 Estructura y funcionamiento básicos de un fotodiodo.

Fuente: Curso *etectores fotoeléctricos*, Instrumentación Astronómica, 2016-2017, p. 12.

Debido a la polarización inversa a la cual está sometido el fotodiodo, la intensidad del campo eléctrico interno se incrementa, dando como resultado que la aceleración de los pares electrones-huecos sea mayor y por lo tanto la corriente resultante del fotodiodo sea mejor ante las variaciones de la potencia óptica incidente.

Existe una gran variedad de tipos de fotodiodos, entre los cuales se resaltan los siguientes:

- *otodiodo tipo* (P-Intrínseca-N.): corresponde a un diodo semiconductor que cuenta con una zona intermedia denominada intrínseca, lo que permite que se incremente la eficiencia del fotodiodo. Debido a la introducción de la zona intrínseca hace que el tiempo de respuesta de este fotodiodo aumente, ya que el tiempo de tránsito de los fotoportadores es mayor. ⁽⁹⁾

En la figura No. 10.11 se muestra las capas que conforman la estructura básica de un fotodiodo tipo PIN y la imagen de uno de ellos.

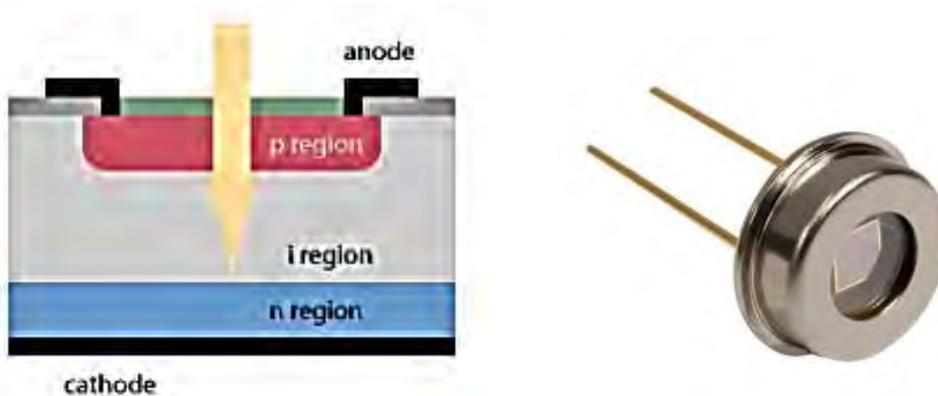


Figura No. 10.11 Estructura básica de un fotodiodo tipo PIN y la imagen de uno de ellos.

Fuente: Fotodetectores. (2019). Disponible:

http://materias.df.uba.ar/lab05Aa2018c2/files/2018_09/fotodetectores.pdf

- *otodiodo tipo A* (Avalanche Photo Detector): es similar al fotodiodo PIN en cuanto a que trabaja polarizado en inversa. La diferencia tiene que ver que los APD deben ser polarizados a un alto voltaje (150-300 V) para que se pueda lograr el efecto de avalancha. Este efecto consiste en la generación en cadena de portadoras, debido a que el campo eléctrico, generado por las elevadas tensiones, logra altas intensidades lo que originan aceleraciones fuertes en la portadoras, existentes en la zona intrínseca, produciéndose colisiones con los átomos que conforman la estructura cristalina del semiconductor, lo que a su vez se generan nuevos pares de electro hueco, como consecuencia de la suficiente energía que llevan las portadoras, haciendo que los electrones pasen de la banda de valencia a la de conducción. Las nuevas portadoras vuelven a generar más portadoras en forma repetitiva, lográndose de esta manera el efecto avalancha. ⁽¹⁰⁾

En la figura No. 10.12 se muestra las capas que conforman la estructura básica de un fotodiodo tipo APD y la imagen de uno de ellos. :

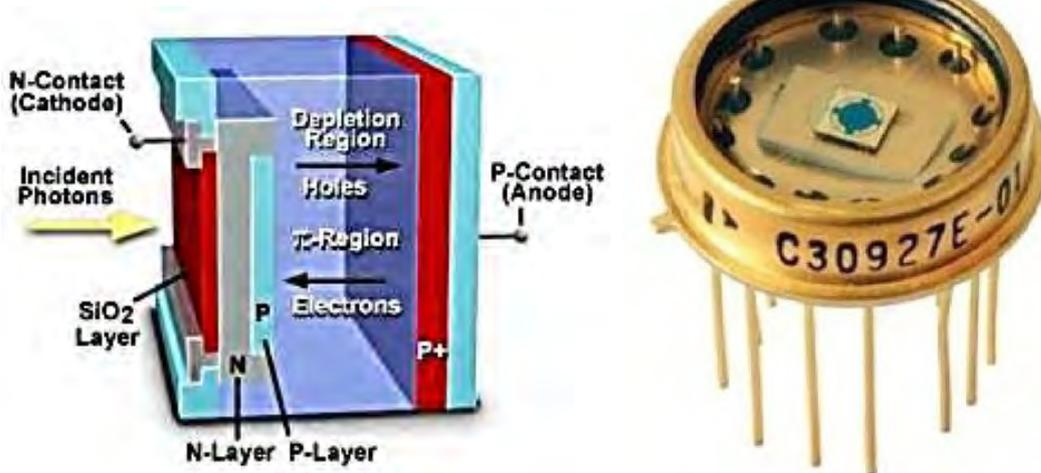


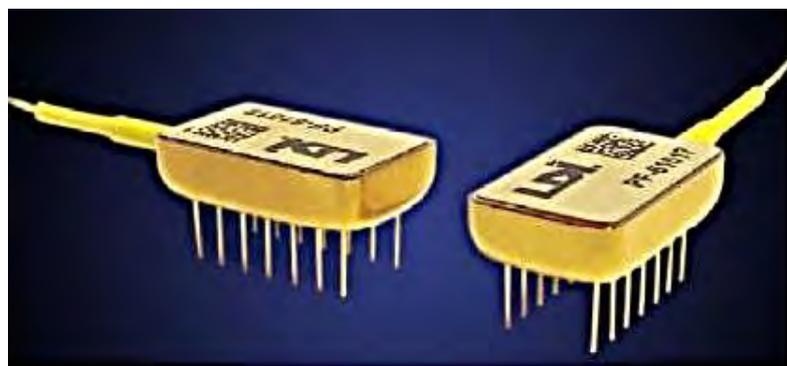
Figura No. 10.12 Estructura básica de un fotodiodo tipo APD y la imagen de uno de ellos.

Fuente: Fotodetectores. (2019). Disponible: http://materias.df.uba.ar/labo5Aa2016c2/files/2018_09/fotodetectores.pdf

Debido al efecto de avalancha en el fotodiodo APD se genera una ganancia interna ofreciendo un mayor nivel de sensibilidad con respecto al PIN. Sin embargo el APD requiere de altos valores de voltaje para su operación y además su salida no es lineal, como consecuencia de la avalancha, originando mayor nivel de ruido que el fotodiodo PIN.

- **otodiodo T** (P-intrinsic-N, transistor de efecto campo): corresponde a un fotodiodo resultante de la integración de un fotodiodo PIN y una transimpedancia discreta de alto rendimiento (etapa de amplificación) Permite un buen acoplamiento con la fibra ya sea monomodo o multimodo.⁽¹¹⁾

La estructura básica de un **T** está conformada principalmente por un detector PD y por un circuito amplificador operacional (OAC). El detector convierte la señal óptica en señal eléctrica, la cual es amplificada por el OAC, lográndose una señal de salida ideal. En la figura 6.13 se ilustra dos imágenes de este tipo de fotodiodo, así como el diagrama esquemático del circuito del **T**.



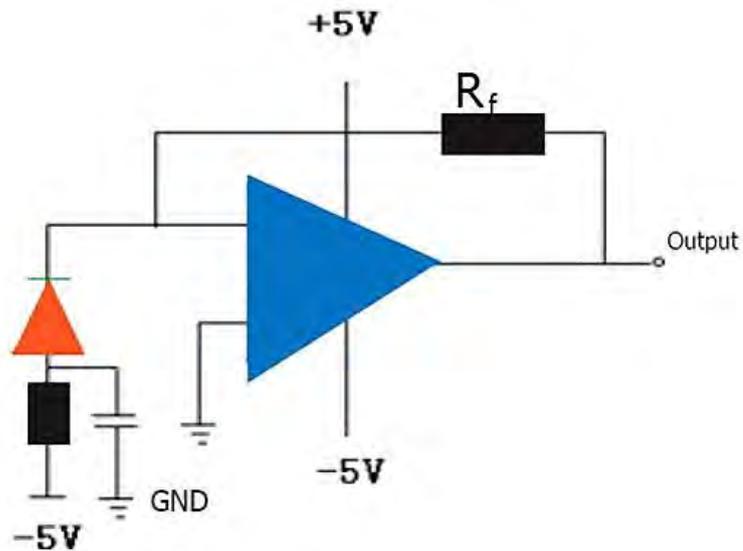


Figura No. 10.13 Imágenes de fotodiodos PINFET y diagrama esquemático del circuito equivalente.

PIN-FET Hybrid receiver. (2019). Disponible:
<http://.fogphotonics.com/Pros/ie.aspx/classId/47/id/248>

10.3.2 Parámetros del fotodiodo

a. Corriente fotónica

Corresponde a la corriente producida por el fotodiodo como consecuencia de los fotones (señal óptica) incidentes en el mismo. En la ecuación 10.6 indica la forma de determinar la corriente producida por un fotodiodo. ⁽¹²⁾

$$\langle 10.6 \rangle I_{ph} = R_{ph} P_{inc}$$

I_{ph} : Corriente fotónica resultante (A)

P_{inc} : Potencia incidente (W)

R_{ph} : Reflectancia del fotodiodo (A/W)

La reflectancia (respuesta espectral o responsividad espectral o sensibilidad radiante) representa la capacidad del fotodiodo de generar pares electrón-hueco por la incidencia de una señal óptica. El valor de la reflectancia depende tanto del material del fotodiodo como de la longitud de onda de la señal óptica incidente.

En la figura No. 10.7 se indican las curvas mediante las cuales se puede determinar un valor aproximado de la reflectancia (respuesta espectral) de diferentes materiales semiconductores, en función de la longitud de onda de la señal óptica incidente y en la ecuación 10.7 la forma de calcular dicho valor.

$$\langle 10.7 \rangle R_{ph} = \eta_Q \frac{q\lambda}{hC} \text{ (A/W)}$$

η_Q : eficiencia cuantica

q : caraga del electrón ($1,60129 \times 10^{-19} \text{ C}$)

λ : Longitud de onda de la señal incidente (μm)

h : Constante de Planck ($\text{J}\cdot\text{s}$)

C : Velocidad de la luz (m/s)

La eficiencia cuántica es la relación entre el número de electrones extraídos del material semiconductor y el número de fotones incidente sobre el mismo, para cada valor de longitud de onda. En el caso ideal esta eficiencia es $\eta_Q = 1$ (100%), lo que representa que por igual número de fotones incidentes igual número de electrones emitidos.

Ejemplo No. 10.5

Calcular corriente fotónica de un fotodiodo que tiene una eficiencia cuántica del 70% para una longitud de onda incidente de 1.3 μm y la potencia incidente óptica es de -16 dBm.

Solución:

Se aplica la ecuación 6.6:

$$I_{ph} = R_{ph} P_{inc}$$

Reflectancia del diodo:

$$R_{ph} = \eta_Q \frac{q\lambda}{hC} = 0.7 \frac{(1.601 \times 10^{-19} \text{ C})(1.3 \mu\text{m})}{1.24 \text{ eV} \cdot \mu\text{m}} = 1.17 \text{ (A/W)}$$

Potencia incidente en veces:

$$-16 \text{ dBm} = 10 \log_{10} (P_{inc})_{mw} \Rightarrow (P_{inc})_{mw} = 10^{-1.6} \text{ mW} = 25.1 \mu\text{W}$$

Entonces la corriente fotónica:

$$I_{ph} = R_{ph} P_{inc} = 1.17 \text{ (A/W)} \times 25.1 \times 10^{-6} \text{ (W)} = 29.37 \mu\text{A}$$

Ejemplo No. 10.6

En la figura No. 10.14 se representa un circuito de operación de un fotodiodo con dos amplificadores operacionales incorporados. Determinar su función de

transferencia (ganancia $\frac{P_{out}}{P_{inc}}$), donde P_{inc} corresponde a la potencia incidente de luz en el fotodiodo.

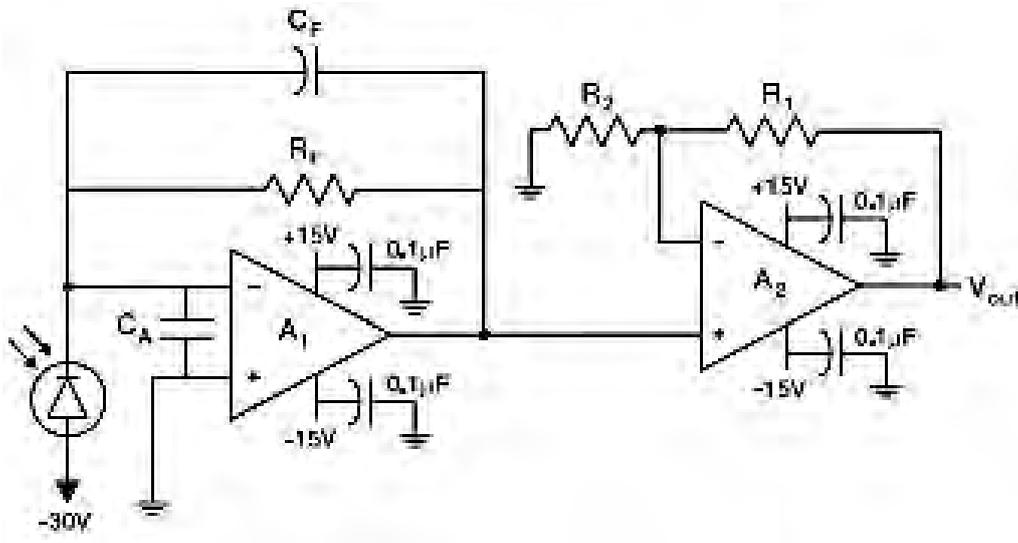


Figura No. 10.14 Circuito equivalente de un fotodiodo PINFET

Fuente: Photodiode Characteristics and Applications.(2019). Disponible:

http: .osioptoelectronics.com application-notes an-photodiode-parameters-characteristics.pdf

Solución:

El voltaje de salida del amplificador A_1 :

$$V_{out1} = -R_F I_{ph}$$

La corriente y el voltaje de salida de salida final:

$$I_1 = \frac{(V_{out1} - V_{out})}{R_1} \quad \wedge \quad V_{out} = V_{out1} - R_1 I_1$$

$$I_1 = I_2 = \left(\frac{0 - V_{out1}}{R_2} \right)$$

$$V_{out} = -R_F I_{ph} + \frac{R_1}{R_2} V_{out1} = -R_F I_{ph} + \frac{R_1}{R_2} (-R_F I_{ph})$$

$$V_{out} = -R_F \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) I_{ph} = -R_F \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) R_{ph} P_{inc}$$

Finalmente

$$\frac{V_{out}}{P_{inc}} = -R_F \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) R_{ph} \quad (V/W)$$

Según resultados obtenidos de montajes realizados del circuito indicado en el ejemplo No. 10.6, los valores típicos que se pueden emplear con esa configuración se relacionan en la tabla No. 10.4

Tipo de amplificador	OPA-637, OPA-846, OPA-847, o similar
R_F :	1 a 10 Kohmios,
R_1 :	10 a 50 Kohmios
R_2 :	0.5 a 10 Kohmios
C_F :	0.2 a 2 pF

Tabla No.10.4 Rango de valers típicos que se pueden usar en la configuración del circuito del ejemplo No. 6.6

Fuente: Photodiode Characteristics and Applications.(2019). Disponible:
[http: .osioptoelectronics.com application-notes an-photodiode-parameters-characteristics.pdf](http://.osioptoelectronics.com/application-notes/an-photodiode-parameters-characteristics.pdf)

b. Longitud de corte

Concierne a aquella longitud de la señal óptica a la cual responde eficientemente el fotodiodo (mayor reflectancia). Para poder definir la expresión que permita calcular la longitud de onda de corte λ_c , se parte de que la energía del fotón incidente debe ser igual al *gap energético* del material semiconductor del fotodiodo. ⁽¹³⁾

$$hf = E_g \Rightarrow \frac{hC}{\lambda} = E_g \Rightarrow \lambda = \frac{hC}{E_g}$$

$$\text{Teniendo en cuenta la ecuación } \langle 4.20 \rangle \Rightarrow \lambda = \frac{1.24(eV \cdot \mu m)}{E_g (eV)}$$

$$\langle 6.7 \rangle \lambda = \frac{1.24}{E_g} (\mu m)$$

Si la longitud de onda, de la señal óptica incidente, está por encima de la longitud de onda de corte λ_c del fotodiodo, los fotones no serán absorbidos y no se generará corriente fotónica. Si la longitud de onda es menor que λ_c , la energía del fotón será mayor que el *gap energético* (diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia (B) y la parte inferior de la banda de conducción (BC) del semiconductor) y la diferencia de energía se disipará en forma de calor.

Ejemplo No. 10.7

Determinar la longitud de onda de corte para el fotodiodo de material semiconductor tipo Si.

Solución:

Para el semiconductor de silicio su *gap energético* es de 1.12 (eV) (ver tabla 6.4), entonces empleando la ecuación 6.7:

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g (eV)} = \frac{1.24}{1.12} = 1.11 (\mu m)$$

En la tabla No.10.5 se indica se relacionan el *gap energético* y la longitud de onda de corte para algunos tipos de semiconductores.

Semiconductor	$E_g (eV)$	$\lambda_c (\mu m)$	Tipo de Transición del electron (BC a BV)
InP	1.35	0.91	Directo
GaAs _{0.88} Sb _{0.12}	1.15	1.08	Directo
Si	1.12	1.11	Indirecto
In _{0.7} Ga _{0.3} As _{0.64} P _{0.36}	0.89	1.4	Directo
In _{0.53} Ga _{0.47} As	0.75	1.65	Directo
Ge	0.66	1.87	Indirecto
InAs	0.35	3.5	Directo
InSb	0.18	7	Directo

Tabla No.10.5 Gap energético y longitud de onda de corte para algunos tipos de semiconductores.

Fuente: Argas, S., *Optical Transmission Media*, Universidad Carlos III de Madrid, 2017, p. 8

c. Ancho de banda

El ancho de banda de un fotodiodo depende del tiempo con que responde éste ante las variaciones de la potencia óptica incidente. A este intervalo de tiempo entre la llegada de un pulso de señal óptica al fotodiodo y la aparición de la corriente fotónica en el circuito, se le denomina *tiempo de respuesta o tiempo de subida* del fotodiodo $T_r(s)$. Una aproximación para calcular este ancho de banda se indica en la ecuación 10.8. ⁽¹⁴⁾

$$\langle 10.8 \rangle B = \frac{0.35}{T_r} \text{ (Hz)}$$

Ejemplo No. 10.8

Determinar el rango de los anchos de banda de un fotodiodo de tipo PIN, cuyo material semiconductor es Ge, para el caso del rango de tiempo de respuesta considerando para este tipo de fotodiodo.

Solución:

Teniendo en cuenta lo indicado en la tabla 6.5 el rango del tiempo de respuesta para el fotodiodo de Ge es de 0.1 a 0.5 nanosegundo, entonces:

Aplicando la ecuación 6.8:

$$\text{Para } 0.1 \text{ ns} \Rightarrow B = \frac{0.35}{0.1 \times 10^{-9}} = 3.5 \text{ (GHz)}$$

$$\text{Para } 0.5 \text{ ns} \Rightarrow B = \frac{0.35}{0.5 \times 10^{-9}} = 0.7 \text{ (GHz)}$$

Lo anterior nos indica que el ancho de banda de este tipo de fotodiodo está entre 0.7 a 3.5 GHz, dependiendo del tiempo de respuesta del Ge utilizado.

d. Potencia de absorción

Los fotones incidentes serán absorbidos en la región de depleción, cuya potencia de absorción es proporcional a la cantidad de fotones incidentes (potencia incidente). La ecuación 10.9 corresponde a la forma de calcular la potencia absorbida en el fotodiodo. ⁽¹⁵⁾

$$\langle 10.9 \rangle \quad P_{abs} = P_{inc} (1 - R_{ph}) (1 - e^{-\alpha d})$$

P_{inc} : Potencia Incidente (W)

R_{ph} : Reflectancia del material semiconductor (A/W)

α : Coeficiente de absorción del material semiconductor (m^{-1})

d : anchura de la región de depleción (m)

En la figura No. 10.15 se indican las curvas de los coeficientes de absorción (α) en función de la longitud de onda (λ) para algunos tipos de semiconductores.

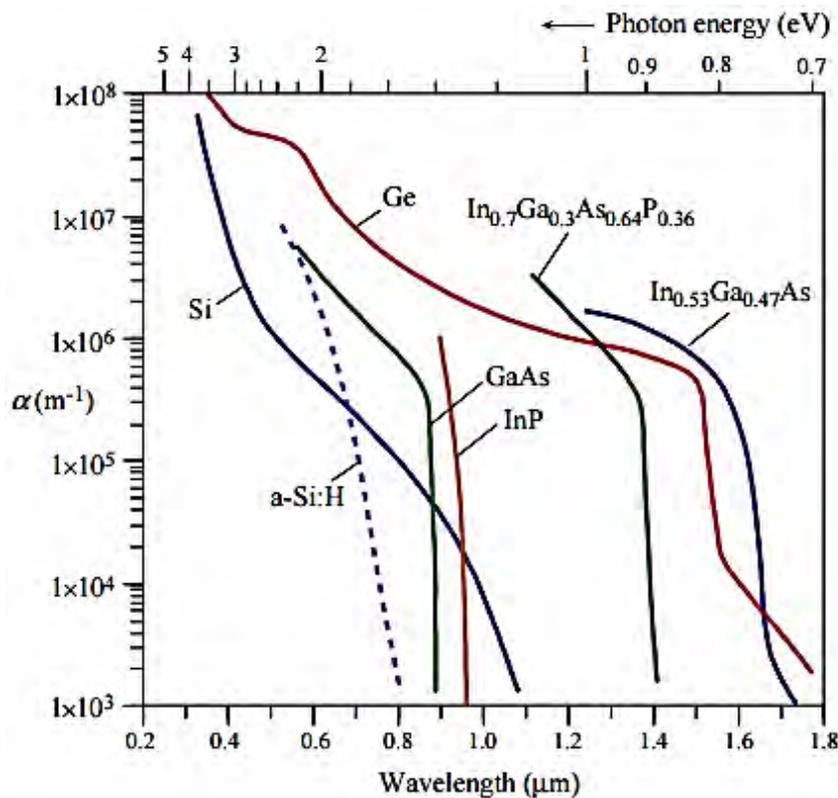


Figura No. 10.15 Curvas del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda para varios tipos de semiconductores.

Fuente: argas, S., *Devices and Optical Transmission Media*, Universidad Carlos III de Madrid, 2018, p. 6

Ejemplo No. 10.9

Para el mismo caso del fotodiodo planteado en el ejemplo No.6.5, con un ancho de la región de depleción de 10 micrómetros, determinar la potencia de absorción, si el material del fotodiodo es de germanio.

Solución:

Según lo planteado y desarrollado en el ejemplo No. 6.5, se tiene:

$$(P_{inc})_{mw} = 10^{-1.6} = 25.1 \mu W ; R_{ph} = 1.17 (A/W) ; \lambda = 1.3 \mu m$$

Se requiere determinar el coeficiente de absorción del material semiconductor del fotodiodo. Desde las curvas de la figura 6.11, para el caso de una longitud de onda de 1.3 micrómetros y semiconductor de germanio se tiene:

$$\alpha \approx 1 \times 10^6 m^{-1}$$

Se aplica la ecuación 6.9

$$\begin{aligned} P_{abs} &= P_{inc} (1 - R_{ph}) (1 - e^{-\alpha d}) = 25.1 \mu W (1 - 1.17 A/W) (1 - e^{-(10^6)(10 \times 10^{-6})}) \\ &= 0.0946 W \end{aligned}$$

Ejemplo No. 10.10

Sí a un fotodiodo tipo PIN de silicio, que dispone de una región intrínseca de anchura de 12 μm , le incide un rayo láser de GaAs, con una intensidad de energía de 1.51 e, determinar la densidad de la corriente fotónica en el detector, teniendo de presente que la potencia óptica incidente por superficie es de 1.2 cm^2 y que no se presentan pérdidas por reflexión. ⁽¹⁶⁾

Solución:

La densidad de la corriente fotónica en el receptor es igual a lo expresado en la ecuación 10.10:

$$\langle 10.10 \rangle \quad J_{ph} = q \frac{N_{ph}}{A} [1 - e^{-\alpha d}]$$

Donde:

J_{ph} : densidad de corriente fotónica (A/m^2).

q : carga del electrón (e).

N_{ph} : flujo de fotones (cantidad de fotones del haz de luz).

A : área del receptor afectada por el haz de luz incidente (m^2).

α : coeficiente de absorción (cm^{-1}).

d : anchura de la región intrínseca (m).

$$\text{Se tiene que: } N_{ph} = \frac{P_{inc}}{E_g} = \frac{P_{inc}}{hf} \quad (1/s),$$

Entonces el flujo de fotones incidentes por superficie sobre el detector, es:

$$\frac{N_{ph}}{A} = \frac{P_{inc} / hf}{A} = \frac{P_{inc} / A}{hf} = \frac{1.2 (W / cm^2)}{1.51(eV) \times (1.6 \times 10^{-19}) (e)}$$

$$\approx 4.97 \times 10^{18} (1 / s.cm^2)$$

Desde las curvas de la figura No.10.11, para una energía incidente de $1.51eV$, el coeficiente de absorción para el Si es $\alpha \approx 750 \times 10^2 cm^{-1}$

Reemplazando valores en la ecuación 6.10:

$$J_{ph} = (1.6 \times 10^{-19})(4.97 \times 10^{18}) [1 - e^{-(750 \times 10^2)(12 \times 10^{-6})}] = 0.4723 (A / cm^2)$$

e. Corriente de oscuridad

Corresponde a aquella corriente que se genera en el fotodiodo sin que exista señal óptica incidente. Se origina debido al comportamiento intrínseco de los

pares electrón-hueco generado térmicamente. Generalmente, para fotodiodos de buena calidad, el valor de esta corriente no sobrepasa los 10 nA.⁽¹⁷⁾

En la tabla No. 10.6 se relaciona los valores típicos de los principales parámetros de los tres fotodiodos tipo PIN más utilizados.

Parámetro	Si	Ge	InGaAs
Reflectancia (A/W)	0.4 a 0.6	0.5 a 0.7	0.6 a 0.9
Longitud de onda de corte (um)	0.4 a 1.1	0.8 a 1.8	1.0 a 1.7
Tiempo de respuesta (ns)	0.5 a 1.0	0.1 a 0.5	0.05 a 0.5
Ancho de banda (GHz)	0.3 a 0.6	0.7 a 3.5	1.0 a 5.0
Corriente de oscuridad (nA)	1 a 10	50 a 500	1 a 20
Eficiencia (%)	75 a 90	50 a 55	60 a 70

Tabla No. 10.6 Valores típicos de los principales parámetros de fotodiodos PIN.

Fuente: Tutorial de Comunicaciones. (2019). Disponible:
http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_5_3.htm

La sensibilidad de un *fotodiodo* depende del material semiconductor que se utiliza en su estructuración, para una determinada señal espectral de la luz. En la tabla No. 10.7 se indica el rango espectral, en longitud de onda, donde los *fotodiodos* son más sensibles según el material con que han sido construidos.

Material	Rango espectral
Silicio (Si)	190 – 1100 nm
Germanio (Ge)	800 - 1700 nm
Indio galio arsénico (InGaSa)	800 – 2600 nm
Sulfuro de plomo	1000 – 3500 nm

Tabla No. 10.7 Rango espectral de los fotodiodos donde son más sensibles de acuerdo al material de su construcción.

Fuente: Fotodiodos. (2019). Disponible: http://robots-argentina.com.ar/Sensores_fotodiodos.htm

Existe en el mercado una gran variedad de tipos de *fotodiodos*, para diferentes aplicaciones. En la figura No. 10.16 se ilustra algunos de ellos.

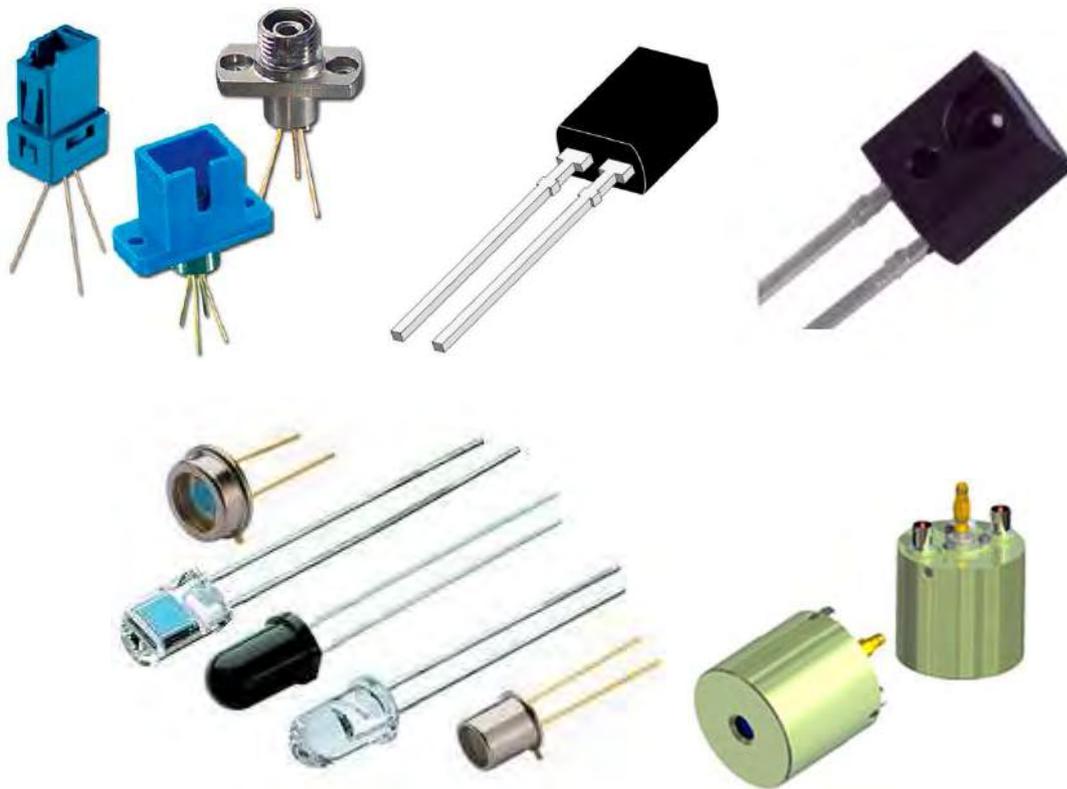


Figura No. 10.16 Imágenes de fotodiodos comerciales.
Fuente: Catálogos "fotodiodos", Fairchild Photo JDSU, 2016 -2017.

10.4 Transmisor y receptor óptico

El transmisor y receptor óptico corresponden a los dos componentes existentes en los extremos de un enlace óptico. El transmisor en el extremo inicial y el receptor en el extremo final. Para el caso de comunicaciones bidireccionales (que son las más comunes), en cada extremo del enlace óptico existe un transmisor y un receptor conectados con su correspondiente fibra de enlace (una para cada uno). En la mayoría de los casos estos dos componentes se encuentran en una sola unidad denominada transceptor óptico, trabajando independientemente, similar a como sucede en las comunicaciones radioeléctricas.

10.4.1 Transmisor óptico

El transmisor óptico es el encargado de activar el encendido y el apagado de la luz del dispositivo óptico que genera la señal luminosa. El transmisor óptico se posiciona muy cerca de la fibra óptica y generalmente tiene un lente en su frente final (antena óptica), el cual sirve para enfocar el haz de luz a ser inyectada a la fibra. Como se ha mencionado anteriormente los diodos láser generan más potencia luminosa que los LEDs y que las señales infrarrojas son las más empleadas, en las longitudes de onda de 850 nm, 1.300 nm y 1.550 nm. En la figura No. 10.17 se muestra un diagrama de uno de los diferentes circuitos

electrónicos elemental de un emisor óptico y la curva del infrarrojo para que el diodo láser obtenga el punto de operación. ⁽¹⁸⁾

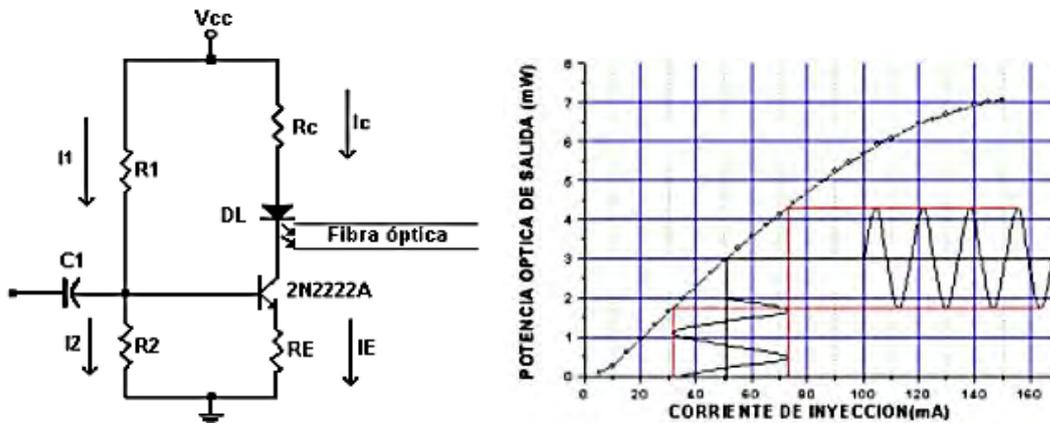


Figura No. 10.17 Diagrama simplificado de un circuito electrónico de un emisor óptico y la curva de operación de un diodo láser.

Fuente: Riviera F. J., "Diseño y construcción de un enlace opto-electrónico" Profesor-investigador Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2017, p. 39.

Para obtener la respuesta de operación indicada en la curva mostrada en la figura inmediatamente anterior los valores de los componentes del circuito y sus parámetros de funcionamiento son los siguientes:

$$R_C = 6.8 \Omega, R_E = 33 \Omega, R_1 = 15 K\Omega, R_2 = 10 K\Omega, V_{CC} = 12 V, I_C = 46 mA$$

Existe una gran variedad de transmisores ópticos, en la figura No. 10.18 se ilustra unas imágenes de dos de ellos.





Figura No. 10.18 Imagen de un transmisor óptico.

Fuente: Transmisor óptico. (2019). Disponible: <http://www.tba-sa.com/temas-docs/nfnotas116.pdf>. TBA-SA Tecnología de banda ancha. (2019). Disponible: http://tba-sa.com/transmisoresOpticos/TBA8500AB_tba8500AB.html

En el mercado se consigue una gran variedad de transmisores ópticos, cuya potencia de salida óptica, más frecuente, está entre 2 y 28 dBm, pudiéndose encontrar de mayor valor de potencia.

Ejemplo No. 10.11

En la figura No. 10.19 se ilustra el circuito de un transmisor láser: a.) indicar su composición y b.) describir su funcionamiento.⁽¹⁹⁾

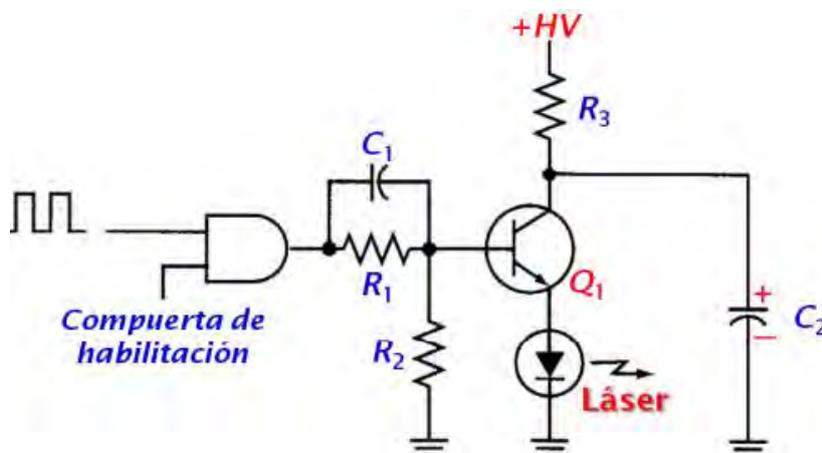


Figura No. 10.19 Transmisor Láser

Fuente: Transmisores y Receptores Ópticos. (2019). Disponible: http://www.coimbraweb.com/documentos/opticas/8.6_led_laser.pdf

Solución:

a.) *Composición*: sus componentes básicos son: el diodo láser y el circuito excitador.

b.) *funcionamiento*: los pulsos de datos de entrada se aplican a la compuerta lógica, el cual comanda la activación del transistor interruptor T_1 , el cual a su vez comanda la activación del diodo láser a una velocidad muy alta, en el rango de los μs .

- Si la entrada es cero (0 binario), la salida de la compuerta AND es cero, lo que implica que el T_1 no conduce y por lo tanto el láser está apagado, lo que origina que C_2 se al voltaje de la fuente (H) a través de R_3 .
- Si la entrada es un pulso positivo (1 binario), T_1 conduce haciendo que el voltaje almacenado en C_2 se le aplique al láser, el cual a su vez se activa generando un pulso de luz intensa.

El rango de potencias que generan los diodos láser va entre unos cuantos m hasta algunos vatios.

Los transmisores láser se emplean para enlaces de longitud larga y transmisiones de alta velocidad, del orden de los cientos de Gbps o más, debido a los altos niveles de intensidad de luz que generan y a que la velocidad de cambio, de un estado a otro, es rápida.

a que los láser generan una cantidad alta de calor en su operación, demandan contar con un disipador de calor adecuado para que pueda funcionar correctamente.

10.4.2 Receptor óptico

El receptor óptico es el encargado de recibir las señales luminosas digitales, las decodifica (conversión a señales eléctricas) y las envía al dispositivo final, ya sea un computador, un televisor o un teléfono. El elemento esencial del receptor óptico es una fotocelda o un fotodiodo para poder detectar la luz. En la figura No. 10.20 se ilustra uno de los circuitos electrónicos elementales de receptores ópticos. ⁽²⁰⁾

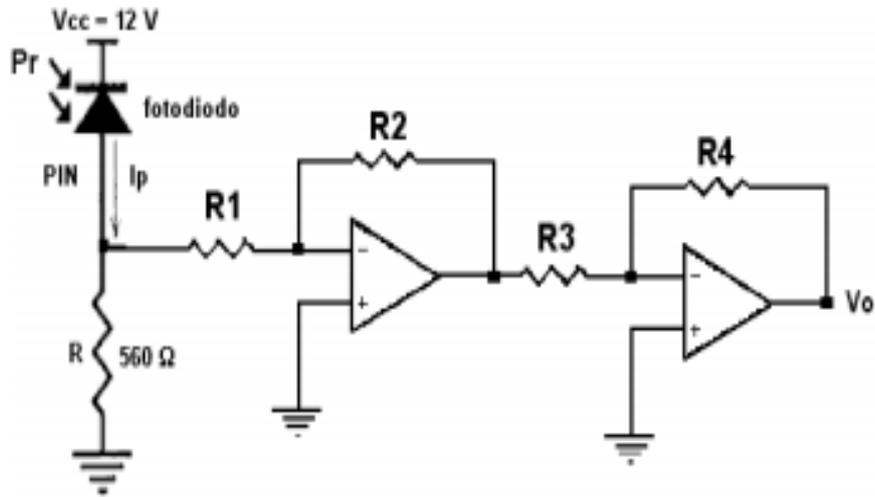


Figura No. 10.20 Diagrama elemental de receptores ópticos

Fuente: Riviera F. J., "Diseño y construcción de un enlace opto-electrónico" Profesor-investigador Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2015, p. 40

En la tabla No. 10.8 se relacionan los principales parámetros de funcionamiento del diodo detector (foto-detector) del receptor óptico, mostrado en la figura inmediatamente anterior.

Parámetro	Valores
Responsividad	0.75 A / W
Ancho de banda	10 MHz
Longitud de onda	1.300 nm
Corriente de oscuridad	10 nA / T=25°C

Tabla No. 10.8 Principales parámetros de funcionamiento del fotodetector del receptor óptico ilustrado en la figura No. 7.35.

Fuente: Riviera F. J., "Diseño y construcción de un enlace opto-electrónico" Profesor-investigador Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2014, p. 40.

Al igual que para el caso de los transmisores ópticos, existe una gran variedad de receptores ópticos, en la figura No. 10.21 se muestra una imagen de uno de ellos.



Figura No. 10.21 Imagen de un receptor óptico.
 Fuente: <http://hondao-optic.com> es hfc-optic-net or -series page 2

Receptor óptico. (2019). Disponible: <http://yscom.com> blog optica .

Ejemplo No. 10.12

En la figura No. 6.22 se indica un diagrama de un receptor óptico: ⁽²¹⁾

- a.) Indicar su composición y funcionamiento básico.
- b.) Calcular el voltaje de salida (V_0), de tal forma que para un desplazamiento de 300 a $600 \mu m$ se obtenga una variación de voltaje de: 0 a 6 , teniendo en cuenta que $R_f = 1 M\Omega$ y que para un AD620:

$$V_0 = G(RG)(V_+ - V_-) + V_5 \quad \wedge \quad G(RG) = 1 + 49.4 K\Omega / RG$$

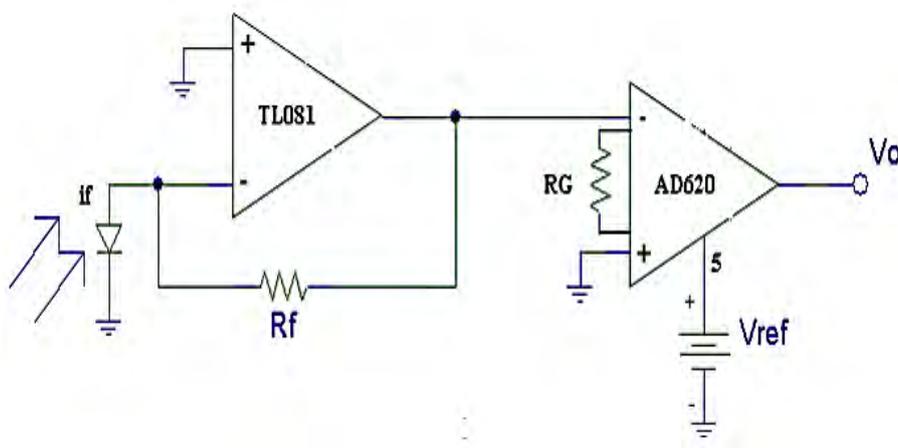


Figura No. 10.22 Receptor óptico
 Fuente: ázquez, C. García, E. *Sensores ópticos* Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Tecnología Electrónica e Instrumentación Electrónica I 2017 p.3

Solución:

a.) Composición y funcionamiento básico:

- *Fotodiodo*: convierte la señal óptica, que recibe de la fibra, en señal eléctrica (corriente fotónica: i_f).
- *Convertidor de corriente a voltaje*: convierte la corriente fotónica generada por el fotodiodo en voltaje. Debido al funcionamiento ideal del amplificador operacional (TL081), la corriente fotónica (i_f) pasa por R_f , generándose un voltaje a la salida del amplificador (V_s) negativo.
- *Amplificador diferencial*: amplifica la señal de voltaje, que recibe del convertidor, elevando su nivel al valor deseado, a través del amplificador operacional AD620.
- *Tensión offset* (V_{ref}): suministra corrientes de offset pequeñas las cuales le permiten al AD620 amplificar con una buena precisión.
- *Control de ganancia*: a través de la resistencia externa R_G , obteniéndose a la salida un rango determinado de valores V_0 .

b.) Voltaje de salida (V_0):

- Por lo expuesto anteriormente, a la salida del amplificador operacional TL081, se tiene:

$$V_s = -R_f \times i_f$$

- Teniendo en cuenta que para un AD620, con el circuito indicado en la figura 4.42:

$$V_0 = G(RG)(V_+ - V_-) + V_{ref} \quad \wedge \quad G(RG) = 1 + 49.4 \text{ K}\Omega / RG$$

Donde:

$$V_+ = 0 \text{ V} \quad \wedge \quad V_- = V_s = R_f \times i_f$$

V_{ref} , RG : se determinan mediante el rango de voltaje de salida deseado.

Al hacer los reemplazos correspondientes:

$$V_0 = (1 + 49.4 \text{ K}\Omega / RG)(0 + R_f \times i_f) + V_{ref}$$

$$V_0 = (1 + 49.4 \text{ K}\Omega / RG)(1 \text{ M}\Omega \times i_f) + V_{ref}$$

Para determinar RG y V_{ref} , se encuentran las corrientes fotónicas para cada uno de los límites del desplazamiento (gap) planteado en el enunciado del ejemplo, de acuerdo a la curva de la figura No. 10.23.

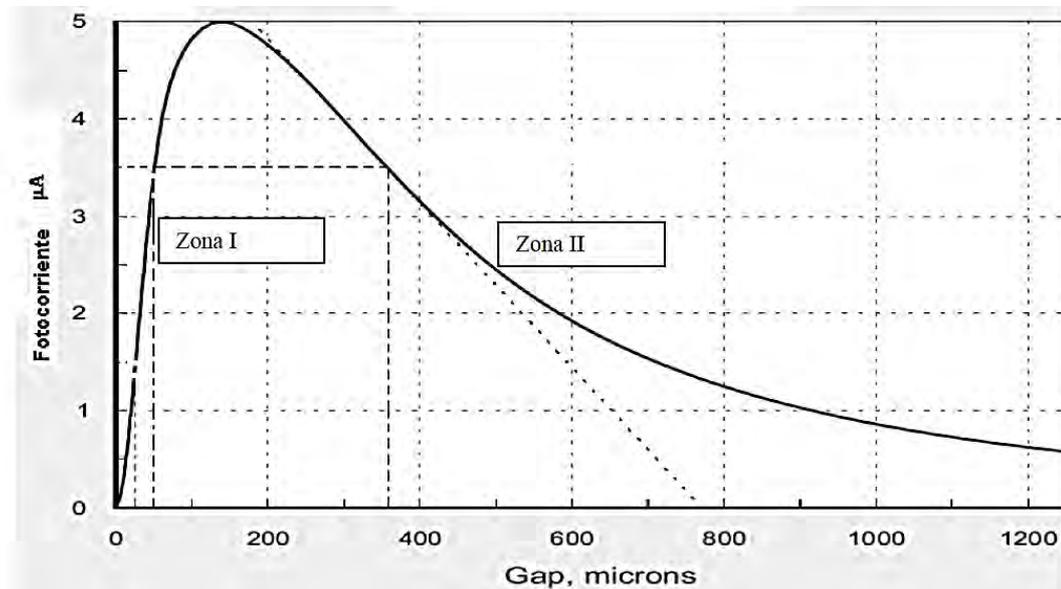


Figura 10.23 Corriente fotónica de acuerdo al desplazamiento.
Fuente: ázquez, C. García, E. *Sensores pticos* Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Tecnología Electrónica e Instrumentación Electrónica I 2017 p.4

Para $300\mu m \Rightarrow if \approx 4 \mu A$ \wedge Para $600 \mu m \Rightarrow if \approx 2 \mu A$

Ahora para cada uno de los dos voltajes que limitan la variación de tensión de salida deseada (0 a 6 V), se establecerán dos ecuaciones lineales con dos incógnitas: RG y V_{ref}

$$1.) \quad 0 = (1 + 49.4 K\Omega / RG)(1M\Omega \times 2\mu A) + V_{ref}$$

$$0 = (1 + 49.4 K\Omega / RG)(2V) + V_{ref}$$

$$2.) \quad 6 = (1 + 49.4 K\Omega / RG)(1M\Omega \times 4\mu A) + V_{ref}$$

$$6 = (1 + 49.4 K\Omega / RG)(4V) + V_{ref}$$

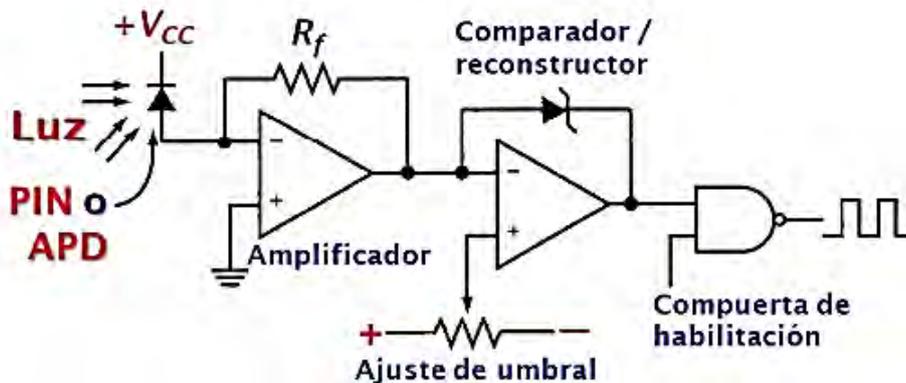
Aplicando sustitución o regla de Cramer, se encuentran los valores de las dos incógnitas:

$$V_{ref} = -6 V \quad \wedge \quad RG = 24.7 K\Omega$$

Lo anterior nos indica que con estos valores calculados y los dados en el enunciado del problema, el receptor óptico, mostrado en la figura 4.29, generará una variación de voltaje de 0 a 6 voltios para un desplazamiento de: 300 a 600 μm .

Ejemplo No. 10.13

En la figura No. 10.24 se ilustra el circuito de un receptor óptico: a.) indicar su composición y b.) describir su funcionamiento.⁽²²⁾



FiguraNo. 10.24 Receptor óptico.

Fuente: Transmisores y Receptores Ópticos. (2019). Disponible:
http://www.coimbraweb.com/documentos/opticas/8.6_led_laser.pdf

Solución:

a.) *Composición*: sus componentes básicos son: un fotodiodo tipo PIN o de tipo APD (*Avalancha foto-iodo*), de un circuito de amplificación y de un circuito comparador reconstructor.

b.) *Funcionamiento*: los pulsos de luz son convertidos en corriente mediante el fotodiodo, los cuales son amplificados y convertidos en pulsos de voltaje a través del comparador reconstructor, y los pulsos de entrada originales son recuperado mediante la compuerta AND.

- Los pulsos de luz que llegan a través de la fibra óptica son convertidos en corriente mediante el fotodiodo PIN o el APD, la cual es incrementada por el amplificador. A la salida de este amplificador se logra un voltaje que corresponde al producto de la corriente que sale del fotodiodo por la resistencia R_f . Lo anterior nos indica que la función de transferencia de este amplificador es de un convertidor de corriente a voltaje.

- El comparador se encarga de formar los pulsos con tiempos muy rápidos de subida y de caída.
- La compuerta de habilitación permite asegurar que los voltajes de los pulsos binarios sean corrector, lográndose la recuperación de los datos digitales originales.

10.5 Repetidores o amplificadores en enlaces ópticos

La distancia que una señal luminosa puede alcanzar al propagarse a través de una *fibra óptica*, antes de requerirse ser retransmitida, depende de la longitud de onda de la señal y del tipo de la fibra. En la tabla No. 10.9 se indica estos alcances (en kilómetros) dependiendo de la longitud de onda de la señal luminosa y del tipo de la fibra.⁽²³⁾

Hay que recordar que las *fibras ópticas* de núcleo de vidrio (PCF) tienen mucho más alcance que las de núcleo de plástico (POF) y de la misma forma ofrece mayor velocidad binaria. Para el caso de las fibras PCF su alcance es del orden de varios kilómetros y su velocidad de los terabits por segundo (Tbps), y actualmente están saliendo al mercado del orden de los petabits por segundo (Pbps). Para el caso de las fibras POF su alcance es reducido (de algunos metros) y su velocidad del orden de los Gbps.

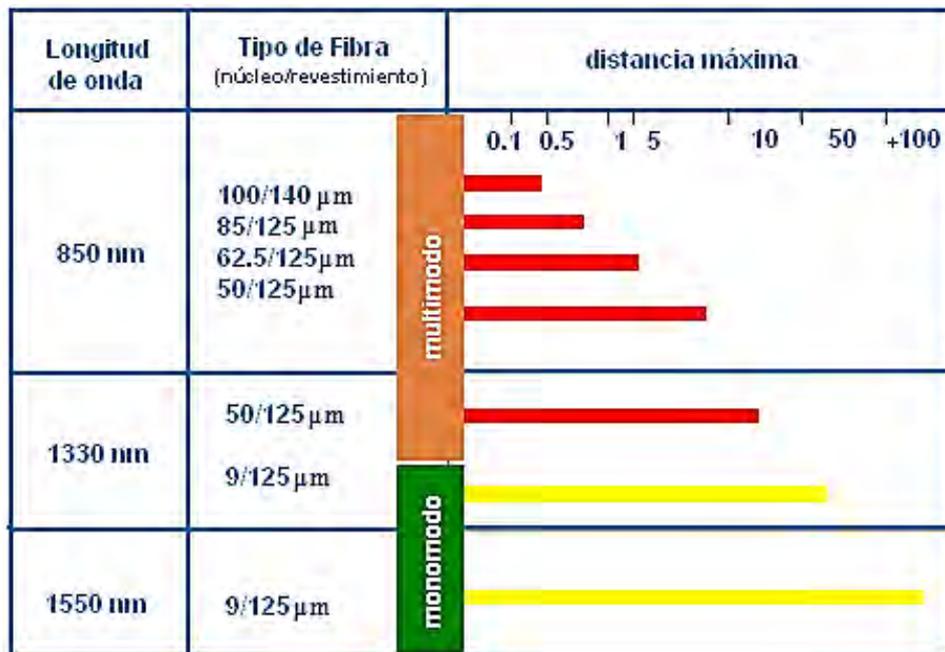


Tabla No. 10.9 Alcances de las fibras ópticas (m) en función de la longitud de onda de la señal luminosa y del tipo de fibra.

Fuente: Alcance de la fibra óptica. (2019). Disponible: fibraoptica.com fibras-
opticas...vs... alcance-de-la-fibra-optica.

Dependiendo de la longitud de onda de las señales luminosas y del tipo de *fibra óptica* que se esté empleando para la propagación correspondiente, estas señales sufren cierto grado de atenuación. Debido a esta situación la señal luminosa pierde intensidad, requiriéndose para determinadas distancias (típicas: 30 a 50 m, para fibras monomodos), regenerar la señal.

10.5.1 Repetidores o amplificadores opto-electrónicos

Los primeros sistemas que se implementaron para tal fin fueron los repetidores o amplificadores opto-electrónicos, los cuales consisten en la combinación secuencial de: detectores ópticos, amplificadores electrónicos y emisores ópticos. La señal luminosa a ser regenerada es convertida a señal eléctrica (a través del detector óptico), esta señal eléctrica es amplificada por el amplificador electrónico y posteriormente la señal eléctrica amplificada es convertida nuevamente en señal luminosa (a través del emisor óptico) y finalmente inyectada al siguiente tramo de la fibra. En la figura No. 10.25 se muestra un diagrama de un enlace óptico con repetidor opto-electrónico.

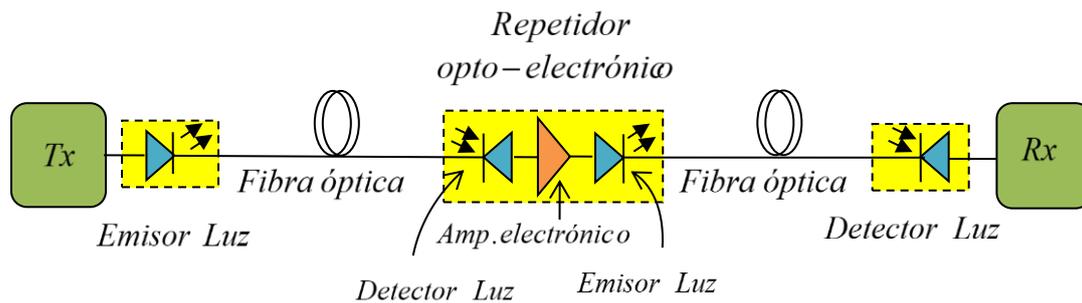


Figura No. 10.25 Enlace óptico con repetidor opto-electrónico.

Existe una gran variedad de repetidores opto-electrónicos en el mercado, en la figura No. 10.26 se muestran algunos de ellos, para el caso de enlaces terrestres, para instalación tanto en fachadas como en poste. Son muy empleados en las redes *TT*, en redes *CATV* y en redes de área local. Así mismo son muy resistentes a la intemperie (anti-U y lluvia). ⁽²⁴⁾



Figura No. 10.26 Algunos tipos de repetidores opto-electrónicos.
Fuente: Repetidores opto-electrónicos. (2019). Disponible: <http://www.cablematic.es> ,
<http://www.dx.com> .

10.5.2 Repetidores o amplificadores ópticos

Los repetidores opto-electrónicos presentan cierta lentitud en su proceso, por lo tanto no pueden realizar su función a la misma velocidad con que los bits les llegan. Así mismo este tipo de repetidor requiere de alimentación para los dispositivos electrónicos que utiliza, lo cual representa inconvenientes en la implementación y mantenimiento de los mismos, especialmente si estos repetidores se emplean en los enlaces de tendido submarino.

Es principalmente por los anteriores motivos que se desarrollaron repetidores o amplificadores totalmente ópticos, los cuales no requieren todo ese largo proceso de convertir la señal óptica en eléctrica, después amplificarla y nuevamente convertirla en señal óptica para que continúe su propagación, ya recuperada su intensidad, a través de la fibra. Ni tampoco requieren de alimentación.

Un repetidor óptico está conformado, esencialmente, de una fibra óptica con un recubrimiento especial denominado *doping*. Esta parte recubierta es bombeada

mediante un haz láser, el cual origina una energía que es almacenada en el recubrimiento *doping*. Cuando llega una señal debilitada, esta energía permite que la señal se potencie, de tal manera que genera una nueva señal con las mismas características espectrales de la original pero con mayor intensidad. Es decir este tipo de repetidor es prácticamente un *amplificador óptico*. En la figura No. 10.27 se muestra un diagrama de un enlace óptico con repetidor óptico.

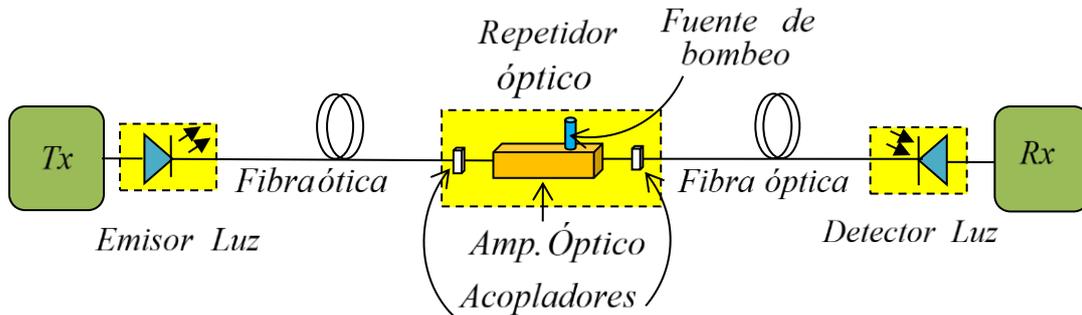


Figura No. 10.27 Enlace óptico con repetidor óptico.

El principio de funcionamiento de un *amplificador o repetidor óptico* es el mismo del proceso de emisión estimulada que se emplea para la generación de un haz láser. En la figura No. 10.28 se ilustra un esquema de la estructura y funcionamiento básico de un *amplificador óptico*.⁽²⁵⁾

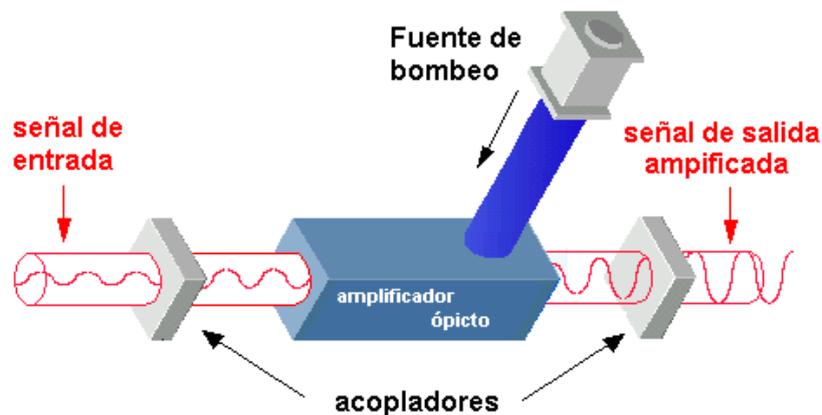


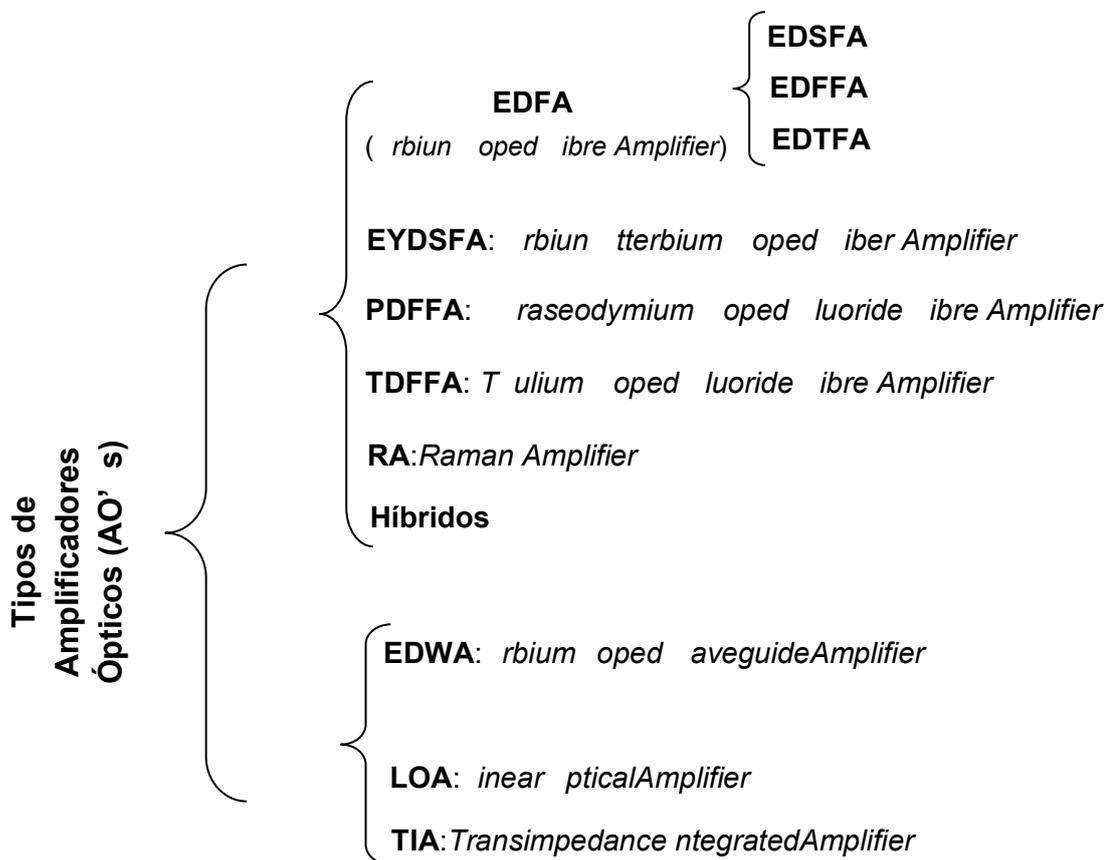
Figura No. 10.28 Estructura y funcionamiento básico de un amplificador óptico.

Fuente: Amplificador óptico. (2019). Disponible:
http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_8_2.htm.

Se podría simplificar la descripción del funcionamiento del *amplificador óptico*: en que una fuente de bombeo inyecta una energía, mediante un láser de onda continua a una longitud de onda ligeramente inferior a la señal a amplificar (típicas: 980 nm o 1.480 nm). Esta energía incide en la trayectoria de la fibra óptica que se encuentra dentro del amplificador, la cual ha sido previamente

dopada. La energía inyectada es absorbida por los electrones de la zona dopada, incrementándose los niveles de energía de estos electrones. Cuando son alcanzados estos electrones por los fotones de la señal óptica que se está transmitiendo, entonces estos fotones caen a unos niveles energéticos más bajos, originando nuevos fotones, lo que equivale a un proceso de emisión estimulada, dando lugar a la amplificación de la señal.

Existen varios tipos de amplificadores ópticos, los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos: los que se basan en *fibras ópticas* OFA (*Optical Fibre Amplifiers*) y los que se fundamentan en *guías de onda ópticas* OGA (*Optical Waveguide Amplifiers*). Cada uno de estos dos grandes grupos lo conforman diferentes amplificadores ópticos dependiendo esencialmente del material que utilizan. A continuación se establece una síntesis de esta clasificación.⁽²⁶⁾



Dos de los amplificadores más usados, sin desconocer la utilización de los otros tipos, son:

- Los DFA s (*Doped Fibre Amplifiers*): tiene un núcleo de fibra óptica dopado con iones de Erbio, Praseodimio, Iterbio o Neodimio (materiales denominados tierras raras).

- Los SOAs (Semiconductor Optical Amplifiers): cuya zona activa está conformada de aleaciones de elementos semiconductores como el fósforo, el indio, el galio y el arsénico.

En la figura No. 10.29 se muestra uno de los diferentes equipos correspondiente a un repetidor óptico, gran variedad que existen en el mercado.



Figura No. 10.29 Imagen de un repetidor óptico.
Fuente: Catálogo "Repetidores ópticos", GT-Tech, 2018.

Para el caso de repetidores a ser utilizados en un tendido de fibra óptica submarino, por cuestiones lógicas de protección de la humedad, de las presiones y demás efectos que se generan en el suelo marítimo, se encuentran herméticamente cubiertos por diferentes capas que los salvaguardan. En la figura No. 10.30 se ilustran una imagen donde se puede apreciar el aspecto exterior como se aprecian estos tipos de repetidores para tendidos submarinos.



Figura No. 10.30 Aspecto exterior de un repetidor para tendido submarino.

Fuente: http://www.eldiario.es/turing-vigilancia-y-privacidad/BELLA-conectara-Latinoamerica-Europa-Unidos_0_398610529.html. Consultado en junio 2018.

10.6 Las tarjetas de red óptica

Estas tarjetas o adaptadores de red, además de permitir la interfaz de conexión del cable óptico con el equipo terminal (computador), para el caso de que estén como receptoras, son las encargadas de convertir los impulsos de luz que le entrega la *fibra óptica*, en señales binarias eléctricas para que las pueda interpretar el PC, y cuando están como transmisoras, son las encargadas en convertir los pulsos binarios eléctricos que le entrega el PC, en pulsos luminosos para que se puedan enviar a través de la *fibra óptica*. ⁽²⁷⁾

En términos generales, estas tarjetas les corresponden enviar y recibir datos a través de la *fibra óptica* en las redes de transmisión de datos (LAN, WAN y demás redes de computadores). Las tarjetas de red óptica se insertan dentro de las ranuras de expansión o *slots* que se encuentran en la tarjeta principal (*Motherboard*), atornillándolas al gabinete del equipo de tal forma que no permitan vibración alguna.

Cada una de las tarjetas conforma un puerto para la correspondiente conexión de los cables de *fibra óptica*. En la figura No. 10.31 se muestra, en la parte superior izquierda, un adaptador de red con interfaz PCI-e para cable UTP con doble puerto Ethernet y en la parte superior derecha, uno para redes inalámbricas con bus PCI, y así mismo, en la parte inferior izquierda, un interfaz PCMCIA para el caso de portátiles y en la parte inferior derecha, un interfaz USB.



Figura No. 10.31 Imágenes de tarjetas e interfaces de redes ópticas

Fuente: Tarjeta de red óptica. (2019). Disponible:

[http: .informaticamoderna.com Tarjetas ópticas.htm](http://.informaticamoderna.com/Tarjetas_opticas.htm) Instalación Física de una Red
[http: assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo_8448180828.pdf](http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo_8448180828.pdf)

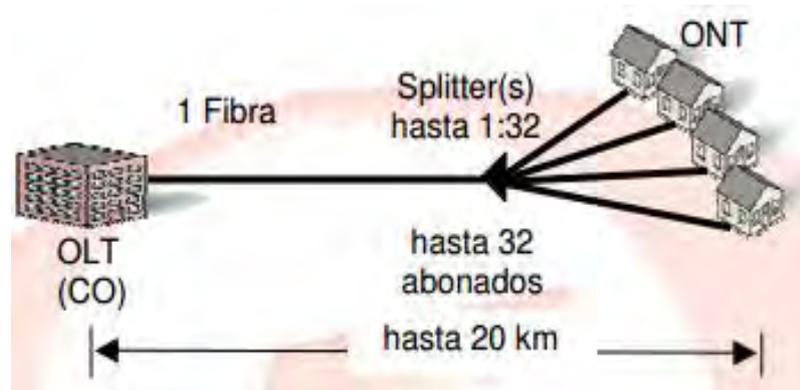
Los adaptadores de red o tarjetas de red o NIC (Net or Interface Card), pueden venir o no incorporados con la plataforma hardware básica del sistema. También un equipo puede disponer de dos o más adaptadores de red, lo cual le permite atender distintas redes y establecer diferentes configuraciones. (23)

La información que le llega a los adaptadores de red del equipo (host), es transferida, en forma paralela, a los distintos componentes del mismo (CPU, memoria, periféricos), mediante un bus interno. Estos componentes se acoplan al bus a través de conectores denominados slots de conexión, los cuales deben tener unas especificaciones que sean coherentes con las especificaciones de la interfaz de la tarjeta de red.

Para equipos servidores las interfaces que generalmente se emplean son PCI, mientras para los equipos y los de sobre mesa son PCI o USB y para portátiles PCMCIA y USB.

10.7 Divisores ópticos

Los divisores ópticos o Splitters son dispositivos pasivos que se emplean en las redes ópticas, para dividir las señales ópticas que viajan a través de una fibra óptica en varias salidas. En la actualidad existe Splitters de 2, 4, 8, 16, 32, 64 o 128 salidas. Estos dispositivos son muy utilizados en las redes ópticas: de transmisión de datos (LAN, WAN), de televisión por cable (CATV), redes híbridas HFC (fibra-coaxial), de fibra hasta cualquier parte (FTTx), entre otras. En la figura No. 10.32 se muestra, en la parte superior, un esquema de una red con divisor óptico el cual tiene un puerto de entrada y 32 posibles puertos de salida, donde OLT (Optical Line Termination) corresponde a la sala de equipos o (CO: Central Office) y ONT (Optical Network Terminal) a los terminales de la red óptica (suscriptores), y en la parte inferior a una típica estructura de una red solamente pasiva PON (Passive Optical Network).⁽²⁸⁾



a.) Red con divisor óptico 1:32



b.) Estructura típica de una red PON

Figura No.10.32 Red con divisor óptico hasta 1:32 y estructura típica de una red PON

Fuente: Red POP. (2019). Disponible:
http://portal.furua.com.br/arquivos/guia/guia_1583_GuAideaplicacionFTTx.PDF.

En la figura No. 10.33 se ilustran dos imágenes correspondientes a salas de equipos OLT (*Optical Line Termination*).



Figura No. 10.33 Imágenes de salas de equipos OLT (*Optical Line Termination*).

Fuente: Equipos OLT. (2019). Disponible:
http://fibremex.com/fibraoptica/index.php/modulo_contenido_id_3_titulo_3_pagina_128.

Existen diferentes tipos de divisores ópticos, de acuerdo a su tecnología, entre los cuales se pueden resaltar los siguientes:⁽²⁹⁾

10.7.1 Divisores ópticos FBT

Los divisores ópticos con tecnología FBT(*used Biconical Taper*), están conformados por la unión entre dos fibras independientes, donde los revestimientos de las fibras son fundidas en una pequeña región de tal manera que se origina una transferencia de energía por acoplamiento. Generalmente los

divisores FBT cuentan con un número de salidas bajo (normalmente máximo 8 salidas) En la figura No. 10.34 se ilustra la configuración de este tipo de divisor óptico, para el caso de dos y cuatro salidas, e imágenes de dos divisores (*splitters*) ópticos

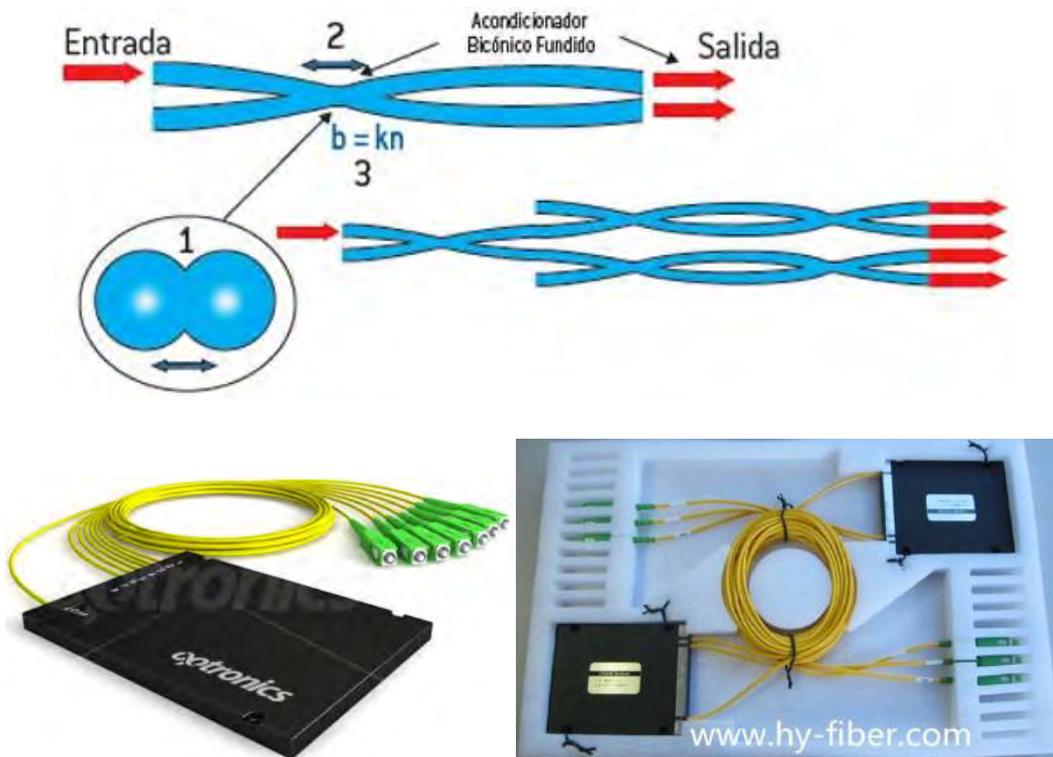


Figura No.10.34 Configuración: fibra acondicionador bicónico fundido FBT e imágenes de dos *splitters* ópticos.

Fuente: Fiber-OpticSplitter. (2019). Disponible:

http: .instaladoresdetelecomhoy.com divisores-splitters-para-fftth . <http://spanish.fiber-opticsplitter.com> .

10.7.2 Divisores ópticos PLC

Los divisores ópticos con tecnología FBT (*used Biconical Taper*), están conformados por la unión entre dos fibras independientes, donde los revestimientos de las fibras son fundidas en una pequeña región de tal manera que se origina una transferencia de energía por acoplamiento. Estos divisores ofrecen alta fiabilidad, así como una baja pérdida de inserción, mínima sensibilidad a la polarización y una muy buena uniformidad, lo cual brindan una muy buena acogida en la utilización de los enlaces ópticos.

Generalmente los divisores PLC cuentan con un número de salidas alto (normalmente mínimo 8 salidas). La recomendación G.984.6 de la ITU-T permite relaciones de división de hasta 64. En la figura No. 10.35 se muestra en la parte

superior la estructura de un divisor óptico PLC y en la parte inferior dos fibras ópticas: una con un divisor 1x8 y la otra con un divisor 1x32.

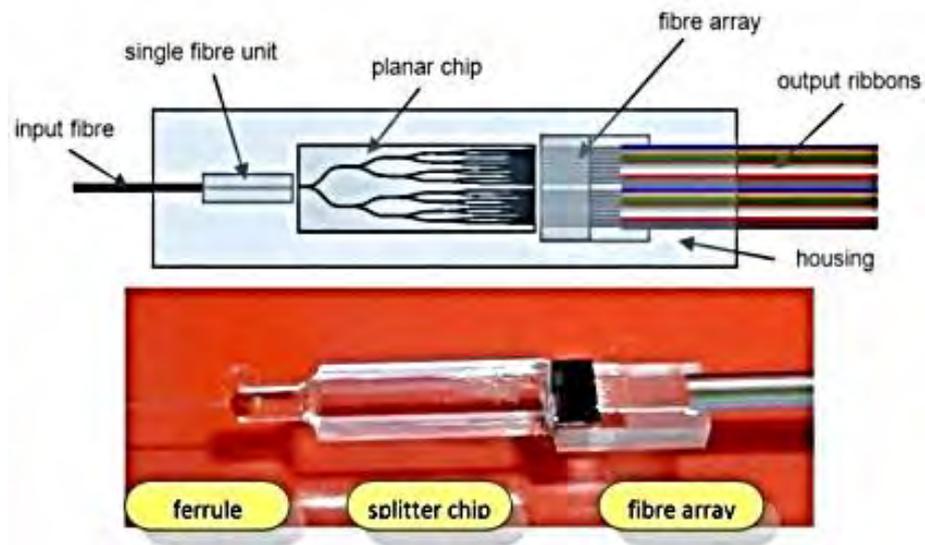


Figura No. 10.35 Estructura de un divisor óptico PLC y dos fibras ópticas una con divisor PLC 1x8 y la otra con divisor PLC 1x32.

Fuente: *fibra óptica en el hogar - TT*, Council Latam. 2017 Divisores ópticos (2019).
 Disponible: http://www.sen.o.com.es/PLC_20Splitter_Spanish.pdf.

Los divisores ópticos PLC, son más compactos, generan menos pérdidas de inserción y ofrecen un espectro óptico más ancho que los FBT. Las pérdidas, teóricas, que generan los divisores ópticos PLC son de 3 dB por cada grupo de salidas en potencial binario. Sin embargo los valores reales son un poco mayor dependiendo del fabricante (ver tabla No. 10.10).

Número de puertos	1x2	1x4	1x8	1x16	1x32	1x64
Pérdidas por inserción (dB)	3.8	7.4	10.7	13.7	16.9	19.8
Uniformidad (dB)	0.4	0.6	0.8	1.2	1.5	2.5

Tabla No. 10.10 Pérdidas divisores ópticos PLC

Fuente: arren, T., *Consideraciones de manejo de fibra para componentes ópticos*, Clearfield, 2017.

10.8 Multiplexación / Demultiplexación óptica

La multiplexación óptica se fundamenta en la tecnología de la multiplexación por división de longitud de onda DM (*avelength division Multiplexing*), en la cual varias señales ópticas, de diferente longitud de onda, semultiplexan sobre una única fibra óptica, donde cada una de estas señales son generadas por un haz láser cada una de ellas, lográndose de esta forma reducir la cantidad de fibras en los enlaces ópticos. Lo anterior es posible debido al gran ancho de banda que tiene la fibra óptica. ⁽³⁰⁾

Cada señal óptica multiplexada corresponde a un canal óptico, que podrá ser tratado independientemente del resto de canales que comparten la fibra óptica y contener diferente tipo de tráfico. Con esta técnica les permite a los operadores de las telecomunicaciones, que utilicen redes ópticas, incrementar sus capacidades de transmisión sin necesidad de disponer de más cable óptico.

La demultiplexación óptica es el proceso contrario al de la multiplexación. Las diferentes señales ópticas, cada una con una longitud de onda específica, que se transmiten por una misma fibra óptica, se separan una de las otras, remitiéndolas cada una de ellas por diferentes fibras ópticas. En la figura No. 10.36 se hace una representación esquemática de los conceptos de estos procesos.

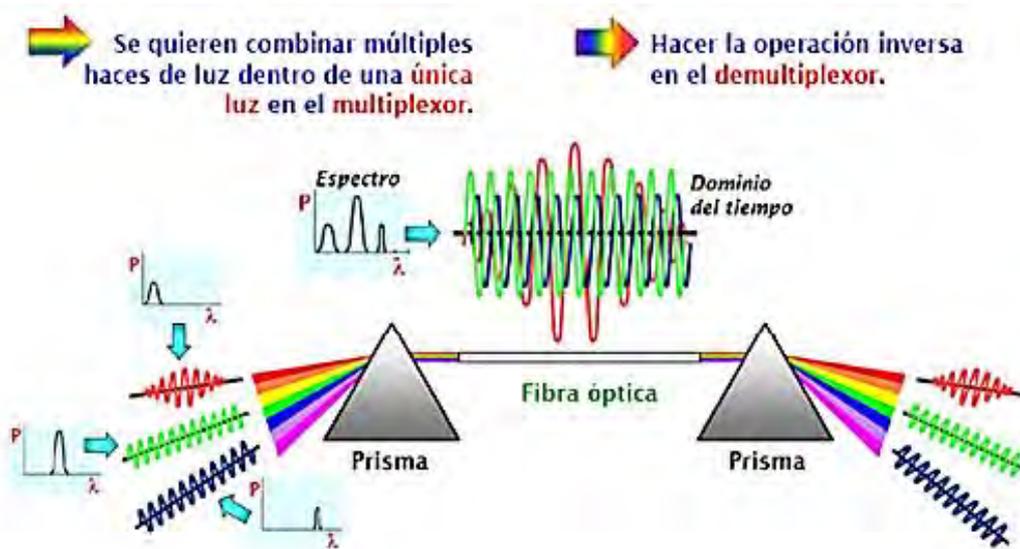


Figura No. 10.36 Concepto básico de la multiplexación demultiplexación óptica.

Fuente: Mux Demux óptico. (2019). Disponible:
<http://.monografias.com/trabajos103/tecnologia-dm/tecnologia-dm.shtml>.

El dispositivo que asocia las señales ópticas se le denomina multiplexor y al que las separa demultiplexor. También existe dispositivos que realizan ambos procesos, denominándose Mux Demux, teniendo de presente que en el enlace, para el caso de comunicación full dúplex, este dispositivo debe contar con dos fibras al lado del enlace: una por donde se transportan las señales ópticas multiplexadas a transmitir y la otra las señales ópticas recibidas a desmultiplexar. Lo anterior se debe, como se mencionó anteriormente, a que las fibras ópticas solo permiten transmitir en un solo sentido cada vez.

La utilización de la tecnología DM demanda cada día mayor interés, dentro de la estructura de las redes ópticas, debido al crecimiento permanente tanto en capacidades de transmisión como en la ampliación del cubrimiento de estas redes. En la figura No. 10.37 se muestra un diagrama, donde se relaciona las principales etapas del proceso de la multiplexación y demultiplexación óptica aplicando la tecnología DM.

Las señales monocromáticas de diferentes λ ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$), son generadas por láseres y conducidas por n fibras hasta el **multiplexor**.

El **multiplexor** combina las señales que le llegan en una **señal policromática** que se envía a una sola fibra para su transmisión.

El **demultiplexor** separa las diferentes λ de la señal policromática para su correspondiente procesamiento.

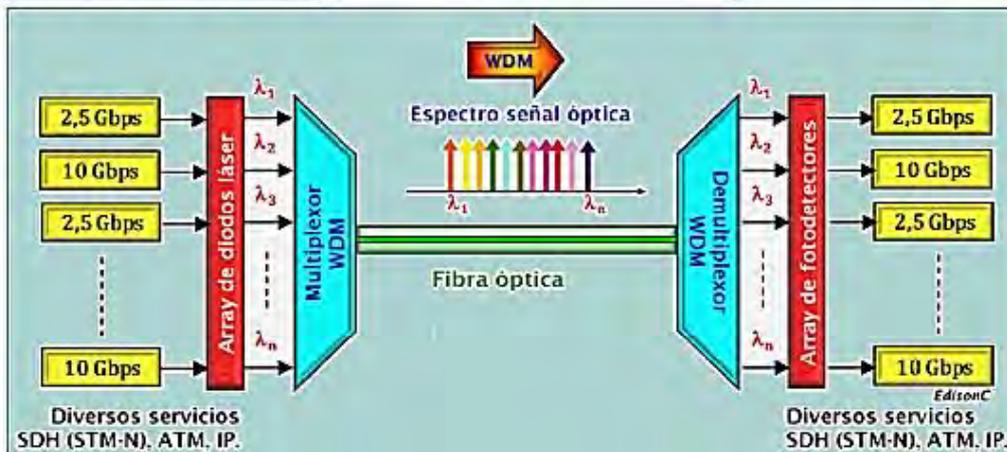


Figura No. 10.37 Diagrama de la multiplexación y demultiplexación óptica aplicando DM.

Fuente: DM. (2019). Disponible: <http://www.monografias.com/trabajos103/tecnologia-dm/tecnologia-dm.shtml>.

Complementando la información de los procesos de Mux y Demux óptica, indicados en los diagramas de las figuras inmediatamente anteriores, en la parte superior de la figura No. 10.38 se indican los principales elementos que conforman un terminal de transmisión DM y en la parte inferior los de un terminal de recepción DM.

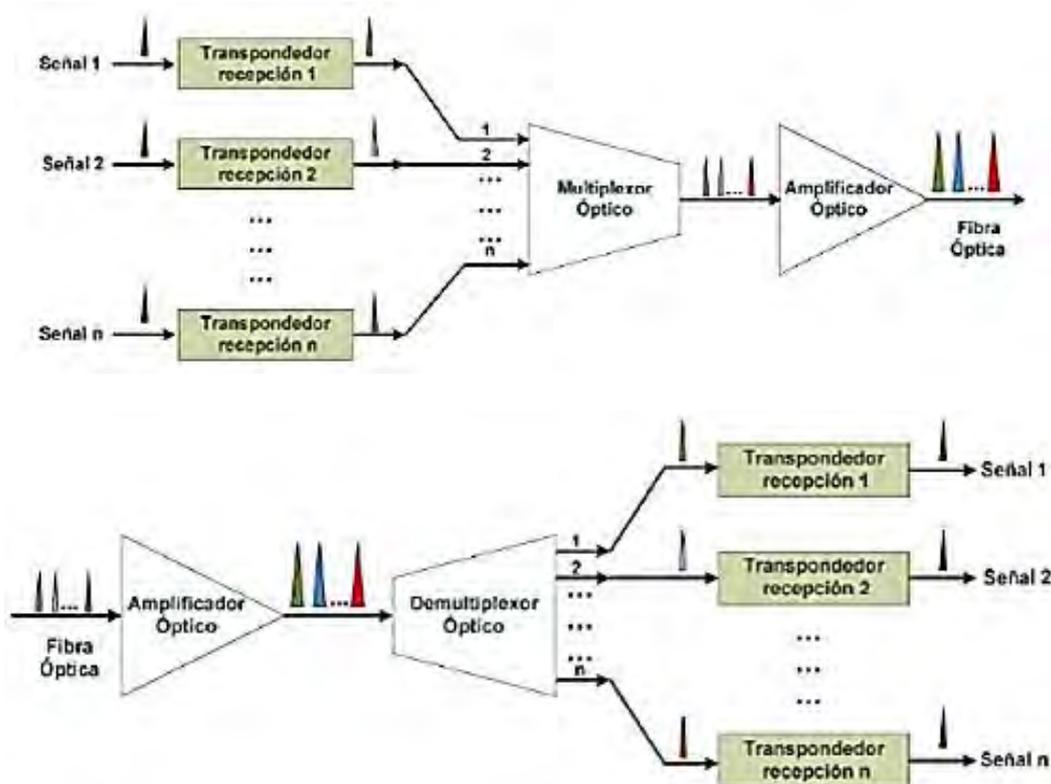


Figura No. 10.38 Elementos principales de los terminales de transmisión y recepción DM.

Fuente: Transmisión y Recepción DM. (2019). Disponible:
<http://fundamentostelecomunicacion.blogspot.com.co/2018/11/dm-multiplexacion-por-division-de.html>.

La DM es una técnica de multiplexación muy semejante a la multiplexación por división de frecuencias FDM (*frequency division Multiplexing*). Hay que tener presente que cada canal óptico no solo utiliza una única longitud de onda, cada uno de ellos ocupa un determinado ancho de banda alrededor de la longitud de onda, dependiendo del grado de dispersión del haz óptico. Dependiendo de la cantidad de longitudes de onda que maneje DM y a las distancias que cubra, esta tecnología se divide en dos tipos: C DM y D DM.

10.8.1 CWDM

La multiplexación por división en longitudes de ondas ligeras C DM (*Coarse wavelength division Multiplexing*), se caracteriza por facilitar pocas longitudes de onda (ocho o menos longitudes de onda activas por fibra) y su alcance es relativamente reducido (máximo regiones metropolitanas). Utiliza un espectro de frecuencia amplio y separa las longitudes de onda unas de otras. El C DM fue estandarizado por la ITU-T, en la recomendación G.694.2 en el año 2002.

Una de las particularidades esenciales de C DM es que existe mayor espaciado entre canales ópticos, permitiéndole utilizar como fuente luminosa láseres con mayor ancho espectral, y por lo tanto la exigencia de no dispersión de su haz luminoso no sea tan crítica, lo que hace que los láseres demandados por C DM sean mucho menos costosos que los de D DM, que si exigen que el haz luminoso de los láseres tengan un mínimo grado de dispersión.

En la figura No. 10.39 se ilustra las agrupaciones de longitud de onda (canales ópticos) por bandas con los respectivos valores de atenuación de acuerdo a la recomendación ITU-T G.694.2, para el caso de C DM.⁽³¹⁾

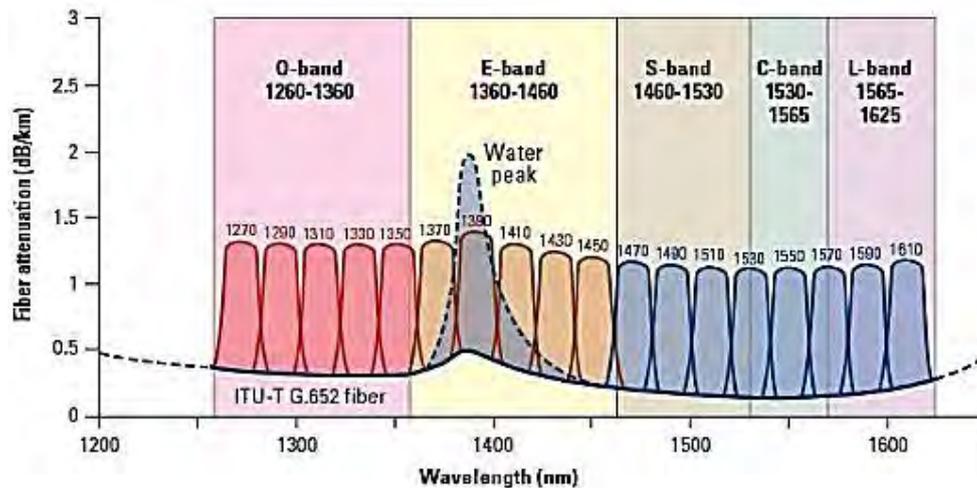


Figura No. 10.39 Espectro de longitud de onda por bandas de acuerdo a la recomendación ITU-T G.694.2, para el caso de C DM.

Fuente: Recomendación ITU-T G.694.2. (2019). Disponible: [www.asga.com.br ... 003 20-20Mux 20Demux 20-20Espanhol.p..](http://www.itu.int/ITU-T/asn/asga.com.br...003_20-20Mux_20Demux_20-20Espanhol.p..)

Entre las particularidades que tiene la tecnología C DM, se pueden resaltar las siguientes: ⁽²⁸⁾

- Especificada por longitudes de onda.
- Alcance reducido (máximo 80 m).
- Emplea frecuencias de amplio espectro.
- Las longitudes de onda se dispersan.
- Posibilidades de desviación de longitudes de onda.
- Espaciamiento amplio entre canales ópticos (2.500 GHz 20 nm) .
- La señal óptica no está amplificada.
- Velocidad de transferencia máximo por canal: 2.5 Gbps.

Una de las bondades que se le anotan a C DMes que es muy sencillo en cuanto a diseño de red, implementación, y operación, así mismo que trabaja con pocos parámetros que necesiten la optimización por parte del usuario, mientras que los sistemas D DM requieren de complejos cálculos de balance de potencias por canal.

En la figura No. 10.40 se representa un sistema de canal único de fibra basado en C DMMU . Como se aprecia en este diagrama se transmiten 4 diferentes comunicaciones utilizando una sola fibra óptica en vez de un par de fibras, en el canal de enlace. Cada una de las correspondientes señales ópticas emplea una longitud de onda diferente, tanto en un sentido de la transmisión como en el otro.

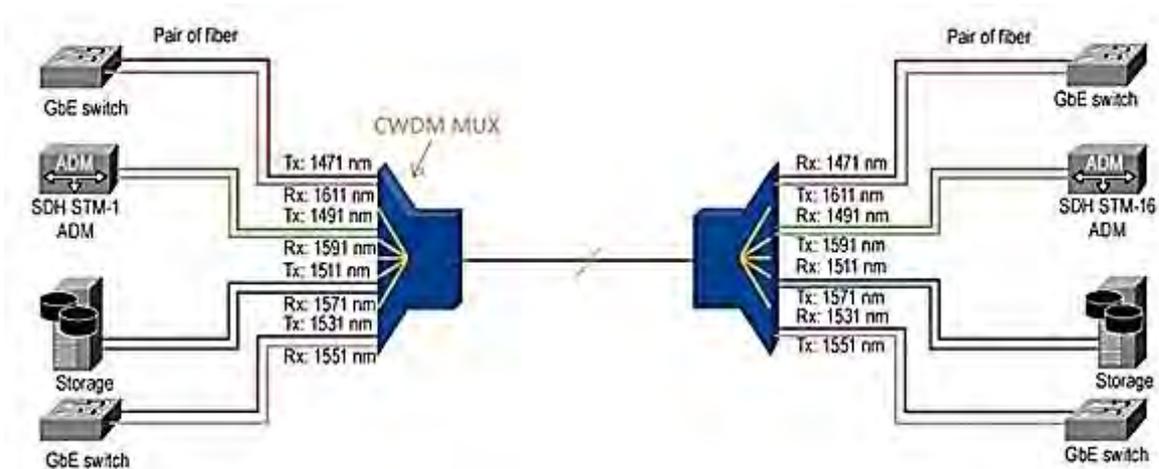


Figura No. 10.40 Sistema de canal único de fibra basado en CWDM

Fuente: CWDM vs. DWDM. (2019). Disponible: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/CWDM-vs-DWDM.html>

10.8.2 DWDM

La multiplexación por división en longitudes de ondas densas DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), la cual usa la banda C (1.550 nm). En DWDM, para lograr reducir la dispersión cromática de cada canal, se utiliza láser de mayor calidad y fibras de baja dispersión. Otra alternativa para lograr esta reducción es mediante el empleo de módulos de compensación de la dispersión DCM (Dispersion Compensation Modules). Debido a lo anterior, se puede reducir el espacio entre los canales ópticos, lográndose de esta forma incrementar la capacidad de multiplexación.

En la figura No 10.41 se representa un sistema de demultiplexación por división en longitudes de ondas densas DWDM. Actualmente estos sistemas permiten multiplexar 40, 80 o 160 canales ópticos separados entre sí 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz respectivamente.

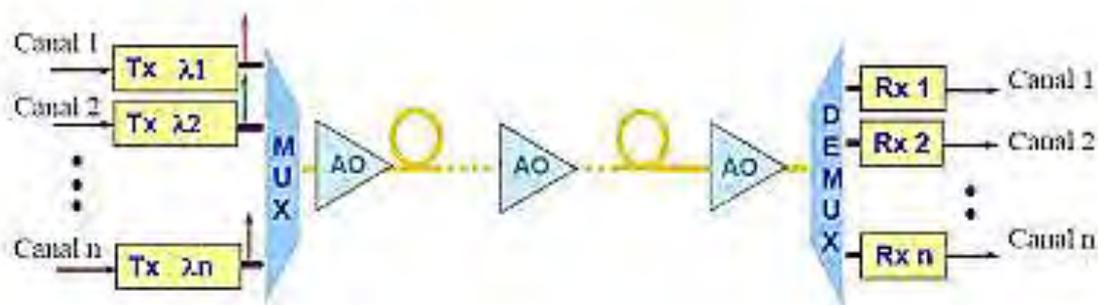


Figura No.10.41 Sistema de multiplexación por división en longitudes de ondas densas DWDM.

Fuente: Rao, S. Benjoo, S.J. Muthuraj, B. Dixit, S., *All optical access networking for metropolitan area networks: opportunities and challenges*, IEEE Commun. Mag., 2015, p.40

En la figura No. 10.42 se muestra, en la parte superior, la agrupación de los canales ópticos (longitudes de onda) para el caso de DWDM y en la parte inferior para el caso de CWDM.

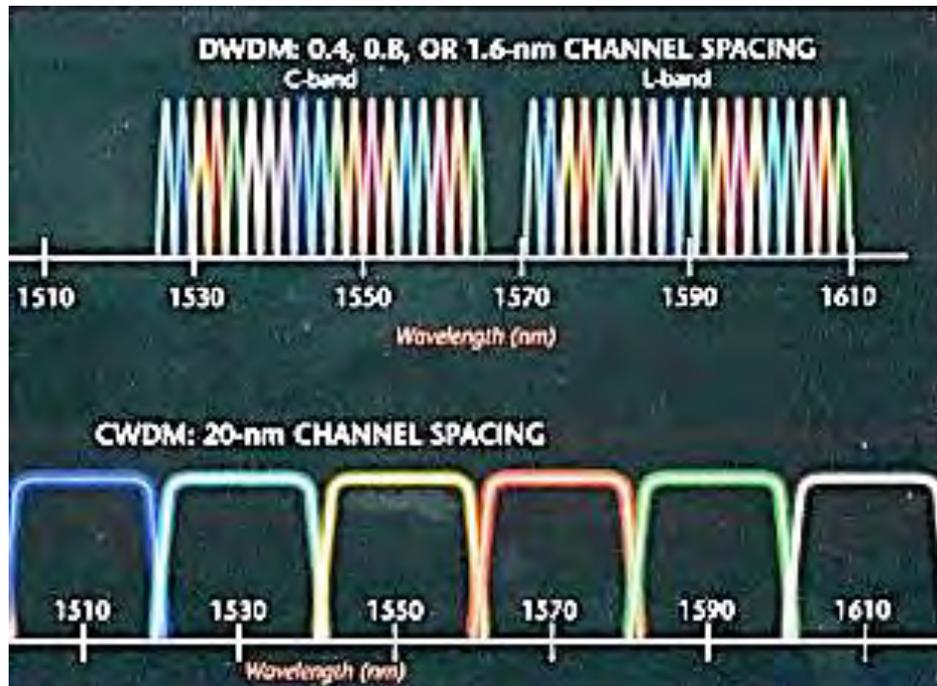


Figura No. 10.42 Espectros de longitud de onda para DWDM y CWDM

Fuente: DWDM vs CWDM. (2019). Disponible: <https://www.spaces.com/dwdm-vs-cwdm/>

Como se puede observar de la figura inmediatamente anterior, existe menor espaciado de longitudes de onda entre canales ópticos en DWDM que en el caso de CWDM, lo que permite que DWDM ofrezca mayor nivel de multiplexación (mayor número de canales ópticos por fibra). Lo anterior implica que DWDM requerirá de haces de láseres más concentrados y estables, lo que demanda mayores costos.

Entre las particularidades que tiene la tecnología DWDM, se pueden resaltar las siguientes: ⁽³²⁾

- Especificada por frecuencias.
- Alcance de distancias grandes.
- Emplea frecuencias de angosto espectro.
- Las longitudes de onda compactas.

- Espaciamiento angosto entre canales ópticos (100 GHz 0,8 nm, 41canales) o (50 GHz 0,4 nm, 82 canales).
- Exigen láseres de alta precisión.
- La señal óptica puede ser amplificada.
- Velocidad de transferencia por canal: 10 a 40 Gbps.

En cuanto a los principales fabricantes y suministradores de sistemas DWDM tenemos a: Alcatel, Ciena, Cisco, Ericsson, Huawei, Lucent, Marconi y Nortel Networks. En la figura No. 10.43 se exponen algunos de los principales equipos empleados por DWDM.



a.) Gabinete-distribución



b.) Plataforma



c.) Diodos láser 760 - 3000 nm

Figura No. 10.43 Principales equipos empleados por DWDM.

Fuente: C DM D DM. (2019). Disponible:
<https://sx-de-tx.wikispaces.com/DWDM+y+CWDM>.

Comparativamente la D DM emplea dispositivos ópticos más complejos y por lo tanto más caros que la C DM, pero permiten mayores distancias de transmisión. La apreciación que existe es que la C DM es más competitiva para enlaces de cortas distancias, mientras que la D DM lo es para los de distancias grandes. En la figura No. 10.44 se exponen unas imágenes donde se encuentran unos ejemplos de equipos Mux Demux ópticos.



Figura No. 10.44 Equipos Mux Demux ópticos.

Fuente: Mux Demux ópticos. (2019). Disponible:
<http://.instaladoresdetelecomhoy.com/divisores-splitters-para-ftth> .
[.asga.com.br ... 003 20- 20Mux 20Demux 20- 20Espanhol.p](http://.asga.com.br...003-20-20Mux-20Demux-20-Espanhol.p).

En la figura No. 10.45 se ilustra el sistema D DM correspondiente a los componentes esenciales tanto del transmisor como del receptor. Usualmente estos sistemas están conformados principales por:

- MU y DEMU .

- Aisladores.
- Circulares.
- Amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA: *rbium oped iber Amplifier*).
- Unidad de banda ancha DM.

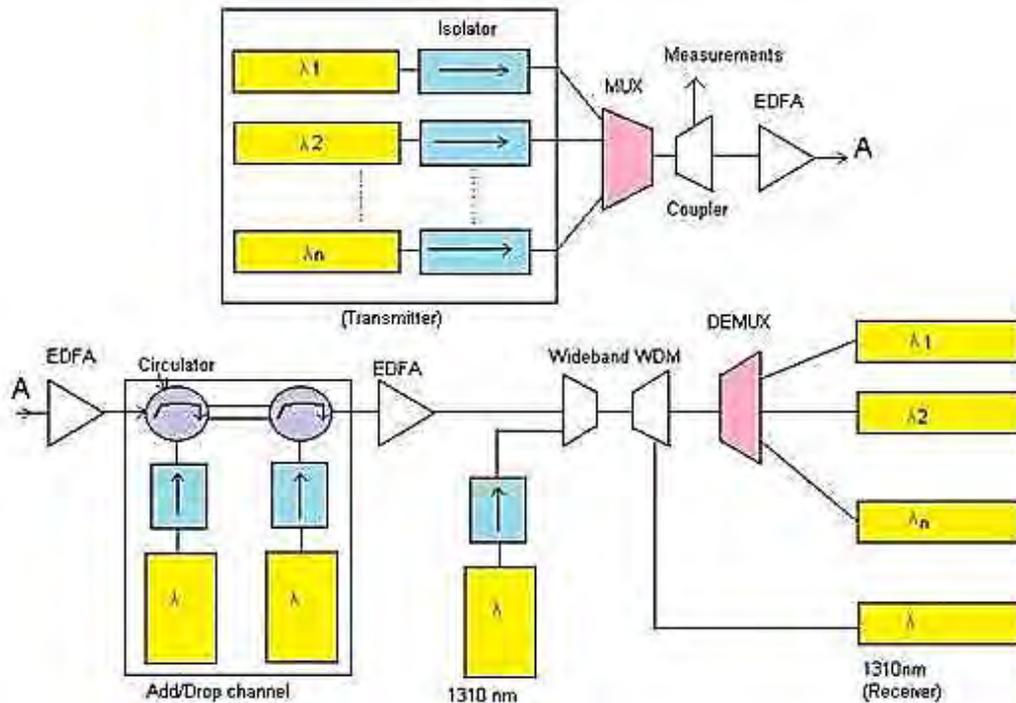


Figura No. 10.45 Estructura básica de un sistema DWDM.

Fuente: DWDMSystem. (2019).

Disponible: <http://ldc.usb.ve/figueira/Cursos/redes2/E-POSICIONES-DWDM/material/dwdm9.htm>

10.8.3 Diferencias entre CWDM y DWDM

En la tabla No. 10.11 se relacionan las principales diferencias existentes entre CWDM y DWDM. Fácilmente se puede observar que el sistema DWDM ofrece mejores especificaciones técnicas de funcionamiento que el sistema CWDM.

Especificaciones / Características	CWDM	DWDM
Estructura	Sistema WDM con menos de 8 longitudes	Sistema WDM con más de 8 longitudes de onda activas por fibra óptica

	de onda activas por fibra óptica	
Definición	Definida por longitudes de onda	Definida por frecuencias
Capacidad	Más baja	Más alta
Costo	Bajo	Alto
Alcance	Comunicación de corto alcance (menores de 80 km)	Comunicación de largo alcance (mayores de 100 km)
Ancho de banda	Ancho de banda amplio	Ancho de banda estrecho
Longitudes de onda	Longitudes de onda más grandes	Longitudes de onda más pequeñas, por lo tanto puede empaquetar más de 40 canales en comparación con CWDM en el mismo rango de frecuencia
Amplificación	La señal óptica no está amplificada	Se puede utilizar señal óptica amplificada
Multiplexación Espectral	Divide el espectro en grandes trozos	Divide el espectro en pequeñas partes.
Desviación	Es posible la desviación de longitudes de onda	Se requieren láseres de precisión para mantener los canales dentro del objetivo

Tabla No. 10.11 Principales diferencias entre C-DM y D-DM

Fuente: C-DM vs D-DM Difference between C-DM and D-DM. (2019). Disponible: <http://www.fireless-world.com/Terminology/C-DM-vs-D-DM.html>

En la figura No. 10.46 se muestra una imagen donde se especifica nuevamente la diferencia existente entre el espectro ocupado por estos dos sistemas de multiplexación óptica. Como se puede apreciar, el espectro D-DM tiene un espaciado de longitud de onda más estrecha entre los canales en comparación con la del espectro C-DM.

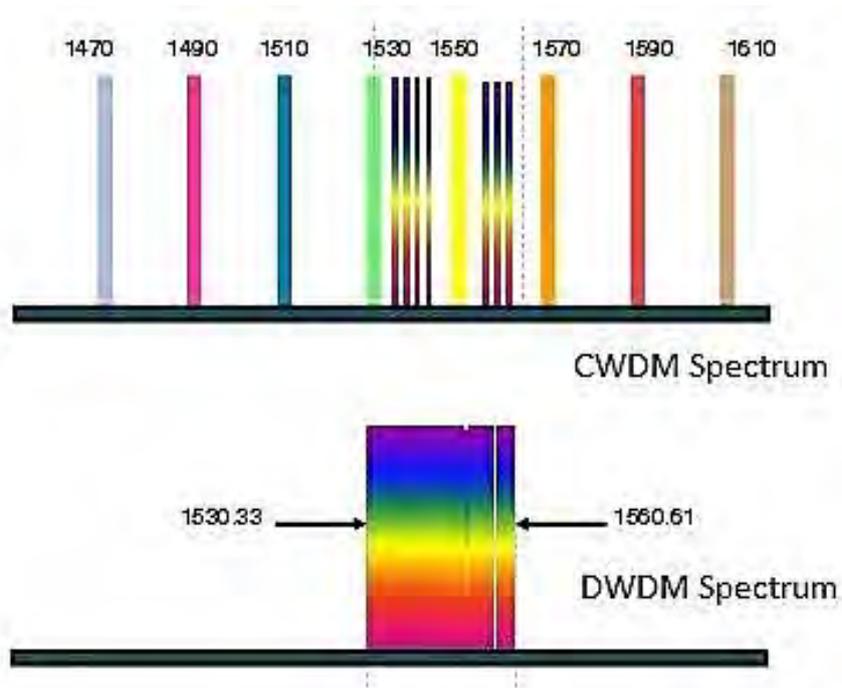


Figura No. 10.46 Espaciado de longitud de onda entre los canales para CWDM y DWDM.

Fuente: CWDM vs DWDM Difference between CWDM and DWDM. (2019). Disponible: <http://www.fiberless-world.com/Terminology/CWDM-vs-DWDM.html>

10.9 Conmutadores ópticos

La conmutación óptica es el proceso que realiza el encaminamiento de las señales óptica (canales ópticos). El formato y la longitud de onda de las señales que llegan al conmutador, son cambiados mediante las interfaces de entrada del conmutador (LA_x , LB_x), para que a través de prismas sean dirigidas a una salida determinada. Las interfaces de salida (OL_1 , OL_2) correspondientes, adecuan nuevamente las señales a su formato y longitud de onda original. El dispositivo de control (dispositivo electrónico), es el que se encarga de configurar el funcionamiento del conmutador respectivo. En la figura No. 10.47 se hace una representación del funcionamiento del proceso de conmutación óptica, tanto para salida directa como para salida cruzada. ⁽³³⁾

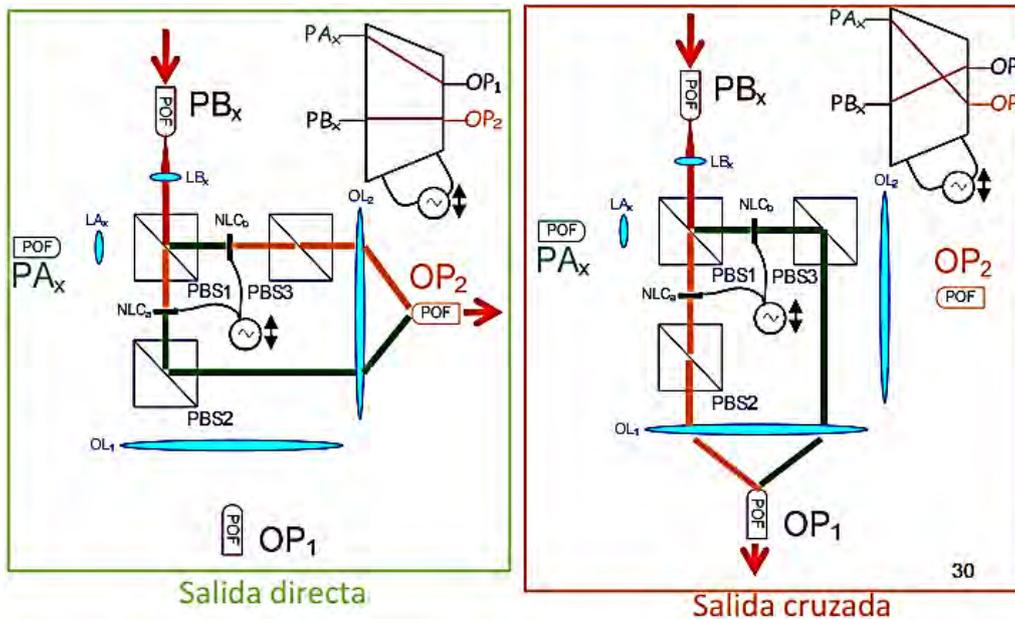


Figura No. 10.47 Proceso de conmutación óptica: salida directa y salida cruzada. Fuente: ao, S. Ben oo, S.J. Mu herjee, B. .Dixit, S., *All ptical ac et s itc ing for metropolitan area net or s: oportunities and c allenges,* IEEE Commun. Mag., 2016, p.39.

Una unidad de conmutación óptica O C (*optical Cross Connect*), dirigen una señal óptica desde cualquiera de sus entradas hacia una de sus salidas, según el puerto de entrada y la longitud de onda de la señal. A este tipo de conmutación se le denomina conmutación espacial. En la figura No. 10.48 se ilustra un esquema de una unidad de conmutación óptica de tipo espacial. ⁽³⁴⁾

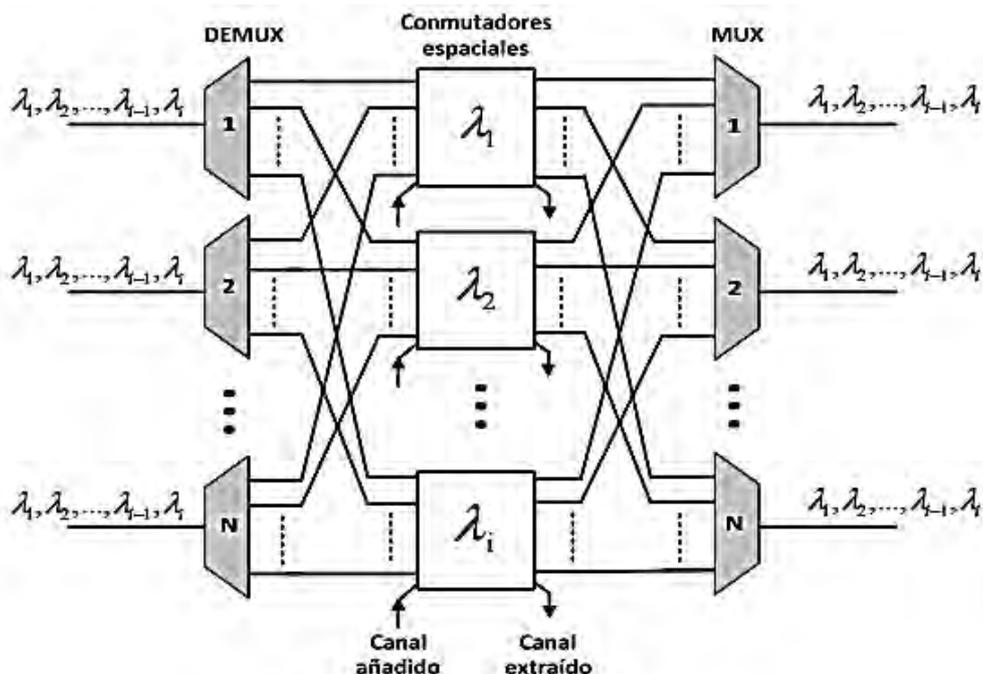


Figura No. 10.48 Unidad de conmutación óptica espacial.

Fuente: Sáez García, C. Sánchez Montero, D., "Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos", Departamento Tecnológico - Universidad Carlos III Madrid, 2016, p.32.

Una unidad de conmutación dispone de N puertos de entrada (N Demux ópticos). A cada uno de estos puertos le llega un mismo conjunto de m señales multiplexadas (DM), cada una de ellas con su correspondiente longitud de onda. Cada unidad de conmutación está conformada por m conmutadores ópticos espaciales (2×2), configurados de tal manera que cualquiera de las m señales de entrada, en cada uno de los m conmutadores, disponga del enrutamiento deseable, saliendo hacia el multiplexor correspondiente. Por lo tanto también deberá existir N Mux ópticos a la salida de la unidad de conmutación, los cuales cada uno de ellos podría recibir m señales, y permitir así mismo la multiplexación (DM) de m posibles señales por cada Mux. ⁽³⁵⁾

Por lo anterior, una unidad de conmutación óptica de tipo espacial, para manejar N puertos de entrada con un conjunto de m señales ópticas, cada una de ellas con su respectiva longitud de onda, deberá de contar con:

- N demultiplexores.
- N multiplexores.
- M conmutadores ópticos espaciales.

Las técnicas que emplean los conmutadores ópticos de tipo espacial para transferir las señales de entrada hacia los puertos de salida son las de los sistemas micro-electromecánicos MEMS (*Microelectromechanical Systems*) y los termo-ópticos MZI (*Mach-Zehnder Interferometer*), donde el efecto termo-óptico varía el índice de refracción del trayecto que sigue la señal, originando la conmutación de la misma. En la figura No.10.49 se expone una imagen de una unidad de conmutación óptica.



Figura No. 10.49 Imagen de una unidad de conmutación óptica.

Fuente: Conmutadores ópticos. (2019). Disponible: <http://www.nextel-es.com/articulo.asp?idarticulo=665>.

Ejemplo No. 10.14

Realizar la conformación básica de una unidad de conmutación óptica espacial conformada por 2 puertos de entrada y 2 puertos de salida para atender un conjunto de 3 señales ópticas multiplexadas (DM),

Solución:

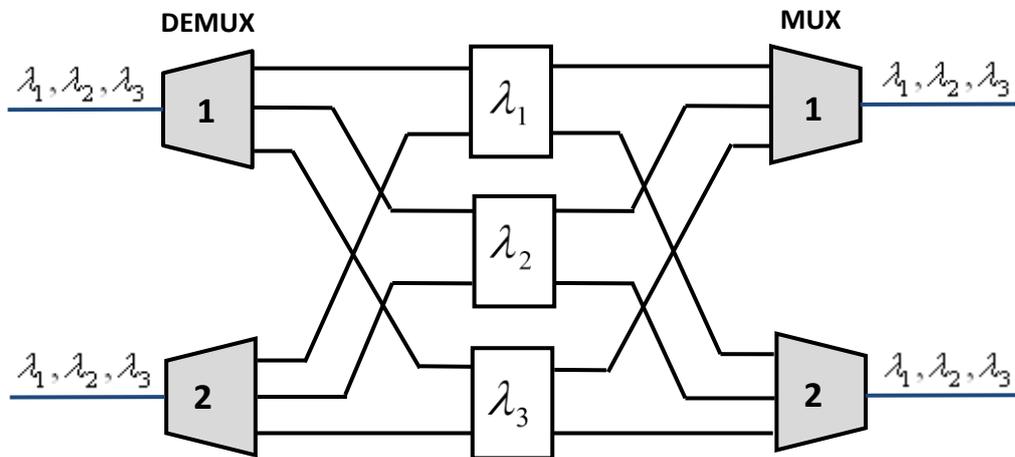


Figura No. 10.50 Unidad de conmutación óptica espacial (m 3, N 2)

Fuente: Catálogo *Solutions: o er supply*, Tal Technologies, 2016-2017.

10.10 Filtros ópticos

Los filtros ópticos son dispositivos que solo permiten el paso a través de ellos de señales luminosas de cierta longitud de onda y suprimen el paso de aquellas señales ópticas con longitudes de onda diferentes. Es decir son dispositivos concebidos para la selección de un determinado intervalo de longitudes de onda de luz.⁽³⁵⁾

El principio de funcionamiento de un filtro óptico se fundamenta en mecanismos sustractivos, ya que se basa en la capacidad de los materiales de absorber los componentes cromáticos de la luz que los ilumina, bloqueando las señales ópticas de determinadas longitudes de onda, permitiendo el paso de otras.

La tipificación de los filtros ópticos se asienta en la forma en que no permite el paso a través de ellos de señales de luz con determinada longitud de onda. A continuación se relacionan algunos de los principales tipos de filtros que utilizan en los enlaces ópticos.

10.10.1 Filtros de interferencia

El principio de funcionamiento de este tipo de filtros es que las señales de luz con determinadas longitudes de onda se reflejen al incidir en el filtro y debido a la interferencia entre ellas éstas se destruyen por la diferencia de fases

existentes entre las mismas. Estas reflexiones solo se presentan para aquellas señales que el filtro no permite el paso a través de él. A estos filtros también se les denominan como: *filtros dicroicos*.

Están conformados por el apilamiento alternativo de un conjunto de capas delgadas de dos materiales con índice de refracción diferente sobre un sustrato de cristal. Por lo general estas capas suelen ser de material dieléctrico y es por este motivo que también se le conocen como *filtros dieléctricos*.⁽³⁶⁾

El efecto del filtraje se debe a la diferencia en el índice de refracción entre dos capas consecutivas, lo cual permite que un rango de estrecho de longitudes de onda atraviesen por este conjunto de capas (filtro) y se refleje el resto.

Lo anterior se logra colocando una lámina separadora transparente entre las dos capas semireflexivas, lo que produce múltiples reflexiones, donde las interferencias que se generan entre ellas se pueden utilizar para producir un filtro de interferencia selectivo para una estrecha banda de frecuencias. Si el grosor de la lámina separadora es de media longitud de onda de la longitud de onda deseada, entonces las otras longitudes de onda serán atenuadas por interferencia destructiva. En la figura No. 10.51 se ilustra la estructura y funcionamiento básico de un filtro de interferencia. Como se puede apreciar, solamente aquellas señales de luz con longitudes de onda cuyo periodo coincidan con la longitud de onda de dos capas de distinto índice de refracción pueden atravesar el filtro.

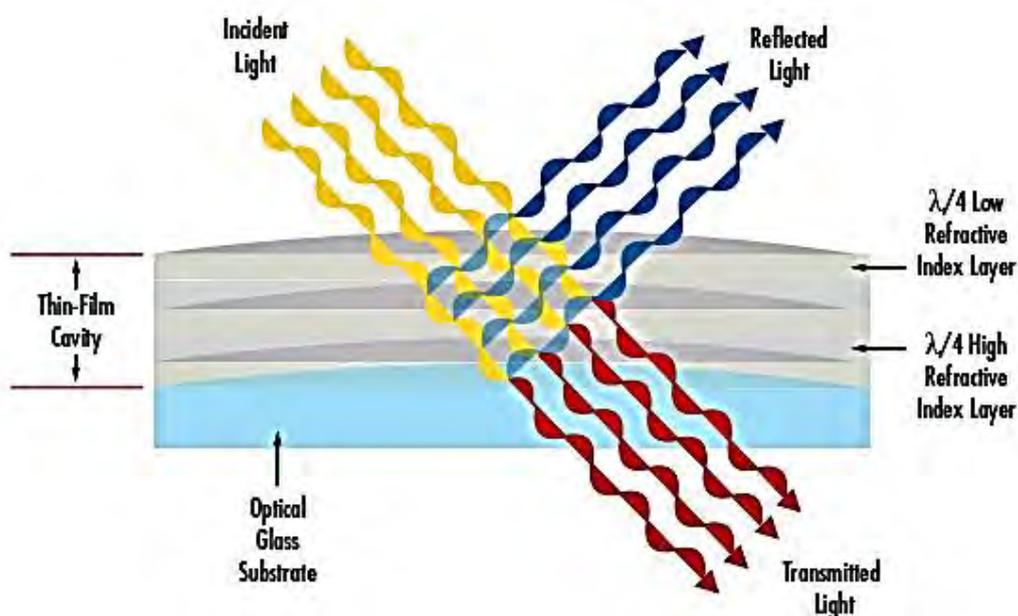


Figura No. 10.51 Estructura y funcionamiento básico de un filtro óptico de interferencia.

Fuente: Fuente: Optical-Filters. (2019). Disponible:
<https://edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/optical-filters>

Las señales ópticas que solo deja pasar el filtro son aquellas que tengan una longitud de onda indicada en la ecuación 10.11.

$$\langle 10.11 \rangle \quad N\lambda = 2nd \cos\alpha$$

N : Número entero

n : Índice de refracción de la capa

d : Grosor de la capa del dieléctrico

α : Ángulo de incidencia del haz de luz con respecto a la normal

El grosor de la capa del dieléctrico determina la longitud de onda que deja pasar el filtro (no la refleja). Para que se produzca una interferencia constructiva (reforzamiento) entre el rayo reflejado en λ y el que incide en 2λ , se requiere que la diferencia de camino óptico entre estos dos rayos sea un múltiplo entero de la λ en el medio dieléctrico. En la figura No. 10.52 se ilustra el esquema de un filtro de interferencia tipo Fabry-Perot y uno multicapa, donde se puede apreciar los fenómenos de reflexión.

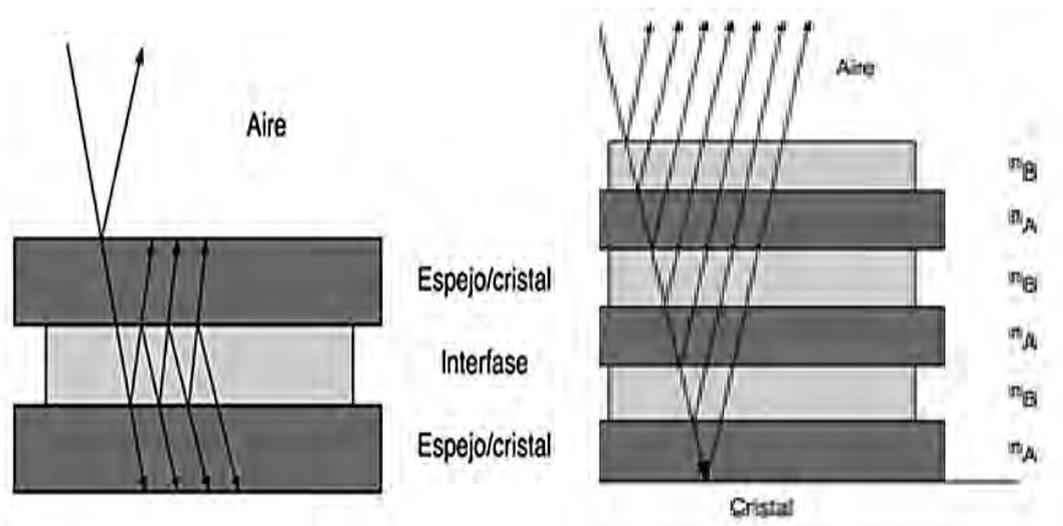
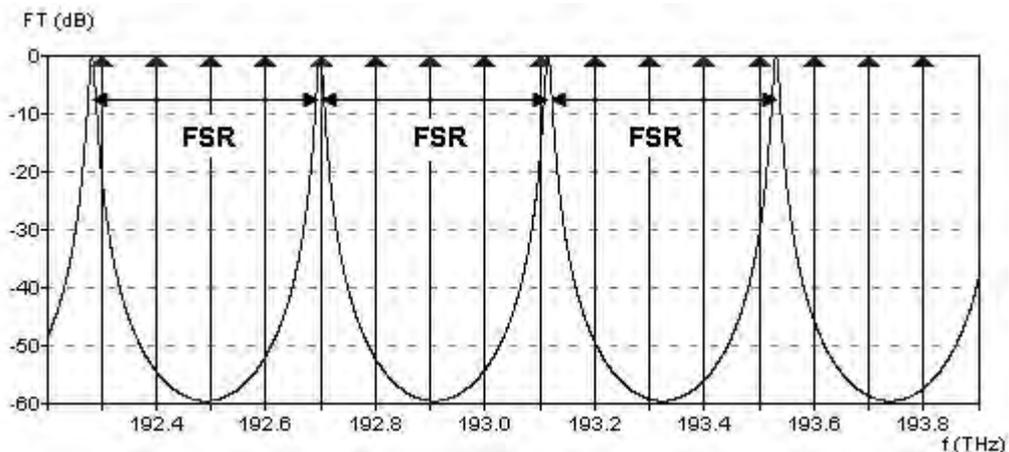


Figura No. 10.52 Filtro de interferencia tipo Fabry-Perot y filtro de interferencia multicapa.

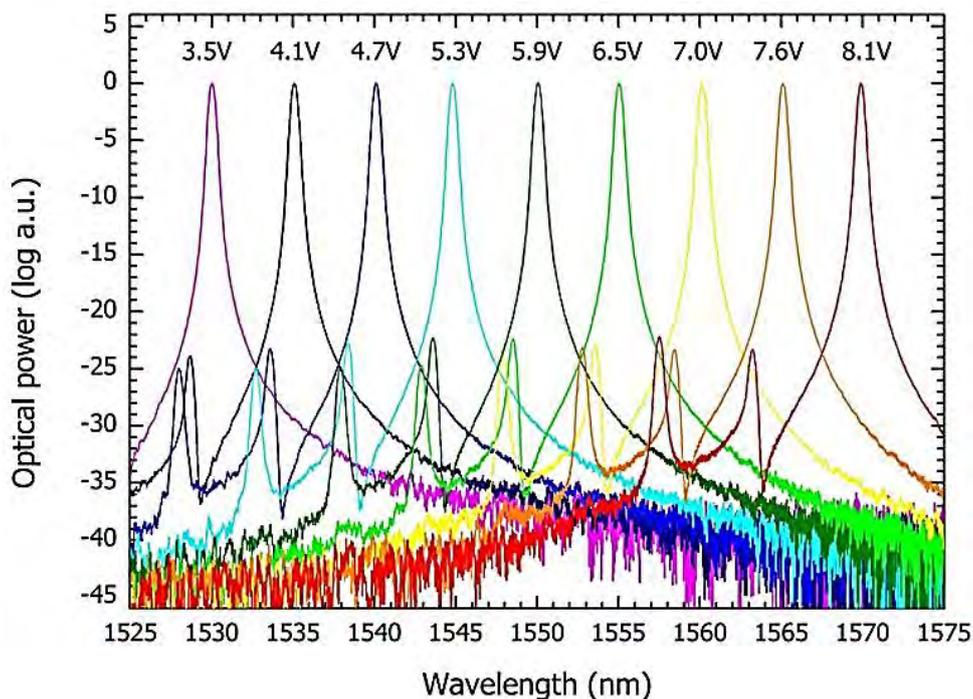
Fuente: Perothttp://carlostapia.es fisica filtros astronomicos.html

Para el filtro tipo Fabry-Perot consiste en una cavidad llena de un dieléctrico (puede ser aire entre otros), la cual se encuentra limitada por dos superficies de alta reflectancia (puede ser vidrio recubierto), que permiten el paso de una cierta cantidad de luz por transmisión.⁽³⁷⁾

En la gráfica No. 10.53 se muestra las frecuencias de máxima respuesta de un filtro de Fabry-Perot, así como el espectro de respuesta del filtro óptico sintonizable FSO2 Bragg METER, donde se puede apreciar que, estas frecuencias, son periódicas y además se hacen más estrechas a medida que aumenta el coeficiente de reflexión del medio, lo que equivale a que la selectividad del filtro aumenta. A la separación entre cada par de estas frecuencias se le denomina el rango espectral libre (*SR: free Spectral Range*)⁽³⁸⁾.



a.) Espectro de respuestas máximas: filtro óptico Fabry-Perot



b.) Espectro de respuestas máximas: filtro óptico FSO2-BraggMETER

Figura No. 10.53 Frecuencias de máxima respuesta de un filtro de Fabry-Perot Espectro de respuesta del filtro óptico sintonizable FSO2 BraggMETER

Fuente: Filtro de Fabry-Perot. (2019). Disponible:

http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_4_3.htm /
https://www.hbm.com/fileadmin/_processed_/2/7/csm_fs02_BraggMeter_graphik1_574a1355f6.jpg

En la figura No. 10.54 se ilustra la imagen de un filtro FSO2-BraggMETER y su estructura interna del mismo.

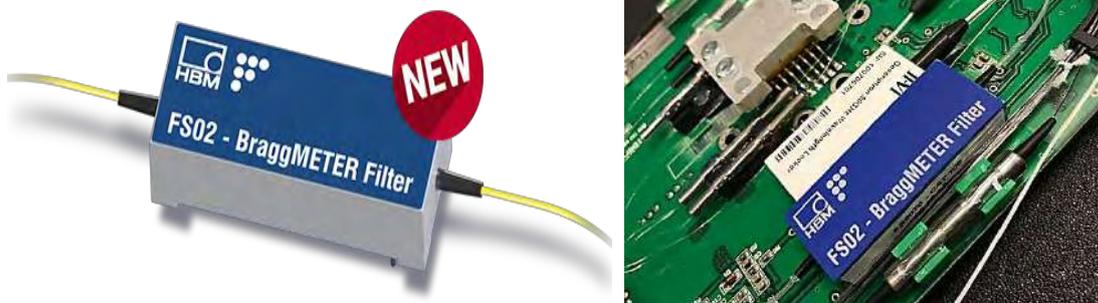


Figura No. 10.54 Imagen y estructura interna de un filtro FSO2-BraggMETER

Fuente: Catálogo Filtro óptico FSO2-BraggMETER", HBM, 2017.

Ejemplo No. 10.15

En la figura No. 10.55 se muestra una imagen de un filtro Fabry-Perot y el proceso de filtraje que realiza. Determinar el número de señales ópticas que solo deja pasar el filtro, si el grosor de la capa del dieléctrico es de 0.000006cm , la cual tiene un índice de refracción de 1.4 y un ángulo de incidencia del haz de luz con respecto a la normal de 22° .

Las señales ópticas que solo deja pasar el filtro son aquellas que tengan una longitud de onda

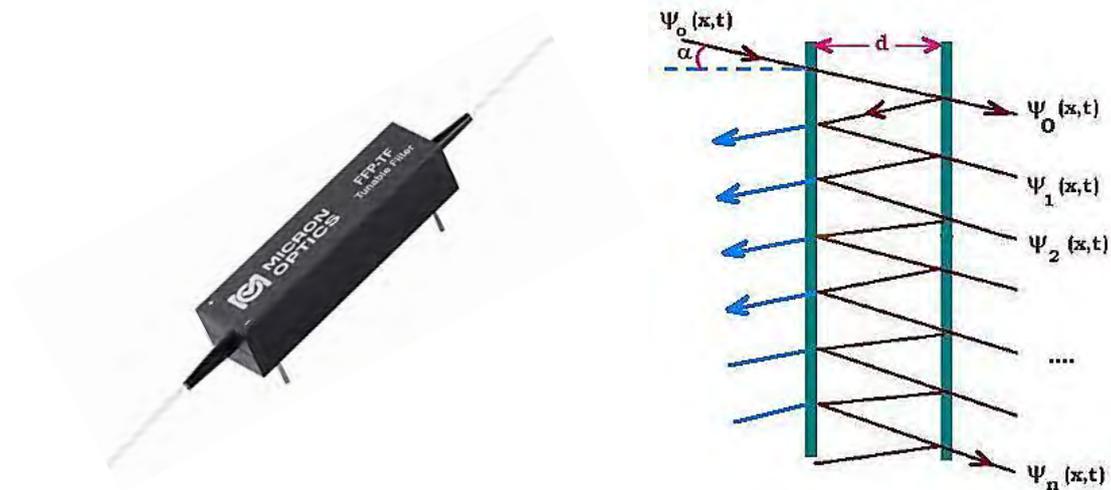


Figura No. 10.55 Imagen de un filtro Fabry-Perot y su proceso de filtraje
 Fuente: Fiber Fabry-Perot Tunable Filter FFP-TF - Micron Optics. (2019). Disponible:

.micronoptics.com ... fiber-fabry-perot-tunable-filter-ffp-tf

Solución:

Aplicando la ecuación 10.11:

$$N\lambda = 2nd \cos\alpha = 2 \times 1.4 \times (0.000006 \times 10^{-2}) \times \cos 22^\circ$$

$$\approx 0.00000155767 \text{ m} \approx 1.557,67 \text{ nm}$$

$$\lambda = 1.557,67 \text{ nm} / N \quad \wedge \quad \text{Para : } N = 1,2,3, \dots$$

Lo que significa que tan solo pasaran señales de luz de longitudes de onda:

$$\lambda = 1.557,67 \text{ nm}, 778,835 \text{ nm}, 519,223 \text{ nm}, \dots$$

10.10.2 Filtros de absorción

El principio de funcionamiento de este tipo de filtros es que absorben las señales de luz de un amplio rango de longitudes de onda, dejando pasar el resto. Por lo general estos filtros lo conforman una lámina de material gelatinoso coloreado o de vidrio coloreado. En esencia lo que hacen es absorbe ciertos rangos espectrales de las señales luminosas y dejan pasar el resto.⁽³⁹⁾

Existen esencialmente dos fundamentos en los cuales se basa el funcionamiento de estos filtros:

- Por *dispersión selectiva*: para este caso el filtro está conformado por cristales dispersantes, en los cuales para longitudes de onda corta las señales luminosas se dispersan y son absorbidas, mientras que las de longitudes largas no sufren afectación alguna.
- Por *absorción iónica*: para este caso el filtro está conformado por materiales con iones absorbentes, en los cuales para determinadas longitudes de onda las señales luminosas son absorbidas y para el resto pasan a través del filtro. En este tipo de filtro se genera un calentamiento considerable.

A continuación se indican los aspectos principales en los cuales se fundamenta la explicación cuantitativa del fenómeno de absorción que sufren las ondas, con determinadas longitudes de onda, cuando inciden en ciertos materiales sólidos.⁽⁴⁰⁾

1. El *campo eléctrico* de la onda que se propaga por un material está dado por la ecuación 6.12.

$$\langle 10.12 \rangle \quad \vec{E} = E_0 e^{j2\pi f [t - (x/v)]} \text{ (V / m)}$$

E_0 : *Intensidad del campo eléctrico incidente (V / m)*

$j2\pi f [t - (x/v)]$: *Desplazamiento en el tiempo t después de la perturbación que crea el \vec{E} en un punto situado en x .*

f : *Frecuencia de la onda (Hz).*

t : *Tiempo de la onda en el material (s).*

x : *Línea de propagación de la onda (m)*

v : *Velocidad de propagación de la onda (m / s).*

2. La velocidad de propagación de la onda en el material está dada por la ecuación 6.14.

$$\langle 10.13 \rangle \quad \frac{1}{v} = \frac{n - jk}{c} = \frac{n}{c} - j \frac{k}{c}$$

$n - jk$: Índice de refracción complejo

(n : parte real del índice que está relacionada con la velocidad
y k : parte imaginaria del índice (coeficiente de extinción) que está relacionada con la descomposición o atenuación de la intensidad del campo eléctrico incidente.

c : velocidad de la luz en el vacío (m/s)

3. Desarrollando lo expresado en la ecuación 6.12, aplicando la equivalencia indicada en la ecuación 6.13:

$$\langle 10.14 \rangle \quad \vec{E} = E_0 e^{j2\pi ft} e^{-j(2\pi xn/c)} e^{-(2\pi fkx/c)} \quad (V/m)$$

$e^{-(2\pi fkx/c)}$: corresponde al valor de atenuación que sufre la onda

Teniendo en cuenta que: $f/c = 1/\lambda \Rightarrow e^{-(2\pi kx/\lambda)} = e^{-2\pi x(k/\lambda)}$

De la ecuación inmediatamente anterior se tiene que el valor de la atenuación depende del coeficiente de extinción por longitud de onda de la señal: (k/λ) .

4. Se tiene que la intensidad (potencia) de una onda, en un material determinado, equivale a lo expresado en la ecuación 10.15:

$$\langle 10.15 \rangle \quad P = gE^2$$

g : conductividad del material (mho/m)

5. Teniendo de presente lo considerado en los numerales anteriores se obtiene:

$$\langle 10.16 \rangle \frac{P(x)}{P(0)} = \frac{gE^2(x)}{gE^2(0)} = e^{-4\pi x(k/\lambda)}$$

$P(0)$: Potencia de la onda incidente (W)

$P(x)$: Potencia de la onda en el punto x del material (W)

6. Considerando la expresión del coeficiente de absorción, se tiene que:

$$\langle 10.17 \rangle \frac{P(x)}{P(0)} = e^{-\alpha x} \Rightarrow P(x) = P(0) e^{-\alpha x}$$

α : Coeficiente de absorción = $4\pi(k/\lambda)$

A la expresión indicada en la ecuación 6.16 se le conoce como la *ley de Bouguero* intensidad de *absorción de ambert*. Esta ley establece que la energía absorbida, de una onda en un medio, depende de su longitud de onday del grosor y naturaleza del material de ese medio.

Los materiales coloreados absorben parte de las radiaciones del espectro óptico y dejan pasar las otras en mayor o menor proporción. En términos de intensidad eléctrica, la expresión de la absorción de una onda que ha atravesado un espesor x de un medio, teniendo en cuenta que la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud, se puede determinar de la forma indicada en la ecuación 10.18.

$$\langle 10.18 \rangle \frac{I(x)}{I(0)} = e^{-\alpha x} \Rightarrow I(x) = I(0) e^{-\alpha x}$$

$I(0)$: Corriente de la onda incidente (A)

$I(x)$: Corriente de la onda en el punto x del material (A)

A la relación entre estos dos valores de la corriente fotónica se le denomina *coeficiente de transmitancia interna*. En la ecuación 6.19 se indica esta relación.

$$\langle 10.19 \rangle T(x) = \frac{I(x)}{I(0)} = e^{-\alpha x}$$

El parámetro típico de la *profundidad de penetración* de los medios o materiales, corresponde de $T(x) \approx (1/3)$, que generalmente se toma como la capacidad absorbente de un medio.

Para el caso de medios o materiales dieléctricos ($k = 0$), la *profundidad de penetración* es indeterminada (muy grande), pero para los de tipo conductivo este parámetro es muy pequeño. En caso general los metales tienen un parámetro de *profundidad de penetración* menor que una micra, por lo cual se consideran como materiales absorbentes, para el caso de las señales ópticas.

En la figura No. 10.56 se muestra el espectro de absorción y el de emisión de una sustancia fluorescente.

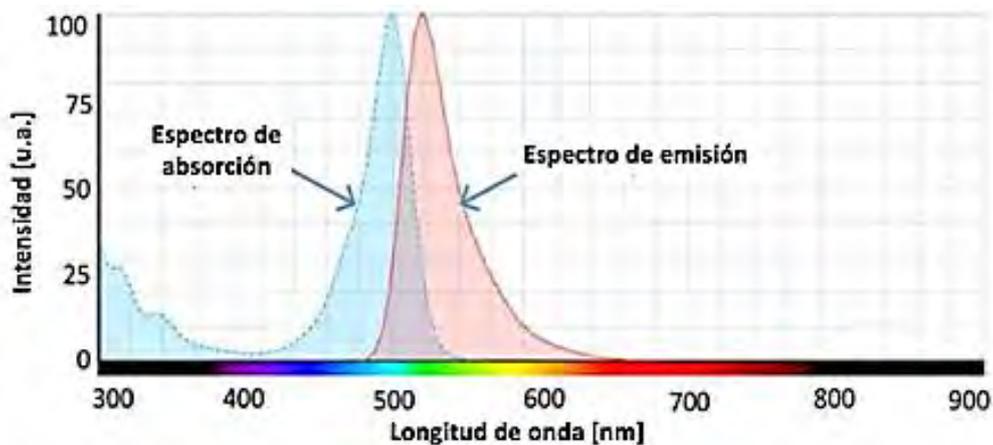


Figura No. 10.56 Espectro de absorción y de emisión de una sustancia fluorescente.

Fuente: Ormachea, O. Villazón, A., "Development of a low-cost epifluorescence microscope",
Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE)
Centro de Investigaciones de Nuevas Tecnologías Informáticas (CINTI). 2018

Ejemplo No. 10.16

Determinar el espacio que alcanza a penetrar una señal con longitud de onda de 0.8 micrometro en un medio de material de SI, para una transmitancia interna típica de $1/3$.

Solución:

Desde la ecuación 6.18:

$$T(x) = \frac{I(x)}{I(0)} = e^{-\alpha x} = 1/3 \Rightarrow \ln e^{-\alpha x} = \ln(1/3)$$

$$-\alpha x = -0.303413 \Rightarrow x = 0.303413 / \alpha$$

El coeficiente de absorción se obtiene desde las curvas de la figura No.6.11:

$$\alpha \approx 1 \times 10^5 \text{ (m}^{-1}\text{)} \Rightarrow x = 0.303413 / 1 \times 10^5 \approx 3.03 \text{ } \mu\text{m}$$

El anterior resultado indica que la intensidad de la corriente fotónica a 3.03 micro metros del medio, en consideración, equivale a 1/3 de la misma corriente a la entrada de dicho medio de material de Si.

10.10.3 Filtros de cuña

En esencia es un tipo de filtro de interferencia, cuya conformación consiste básicamente en una placa dieléctrica (vidrio, cristal o cuarzo entre otros), en forma de cuña, colocada entre capas parcialmente transparentes. El rango típico de la longitud de las placas es de 50 a 200 nm

En la figura No. 10.57 se ilustra unas imágenes donde representa del principio de la estructura de un filtro de interferencia en forma de cuña. La longitud de onda transmitida depende del espesor de la cuña. El ancho de banda típico de un filtro de cuña esta entre las longitudes de onda de: 10 a 20 nm. .

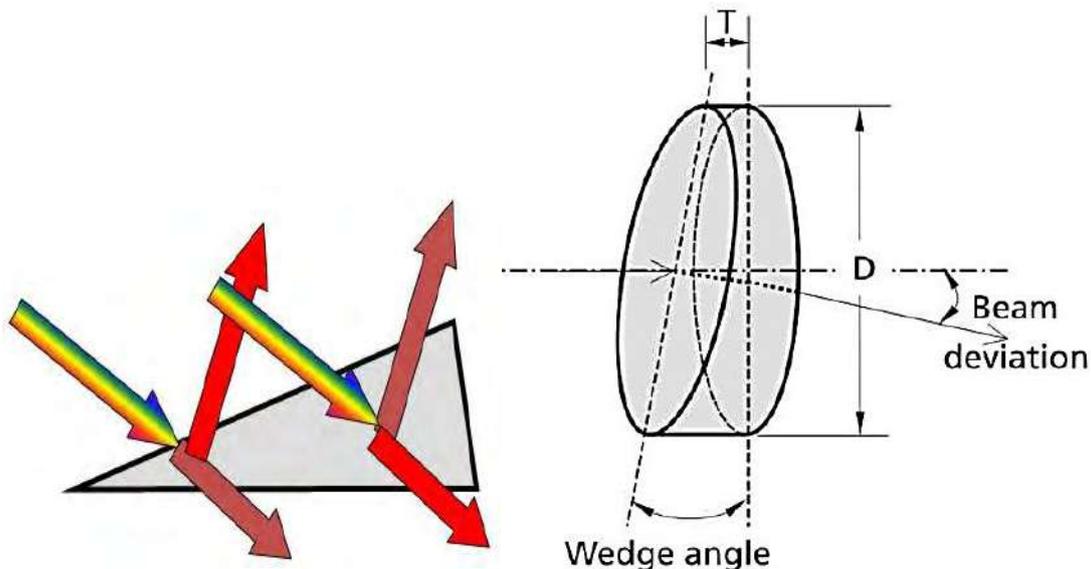


Figura No. 10.57 Principio de la estructura de un filtro de cuña

Fuente: Filtro óptico de cuña. (2017). Disponible: <http://slideplayer.es/slide/3480338>
<http://directindustry.es/product/sma-optics-product-57692-596199.html>

Las longitudes de onda transmitida varía a lo largo del espesor de la cuña. El rango típico de ancho de banda de estos filtros está entre: 10 a 20 nm, dependiendo de la escogencia de la posición lineal a lo largo de la cuña. Existen cuñas de interferencia para la región del visible (400 a 700 nm), para la región del infrarrojo entre 1.000 a 2.000 nm y también para algunas regiones de la banda infrarrojo: 2.500 a 14.500 nm. ⁽⁴¹⁾

Teniendo de presente que dos superficies, separadas ligeramente del paralelo entre sí, forman una cuña de ángulo pequeño, se puede aplicar la *ley de Snell* para determinar la dirección que seguiría un rayo óptico una vez atravesase la cuña. Esta dirección está dada en la ecuación 10.20⁽⁴²⁾

$$\langle 10.20 \rangle \delta = \alpha(n-1)$$

$$d\delta = \frac{\delta}{v}$$

α : ángulo de la cuña

δ : ángulo de desviación

$d\delta$: dispersión

n : índice de refracción de la cuña

v : velocidad de la onda en la cuña

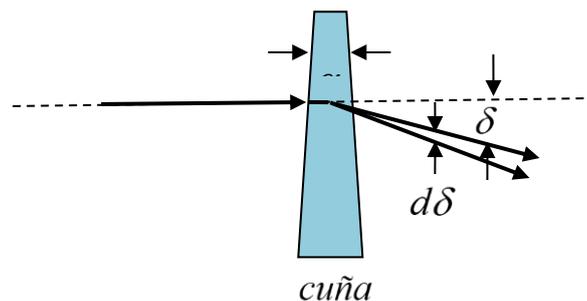


Figura No. 10.58 Desviación y dispersión de la onda al atravesar la cuña.

Fuente: Wedge (Thin Prism). (2019). Disponible:

https://spie.org/publications/tt48_525_wedge?SSO=1

Ejemplo No. 10.17

Determinar el índice de refracción del material de la cuña de un *filtro de cuña*, si el ángulo de la misma es de 20° y el ángulo de desviación es de 10°

Solución:

Aplicando la expresión de la ecuación 6.19

$$\delta = \alpha(n-1) \Rightarrow n = (\delta/\alpha) + 1 = (10^0 / 20^0) + 1 = 1.5$$

10.10.4 Filtro de Faraday

Este filtro corresponde a los denominados filtros atómicos de línea (*Atomic line filter*), los cuales operan dentro del principio de absorción y líneas de resonancia de vapores atómicos, ofreciendo una gran precisión y exactitud de selección, así como pérdidas mínimas de energía en la señal. ⁽⁴²⁾

El principio de funcionamiento del *filtro de Faraday*, conocido como filtro magneto-óptico (EFADOF: Excited Faraday Dispersive Optical Filter), consiste en la rotación de la polarización de la luz que atraviesa una celda de vapor. Solamente las señales luminosas con frecuencia resonantes al vapor pasan, mientras que las otras radiaciones son bloqueadas por las placas de polarización.

En la figura No. 10.59 se muestra la polarización de luz producida por un *filtro de Faraday*. La rotación o variación angular que experimenta el plano de polarización de la luz, está dada en la ecuación 10.21. La *constante de Verdet* depende esencialmente de: la longitud de onda de la señal de luz que atraviesa el filtro, del medio atravesado y de la temperatura existente en el filtro.

$$\langle 10.21 \rangle \theta = VBL \text{ (rad / s)}$$

θ : *variación angular del plano de polarización*

V : *constante de Verdet*

B : *intensidad del campo magnético*

L : *longitud del medio atravesado.*

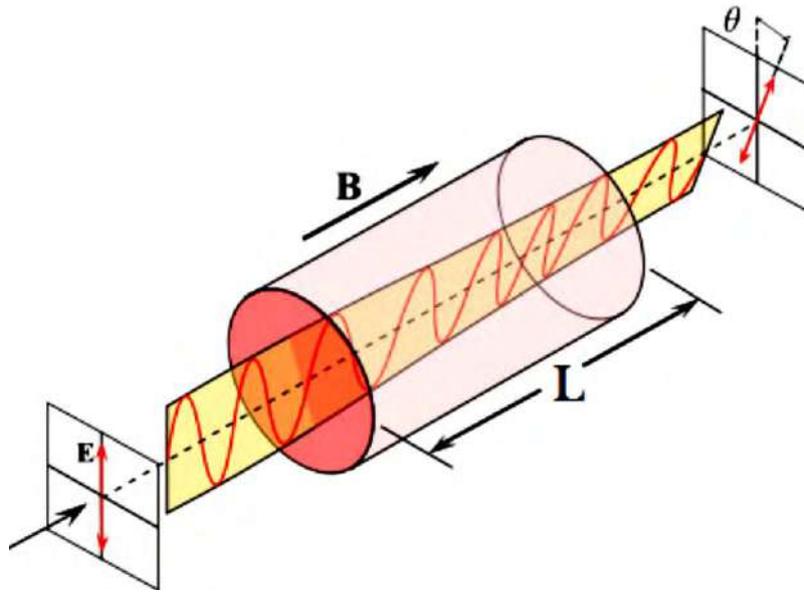


Figura No. 10.59 Polarización de luz producida por el filtro de Faraday

Fuente: Molisch, Andreas F. Oehry, Bernard P. *Radiation Trapping in Atomic Vapours*, Oxford: Oxford University Press, 2016.

La estructura básica de un *filtro de Faraday* está conformada esencialmente por los siguientes componentes:⁽⁴³⁾

- Un *colimador*: precede al filtro, teniendo como función principal alisar los rayos de luz que inciden al filtro, buscando que sean consistentes a través del mismo (no siempre este elemento es indispensable).
- Un *filtro paso-alto* (primer polarizador), el cual se encuentra después del *colimador*, al cual le corresponde bloquear cerca de la mitad de la luz incidente, la que presenta longitudes de onda demasiadas grandes.
- Una *celda de vapor*, es el siguiente elemento, la cual puede absorber o dejar pasar la luz incidente.
- Un *filtro paso-bajo* (segundo polarizador), se encuentra después de la *celda de vapor*, el cual bloquea toda la luz que el primer filtro no fue capaz de realizar, con excepción de la señal de la frecuencia a dejar pasar.
- Un *filtro de interferencia*, es el último elemento, al cual le corresponde optimizar la selectividad del filtro.

En la figura No. 10.60 se muestra un diagrama simplificado de la composición básica de un *filtro de Faraday* y de una imagen de este filtro a base de potasio. Como se puede apreciar las dos placas polarizadas se encuentran ortogonales a la dirección de polarización.

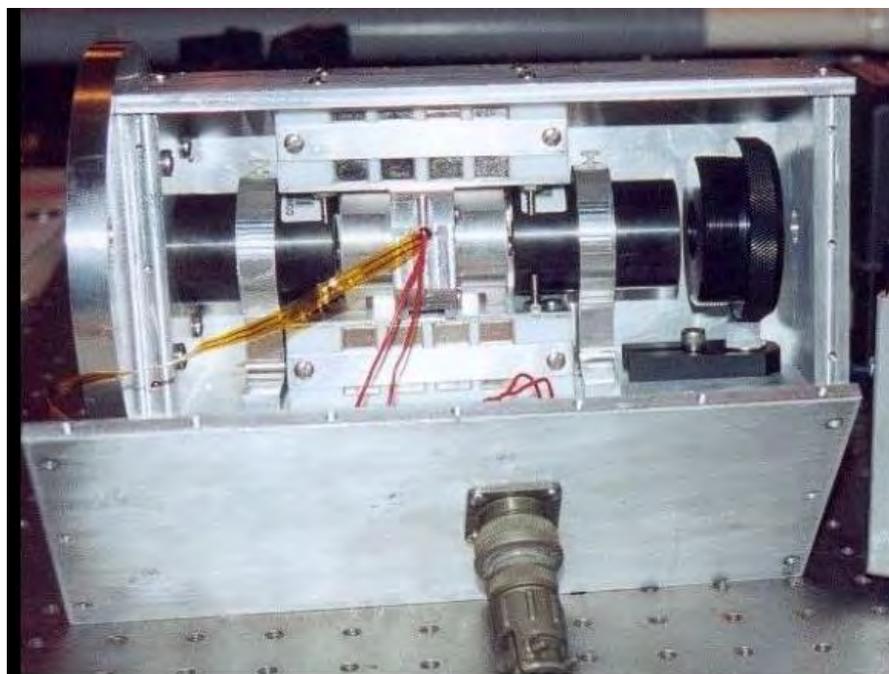
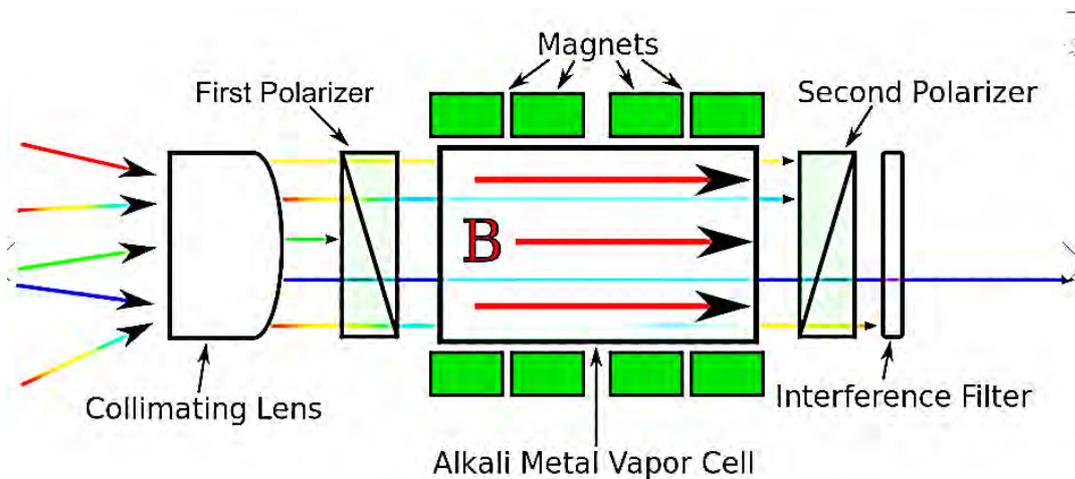


Figura No.10.60 Diagrama simplificado de la composición básica de un *filtro de araday* y una imagen del mismo.

Fuente: Bernard, P. O. /, Walter, S. / Brigitte, S., (2015), "Experimental evaluation of an atomic line filter for spaceborne application", *Proc. SPIE2310*: 51-62. / Hedin, Jonas (2014), *Design and Construction of a Potassium Faraday Filter for Potassium Lidar System Daytime Operation at Arecibo Observatory*

En la figura No. 10.61 se ilustra el ancho de banda típico de un *filtro de araday* (parte sombreada) dada en longitudes de onda relativas. El material empleado es de potasio centrado en la respuesta máxima de transición de 70,1093nm. El tipo de polarización es simple, por lo tanto el máximo en la transmisión es de 0.5.

En general la salida total de un *filtro de araday* está alrededor del 50 % del total de la intensidad de la luz de entrada.⁽⁴²⁾

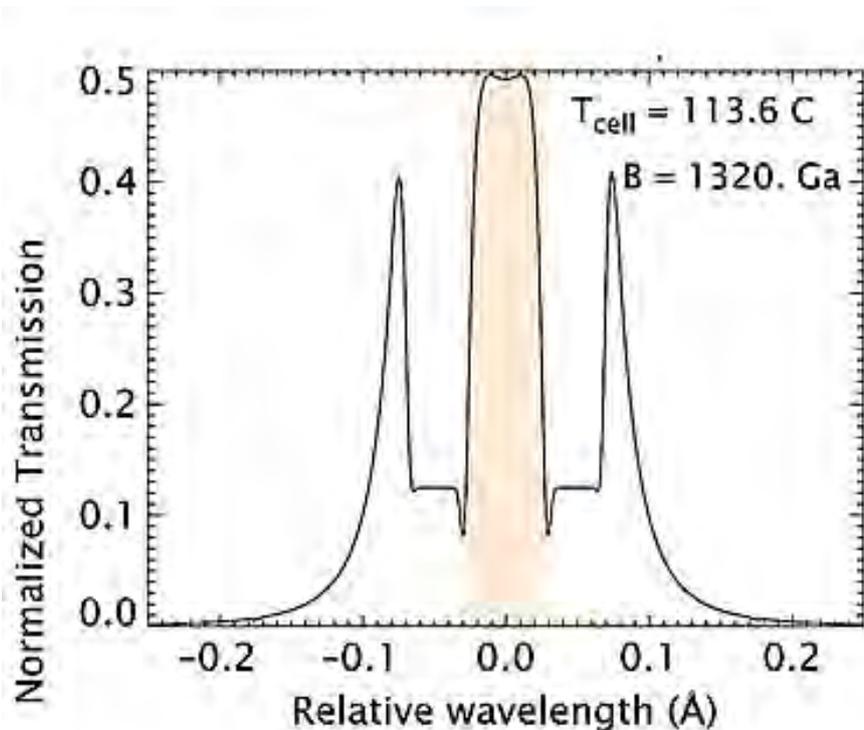


Figura No. 10.61 Ancho de banda típico de un *filtro de araday* (parte sombreada) dada en longitudes de onda relativas.

Fuente: Fitzpatrick, R. (2015), *Anomalous dispersion and resonant absorption*

Ejemplo No. 1|0.18

Determinar la *constante de Verdet*, en el caso de un *filtro de araday*, donde la variación angular resultante que sufre la onda es de 10^0 , el campo magnético aplicado, en la misma dirección de la onda, es de 500 mT y la longitud del medio atravesado es de 30 cm.

Solución:

Aplicando la expresión de la ecuación 6.20:

$$\theta = VBL \text{ (rad / s)} \Rightarrow V = \theta / BL$$

$$\theta = 10^0 \approx 0.3491 \text{ rad.}$$

$$V = 0.3491 / (500 \times 10^{-3})(30 \times 10^{-2}) = 2,327 \text{ (rad / T.m)}$$

10.11 Nodos ópticos

Las redes híbridas HFC (*ybrid iber Coax*) son aquellas que incorporan tanto fibra óptica como cable coaxial, conformando unas redes de banda ancha. Estas redes permiten el acceso a Internet de banda ancha empleando las redes CAT existentes. En su conformación se puede distinguir dos trayectos, donde uno de ellos corresponde a la conexión de los abonados de los usuarios a un nodo zonal mediante cable coaxial y el otro corresponde a la interconexión de los nodos zonales a través de fibra óptica. ⁽⁴⁴⁾

En la figura No. 10.62 se ilustra la estructura básica de una red HFC, de un sistema de televisión por cable CAT .

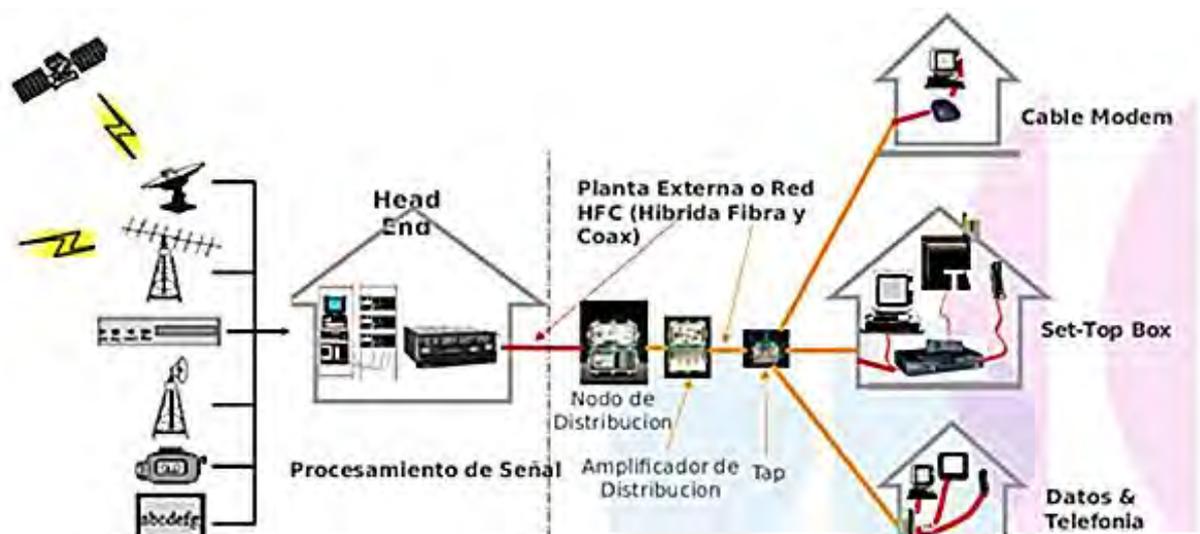


Figura No. 10.62 Esquema de la estructura básica de una red HFC.

Fuente: *Introducción a las Redes de Banda Ancha y cálculos de retorno*. (2019).
Disponible:

http://www.academia.edu/14502163/Introduccion_a_las_redes_de_banda_ancha_HFC_y_calculos_de_retorno

En las redes híbridas HFC, se emplean por lo general nodos ópticos los cuales se encargan de la conversión entre señales ópticas y eléctricas y viceversa. Las señales ópticas se propagan a través de las trayectorias de fibra óptica de la red y las eléctricas a través de las trayectorias de cable coaxial de la misma. La ganancia de salida de estos nodos oscila entre los 35 dBm, y con un rango típico de potencia óptica de salida entre los -3 dBm y 2 dBm. ⁽⁴⁵⁾

En la figura No. 10.63 se ilustra uno de los diferentes tipos de nodos ópticos existentes en el mercado.



Figura No 10.63 Nodo óptico para las redes HFC

Fuente: *Redes HFCsena*. (2019). Disponible: <http://redhfc-sena.blogspot.com/2018/06/nodo-optico-nodos-opticos-es-donde-las.html>.

Recientemente se vienen implementando en las redes HFC, nodos ópticos inteligentes, los cuales ofrecen mejor calidad y cantidad de servicios de datos y de video que se distribuyen dentro de estas redes. Estos nodos son capaces de ajustarse automáticamente y de una forma muy eficiente. En la figura No. 10.64, se muestra la imagen de un nodo óptico inteligente.



Figura No. 10.64 Nodo inteligente para una red de fibra óptica.

Fuente: *Catálogo nodo inteligente para Redes de fibra óptica*, Teleste, 2018.

A continuación se describe cada uno de los puntos señalados del nodo inteligente mostrado en la figura No. 10.64:

1. Entrada y salida de las señales inteligentes de subida y de bajada que en ruta la señal sin ningún accesorio enchufable.
2. Módulo transpondedor para lograr conectividad remota, control automático de nivel y pendiente, así como la funcionalidad de monitoreo de la señal de subida y bajada a la plataforma del nodo óptico.
3. Transmisores y receptores ópticos, los cuales vienen equipados con un organizador de fibra integrado para facilitar la instalación de los mismos.
4. Etapas amplificadoras.
5. Disponibilidad para transmisores que utilizan diversas tecnologías de láser.
6. Bandeja que proporciona una ubicación conveniente para empalmar y almacenar los cables de fibra óptica.

7. Posición para el multiplexador C DM.

10.12 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación en una red óptica es el dispositivo encargado de suministrar la energía requerida para los diferentes equipos activos de la red que puedan existir, tales como amplificadores de RF y nodos ópticos, entre otros, especialmente si la red es híbrida HFC (*ybrid iber Coax*). En la figura No 10.65 se indica la configuración básica, de un sistema de alimentación para una red HFC.⁽⁴⁶⁾

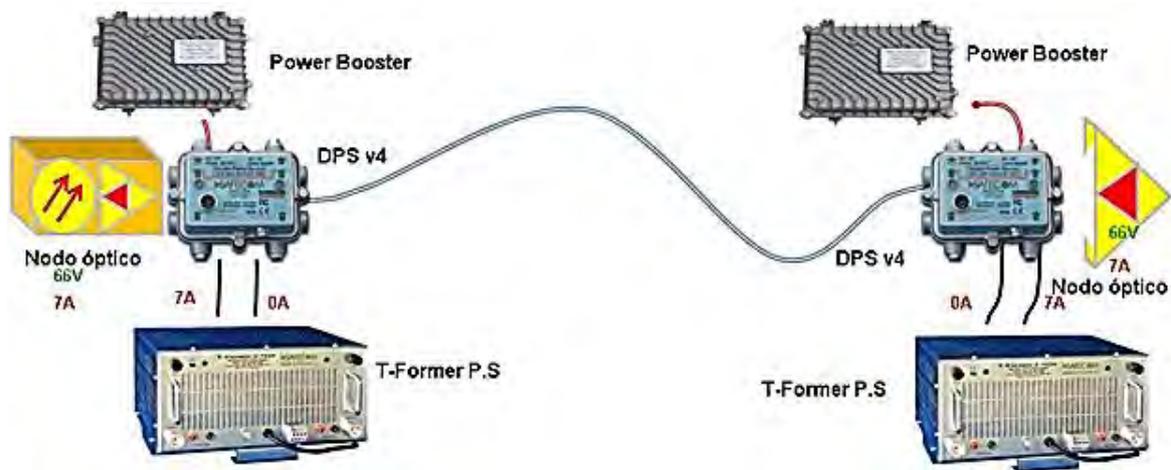


Figura No. 10.65 Configuración básica de un sistema de alimentación para una red HFC.

Fuente: Catálogo *Solutions: o er supply*”, Tal Technologies, 2018.

Los nodos ópticos, como ya se había mencionado, está conformado por un receptor óptico el cual transforma la señal óptica en señal RF para que pueda ser transmitida por el cable coaxial.

A los amplificadores de RF, les corresponden compensar las pérdidas de señal en la red, ocasionadas por la parte de la red de cable coaxial y los demás elementos pasivos de la red.

Los dispositivos DPSv4 (*ouble o er Source versión*) y Po er Booster, garantizan un máximo nivel de voltaje, incluso para enlaces grandes, evitando la necesidad de utilización de baterías y unidades UPS (*ninterruptible o er Supply*).

A los dispositivos T-Former P.S., le corresponde mantener un nivel de voltaje totalmente estable, en toda la línea de alimentación, mediante la supervisión permanente de estos niveles y compensación automática de cualquier cambio

en el voltaje de línea, así mismo como la eliminación de irrupción de efectos secundarios negativos resultantes de la recuperación de energía de la red

En el diagrama indicado en la figura No. 10.66 se representa un esquema simplificado de una distribución de la alimentación a los diferentes equipos de una red HFC que requieran de energía eléctrica para funcionar.

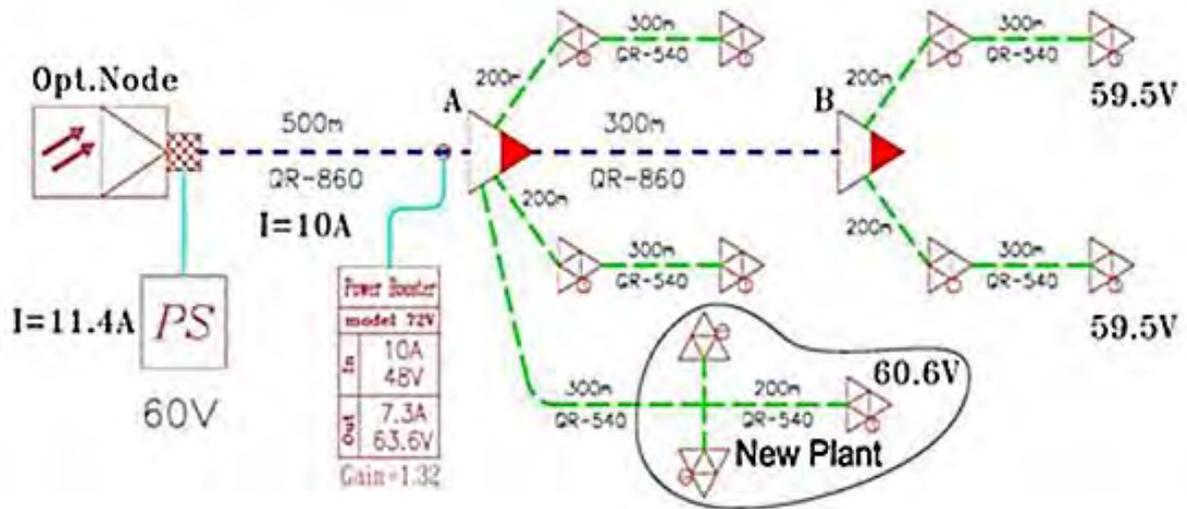


Figura No. 10.66 Esquema simplificado de una distribución de la alimentación a los diferentes equipos de una red HFC.

Fuente: Brophy, T. Ho ald, R. Smith, C. *Bringing togrt er eadend Consolation and ig - Speed ata Trafficin C Arc itecture desing*, Motorola Broadband Communications Sector 2017.

PREGUNTAS Y EJERCICIOS: CAPÍTULO 10

Preguntas:

1. Cuál es la función principal de un emisor de luz . Relacione los diferentes tipos de estos dispositivos y cuál es la característica esencial de cada uno de ellos .
2. En la figura No. 6.2 se muestra los componentes básicos que conforman la estructura de un diodo láser. Cuál es la función esencial de cada uno de estos componentes .
3. En la figura No. 6.4 se muestra el espectro del diodo LED y del diodo láser (LD). Cuál de los dos de estos emisores de luz ocupa mayor ancho de banda y porqué .
4. Los fotones emitidos por un diodo Led poseen mayores dispersiones entre sus longitudes de onda. Lo anterior origina que el ancho del espectro, en longitud de onda, emitido por un diodo Láser sea mucho menor que el de un diodo LED. ¿Qué ventajas origina lo anterior .
5. Para que los *fordiodos* trabajen en forma altamente eficiente, en las redes de comunicaciones ópticas, deben cumplir con una serie de parámetros de funcionamiento. Cuáles son estos requerimientos y como se pueden cumplir .
6. En la figura No. 6.10 se muestra, de manera simplificada, la estructura de un *fordiodo*. Cómo se explica su funcionamiento .
7. La eficiencia de los *fordiodos* se determina mediante la relación existente, entre la cantidad de electrones (corriente eléctrica) que genera versus la cantidad de fotones recibidos (potencia óptima de entrada). Explique por qué la eficiencia se determina mediante esta relación .
8. Entre los principales parámetros de funcionamiento de un *fordiodo* se encuentran los siguientes: a.) Corriente fotónica, b.) Longitud de corte, c.) Ancho de banda, d. Potencia de absorción y e.) Corriente de oscuridad. En que consiste cada uno de estos parámetros .
9. En la figura No. 6.17 se muestra un diagrama de uno de los diferentes circuitos electrónicos elementales de un emisor óptico. Cómo es el funcionamiento de este circuito .
10. En la figura No. 6.20 se ilustra uno de los circuitos electrónicos elemental de un receptor óptico. Cómo es el funcionamiento de este circuito .
11. En qué consiste un repetidor opto-electrónico . Cuál es su composición básica . Cómo funciona . Cuál es desventaja operacional .

12. Existen varios tipos de amplificadores ópticos, los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos: los OFA (*Optical Fibre Amplifiers*) y los GA (*Optical Gain Amplifiers*). En qué se fundamenta la diferencia esencial de estos dos tipos de amplificadores ópticos .

13. ¿Qué se entiende por las tarjetas ópticas .Cuál es su función básica .
Cómo están conformadas .

14. ¿Cuál es la función esencial de los divisores ópticos . Cuáles son los principales divisores ópticos existentes en el mercado . En qué consiste el funcionamiento de cada uno de estos tipos de divisores ópticos .

15. Los divisores ópticos con tecnología FBT (*Fused Biconical Taper*), están conformados por la unión entre dos fibras independientes, donde los revestimientos de las fibras son fundidas en una pequeña región de tal manera que se origina una transferencia de energía por acoplamiento. ¿Cuál es la razón funcional de esta conformación

16. En qué consiste la multiplexación demultiplexación óptica . ¿Cuál es el principio básico de su funcionamiento .

17. ¿Cuál es la razón por la cual la multiplexación óptica se fundamenta en la tecnología de la multiplexación por división de longitud de onda DM (*Wavelength Division Multiplexing*) .

18. En la figura 6.32 se muestra la estructura básica de una FFTx o xPON. Cuáles son sus componentes básicos . ¿Cuál es la función principal de cada uno de ellos .

19. En la figura 6.42 se muestra, en la parte superior, la agrupación de los canales ópticos (longitudes de onda) para el caso de D DM y en la parte inferior para el caso de C DM. ¿Cuál la diferencia esencial entre estos dos tipos de multiplicación óptica .

20. En la figura No. 6.45 se ilustra la estructura básica de un sistema D DM. Identifique sus componentes y describa su funcionamiento global.

21. ¿Cuál es la característica funcional que identifica la multiplexación por división en longitudes de ondas ligeras C DM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) .

22. Por qué en D DM, para lograr reducir la dispersión cromática de cada canal, se utiliza láser de mayor calidad y fibras de baja dispersión

23. Por qué otra alternativa para lograr reducir la dispersión cromática en D DM es mediante el empleo de módulos de compensación de la dispersión DCM (*Dispersion Compensation Modules*) .

24. En la tabla No. 6.11 se relacionan las principales diferencias existentes entre C DM y D DM. Cuál de esas diferencias sería las tres de mayor relevancia .

25. En que consiste la conmutación óptica . Cuál es el principio básico de su funcionamiento .

26. En la figura No. 6.47 se hace una representación del funcionamiento del proceso de conmutación óptica, tanto para salida directa como para salida cruzada. Cuál es la principal diferencia entre estos dos procesos de conmutación .

27. Los filtros ópticos son dispositivos que solo permiten el paso a través de ellos de señales luminosas de cierta longitud de onda y suprimen el paso de aquellas señales ópticas con longitudes de onda diferentes. Por qué

28. El principio de funcionamiento de los *filtros de interferencia* (filtros dicróicos) es que las señales de luz con determinadas longitudes de onda se reflejen al incidir en el filtro y debido a la interferencia entre ellas estas se destruyen. Por qué .

29. El principio de funcionamiento de los *filtros de absorción*, es que estos absorben las señales de luz de un amplio rango de longitudes de onda, dejando pasar el resto. Cómo se puede lograr este fenómeno

30. En esencia es un filtro de cuña es un filtro de interferencia. Por qué de esta afirmación .

31. El principio de funcionamiento del *filtro de arady*, conocido como filtro magneto-óptico (EFADOF: Excited Faraday Dispersive Optical Filter), consiste en la rotación de la polarización de la luz que atraviesa una celda de vapor. Cómo se logra el filtraje en base a está rotación .

32. Cuáles son los principales equipos que requieren de alimentación en una red híbrida HFC (*Hybrid Fiber Coax*) .

33. En el diagrama indicado en la figura No. 6.66 se representa un esquema simplificado de una distribución de la alimentación a los diferentes equipos de una red HFC que requieran de energía eléctrica para funcionar. Cuáles son esos equipos y qué requerimiento de alimentación demandan

Ejercicios:

1. Determinar la frecuencia de una señal transmitida, si los fotones emitidos en la misma contienen una energía alrededor de $5,0022 \cdot 10^{-7} \text{ eV}$.
2. Si la frecuencia de una emisión de radiodifusión sonora es de 100.9 MHz, Cuál la cantidad de energía asociada a los fotones emitidos.
3. A una fibra óptica monomodo tipo SMF (*Standard Single Mode fiber*), le incide una señal de luz la cual genera una dispersión cromática de 15 (ps nm⁻¹ m), determinar la energía asociada a la señal de luz que incide en la fibra
4. Determinar la respuesta (A) de los fotodiodos: a-Si, mono-Si y nO CIGS con respecto a la longitud de onda de la señal óptica recibida de 950nm.
5. Si un fotodiodo tiene una eficiencia cuántica del 65 para una longitud de onda incidente de 1.5 μm y la potencia incidente óptica es de -15 dBm, determinar su corriente fotónica
6. Determinar la longitud de onda de corte para el fotodiodo de material semiconductor tipo Ge.
7. Determinar el rango de los anchos de banda de un fotodiodo de tipo PIN, cuyo material semiconductor es Si, para el caso del rango de tiempo de respuesta considerando para este tipo de fotodiodo.
8. Determinar la potencia de absorción del fotodiodo de germanio, planteado en el ejemplo No. 6.9, si su ancho de la región de depleción es de 12 micrómetros.
9. Teniendo como referencia el diagrama del receptor óptico indicado en la figura 6.22, calcular su voltaje de salida (V_0), de tal forma que para un desplazamiento de $250 \text{ a } 550 \mu\text{m}$ se obtenga una variación de voltaje de: 0 a 5 V, teniendo en cuenta que $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ y que para un AD620:
$$V_0 = G(RG)(V_+ - V_-) + V_5 \quad \wedge \quad G(RG) = 1 + 49.4 \text{ K}\Omega / RG$$
10. Realizar la conformación básica de una unidad de conmutación óptica espacial conformada por 3 puertos de entrada y 3 puertos de salida para atender un conjunto de 5 señales ópticas multiplexadas (DM),
11. Haga una descripción detallada de la estructura de una comunicación óptica, indicando la función principal de cada uno de sus componentes.
12. En la figura No. 10.67 se muestra un enlace óptico entre cuatro transmisores-receptores ITU, utilizando Mux DemuxD DM. Haga una descripción detallada del funcionamiento de este enlace.

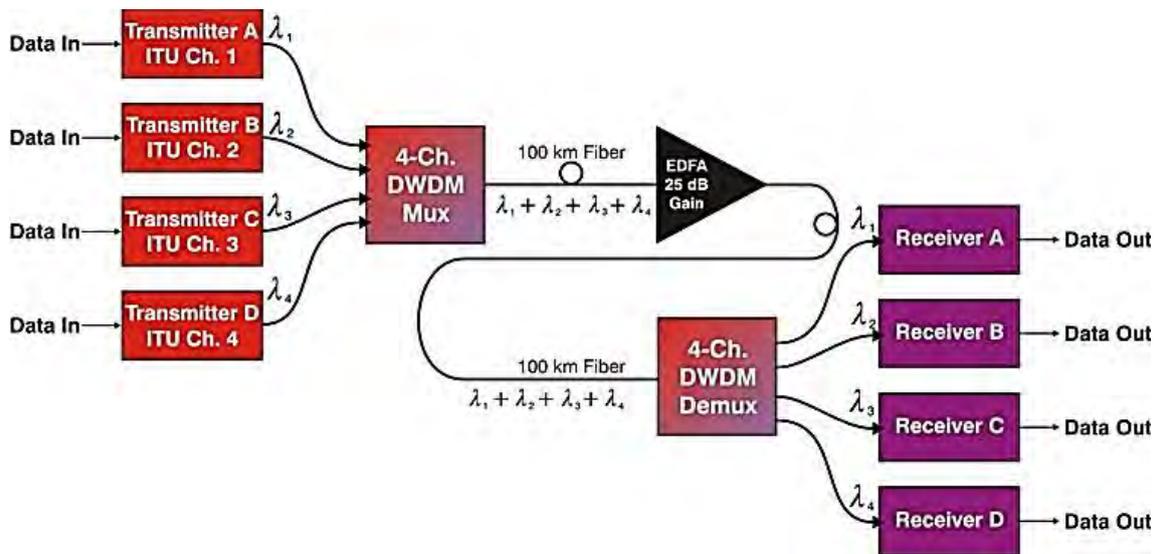


Fig. No. 10.67 Enlace óptico entre cuatro transmisores-receptores ITU
 Fuente: Dense Wavelength-Division Multiplexing (DWDM). 2018. Disponible: <http://www.fiber-optics.info/fiber-optic-glossary/dense-wavelength-division-multiplexing-dw-dm>

13. Realizar la conformación básica de una unidad de conmutación óptica espacial conformada por 3 puertos de entrada y 3 puertos de salida para atender un conjunto de 4 señales ópticas multiplexadas (DWDM),

14. En la figura No. 6.68 la estructura de un circuito común con fotodiodo, describir de forma detallada su funcionamiento.

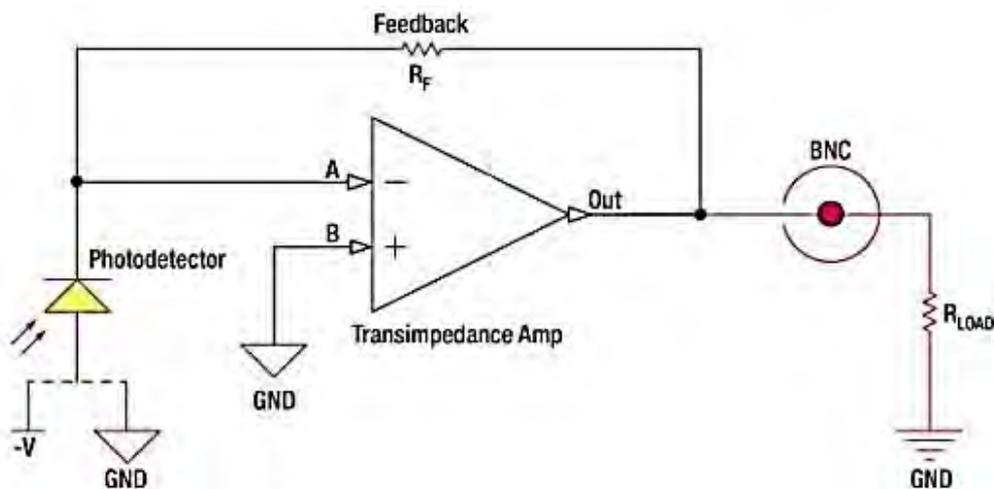


Figura No. 6.68 Circuito común con fotodiodo

Fuente: PIN-040A Fotodiodo OSIOptoelectronics Infrarrojo Si, Montaje en (2019).
 Disponible: <https://es.rs-online.com/web/p/fotodiodos/8486247>

15. En la figura No. 6.14, del ejemplo No. 6.6, se representa un circuito de operación de un fotodiodo con dos amplificadores operacionales incorporados. Comprobar que que la frecuencia de corte a 3 dB es la indicada en la ecuación 6.22. ⁽⁴⁷⁾

$$\langle 6.22 \rangle f_{3dB}(\text{Hz}) = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_F (C_J + C_F + C_A)}}$$

Donde :

GBP : Gain Bandwidth Product del amplificador A_1

C_A : Capacitancia de entrada del amplificador

16. En la figura No. 6.19 del ejemplo No. 6.11 se ilustra el circuito de un transmisor láser, indicar el voltaje sobre el capacitor C_2 , cuando el diodo láser está activado.

17. En la figura No. 6.24, del ejemplo No. 6.13, se ilustra el circuito de un receptor óptico. Determinar el voltaje de salida en cada uno de los dos amplificadores.

18. En la figura No. 6.25, se representa un enlace óptico con repetidor óptico-electrónico. Describa el proceso de funcionamiento del repetidor.

19. En la figura No. 6.27, se representa un enlace óptico con repetidor óptico. Describa el proceso de funcionamiento del repetidor.

20. En la figura No. 6.55, del ejemplo No. 6.15, se muestra una imagen de un filtro Fabry-Perot y el proceso de filtraje que realiza. Determinar el número de señales ópticas que solo deja pasar el filtro, si el grosor de la capa del dieléctrico es de 0.000008cm, la cual tiene un índice de refracción de 1.3 y un ángulo de incidencia del haz de luz con respecto a la normal de 24° .

21. Determinar el espacio que alcanza a penetrar una señal con longitud de onda de 0.9 micrómetro en un medio de material de GE, para una transmitancia interna típica de 13.

22. Determinar el índice de refracción del material de la cuña de un *filtro de cuña*, si el ángulo de la misma es de 22° y el ángulo de desviación es de 11°

23. Determinar la *constante de Verdet*, en el caso de un *filtro de araday*, donde la variación angular resultante que sufre la onda es de 12° , el campo magnético aplicado, en la misma dirección de la onda, es de 600 mT y la longitud del medio atravesado es de 35 cm.

24. Sí un fotodiodo de avalancha típico se encuentra trabajando con los siguientes parámetros: ⁽⁴⁸⁾

- ✓ Potencia óptica incidente: $P_{inc} = 48 \text{ mW}$
- ✓ Frecuencia óptica: $f = 4.8 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- ✓ Voltaje del fotodiodo: $V = 33 \text{ V}$
- ✓ Eficiencia cuántica: $\eta = 89\%$
- ✓ Voltaje de ruptura del fotodiodo: $V_{BR} = 35 \text{ V}$
- ✓ Corriente de oscuridad: $I_s = 11 \text{ nA}$
- ✓ Parámetro de multiplicación: $m = 2$

Determinar :

- a.) El factor de multiplicación del fotodiodo.
- b.) El flujo de fotones.
- c.) La fotocorriente no multiplicada.
- d.) La fotocorriente total (multiplicada)

Teniendo en cuenta que el factor de multiplicación (M) está dado por la expresión indicada en la ecuación 6.23.

$$\langle 6.23 \rangle M = \left[1 - \left(\frac{V}{V_{BR}} \right)^m \right]^{-1}$$

Donde :

V : Voltaje del fotodiodo (V)

V_{BR} : Voltaje de ruptura del fotodiodo (V).

m : Parámetro para la multiplicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 10

- (1) Shubert, E. Fred, *Light-Emitting Diodes*, Cambridge University Press, 2016, pp.33-34.
- (2) Masuhara, A., *Categorías de diodo láser*, Justin Heard. Tokyo. 2017, pp. 56-57.
- (3) Various Types of Laser Diodes_(2019). Disponible:
<http://biofi.semmelweis.hu/run/dl.php?id>
- (4) Rodney, Brooks *Fields of Color: The theory that escaped Einstein*. Allegra Print Imaging, 2017, 145-146.
- (5) Andre Siddler. "An Introduction to Modern Cosmology", Wiley Sons. pp. - .
- (6) Cutnell J.D. Johnson, J., *Electromagnetic Radiation - wavelength, frequency, and photon energy physics*," Algebralab.org, 2017, pp. 234-236.
- (7) Emsley, M. Dosunmu, O. Inlu M.S. *High-speed resonant-cavity-enhanced silicon photodetectors on reflecting silicon-on-insulator substrates*", IEEE Photonics Technol. Lett. 14, 2016, pp. 519-521
- (8) Csuta, S.M. Dashtina-Murthy S. Campbell, J.C. *CMOS-compatible planar silicon waveguide-grating-coupler photodetectors fabricated on silicon-on-insulator substrates*", IEEE J. Quantum Electron. 38, 2014, pp. 477-480
- (9) Schaub, J.D. Hoester, S.J. Dehlinger, G. Ouyang, J.C. Guenterberger, D. Wang, M. Rogers, D. Chu, J. Grill, A., *High speed, lateral photodiodes in silicon technologies, Semiconductor photodetectors*", 2016, Proc. SPIE, vol. 5353 (SPIE Bellingham, 2016) pp. 1-9
- (10), (48) Hamamatsu Photonics, *Technical information: Characteristics and use of SiC Avalanche photodiode*", Solid State Division. 2017, pp. 8-9.
- (11) Tyco Electronics, Fiber Optic Business Unit, Manual: *Typical optical receiver modules*", 2017.
- (12) He, S. Meng, Bland-Hathorn, J. Helleux, S. Dagenais, M., *Silicon nitride Silicon nitride calibration Spectrometer for operation near 1.55 μm*" Publication Year: 2018, Article Sequence Number: 4502207

- (29) Fiber-Optic Splitter. (2019). Disponible:
<http://www.instaladoresdetelecomhoy.com/divisores-splitters-para-ftth> .
<http://spanish.fiber-opticsplitter.com> .
- (30) Pérez, I. Ázquez, C., *Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos* Técnicas de Multiplexación. Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF) Dpto. de Tecnología Electrónica Universidad CARLOS III de Madrid. 201, pp.165-167.
- (31) Recomendación ITU-T G.694.2. (2019). Disponible:
www.asga.com.br/.../003-20-Mux-20-Demux-20-Espanhol.pdf
- (32) CastroLechtaler, A. *An introduction to digital networks of data transmission and isochronous signals*, AlfaOmega, 2014, pp. 341-345.
- (33) Bao, S. Ben Boo, S.J. Muherjee, B. Dixit, S., *All optical access for metropolitan area networks: opportunities and challenges*, IEEE Commun. Mag., 2016, pp.39-40
- (34) Ázquez García, C. Sánchez Montero, D., *Dispositivos y Medios de Transmisión Ópticos*, Departamento Tecnológico - Universidad Carlos III Madrid, 2017, pp.31-32.
- (35) Ballard, J. Gauged, A. Baize, S. Lemonade, P. Laurent, A. Clarion, P. *Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers*, Optics Communications", volume 266, Issue 2, 15 October 2016, Pages 609-613
-
- (36) Fabri-Perot interferometer. (2019).
 Disponible:
<http://scientificsentence.net/aves/index.php/eyes/Integer-interferometers>
- (37) Baptiste, J. Perot, A. *Perot frequently spelled with an accent*, in scientific publications, and so the name of the interferometer is commonly written with the accent. Métyier, Françoise (September-October 2012). [t](#) (PDF). Photoniques (in French) (25). Archived from *the original pdf* on 2012-11-10. Retrieved - - . pp - :
- (38) Rosario, N. E. Amasoe, M. A.; Sayao, A. C. Siqueira, R., *A multifilter rotating wide band radiometer calibration for spectral aerosol optical depth retrievals over*, São Paulo City, Brazil. Applied Optics, v. 47, 2016, pp. 1173-1176,
- (39) Moshtael, H. Aslam T. Underwood I. Dhillon B., *High Tech Aids to Vision: A Review of Image Processing for the Visually Impaired*. Translational vision science technology 2017 pp. 4-6

(40) Ormachea, O. Villazón, A., *Development of a low-cost epifluorescence microscope*", Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE) Centro de Investigaciones de Nuevas Tecnologías Informáticas (CINTI). 2017, pp. 187-19.

(41) Abel-Tibérini, L. Lemarquis, F. Marchand, G. Roussel, L. Albrand G. Lequime, M. Amra, C. Kaiser, N. Macleod, N. *Advances in Optical Technology in Films*", Manufacturing of linear variable filters with straight isothickness lines in, Eds, Proc. SPIE 5963, 86-94, October 2014, pp. 45-48.

(42) Edge (Thin Prism). (2019). Disponible:
<https://spie.org/publications/tt48-525-edge-SSO-1>

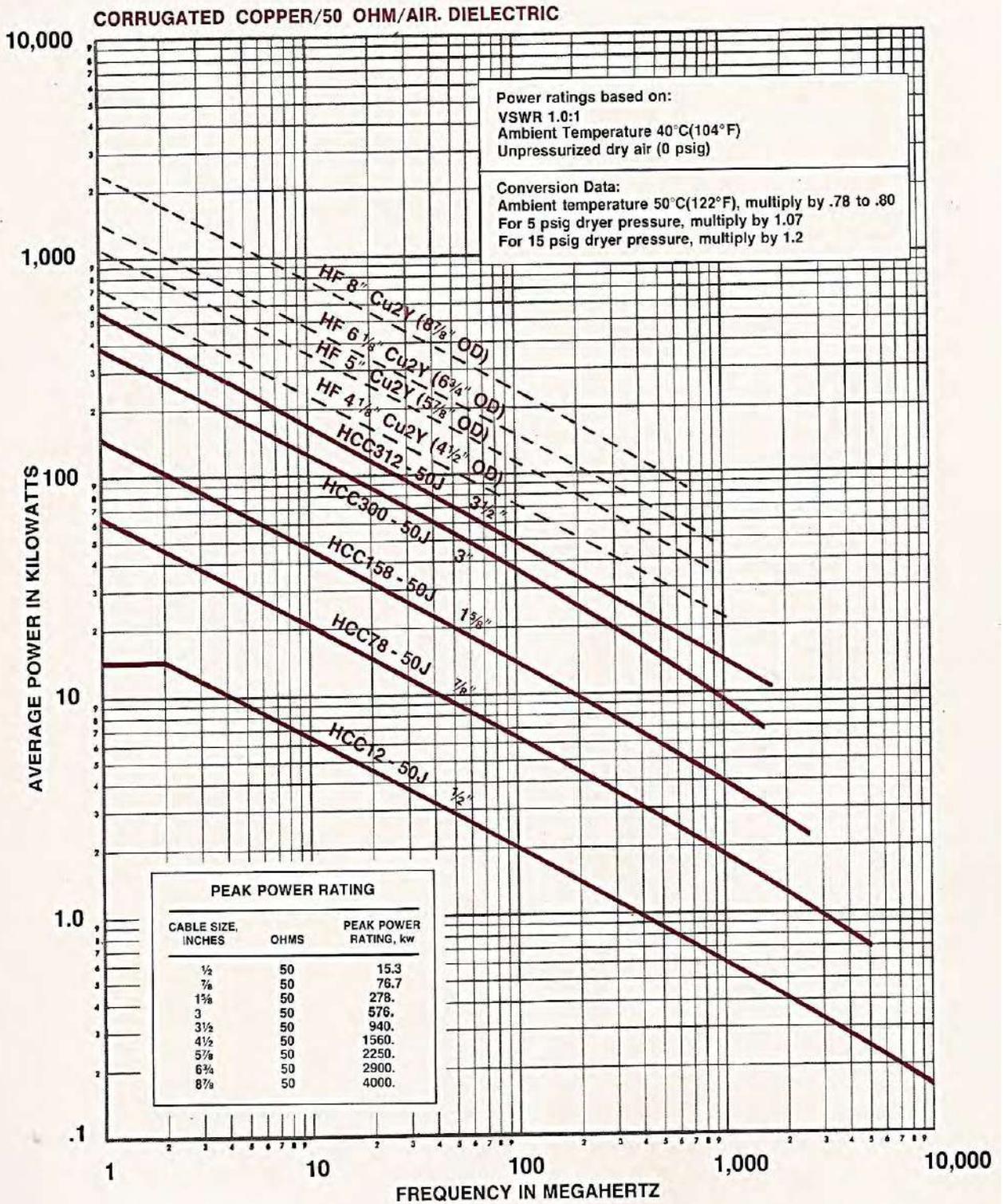
(43) Bernard, P. O., Walter, S. Brigitte, S., (2016), *Experimental evaluation of an atomic line filter for spaceborne application*", Proc. SPIE 2310: 51-62. Hedin, Jonas (2017), *Design and Construction of a Potassium Faraday Filter for Potassium Star System Daytime Operation at Arecibo Observatory*".

(44) Catalog: Scientific Atlanta, Motorola, Jerold, Sylvania, Harmonic, 2017.

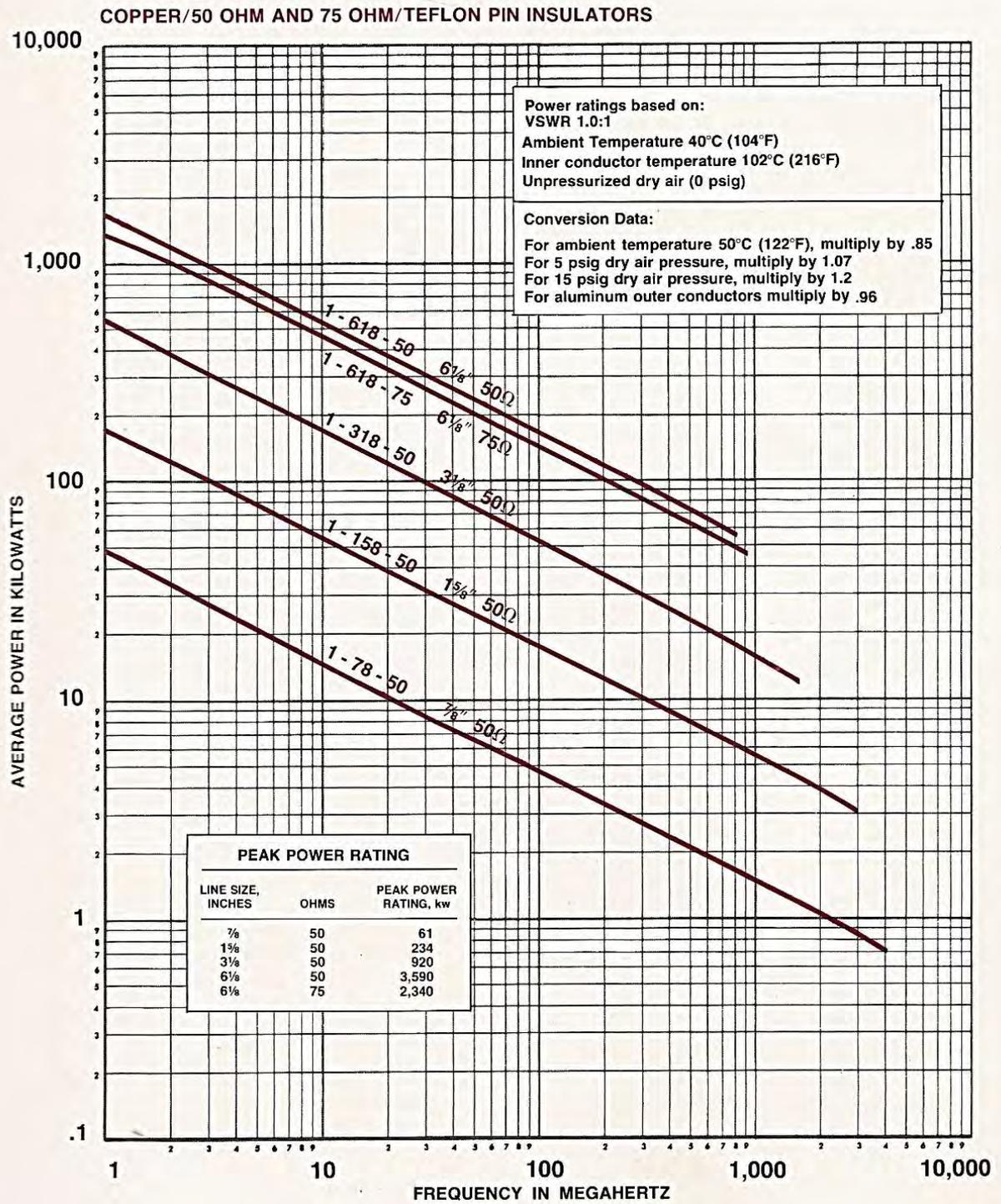
(45) Redes HFCsena. (2019). Disponible:
<http://redhfc-sena.blogspot.com/2013/06/nodo-optico-nodos-opticos-es-donde-las.html>

(46) Brophy, T. Hoald, R. Smith, C. *Bringing together Endend Consolation and Gig-Speed Data Traffic in Core Architecture Design*", Motorola Broadband Communications Sector 2017, pp 69-71.

(47) Photodiode Characteristics and Applications. (2019). Disponible:
<http://www.osioptoelectronics.com/application-notes/an-photodiode-parameters-characteristics.pdf>

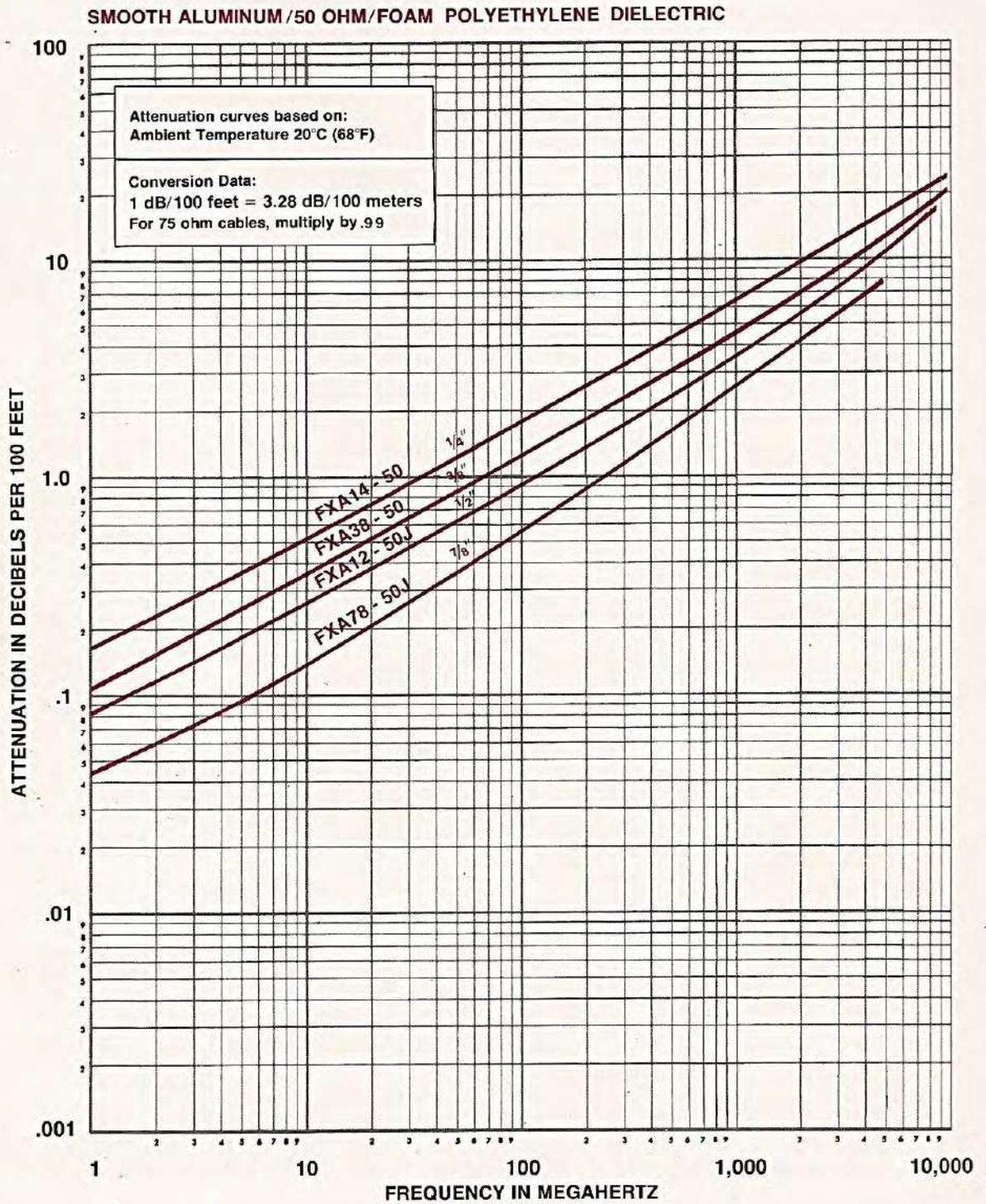


Curvas No. 1 Anexo No 2



Attenuation

Foamflex Cable

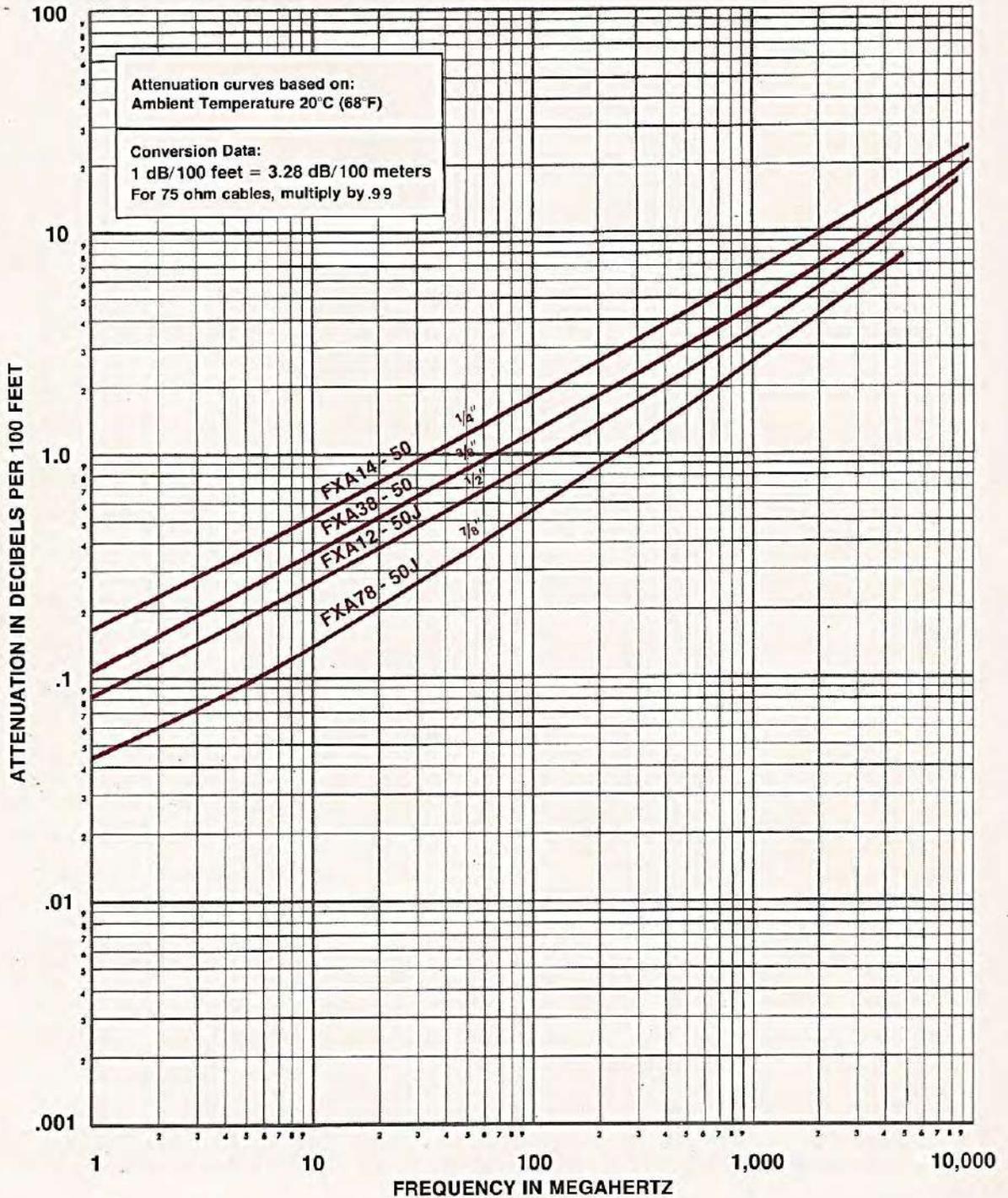


Curvas No. 2 Anexo No. 1

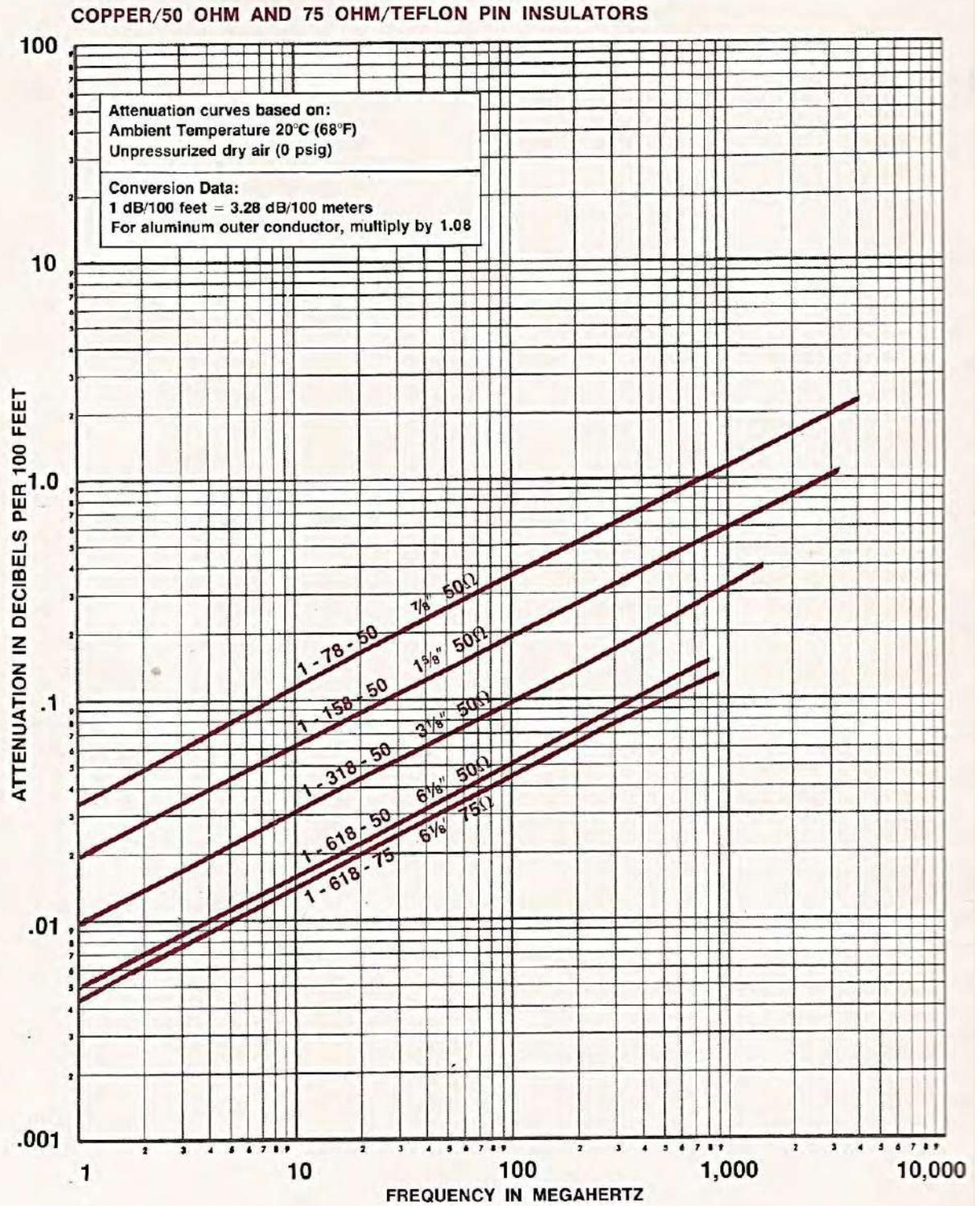
Attenuation

Foamflex Cable

SMOOTH ALUMINUM / 50 OHM / FOAM POLYETHYLENE DIELECTRIC



Curvas No. 3 Anexo No. 1



Curvas No. 4 Anexo No. 1

Anexo No. 2

Curvas de potencia permisible de los cables coaxiales

Fuente: Catálogo *Antenna Transmission Line Systems* Cable Wave Systems, 2016, pp. 77 83 87 93.

OTROS TEXTOS PUBLICADOS POR EL AUTOR

- *“Criterios de diseño e implementación de sistemas de radio-comunicación, para el sector salud”*: 1998. Organización Panamericana de Salud (OPS).
- *“Arquitectura de una red de telemedicina, caso ciudad de Bogotá”*: 2004. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. ISBN: 958-8175-67-4
- *“Antenas, conceptos básicos simplificados de funcionamiento y diseño”*: 2007. Universidad de San Buenaventura. ISBN:978-958-97921-3-1
- *“Medios y métodos de propagación de ondas de radio”*: 2008. Universidad de San Buenaventura. ISBN: 978-958-98308-8-8.
- *“Antenas, conceptos básicos simplificados de funcionamiento y diseño”*: segunda edición complementada 2010. Universidad de San Buenaventura. . ISBN:978-958-97921-3-1
- *“Campos electromagnéticos, conceptos básicos y ejercicios resueltos”*: 2012. Universidad de San Buenaventura. ISBN:978-958-8422-43-5
- *“Telefonía Móvil Celular: una reflexión académica”*, 2014, Fundación Universitaria Los Libertadores. ISBN:978-958-9146-44-6.
- *“Sistemas de Radiodifusión de Video: desarrollo y avances”* 2018. Fundación Universitaria Los Libertadores. ISBN:978-958-9146-87-3.
- *“Sistemas de Radiodifusión Sonora: desarrollo y avances”* 2019. Fundación Universitaria Los Libertadores. (proceso de edición)