



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Curso 2016/2017

# La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Alumno: Wilson Leal Romero

Tutor: Dr. D. Felipe San Luis Gutiérrez

Grado: Ingeniería Radioelectrónica

Título: LA FIBRA ÓPTICA: REDES Y APLICACIONES

Alumno: Wilson Leal Romero

Tutor: Dr. D. Felipe San Luis Gutiérrez

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Grado el día ..... de ..... de 2017 en Santa Cruz de Tenerife, en la Escuela Politécnica Superior de Ingenieros de la Universidad de la Laguna de Tenerife, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



## **Agradecimientos**

En primer lugar, me gustaría dedicarle este trabajo a mi familia, en especial a mis padres, que me han apoyado incondicionalmente desde el inicio de mis estudios de todas las maneras posibles. Han estado a mi lado en los momentos buenos y en los momentos malos (sobre todo los malos) y siempre han sido capaces de sacar en mí el ánimo que, en ocasiones, yo no he sido capaz de sacar. Gracias Zulaine y Aquiles por apoyarme en todo este proceso.

Seguidamente, me gustaría agradecer a Yolanda su paciencia conmigo. Si no fuera por ella, probablemente habría aplazado este proyecto, con la posibilidad de que se alargara más de la cuenta. Ha sido mi compañera desde el inicio de mi vida universitaria y, gracias a su ejemplo y su ahínco, hoy estoy más cerca de conseguir acabar esta etapa de mi vida.

Gracias también a mis profesores de la carrera, en especial a los de Radioelectrónica. Vosotros habéis hecho que mi interés por la electrónica haya aflorado durante mi etapa universitaria. Agradezco especialmente a José Ángel su apoyo, no solo en lo que académicamente se refiere, sino en muchos otros ámbitos de la vida universitaria, tanto inquietudes como dificultades en otras asignaturas.

Por último, y no por ello menos importante, agradezco a mi tutor Felipe San Luis su guía y consejos a lo largo del proceso de realización de este trabajo de fin de grado. Su orientación ha sido vital a la hora de entender y unir conceptos necesarios para montar este proyecto. Sin él habría estado totalmente perdido.



# Índice

Introducción	14
Abstract	15
Antecedentes históricos	16
Capítulo 1: Conceptos básicos de la fibra óptica	18
1.1. Principios físicos de la fibra óptica	19
1.1.1. Espectro	19
1.1.2. Conceptos básicos de las ondas	20
1.1.3. Reflexión	22
1.1.4. Refracción	23
1.1.5. Reflexión total	25
1.1.6. Apertura numérica	26
1.1.7. Propagación de la luz en el conductor	28
1.2. Principios químicos de la fibra óptica	30
1.2.1. Fibra óptica de plástico y de vidrio	30
1.2.2. Fibra óptica de vidrio de cuarzo	31
1.3. Perfiles de fibra óptica	34
1.3.1. Perfil escalonado	36
1.3.2. Perfil gradual	41
1.3.3. Perfil múltiple	45
Capítulo 2: La fibra óptica	49
2.1. Parámetros y métodos de medición de la fibra óptica	50
2.1.1. Condiciones de excitación	50
2.1.2. Atenuación	53
2.1.3. Métodos de medición	54
2.1.4. Ancho de banda	58
2.1.5. Métodos de medición	60
2.2. Configuración de la fibra óptica	64
2.2.1. Alma del cable	64

2.2.2. Trenzado	64
2.2.3. Relleno del alma	67
2.2.4. Vaina del cable	68
2.2.5. Vaina protectora	69
2.2.6. Armaduras	69
2.2.7. Clases constructivas	71
2.2.8. Cables exteriores	71
2.2.9. Cables interiores	87
2.2.10. Cables especiales	91
2.3. Fabricación de la fibra óptica	94
2.3.1. Fabricación de la preforma	94
2.3.2. Estirado de la fibra	97
2.4. Cables de fibra óptica	99
2.4.1. Conductores huecos	99
2.4.2. Relleno	101
2.4.3. Conductores por grupos	102
2.4.4. Características técnicas del conductor hueco y por grupos	104
2.4.5. Conductores macizos	105
2.4.6. Características técnicas de conductores macizos	106
2.4.7. Conductores compactos	107
2.4.8. Características técnicas de los conductores compactos	108
2.4.9. Técnica de citas	108
2.5. Conversión electro-óptica de señales	111
2.5.1. Elementos emisores	114
2.5.1.1. Diodo emisor de luz (LED)	114
2.5.1.2. Diodo láser	115
2.5.2. Elementos receptores	119
2.5.2.1. Fotodiodo PIN	121
2.5.2.2. Fotodiodo de avalancha	122
2.6. Sistemas de transmisión	124

2.6.1. Transmisión analógica _____	125
2.6.2. Transmisión digital _____	127
Capítulo 3: Instalaciones de fibras ópticas _____	129
3.1. Planificación de una instalación de fibra óptica _____	130
3.1.1. Planificación correspondiente a la transmisión _____	130
3.1.1.1. Atenuación para conductores de fibra óptica monomodo y multimodo _____	130
3.1.1.2. Ancho de banda de conductores de fibra óptica con perfil gradual en instalaciones de cable _____	131
3.1.1.3. Dispersión de conductores de fibras ópticas monomodo en instalaciones de cables _____	132
3.1.2. Planificación desde el punto de vista mecánico _____	133
3.2. Empalmes de fibras ópticas _____	136
3.2.1. Empalme mecánico simple _____	137
3.2.2. Empalme térmico simple _____	138
3.3. Conectores de fibras ópticas _____	140
3.3.1. Acoplamiento con lentes _____	143
3.3.2. Acoplamiento frontal _____	144
3.4. Normativa relativa a las radiocomunicaciones a bordo _____	147
Capítulo 4: Redes de fibras ópticas _____	148
4.1. Topología y topografía de redes _____	149
4.1.1. Redes de interconexión total _____	151
4.1.2. Redes en estrella _____	152
4.1.3. Redes en bus _____	153
4.1.4. Redes en árbol _____	154
4.1.5. Redes en anillo _____	155
4.1.6. Redes en anillo modificadas _____	156
4.2. Hardware de redes _____	158
4.2.1. Redes de área local _____	158
4.2.2. Redes de área amplia _____	160
4.3. Tipos de interfaces para fibras ópticas _____	161

Capítulo 5: Aplicaciones de la fibra óptica _____	162
5.1. Ventajas y desventajas de la fibra óptica frente al cobre _____	165
5.2. Aplicaciones de la fibra óptica _____	170
5.3. Aplicaciones marinas _____	175
5.3.1. La fibra óptica submarina _____	183
5.3.1.1. Estructura del cable de fibra óptica submarina. _____	183
5.3.1.2. Instalación de cables de fibra óptica submarino _____	184
5.3.2. Redes NMEA _____	187
5.3.2.1. Características NMEA 2000 _____	188
5.3.2.2. Componentes de una red NMEA 200 _____	188
Conclusión _____	192
Anexos _____	193
Bibliografía _____	195

## Índice de figuras

Figura 1.1. Espectro electromagnético	20
Figura 1.2. Onda armónica plana, inmovilizada en $z_0$	22
Figura 1.3. Reflexión de la luz	23
Figura 1.4. Refracción de la luz	24
Figura 1.5. Reflexión total de la luz	26
Figura 1.6. Conducción de la luz en un conductor de fibra óptica	27
Figura 1.7. Los primeros diez modos de propagación de un conductor de fibra óptica	29
Figura 1.8. Relación entre la atenuación y el ancho de banda/distancia para varias fibras ópticas	31
Figura 1.9. Variación de la viscosidad de cuarzo en función de la temperatura	32
Figura 1.10. Perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica	36
Figura 1.11. Conductor de fibra óptica con perfil escalonado	37
Figura 1.12. Conductor de fibra óptica monomodo	39
Figura 1.13. Distribución radial del campo del modo fundamental $LP_{01}$	40
Figura 1.14. Distribución radial del campo de los modos $LP_{11}$ y $LP_{01}$	40
Figura 1.15. Conductor de fibra óptica con perfil gradual	41
Figura 1.16. Diagrama del espacio de las fases de un conductor de fibra óptica con perfil gradual	44
Figura 1.17. Diagrama en el espacio de las fases de un conductor de fibra óptica con perfil escalonado	44
Figura 1.18. Modos en el diagrama del espacio de las fases	45
Figura 1.19. Dispersión cromática en función de la longitud de onda	46
Figura 1.20. Estructuras de perfiles de conductores de fibras ópticas sin desplazamiento de la dispersión	47
Figura 1.21. Estructuras de perfiles de conductores de fibras ópticas con desplazamiento de la dispersión	47
Figura 1.22. Estructuras de perfiles de conductores de fibra óptica con dispersión plana	48
Figura 2.1. Diagrama de fases de un conductor de fibra óptica con perfil gradual y el 70% de excitación	52
Figura 2.2. Curva de atenuación de Rayleigh	53
Figura 2.3. Método de medición de la atenuación por transmisión de luz	55
Figura 2.4. Método de retrodispersión	56
Figura 2.5. Curva obtenida en una medición por retrodispersión	57
Figura 2.6. Función de transferencia de un conductor de fibra óptica	59

Figura 2.7. Protocolo de una medición del ancho de banda en el ámbito de tiempo	63
Figura 2.8. Cable con una capa (izda.) y con dos capas (dcha.)	65
Figura 2.9. Cable de capas con conductores por grupos (izda.) y cable por grupos (dcha.)	65
Figura 2.10. Cable ranurado	66
Figura 2.11. Trenzado S-Z	67
Figura 2.12. Coeficiente de atenuación en función de la frecuencia moduladora para cables de cobre sintéticos y coaxiales así como diversos cables de fibras ópticas	77
Figura 2.13. Cable exterior conformado totalmente por elementos dieléctricos con 8 fibras ópticas, en forma de conductores huecos	78
Figura 2.14. Cable de telecomunicaciones con vaina de capas de PE y 12 fibras ópticas en conductores huecos así como dos conductores de cobre	80
Figura 2.15. Cable de telecomunicaciones con vaina por capas de polietileno y hasta 60 fibras ópticas en conductores por grupos, así como un cuadrete de cobre	82
Figura 2.16. Cable de telecomunicaciones con vaina por capas de polietileno y hasta 60 fibras ópticas en conductores por grupos, así como un cuadrete de cobre	83
Figura 2.17. Cable con 2000 fibras ópticas	84
Figura 2.18. Cable interior con 1 fibra óptica	88
Figura 2.19. Cable interior con 6 fibras ópticas	89
Figura 2.20. Cable interior de 10 fibras ópticas (conductor por grupos)	89
Figura 2.21. Cable interior con 60 fibras ópticas (conductor por grupos)	90
Figura 2.22. Cables para aviones	92
Figura 2.23. Cables marinos de fibras ópticas para grandes distancias	93
Figura 2.24. Fabricación de preformas por deposición de vidrio a partir de la fase gaseosa	97
Figura 2.25. Esquema de estirado de la fibra	98
Figura 2.26. Posición del conductor de fibra óptica cuando no hay sollicitación	100
Figura 2.27. Posición del conductor de fibra óptica ante un alargamiento de cable	100
Figura 2.28. Posición del conductor de fibra óptica ante una contracción de cable	101
Figura 2.29. Relleno de conductor hueco	102
Figura 2.30. Conductor por grupos	103
Figura 2.31. Reserva de longitud en los maxigrupos conductores	103
Figura 2.32. Conductor macizo	106
Figura 2.33. Conductor compacto	107
Figura 2.34. Esquema básico de un cable de cintas	109
Figura 2.35. Configuración de un cable de cintas con 144 fibras ópticas	110
Figura 2.36. Principio funcional de un sistema de transmisión con conductor de fibra óptica	111

Figura 2.37. Interacciones electro-ópticas en un semiconductor _____	113
Figura 2.38. Curva característica potencia luminosa/corriente de un diodo láser _	116
Figura 2.39. Distribución espectral de la irradiación de un diodo emisor de luz (1) y de un diodo láser (2) _____	117
Figura 2.40. Distribución espacial de la radiación de un diodo emisor de luz (1) y de un diodo láser (2) _____	118
Figura 2.41. Diagrama de bloques de un módulo láser _____	119
Figura 2.42. Coeficiente de absorción de materiales semiconductores en función de la longitud de onda _____	120
Figura 2.43. Corte esquemático de un fotodiodo PIN _____	121
Figura 2.44. Corte esquemático de un fotodiodo de avalancha de silicio _____	122
Figura 2.45. Sensibilidad de un fotodiodo PIN comparado con uno de avalancha (PD) _____	123
Figura 2.46. Corte esquemático de un fotodiodo de avalancha InGaAs/InP _____	123
Figura 2.47. Componentes de transmisión básicos de la transmisión óptica sin regenerador intermedio (arriba) y con regenerador intermedio (abajo) _____	124
Figura 2.48. Modulación de amplitud _____	126
Figura 2.49. Modulación de frecuencia _____	127
Figura 3.1. Método de empalme mecánico simple _____	137
Figura 3.2. Equipo empalmador térmico simple _____	138
Figura 3.3. Método de ajuste del conductor de fibra óptica en sentido longitudinal _____	139
Figura 3.4. Módulo de empalme _____	140
Figura 3.5. Sección de un conector SMA _____	141
Figura 3.6. Principio de acoplamiento con lentes _____	143
Figura 3.7. Principio de acoplamiento frontal _____	143
Figura 3.8. Corrimiento de conductores de fibra óptica _____	144
Figura 3.9. Ángulo entre el eje longitudinal de ambas fibras ópticas _____	145
Figura 3.10. Distancia entre caras frontales de conductores de fibra óptica _____	145
Figura 3.11. Conector simple para conductores de fibra óptica con perfil escalonado y gradual _____	146
Figura 4.1. Topología en anillo _____	150
Figura 4.2. Topología en estrella _____	150
Figura 4.3. Red de interconexión total _____	152
Figura 4.4. Red en estrella _____	153
Figura 4.5. Red en bus _____	154
Figura 4.6. Red en árbol _____	155
Figura 4.7. Red en anillo _____	156

Figura 4.8. Red en anillo modificada. Emplea un anillo central de elementos concentradores a los que se conectan terminales en topología de estrella _____	157
Figura 4.9. Dos redes de difusión: a) De bus. b) De anillo _____	159
Figura 4.10. Relación entre hosts de LANs y subred _____	161
Figura 4.11. Anillo de fibra óptica con repetidores activos _____	162
Figura 4.12. Conexión de estrella pasiva en una red de fibra óptica _____	163
Figura 5.1. Mecanismo para aumento de campo visual _____	171
Figura 5.2. Endoscopio para cavidad profunda _____	173
Figura 5.3. Diversos puntos a examinar en un motor a reacción _____	174
Figura 5.4. Representación esquemática de un fotodetector _____	178
Figura 5.5. Antena náutica KNS de acceso a Internet _____	179
Figura 5.6. Antenas combo 2J6A _____	180
Figura 5.7. Serie Xtreme de Gost _____	181
Figura 5.8. Mobotix M15 _____	181
Figura 5.9. Gost minidome _____	182
Figura 5.10. Mobotix S15 _____	182
Figura 5.11. Partes de un cable de fibra óptica submarina _____	183
Figura 5.12. Instalación de un cable de fibra óptica submarina _____	185
Figura 5.13. Reparación de un cable de fibra óptica submarina _____	186
Figura 5.14. Esquema de interconexión NMEA 0183 y 2000 _____	187
Figura 5.15. Distribución de pines de conectores NMEA 2000 _____	188
Figura 5.16. Conector tipo T _____	189
Figura 5.17. Terminador macho (izda.) y terminador hembra (dcha.) _____	189
Figura 5.18. Terminador en línea _____	190
Figura 5.19. Cable de alimentación NMEA 2000 _____	190
Figura 5.20. Cable principal de caída de voltaje _____	190
Figura 5.21. Red NMEA a bordo _____	191



## Índice de tablas

Tabla 1. Características del vidrio de cuarzo _____	33
Tabla 2. Características ópticas y de transmisión de conductores de fibras ópticas monomodo y multimodo, a temperatura ambiente (según DIN VDE sección 3) ____	73
Tabla 3. Comparación de cables conductores de fibras ópticas y de cobre _____	75
Tabla 4. Denominación _____	79
Tabla 5. Colores que se aplican en las vainas de las fibras _____	81
Tabla 6. Estructura de la identificación de cables para exteriores según la norma DIN VDE 0888 sección 3 _____	86
Tabla 7. Estructura de la identificación de cables interiores según la norma DIN VDE 0888 sección 4 _____	91
Tabla 8. Valores tipo para los diámetros de conductores huecos y en grupos ____	104
Tabla 9. Valores característicos de diodos emisores de luz _____	112
Tabla 10. Valores característicos de diodos láser _____	118
Tabla 11. Valores característicos de elementos receptores _____	124
Tabla 12. Sistemas de transmisión para señales digitales _____	128
Tabla 13. Comparación entre cables trenzados, coaxiales y fibra óptica _____	166

### Introducción

El presente trabajo de Fin de Grado, de la rama de estudios de Ingeniería Radioelectrónica Naval de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de la Universidad de La Laguna, trata sobre las Comunicaciones mediante el uso de Fibra Óptica y sus aplicaciones náuticas, bien sea en las redes de comunicaciones, como puede ser la red que interconecta e integra diversos equipos llamada NMEA instaladas a bordo de los modernos buques, como en aplicaciones puntuales como es el Giroscopio, el Sónar o el Hidrófono, que convierte señales acústicas en señales ópticas, así como en las comunicaciones submarinas mediante cables de fibra óptica o cualquier otra que se precise a bordo, de forma que, gracias a estas redes de comunicaciones, logramos tener una cierta inmunidad o apantallamiento frente a las interferencias electromagnéticas de otros elementos, tanto externos como internos, que nos puedan afectar en la toma de decisiones y que son inherentes a los sistemas cableados tradicionales.

Las tecnologías están en continuo desarrollo, es por esto que los buques deben modernizar sus sistemas de comunicaciones y redes de transmisión de datos a bordo, para seguir de forma paralela al mercado tecnológico y para mejorar en seguridad de la vida humana en la mar.

En un buque los equipos o dispositivos están sometidos a un ambiente hostil, por lo que se fabrican con la mayor durabilidad posible, es por esto que los fabricantes, cada vez que la tecnología da un paso adelante, compatibilizan sus equipos con los nuevos avances tecnológicos pero manteniendo en funcionamiento los sistemas anteriores, empleando interfaces que los hacen compatibles con los nuevos sistemas mejorando así la integración.

Es por lo que este trabajo pretende abordar la tecnología de las comunicaciones mediante fibra óptica y su implementación a bordo de los buques.

### Abstract

The present Final Degree Project, of the branch of studies of Naval Radioelectronic Engineering of the Escuela Politécnica Superior de Ingeniería of the Universidad de La Laguna, deals with the Communications through the use of Fiber Optics and its nautical applications, either in the Communications networks, such as the network that interconnects and integrates various equipment called NMEA installed on board modern ships, as in specific applications such as Gyroscope, Sonar or Hydrophone, which converts acoustic signals into optical signals, as well as in submarine communications using fiber optic cables or any other that is needed on board, so that, thanks to these communications networks, we achieve some immunity or shielding against the electromagnetic interference of other elements, both external and internal, that can affect us in the decision making and that are inherent to the traditional cabling systems channels.

Technology is in continuous development, which is why ships must modernize their communication systems and data transmission networks on board, to continue in parallel to the technological market and to improve safety of life at sea.

In a ship, the equipment or devices are subjected to a hostile environment, so they are manufactured with the greatest possible durability, this is why manufacturers, whenever the technology takes a step forward, make their equipment compatible with new technological advances but keeping the previous systems in operation, using interfaces that make them compatible with new systems, thus improving integration.

It is for this reason that this project tries to approach the technology of the communications by optical fiber and its implementation on board of the ships.

### Antecedentes históricos

Desde la más remota antigüedad se ha utilizado la luz para la transmisión de información. Se utilizaba, por ejemplo, a la hora de usar fogatas para las señales. Hoy en día se puede encontrar este tipo de información en las banderas utilizadas en la marina, en faros, semáforos y las luces indicadoras en tableros de maquinaria. Desde hace siglos, el hombre ha pensado en la construcción de sistemas que utilizan pulsos luminosos para enviar señales a grandes distancias.

Así, Claude Chappe construyó en Francia alrededor de 1790 un sistema de telégrafo óptico, consistente en una cadena de torres con sistemas de señalización móviles. Mediante este sistema se podía transmitir información a una distancia de unos 200 km en apenas 15 minutos, siendo reemplazado por el telégrafo eléctrico.

En 1889, Alexander Graham Bell desarrolló el “photophon”, mediante el que se podían transmitir señales de voz con ayuda de la luz, pero debido a que no era viable a causa de las condiciones climáticas y la visibilidad, que ponían en entredicho la transmisión, no encontró aplicaciones prácticas.

En 1870, es decir, antes del descubrimiento de Bell, John Tyndall señaló la solución del problema demostrando que un chorro de agua era capaz de conducir la luz, basándose en el “Principio de la Reflexión Total”. Sin embargo, no fue hasta el año 1934 donde Norman R. French obtuvo una patente que cubría un sistema telefónico óptico, En esta, describía que las señales de voz eran transmitidas por una red de conductores ópticos (formados por varillas de vidrio u otro material similar) con un pequeño coeficiente de atenuación para la respectiva longitud de onda de servicio.

Pasaron 25 años hasta que este concepto fue llevado a la práctica. La fuente de luz seleccionada para ser usada como emisor fue el láser, desarrollado en 1958 por los premios Nobel Arthur Schawlow y Charles H. Townes. Fue utilizado por primera vez por Theodor H. Maiman en 1960.

En 1962 se descubrió que era posible reproducir un láser con materiales semiconductores. A su vez, se desarrollaron los elementos receptores: fotodiodos semiconductores.

Quedaba únicamente por encontrar un medio de transmisión adecuado que uniera ambos extremos.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Primeramente se propusieron conductores circulares huecos y espejados, con un complicado sistema de lentes. En Inglaterra en el año 1966, Charles R. Kao y George A. Hockham sugirieron utilizar fibras de vidrio. El problema residía en que, para que fuera viable, la máxima atenuación que debía presentar debía ser del orden de los 20 dB/km contra los aproximadamente 1000 dB/km que tenían en 1965.

Ya en los años cincuenta, la técnica media utilizaba fibras de vidrio para la transmisión directa de imágenes sobre distancias muy cortas.

En 1970, la empresa Corning Glass Works fabricó en los EE.UU. conductores de fibra óptica con valores de atenuación inferiores a los 20 dB/km y con una longitud de onda de 633 nm. En 1972 se lograron atenuaciones de 4 dB/km con conductores de fibra de perfil gradual. En la actualidad es posible obtener atenuaciones de 0,4 dB/km con longitudes de onda de 1300 nm en conductores de fibra monomodo. Simultáneamente, se mejoran considerablemente la sensibilidad, la potencia y la vida útil de los elementos receptores y transmisores. Además, debido a la adecuada técnica para los cables, conectores y empalmes de los conductores de fibra óptica, se logró introducir sin inconvenientes el nuevo medio de transmisión.

Los primeros conductores de fibra óptica para telefonía fueron utilizados en barcos de la armada de los EE.UU. en 1973.

El primer sistema de conductores de fibra óptica se ensayó en 1976 en la planta de la Western Electric de Atrlna (EE.UU). Un año más tarde, se efectuaron los primeros ensayos de campo; la Bell Systems con una instalación de 2,5 km en Chicago y la General Telephone, con una de 9km de Long Beach. La primera empresa que suministró en EE.UU. cables de la Siecor Corporation, empresa fundada por Siemens y Corning Glass Works.

Desde 1976, Siemens está utilizando en Múnich el tramo experimental de 2,1 km para la transmisión de señales telefónicas, de TV y de videoteléfono.

En 1977, Siemens instaló en Berlín el primer trayecto de fibra óptica para el Correo Federal Alemán. El CERN, de Ginebra (Suiza), desde 1978 tiene en servicio un cable de conductores de fibra óptica a prueba de radiaciones. A partir de esa época se comenzó a utilizar la nueva tecnología a nivel mundial. Estas instalaciones se hicieron con conductores de fibra multimodo. En el ínterin, con la técnica de cables de Siemens, se han instalado más de 1 000 000km de conductores de fibras ópticas en 24 países. En el futuro, se instalarán principalmente tramos con conductores de fibras ópticas monomodo.

# **Capítulo 1: Conceptos básicos de la fibra óptica**

## 1.1. Principios físicos de la fibra óptica

El estudio de la fibra óptica conlleva diversos principios físicos, necesarios para sentar las bases del estudio de la misma. A continuación se abordarán diversas materias relacionadas con este tema.

### 1.1.1. Espectro

La utilidad de las ondas magnéticas a la hora de propagar información se debe a que para propagarse no requieren necesariamente de un conductor metálico, sino que pueden hacerlo con elevada velocidad tanto en el vacío como en un material no conductor.

En la figura 1.1 observamos una reseña del espectro electromagnético y su utilización. La luz visible solamente ocupa la reducida zona desde los 230 nm (violeta) hasta los 780 nm (roja). A la misma se le añade la zona de radiación ultravioleta, con longitudes de onda menores y la zona de radiación infrarroja, con longitudes de onda mayores.

En las telecomunicaciones por fibra óptica se utilizan las longitudes de onda del infrarrojo cercano, es decir, de 800 a 1600 nm, siendo los valores preferidos los de 850, 1300 y 1550.

$$c_0 = 299792,456 \frac{km}{s}$$

Para la propagación en el aire se puede tomar con suficiente aproximación el valor redondo de:

$$c_0 = 300000 \frac{km}{s} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} = 3 \cdot 10^5 \frac{km}{s}$$

## Principios físicos de la fibra óptica

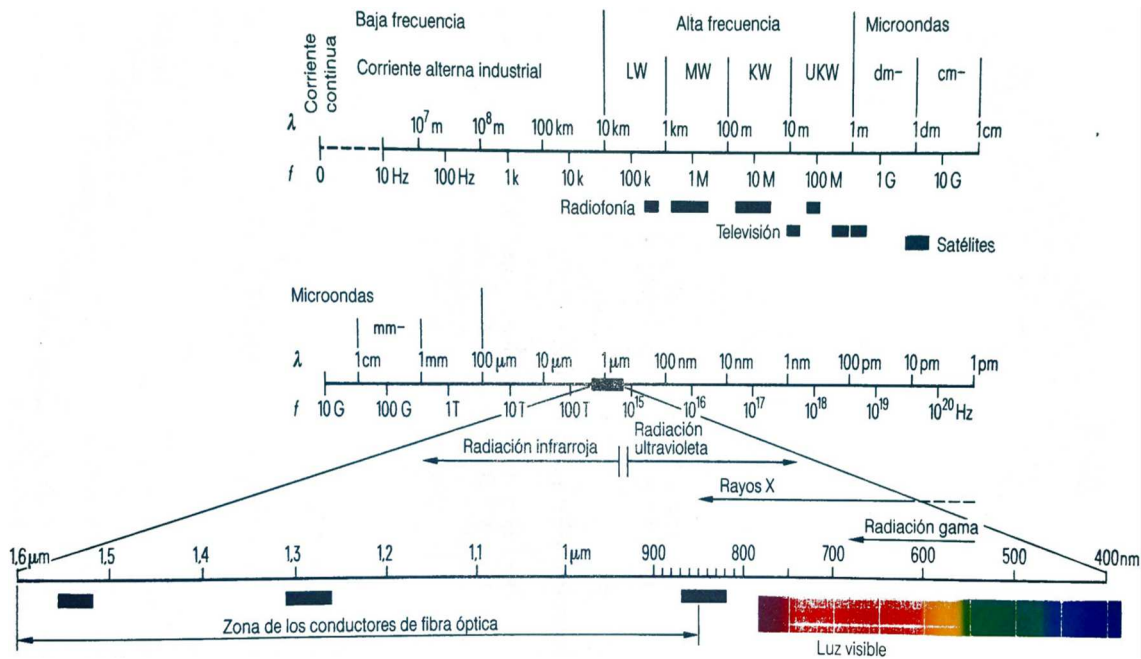


Figura 1.1. Espectro electromagnético

### 1.1.2. Conceptos básicos de las ondas

Como concepto general se considera a una onda como la propagación de un estado o una excitación en una sustancia, sin que ello implique la necesidad de transportar la propia masa o materia de esa sustancia. En el caso de la onda luminosa, el estado es el campo electromagnético que se propaga en una sustancia transparente, el medio óptico.

La forma más simple de describir la variación de esta onda en el tiempo y el espacio es por medio de una función senoidal. Así, para el valor instantáneo  $a$  de una onda plana que se propaga según el eje  $z$  vale:

$$a = A \sin(\omega t - kz) = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right)$$

$a$	Valor instantáneo de la onda plana	$t$	Tiempo, en s
$A$	Amplitud	$k$	Índice de longitud de onda
$\omega$	Velocidad angular, en $s^{-1}$	$z$	Distancia sobre el eje $z$ , en m
$T$	Período, en s	$\lambda$	Longitud de onda, en m



## Principios físicos de la fibra óptica

Con la amplitud  $A$  de la onda se describe la mayor elongación fuera de su posición de reposo.

El valor entre paréntesis ( $\omega t - kz$ ) se denomina ángulo de fase de la onda o en forma de abreviada fase de onda. Este ángulo de fase  $\varphi$  se mide en radianes (rad).

Para ilustrar lo anterior en la figura 1.2 se representa una onda plana detenida en  $z = z_0$  y como función del tiempo  $t$ . Se observa que los puntos oscilantes  $a_1$  y  $a_3$  hallan en la misma fase de oscilación con esa diferencia temporal de  $2\pi$ . En cambio, el punto  $a_2$ , si bien tiene la misma elongación, se halla en una fase diferente.

Al valor  $\omega$  se lo denomina *velocidad angular* y vale  $2\pi$  veces la frecuencia  $f$ , con la cual se indica el número de oscilaciones por unidad de tiempo, es decir:

$$\omega = 2\pi f$$

$f$  Frecuencia en Hz

El tiempo en el que transcurre una oscilación completa se denomina *período  $T$  de la oscilación*. La frecuencia es inversamente proporcional al período  $T$ , es decir:

$$f = \frac{1}{T}$$

$T$  Período, en s

Con  $k$  se designa el *índice de la longitud de onda* que es igual al valor absoluto del vector de onda  $k$  que indica la dirección de la propagación de la onda. Este índice indica el desfase de la onda por unidad de longitud y por lo tanto es inversamente proporcional, con el factor  $2\pi$ , a la longitud de onda.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

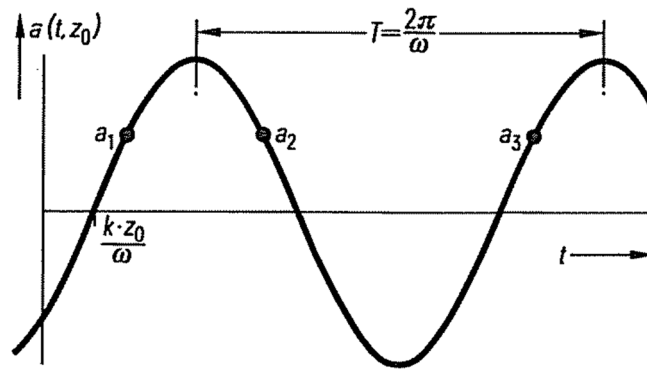


Figura 1.2. Onda armónica plana, inmobilizada en  $z_0$

### 1.1.3. Reflexión

Cuando una onda luminosa incide sobre la superficie de separación entre dos sustancias, una fracción de la misma se refleja. La proporción de la luz reflejada es en función del ángulo  $\alpha_1$  que forma el rayo de luz incidente con la perpendicular a la superficie de separación. Por rayo de luz entendemos la trayectoria dentro de la cual se extiende la energía luminosa. El rayo luminoso reflejado y el ángulo  $\alpha_2$  que éste forma con la perpendicular a la superficie de separación de las sustancias se observan en la figura 1.3.

El rayo reflejado:

- Se mantiene en el plano formado por el rayo luminoso incidente y la perpendicular a la superficie de separación de las sustancias.
- Se halla en el semiplano opuesto (en relación con el rayo luminoso incidente a la perpendicular) a la superficie de separación de las sustancias.
- Tiene los ángulos de incidencia y refracción iguales ( $\alpha_1 = \alpha_2$ )

## Principios físicos de la fibra óptica

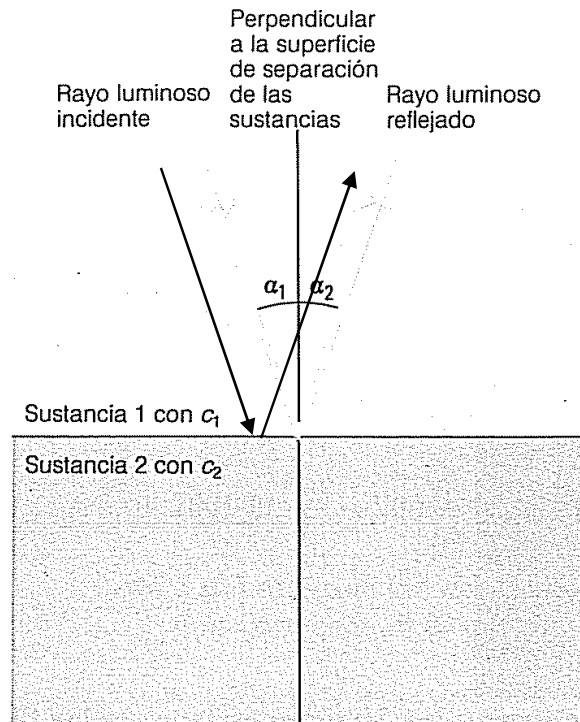


Figura 1.3. Reflexión de la luz

### 1.1.4. Refracción

Si el rayo luminoso incide con un ángulo  $\alpha$  de modo oblicuo desde una sustancia ópticamente menos densa a otra más densa, su dirección de propagación se quiebra y su trayectoria continúa en la segunda sustancia con un ángulo de refracción  $\beta$ .

Para una sustancia isotrópica, o sea un medio o material que presenta idénticas propiedades en todas sus direcciones, vale la *Ley de Refracción de Snell*:

El cociente entre el seno del *ángulo de incidencia*  $\alpha$  y el seno del *ángulo de refracción*  $\beta$  es constante e igual a la relación de las velocidades de la luz  $c_1/c_2$  en ambas sustancias (figura 1.4).

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

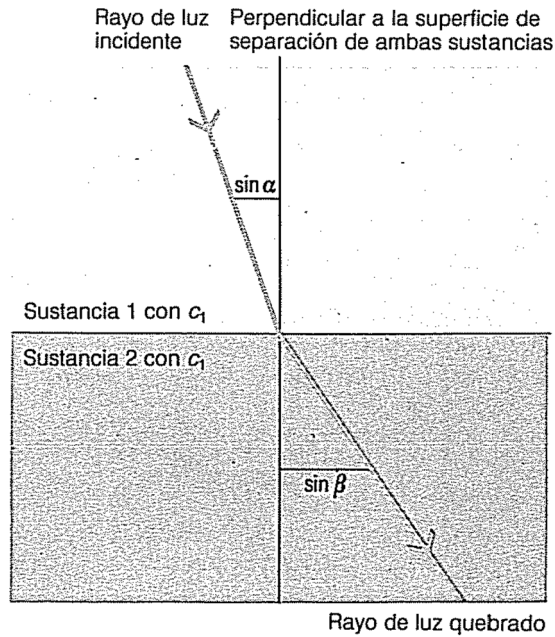


Figura 1.4. Refracción de la luz

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

- $\alpha$     Ángulo de incidencia
- $\beta$     Ángulo de refracción
- $c_1$     Velocidad de la luz en la sustancia 1
- $c_2$     Velocidad de la luz en la sustancia 2

De dos sustancias transparentes, se considera más densa a aquella que posee la menor velocidad de propagación de la luz.

Considerando la transición desde el vacío ( $\approx$  aire) en el cual la velocidad de la luz es  $c_0$ , a una sustancia con velocidad de la luz  $c$ , se obtiene:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{c_1}{c_2} = n$$

La relación entre la velocidad de la luz en el vacío  $c_0$  y la de la sustancia  $c$ , se denomina *índice de refracción*  $n$  (o más exactamente *índice de refracción entre dos fases*  $n$ ) de esa sustancia y es una constante material de la misma. El índice de refracción del vacío ( $\approx$  aire)  $n_0$  es igual a 1.

## Principios físicos de la fibra óptica

Para dos sustancias diferentes con los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  y las correspondientes velocidades de la luz  $c_1$  y  $c_2$  vale:

$$c_1 = \frac{c_0}{n_1} \quad \text{y} \quad c_2 = \frac{c_0}{n_2}$$

De donde se obtiene otra expresión de la ley de Refracción de Snell:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{n_1}{n_2}$$

La relación del seno del ángulo de incidencia al seno del ángulo de refracción es inversamente proporcional a la respectiva relación de los índices de refracción.

El índice de refracción  $n$  de una sustancia depende fundamentalmente de la correspondiente longitud de onda de la luz; en el caso del vidrio de cuarzo y las longitudes de onda del infrarrojo, de gran importancia en las comunicaciones ópticas, este índice decrece continuamente cuando se incrementa la longitud de onda.

### 1.1.5. Reflexión total

Cuando el rayo luminoso que incide con el ángulo  $\alpha$  cada vez mayor desde una sustancia ópticamente más densa con un índice de refracción  $n_1$  sobre la superficie de separación con una sustancia ópticamente menos densa con un índice de refracción  $n_2$  el ángulo de refracción  $\beta$ , al llegar a determinado ángulo de incidencia  $\alpha_0$  puede llegar a ser igual a  $90^\circ$ .

El rayo luminoso que se propaga paralelamente a la superficie de separación de ambas sustancias y el ángulo de incidencia  $\alpha_0$  se denomina *ángulo límite* de las dos sustancias.

Para el ángulo límite  $\alpha_0$ , vale la relación:

$$\text{sen } \alpha_0 = \frac{n_1}{n_2}$$

Es decir, el ángulo límite es función de la relación de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  de ambas sustancias.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Todos los rayos que inciden con un ángulo  $\alpha_0$  mayor que el ángulo límite son reflejados en la superficie que separa ambas sustancias, o sea que no se propagan en la sustancia menos densa sino en la más densa.

A este fenómeno se le conoce como *reflexión total*.

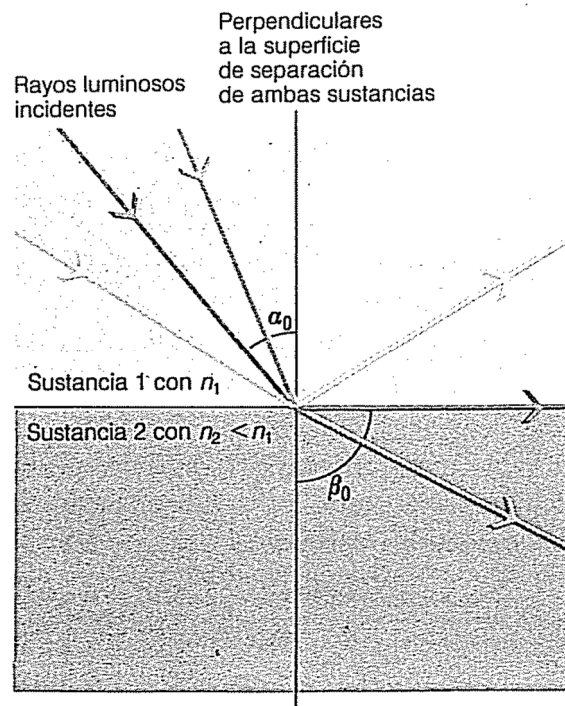


Figura 1.5. Reflexión total de la luz

La reflexión total puede ocurrir únicamente cuando un rayo luminoso incide desde una sustancia ópticamente más densa sobre otra menos densa y nunca se da en el caso inverso.

### 1.1.6. Apertura numérica

En los conductores de fibra óptica se utiliza el efecto de la reflexión total para conducir el rayo luminoso debido a que estos conductores poseen en su centro un "núcleo" formado por un vidrio con un índice de refracción  $n_1$  y, envolviéndolo, un "recubrimiento" formado por un vidrio con un índice de refracción  $n_2$ . El valor de  $n_1$  es algo mayor que el de  $n_2$  (figura 1.6).

## Principios físicos de la fibra óptica

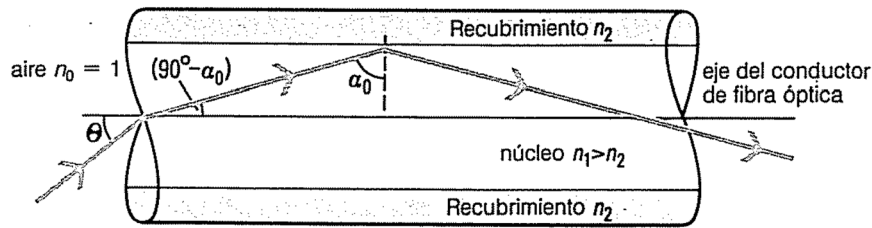


Figura 1.6. Conducción de la luz en un conductor de fibra óptica

$$\text{sen } \alpha_0 = n_0 = \frac{n_1}{n_2}$$

Analizando la expresión se concluye que todos los rayos luminosos que incidan con un ángulo menor que  $(90^\circ - \alpha_0)$  con respecto al eje de fibra óptica son conducidos en el núcleo.

Para acoplar al núcleo un rayo luminoso desde el exterior de la fibra (aire con índice de refracción  $n_0 = 1$ ), el ángulo (entre el rayo luminoso y el eje de la fibra) se rige de acuerdo a la ley de refracción:

$$\frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } (90^\circ - \alpha_0)} = \frac{n_1}{n_0}$$

$$\text{sen } \theta = n_1 \cos \alpha_0 = n_1 \sqrt{1 - \text{sen}^2 \alpha_0}$$

Considerando la condición del  $\alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}$  ángulo límite se obtiene la expresión:

$$\text{sen } \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

El máximo ángulo de acoplamiento  $\theta_{max}$  se denomina *ángulo de aceptación* del conductor de fibra óptica y es únicamente función de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ . Al seno del ángulo de aceptación se lo denomina *apertura numérica (AN)* del conductor de fibra óptica:

$$AN = \text{sen } \theta_{max}$$

Este valor es de gran importancia para el acoplamiento de la luz a los conductores de fibra óptica.

### 1.1.7. Propagación de la luz en el conductor

Las leyes de la óptica permiten describir la reflexión total de la luz en la superficie que separa al núcleo del recubrimiento en un conductor de fibra óptica. Para ello se considera básicamente que la luz se propaga en forma de rayos rectilíneos. Para efectuar un análisis más detallado de las diferentes posibilidades de propagación de la luz dentro del núcleo, es necesario considerar los fenómenos de la óptica ondulatoria dado que el diámetro del núcleo de un conductor de fibra óptica se halla típicamente entre los 10 y 100  $\mu\text{m}$ , siendo solamente un poco mayor que la longitud de onda de la luz transmitida por ese núcleo (aprox. 1  $\mu\text{m}$ ). Debido a esta relación de dimensiones ocurren fenómenos de interferencia que sólo se pueden describir con ayuda de la óptica ondulatoria.

En general se denomina *interferencia* a la superposición de dos o más ondas y su combinación para formar una onda única. Una manifestación típica de la interferencia de dos ondas se obtiene cuando ambas tienen la misma longitud de onda y existe una diferencia constante de fase entre ambas en el tiempo. A este tipo de ondas se le llama *ondas coherentes*. Si en un determinado punto del espacio ambas ondas presentan una diferencia de fase igual a un múltiplo entero de  $\lambda$  (longitud de onda), se produce una *suma* de sus amplitudes. Si la diferencia es un múltiplo entero de  $\lambda/2$  (media longitud de onda), una *resta*. Si ambas son iguales, se puede producir una *anulación* local de las ondas.

Si se utilizan dos fuentes luminosas (por ejemplo dos lámparas incandescentes) y se superponen sus luces no se observa ningún tipo de interferencia debido a que la luz es incoherente. La causa se debe al proceso de emisión de luz del cuerpo luminoso (en este caso, el filamento de las bombillas). En virtud de fenómenos espontáneos aleatorios, cada uno de los átomos del filamento emite destellos luminosos, es decir, cortos trenes de ondas con una duración aproximada de  $10^{-8}\text{s}$ . Considerando que en el aire la velocidad de la luz es de  $3 \times 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , estos trenes de ondas tienen una longitud de aproximadamente 3 metros, que se denomina *longitud de coherencia*. La superposición de los trenes de ondas de esta longitud es totalmente irregular y únicamente ocasiona la iluminación general del ambiente.

Para la transmisión de luz con conductores de fibra óptica fue necesario encontrar *fuentes luminosas coherentes*, es decir, las que emiten una luz lo más coherente posible.



## Principios físicos de la fibra óptica

Por ello, el ángulo espectral de un emisor debería ser lo más pequeño posible. A diferencia de diodos luminosos con un ancho espectral de líneas  $\geq 40nm$  se brindan especialmente los láseres que en virtud de una emisión de luz forzada dan la posibilidad de contar con una diferencia de fases constante e igual a la longitud de onda. Con ello también aparecen interferencias en el conductor de fibra óptica, las cuales se reconocen porque la luz se propaga en el núcleo únicamente en determinados ángulos que corresponden a direcciones en las cuales las ondas asociadas al superponerse se refuerzan (interferencia constructiva). Las ondas luminosas permitidas susceptibles de propagarse en un conductor de fibra óptica se denominan *modos* (ondas naturales o fundamentales).

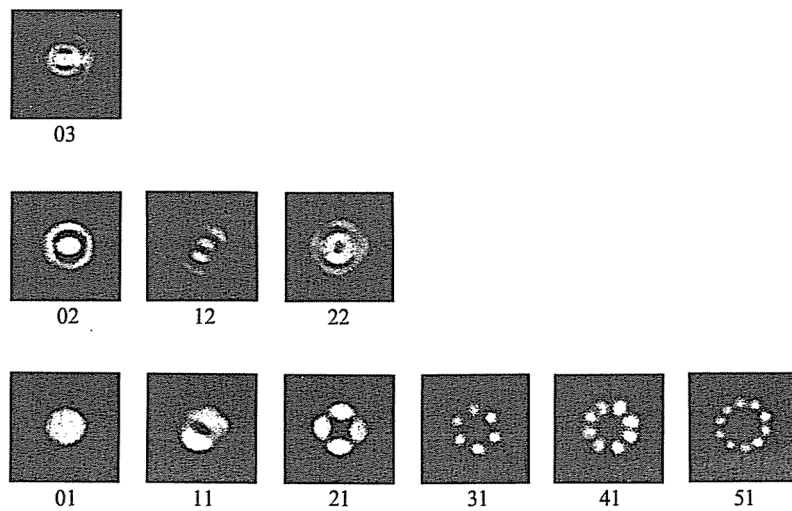


Figura 1.7. Los primeros diez modos de propagación de un conductor de fibra óptica

### 1.2. Principios químicos de la fibra óptica

Las propiedades de propagación de la luz de la fibra óptica dependerán, entre otros, del material con el que estén fabricadas las mismas. A continuación se explicarán los distintos tipos de fibra, así como las distintas propiedades de cada uno.

#### 1.2.1. Fibra óptica de plástico y de vidrio

Los núcleos de los cables de fibra óptica pueden ser de vidrio o plástico (polímero). La fibra óptica con núcleo de plástico es más flexible, se puede doblar mejor y los conectores pueden adaptarse mejor sin necesidad de pulir los extremos o de utilizar resinas epóxicas. La fibra óptica de plástico tiene mayor diámetro en el núcleo, lo que hace a los conectores menos sensibles a los errores de alineamiento y da lugar a unas pérdidas de acoplamiento menores. El cable resulta también menos sensible a las impurezas de fabricación. Un cable que utiliza núcleo de plástico no precisa de elementos adicionales para alcanzar la rigidez que necesita, como tiras de Kevlar, lo que da lugar a un cable más barato que los de núcleos de vidrio. La desventaja de los cables con núcleo de plástico es que presentan una atenuación mucho más alta (cientos de dB/kilómetro) frente a los cables con núcleo de vidrio, lo que limita su uso a los enlaces locales de datos de hasta unos 50 metros.

La fibra óptica con núcleo de vidrio es, actualmente, la elección natural para los enlaces de datos de alta velocidad de larga y media distancia. En estas aplicaciones es importante maximizar el ancho de banda y la distancia entre repetidores para regenerar la señal. Por esta razón, la atenuación por kilómetro y la relación entre el ancho de banda y la distancia (expresada en MHz/km) son factores críticos. La figura 1.8 ilustra la relación entre la atenuación y el ancho de banda/distancia para los tipos más comunes de fibras ópticas.

## Principios químicos de la fibra óptica

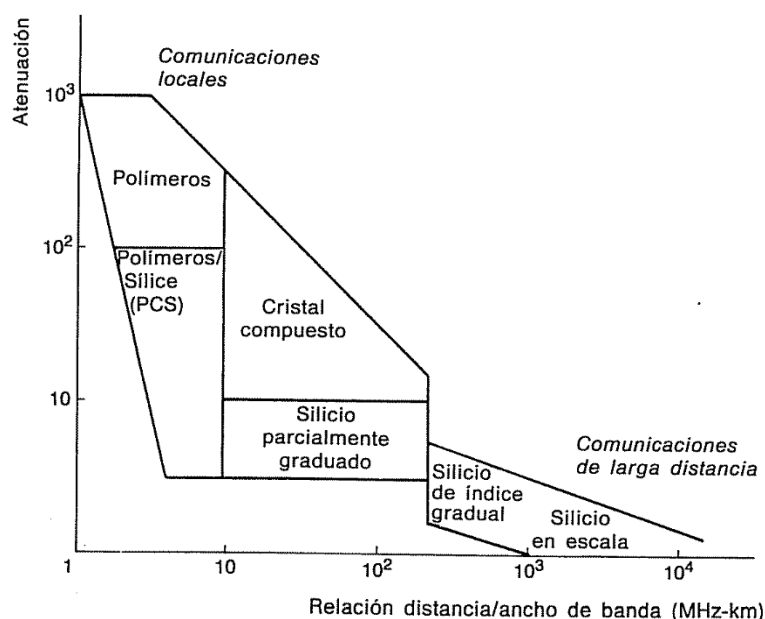


Figura 1.8. Relación entre la atenuación y el ancho de banda/distancia para varias fibras ópticas

### 1.2.2. Fibra óptica de vidrio de cuarzo

Aproximadamente la mitad (en peso) de la corteza terrestre sólida está compuesta por oxígeno y, una cuarta parte, por silicio. La abundancia de ambos elementos se debe a que la corteza terrestre está formada principalmente por cuarzo y sus compuestos con óxidos metálicos (silicatos). El cuarzo, que en su carácter de compuesto químico se denomina *dióxido de silicio*  $\text{SiO}_2$  aparece por lo general en la forma de cuarcita en la arena. Se forma en el transcurso de los siglos por la acción disgregadora de los agentes atmosféricos.

En su forma más pura, el cuarzo cristalino aparece como cristal de roca claro como el agua. Sus propiedades ópticas y mecánicas varían dependiendo de las direcciones de sus cristales.

En la actualidad se elabora de forma sintética a partir de un núcleo cristalino.

En contraposición con el cuarzo, el vidrio de cuarzo resulta de una masa fundida a partir de dióxido de silicio solidificado no cristalino, con apariencia sólida debido a su alta viscosidad. No posee punto de fusión, pero a temperaturas elevadas se ablanda progresivamente, se vuelve pastoso y se evapora sin pasar por estado líquido.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

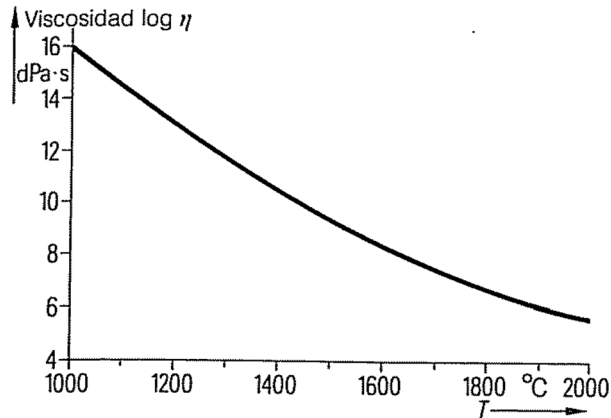


Figura 1.9. Variación de la viscosidad de cuarzo en función de la temperatura

### - Fabricación.

En virtud del agregado de estos óxidos al dióxido de silicio de alta pureza, se modifica no sólo el índice de refracción sino también otras propiedades como, por ejemplo, la dilatación lineal frente a variaciones de temperatura del vidrio de cuarzo. Es también de gran importancia el hecho que, por incorporación de moléculas extrañas se incrementa la dispersión de la luz y, por lo tanto, la atenuación de la que se propaga por el conductor.

Otro motivo por el cual se atenúa la luz que recorre el vidrio de cuarzo resulta de la *absorción* por los metales de transición Fe, Cu, Co, Cr, Ni, Mn y por el agua en forma de iones de OH. Sólo en muy pequeñas contaminaciones del vidrio de cuarzo con estas impurezas metálicas o con iones de OH alcanzan para producir elevadas pérdidas de luz. La concentración de estas impurezas se indica en ppm (partes por millón) o en ppb (partes por billón =  $10^{-9}$ ), significa que tiene una parte de impureza por cada  $10^6$  ó  $10^9$  partes de la sustancia básica. La absorción de estas impurezas es muy marcada. Por ejemplo, 1 ppm de Cu provoca una atenuación de varios dB/km a 950 nm; 1,7 dB/km a 1240 nm y 35 dB/km a 1390 nm. De lo anterior se desprende además que, según la impureza, la atenuación puede ser importante a determinada longitud de onda, en razón de lo cual se habla de bandas de absorción en la correspondiente gama de longitudes de onda.

## Principios químicos de la fibra óptica

Si en lugar de dióxido de silicio de alta pureza como material de partida para la fabricación de conductores de fibra óptica se usaran *vidrios de varios componentes* como por ejemplo vidrio de silicato alcalino de plomo o borsilicato sódico, se obtendrán elevadas atenuaciones en función de las impurezas.

El vidrio común está compuesto por óxidos adicionales que lo hacen mucho menos transparente a la luz; en cambio, tiene una serie de ventajas mecánicas y técnicas en lo relativo a su fabricación.

### - Propiedades del material

El vidrio de cuarzo es una sustancia isotrópica; quiere decir que sus propiedades físicas son las mismas independientemente de la dirección. Muy conocido es su comportamiento frente a variaciones rápidas de temperatura. Teniendo en cuenta su *coeficiente de dilatación lineal* extremadamente pequeño, presenta una extraordinaria estabilidad frente a los cambios de temperatura.

En la tabla 1 se indican una serie de características típicas del vidrio de cuarzo.

Tabla 1. Características del vidrio de cuarzo

Denominación	Unidad	Valor
Densidad $\gamma$	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	2,20
Módulo de elasticidad $E$	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	72 500
Módulo de torsión $G$	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	30 000
Coeficiente de dilatación lineal (por variaciones de temperatura) $\alpha$	$\text{K}^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$

### 1.3. Perfiles de fibra óptica

Si en un conductor de fibra óptica se considera al índice de refracción  $n$  en función del radio  $r$ , se tiene el perfil del índice de refracción de este conductor. Con el mismo se describe la variación radial del índice de refracción del conductor de fibra óptica desde el eje del núcleo hacia la periferia del recubrimiento.

$$n = n(r)$$

La propagación de los modos en el conductor de fibra óptica depende de la forma de este perfil de índices de refracción (figura 1.10)

En la práctica interesan los perfiles exponenciales; bajo esta denominación se entienden aquellos perfiles de índices de refracción que presentan una variación que es función exponencial del radio:

$$n^2(r) = n_1^2 \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left( \frac{r}{a} \right)^g \right] \quad \text{Para } r > a \text{ en el núcleo}$$

$$n^2(r) = n_2^2 = cte \quad \text{Para } r \geq a \text{ en el recubrimiento}$$

$n_1$  Índice de refracción en el eje conductor de fibra óptica ( $r = 0$ )

$\Delta$  Diferencia normalizada de índices de refracción

$r$  Distancia del eje del conductor de fibra óptica, en  $\mu\text{m}$

$a$  Radio del núcleo, en  $\mu\text{m}$

$g$  Exponente, llamado también *exponente del perfil*

$n_2$  Índice de refracción del recubrimiento

La diferencia normalizada de índices de refracción se relaciona con la apertura numérica  $AN$  o los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  por la ecuación:

$$\Delta = \frac{AN^2}{2 \cdot n_1^2} = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2}$$

Merecen ser mencionados los siguientes casos especiales (figura 1.10)

$g = 1$ : Perfil triangular

$g = 2$ : Perfil parabólico

## Perfiles de fibra óptica

$g \rightarrow \infty$ : Perfil escalonado (caso límite).

Únicamente en el último caso (el perfil escalonado) el índice de refracción es constante en el núcleo:  $n(r) = n_1 = cte$ . En todos los demás perfiles, el índice de refracción  $n(r)$  en el núcleo se incrementa en forma gradual desde el valor  $n_2$  en el recubrimiento hasta el  $n_1$  en el eje conductor de la fibra óptica.

En virtud de este tipo de variación, se denomina a estos perfiles también *perfiles graduales*. Esta denominación se ha adoptado específicamente para el perfil parabólico (con  $g = 2$ ) ya que los conductores de fibra óptica con esta clase de perfil presentan muy buenas características técnicas para la conducción de la luz

Otro valor importante en la descripción del conductor de fibra óptica son los así llamados *parámetros V* o *parámetros estructurales V*. Son función del radio  $a$ , de la apertura numérica  $AN$  del núcleo y de la longitud de onda o del índice de longitud de onda  $k$  de la luz. El parámetro  $V$  es adimensional:

$$V = 2\pi \cdot \frac{a}{\lambda} \cdot AN = k \cdot a \cdot AN$$

$a$  Radio del núcleo

$\lambda$  Longitud de onda

$AN$  Apertura numérica

$k$  Índice de longitud de onda

El número  $N$  de los modos conducidos en el núcleo depende de este parámetro con aproximadamente la siguiente relación para un perfil exponencial de exponente  $g$ :

$$N \approx \frac{V^2}{2} \cdot \frac{g}{g+2}$$

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

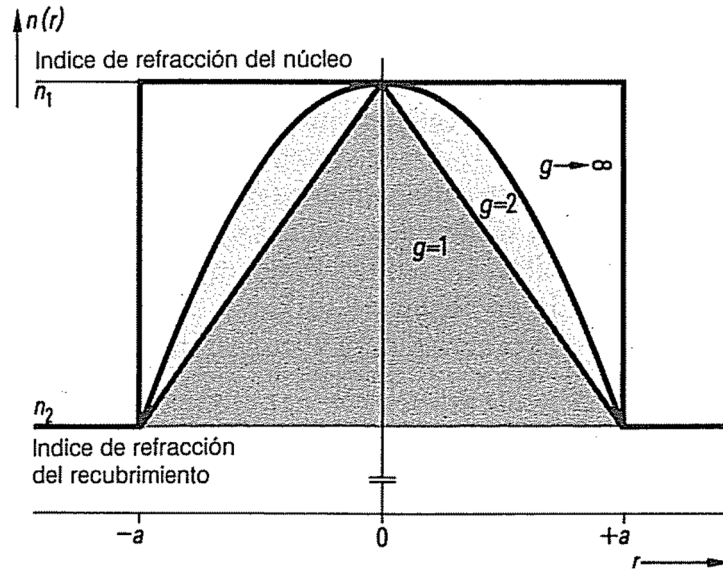


Figura 1.10. Perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica

El número de modos de perfil escalonado ( $g \rightarrow \infty$ ) es aproximadamente:

$$N \approx \frac{V^2}{2}$$

El número de modos del perfil gradual ( $g = 2$ ) es aproximadamente:

$$N \approx \frac{V^2}{4}$$

### 1.3.1. Perfil escalonado

Para que la luz sea conducida en el núcleo de un conductor de fibra óptica con perfil escalonado, el índice de refracción del núcleo  $n_1$  debe ser algo mayor que el recubrimiento  $n_2$ , teniendo en cuenta la reflexión total en la superficie de separación de ambos vidrios. Si el valor del índice de refracción  $n_1$  se mantiene constante en toda la sección del núcleo, se habla de forma de escalón a partir del valor que tiene en el recubrimiento hasta el que posee el núcleo y de allí permanece constante. En la figura 1.11 se representa un conductor de fibra óptica con su perfil escalonado de los índices de refracción y, además, el recorrido de un rayo luminoso con sus correspondientes ángulos.

Un conductor con estas características se denomina *conductor de fibra óptica con perfil escalonado* o fibra escalonada. La fabricación de este conductor es sencilla; pero en la actualidad ya no se lo utiliza. Para describir mejor la propagación de la luz en un conductor de fibra óptica se ha elegido el ejemplo de la figura 1.11.



## Perfiles de fibra óptica

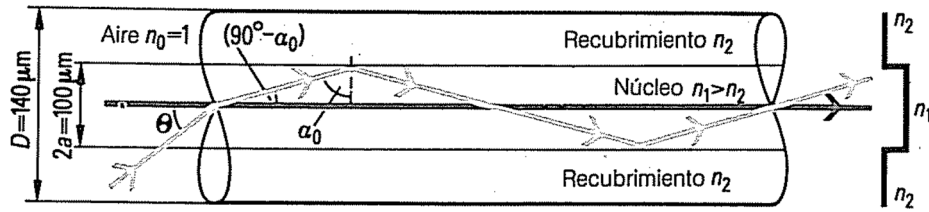


Figura 1.11. Conductor de fibra óptica con perfil escalonado

- Dimensiones típicas de un conductor de fibra óptica multimodo con perfil escalonado

Diámetro del núcleo	$2a$	100 $\mu\text{m}$
Diámetro del recubrimiento	$D$	140 $\mu\text{m}$
Índice de refracción del núcleo	$n_1$	1,48
Índice de refracción del recubrimiento	$n_2$	1,46

Para este ejemplo, el ángulo límite de reflexión total  $\alpha_0$ , o sea el menor ángulo con respecto a la normal al eje, bajo el cual el rayo luminoso incidente es guiado por el núcleo sin refractarse al recubrimiento, es:

$$\text{sen } \alpha_0 = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1,46}{1,48} \approx 0,9865$$

$$\alpha_0 = 80,6^\circ$$

Se propagarán por el núcleo todos los rayos luminosos que forman con el eje del conductor de fibra óptica un ángulo menor o igual a  $(90^\circ - \alpha_0) = 9,4^\circ$ .

Se debe tener en cuenta la Ley de Refracción cuando se acople al núcleo un rayo luminoso desde el exterior (aire con  $n_0 = 1$ ) pues únicamente penetran a este núcleo los rayos luminosos que se hallen dentro de un determinado ángulo de aceptación. Para este ejemplo se tienen:

$$\text{sen } \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,48^2 - 1,46^2} \approx 0,242;$$

$$\theta \approx 14,0^\circ$$

El seno del ángulo de aceptación se define como apertura numérica  $AN$ :

$$AN = \text{sen } \theta \approx 0,242$$

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

La diferencia normalizada de índices de refracción  $\Delta$  para este conductor de fibra óptica con perfil escalonado:

$$\Delta = \frac{AN^2}{2 \cdot n_1^2} \approx \frac{0,242^2}{2 \cdot 1,48^2} \approx 0,0134 = 1,34\%$$

El parámetro  $V$  calculado para este conductor de fibra óptica con perfil escalonado y con un diámetro del núcleo  $2a = 100\mu\text{m}$  para una longitud de onda  $\lambda = 850 \text{ nm}$ , es:

$$V = \pi \cdot \frac{2a}{\lambda} \cdot AN = \pi \cdot \frac{100 \mu\text{m}}{0,85 \mu\text{m}} \cdot 0,242 \approx 89,4$$

El número  $N$  de modos para este conductor es:

$$N \approx \frac{V^2}{2} = \frac{89,4^2}{2} \approx 4000$$

Un conductor con estas características es un conductor de fibras ópticas multimodo. Un impulso luminoso que se propaga en este conductor, está formado por múltiples impulsos luminosos parciales que son conducidos en cada uno de los modos del conductor.

En el extremo inicial del conductor de fibra óptica, cada uno de estos modos es excitado con un ángulo de acoplamiento diferente y conducido dentro del núcleo con otra trayectoria óptica.

En consecuencia, cada modo recorre un camino diferente y llega al otro extremo del conductor en distintos tiempos. La relación entre los tiempos de recorrido máximo y mínimo es directamente proporcional a la relación entre los índices de refracción de recubrimiento y del núcleo o sea que está en el orden de magnitud de la diferencia de índices de refracción  $\Delta$  (más del 1%)

- Dimensiones típicas de un conductor de fibra óptica monomodo

Diámetro del campo	$2w_0$	10 $\mu\text{m}$
Diámetro del recubrimiento	$D$	125 $\mu\text{m}$
Índice de refracción del núcleo	$n_1$	1,46
Diferencia de Índices de refracción	$\Delta$	0,003

## Perfiles de fibra óptica

En la figura 1.12 se presenta la trayectoria de un rayo luminoso y el perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica monomodo.

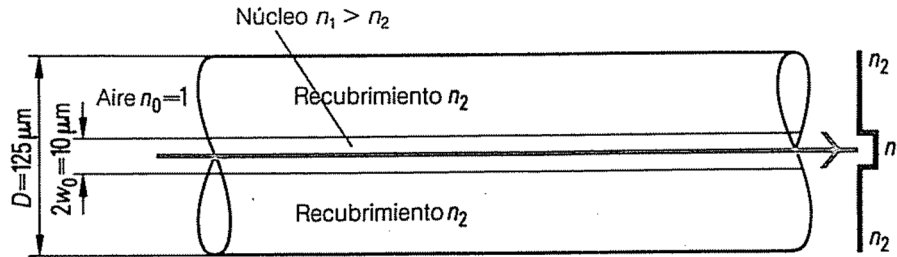


Figura 1.12. Conductor de fibra óptica monomodo

Para un conductor de fibra óptica monomodo típico se obtiene la apertura numérica  $AN$  con:

$$AN = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta} \approx 1,46 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,003} \approx 0,113$$

Con un ángulo de aceptación de:

$$\text{sen } \theta = AN \approx 0,113$$

$$\theta \approx 6,5^\circ$$

Se debe tener en cuenta que en el conductor de fibra óptica monomodo son, comparando con el multimodo y de perfil escalonado, considerablemente menores no solo en el diámetro del núcleo sino también en la apertura numérica y, por lo tanto el ángulo de aceptación, por lo cual el acoplamiento de la luz en aquel resulta relativamente difícil.

Para un conductor de fibra óptica monomodo típico se obtiene una longitud de onda límite (por arriba de la cual solo se propaga el modo fundamental y para la cual es parámetro  $V$  es  $V_c = 2,405$ ).

$$\lambda_c = \pi \cdot \frac{2a}{V_c} \cdot AN = \pi \cdot \frac{8,5 \mu m}{2,405} \cdot 0,113 \approx 1,255 \mu m = 1255 \text{ nm}$$

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

A esta longitud de onda  $\lambda_c$ , el siguiente modo de orden superior  $LP_{11}$  ya no es capaz de propagarse (figura 1.14). A longitudes de onda mayores subsiste únicamente el modo fundamental  $LP_{01}$ . Pero por el recubrimiento también se propaga un campo de modos (figura 1.13).

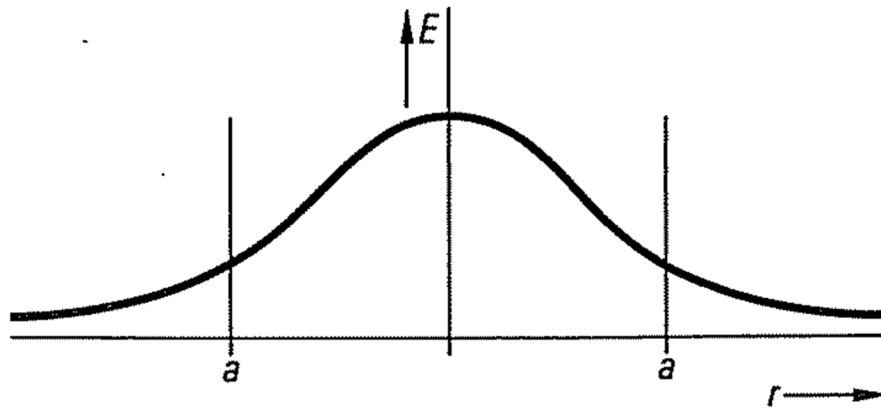


Figura 1.13. Distribución radial del campo del modo fundamental  $LP_{01}$

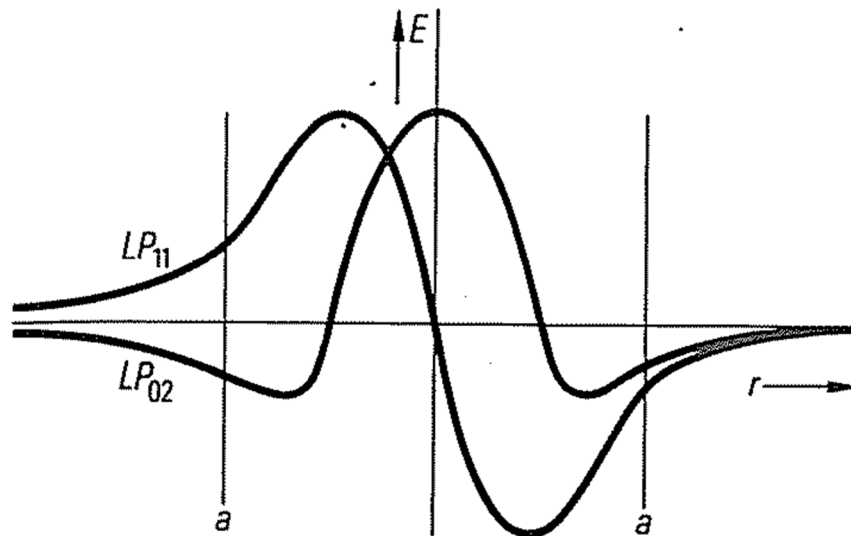


Figura 1.14. Distribución radial del campo de los modos  $LP_{11}$  y  $LP_{01}$

## Perfiles de fibra óptica

### 1.3.2. Perfil gradual

En un conductor de fibra óptica con perfil escalonado y múltiples modos, estos se propagan a lo largo de diferentes trayectorias por lo cual llegan al otro extremo del conductor a diferentes momentos. Esta dispersión modal es un efecto no deseado y puede ser reducida considerablemente si el índice de refracción en el núcleo varía en forma parabólica desde un valor máximo  $n_1$  en el eje del conductor y decae hasta otro valor  $n_2$  en el límite con el recubrimiento.

Un perfil gradual o perfil exponencial con exponente  $g = 2$  se define por:

$$n^2(r) = n_1^2 - AN^2 \cdot \left(\frac{r}{a}\right)^2 \quad \text{Para } r < a \text{ en el núcleo}$$

$$n^2(r) = n_2^2 \quad \text{Para } r \geq a \text{ en el recubrimiento}$$

Un conductor de fibra óptica con este perfil gradual se denomina *fibra gradual*.

- Dimensiones típicas de un conductor de fibra óptica con perfil gradual.

Diámetro del núcleo	$2a$	50 $\mu\text{m}$
Diámetro del recubrimiento	$D$	125 $\mu\text{m}$
Índice de refracción máximo del núcleo $n_1$	1,46	
Diferencia de Índices de refracción	$\Delta$	0,010

En la figura 1.15 se ilustra el recorrido de las ondas luminosas de diferente orden y el perfil en un conductor de fibra óptica con perfil gradual.

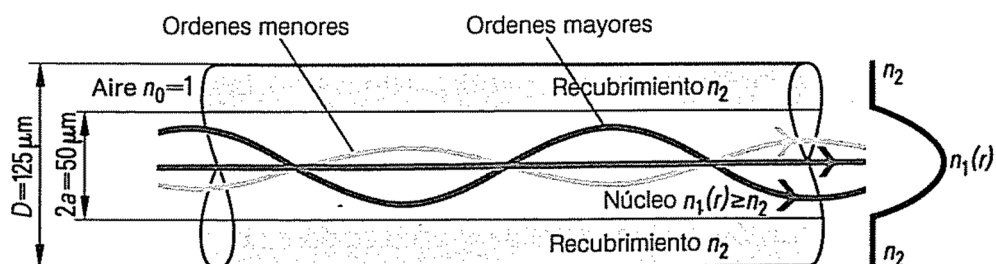


Figura 1.15. Conductor de fibra óptica con perfil gradual

Los rayos luminosos recorren el conductor de fibra óptica describiendo trayectorias onduladas o helicoidales; contrariamente al conductor de perfil escalonado, en cuyo caso los rayos se propagan en forma zigzagueante.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Como consecuencia de la variación continua del índice de refracción  $n(r)$  en el núcleo, los rayos luminosos también se refractan continuamente variando su dirección de propagación al recorrer estas trayectorias helicoidales. Si bien los rayos que oscilan en torno del eje deben recorrer aún un camino más largo que el que se propaga a lo largo de este eje, pueden desarrollar una mayor velocidad, proporcional al menos índice de refracción que tiene el material en los puntos más alejados del eje, y así se compensa en el tiempo la mayor extensión del recorrido. Como resultado de esta compensación desaparece casi totalmente la diferencia de tiempos de recorrido. Cuando se conforma con exactitud el perfil parabólico de índices de refracción, se han metido en un conductor de fibra óptica con perfil gradual, con un tiempo total de recorrido de la luz de  $5 \mu\text{s}$  a lo largo de  $1 \text{ km}$ , dispersiones de tiempo sólo algo mayores de  $0,1 \text{ ns}$ .

Esta insignificante diferencia de tiempo de recorrido en el conductor de fibra óptica con perfil gradual se produce no sólo por la dispersión en el material, sino también por la *dispersión del perfil*. Se origina en virtud de que los índices de refracción varían en el núcleo y en el recubrimiento de diferente manera con la longitud de onda  $\lambda$  y en consecuencia tanto la diferencia de índices de refracción  $\Delta$  como el exponente del perfil  $g$  son función de la longitud de onda. Para un perfil gradual de forma parabólica se obtiene teóricamente el exponente óptimo del perfil  $g$  por la expresión:

$$g = 1 - 1P - \Delta \cdot (2 - P)$$

En la cual tanto parámetro  $P \ll 1$  como la diferencia de índices de refracción  $\Delta$  depende de la longitud de onda  $\lambda$  en consecuencia depende de ella también el exponente del perfil gradual.

El perfil de índices de refracción de un conductor de fibras ópticas con perfil gradual y con  $g \approx 2$  permite obtener únicamente en un rango de longitudes de onda muy reducido, tiempos de recorrido similares para todos los modos conducidos.

Como en un conductor de fibra óptica con perfil gradual el índice de refracción  $n(r)$  depende de la distancia  $r$  al eje del conductor, también es una función de  $r$  el ángulo de aceptación, cuyo valor es muy importante para el acoplamiento de la luz al núcleo:

$$\text{sen } \theta(r) = \sqrt{n^2(r) - n_2^2} = AN \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} \leq AN$$

## Perfiles de fibra óptica

El ángulo de aceptación es máximo e igual a la apertura numérica  $AN$  en el eje del conductor ( $r = 0$ ). En el límite con el recubrimiento ( $r = a$ ) este ángulo se anula.

La apertura numérica vale para un conductor de fibra óptica con perfil gradual típico:

$$AN = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta} \approx 1,46 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,01} \approx 0,206$$

Y el ángulo de aceptación  $\theta_{max}$  en el eje del conductor de fibra óptica:

$$\text{sen } \theta_{max} = AN \approx 0,206$$

$$\theta_{max} \approx 11,9^\circ$$

Se ha encontrado que en las coordenadas  $\text{sen}^2\theta$  y  $r^2$  son las más apropiadas para representar en un sistema de ejes coordenados al ángulo de aceptación  $\theta$  en función de la distancia  $r$  al eje de del conductor de fibra óptica. Un sistema con estas coordenadas se denomina *diagrama del espacio de fases*. En las figuras 1.16 y 1.17 se comparan los diagramas de un conductor de fibra óptica con perfil gradual con otro de perfil escalonado.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

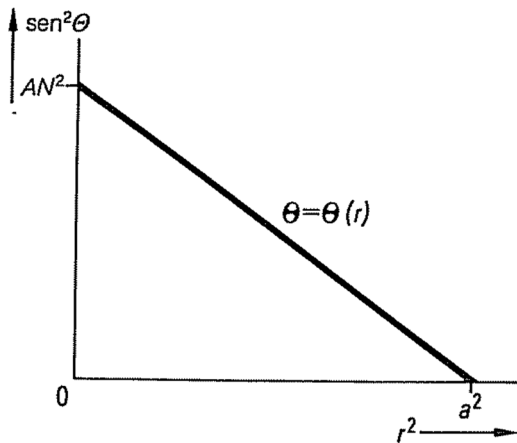


Figura 1.16. Diagrama del espacio de las fases de un conductor de fibra óptica con perfil gradual

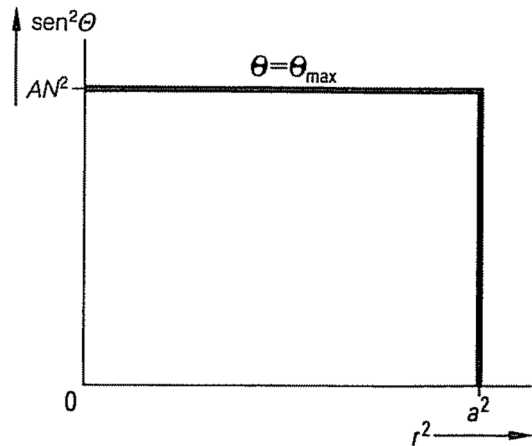
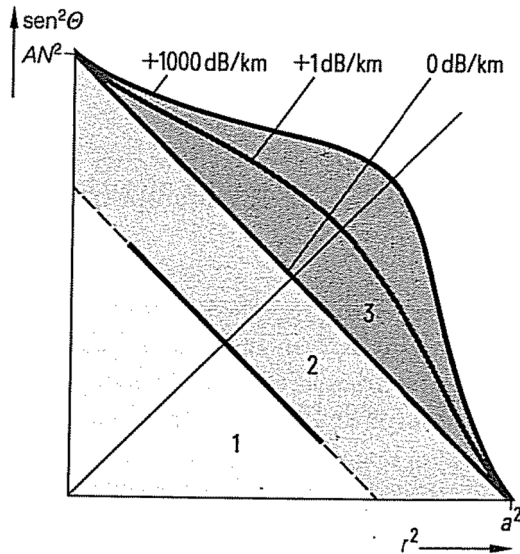


Figura 1.17. Diagrama en el espacio de las fases de un conductor de fibra óptica con perfil escalonado

La superficie debajo de la curva límite dada por el ángulo de aceptación máxima  $\theta_{\max}$  es proporcional a la *potencia luminosa aceptable al núcleo*. Se observa que a igual apertura numérica  $AN$  e igual radio del núcleo  $a$ , en un conductor de fibra óptica con perfil escalonado dicha potencia tiene un valor que duplica la de un conductor con perfil gradual. También es proporcional a esta superficie el número  $N$  de modos guiados en el núcleo. Cada uno de estos modos se puede localizar dentro de esta superficie. Así, los modos  $LP_{vu}$ , de órdenes menores, cuyos índices modales son aproximadamente  $v = 0, 1, 2$  y  $u = 1, 2$  y se propagan casi paralelamente al eje del conductor, se encuentran en las cercanías del origen; en cambio los modos  $LP_{vu}$  de orden superior (con  $v, u \gg 1$ ) se hallan más alejados del mismo. Los modos ubicados fuera de esta área no son guiados; son muy amortiguados. Aquellos modos que se encuentran muy poco fuera de la curva límite tienen limitadas posibilidades de propagación con elevada atenuación; estos modos se denominan *modos fugados*; en parte son guiados y en parte reflejados (figura 1.18).



## Perfiles de fibra óptica



1. Modos de orden menor
2. Modos de orden mayor
3. Zona de los modos fugados

Figura 1.18. Modos en el diagrama del espacio de las fases

Con el diagrama del espacio de las fases se pueden describir otras propiedades de los conductores de fibras ópticas, como por ejemplo condiciones de excitación; también se puede utilizar para calcular la potencia luminosa acoplable desde una fuente luminosa a un conductor de fibra óptica.

### 1.3.3. Perfil múltiple

En un conductor de fibra óptica monomodo la dispersión total se compone, como se sabe, de dos clases de dispersión. Se trata, por un lado, de la dispersión en el material: se origina en el hecho que el índice de refracción  $n$ , por ende, la velocidad de la luz son funciones de la longitud de onda, o sea  $n = n(\lambda)$  y  $c = c(\lambda)$  y, por el otro lado, de la dispersión en la guía de ondas, resultante de la distribución de la luz del modo fundamental  $LP_{01}$  entre el núcleo y el recubrimiento y, por lo tanto, la diferencia de índices de refracción  $\Delta = \Delta(\lambda)$  son función de la longitud de onda. Ambas clases de dispersión combinadas se denomina dispersión cromática.

Para longitudes de onda mayores que  $1300 \text{ nm}$  ambas clases de dispersión tienen signos opuestos en el vidrio de cuarzo. Variando la concentración de impurezas en el vidrio de cuarzo, se puede modificar la dispersión en el material en forma insignificante. En cambio, la dispersión por guía de ondas se puede modificar considerablemente variando la estructura del perfil de índices de refracción.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

El perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica monomodo común es un perfil escalonado con una diferencia de índices de refracción  $\Delta$ . Para esta estructura de perfiles simple se anula la sumatoria de ambas dispersiones en las cercanías de la longitud de onda  $\lambda = 1300 \text{ nm}$ .

Para desplazar esta anulación de las dispersiones a otras longitudes de onda es necesario modificar la dispersión de la guía de ondas y, por lo tanto, actuar sobre la estructura del perfil conductor de fibra óptica. Se llega así a los perfiles de *índices de refracción múltiples o segmentados*. Con el auxilio de estos perfiles se pueden fabricar conductores de fibra óptica cuyo cero de dispersión se halla desplazado más allá de los  $1550 \text{ nm}$  (los así llamados *conductores de fibra óptica con dispersión desplazada*) u otros con valores muy bajos de dispersión en toda la gama de las longitudes de onda que van desde los  $1300$  a los  $1550 \text{ nm}$  (los *conductores de fibra óptica de dispersión plana o dispersión compensada*).

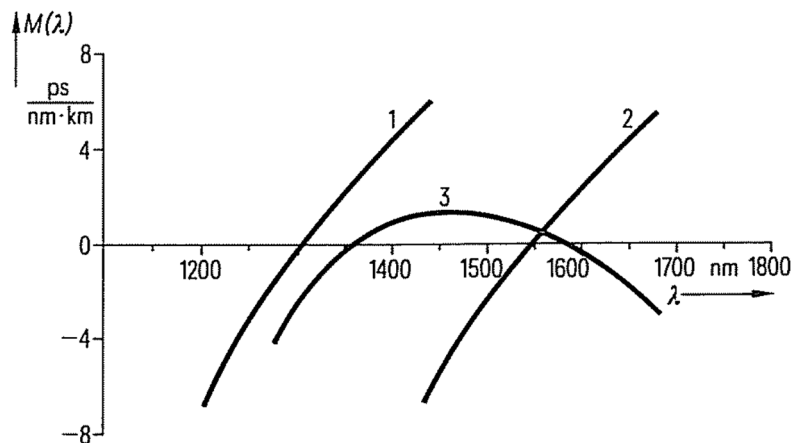


Figura 1.19. Dispersión cromática en función de la longitud de onda

1. Sin desplazamiento de la dispersión
2. Con desplazamiento de la dispersión
3. Con dispersión plana
- 4.

En la figura 1.19 se representa la dispersión cromática  $M(\lambda)$  en función de la longitud de onda para un conductor de fibra óptica monomodo : (1) sin desplazamiento de la dispersión, (2) con desplazamiento de la dispersión y (3) con dispersión plana.

## Perfiles de fibra óptica

Estos conductores de fibra óptica monomodo pueden ser realizados con perfiles de diferentes estructuras. A continuación se da una reseña de dichos perfiles:

- Clase 1 sin desplazamiento de la dispersión

Perfil escalonado normal, figura 1.20 a).

Perfil escalonado con índice de refracción rebajado en el recubrimiento, figura 1.20 b).

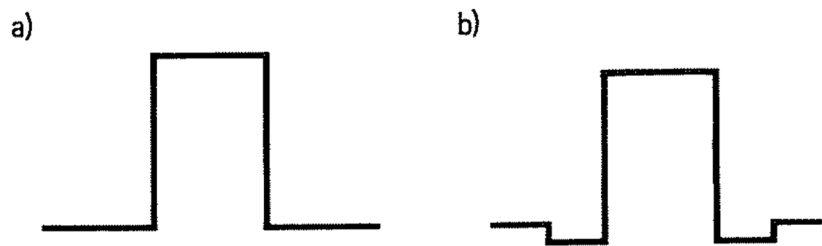


Figura 1.20. Estructuras de perfiles de conductores de fibras ópticas sin desplazamiento de la dispersión

- Clase 2 con desplazamiento de la dispersión.

Perfil segmentado con núcleo triangular, figura 1.21 a).

Perfil triangular, figura 1.21 b).

Perfil segmentado con doble escalón del índice de refracción en el recubrimiento, figura 1.21 c).

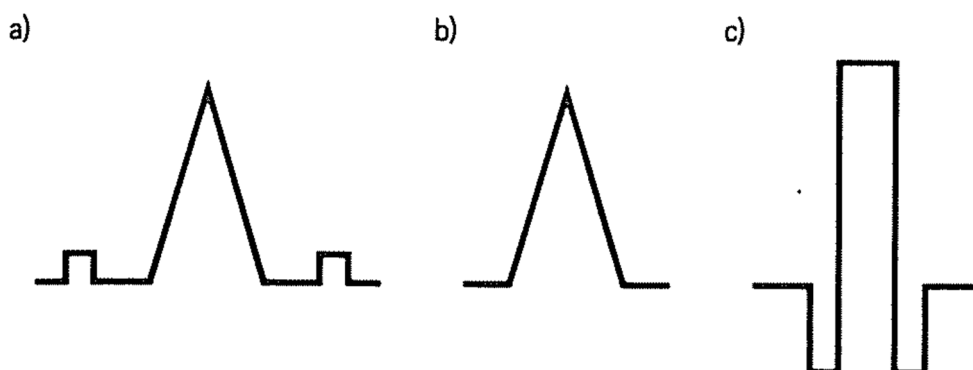


Figura 1.21. Estructuras de perfiles de conductores de fibras ópticas con desplazamiento de la dispersión

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

- Clase 3 con dispersión plana

Perfil segmentado con cuatro escalones del índice refracción en el recubrimiento, figura 1.22 a).

Perfil W, figura 1.22 b).

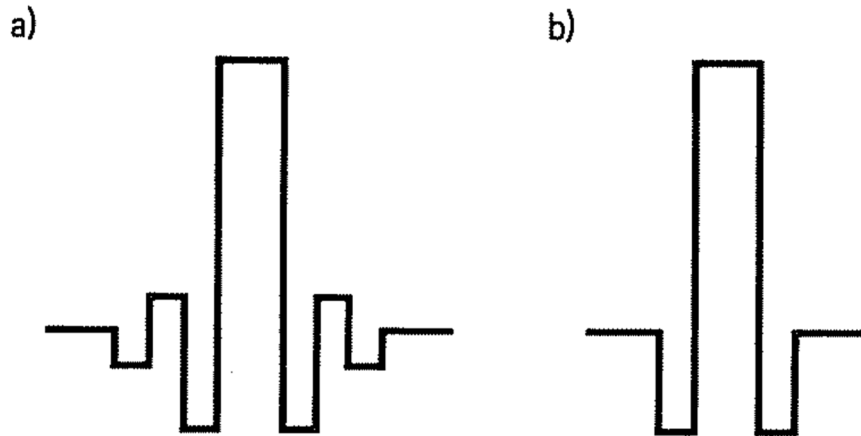


Figura 1.22. Estructuras de perfiles de conductores de fibra óptica con dispersión plana

# **Capítulo 2: La fibra óptica**

## 2.1. Parámetros y métodos de medición de la fibra óptica

La calidad de un conductor de fibra óptica se verifica por medio de métodos de medición reconocidos. Es necesario elaborar la norma relativa a los parámetros a ser medidos de los conductores de fibra óptica y sus correspondientes métodos de medición.

### 2.1.1. Condiciones de excitación

El acoplamiento de la luz en el conductor de fibra óptica es muy importante para la posterior distribución de la potencia luminosa en dicho conductor, ya que la potencia de un pulso luminoso acoplado se distribuye entre cada uno de los modos en la fibra multimodo. En el caso de un conductor de diferente forma, según cómo sean las *condiciones de excitación* de los modos en el acoplamiento de la luz a los conductores de fibras ópticas monomodo y multimodo.

#### - Fibra óptica multimodo

En el caso de la *excitación total* se irradia con luz a todo el núcleo del conductor de fibra óptica en virtud de lo cual se excita a la totalidad de los modos guiados, tanto los de órdenes inferiores como los superiores y también los fugados (figura 2.1). Dado que estos modos son atenuados con diferente intensidad a lo largo del conductor de fibra óptica provocan, además, por intercambio de energía una *mezcla de modos*, se medirá, según la longitud del conductor, una distribución diferente de la potencia luminosa y de los tiempos de recorrido. En consecuencia, las condiciones en el extremo final de un conductor de fibra óptica multimodo dependen del acoplamiento de la luz en su comienzo, independientemente de si la excitación es total o no y de la mezcla de modos durante el recorrido.

Respecto de los conductores de fibras ópticas multimodo es indispensable definir un método inconfundible de acoplamiento de la luz para obtener métodos de medición exactos y reproducibles de los parámetros importantes para la técnica de la transmisión. Para ello se considera como base el hecho que después de cierta longitud del conductor de fibra óptica multimodo, la que es función de la intensidad con la cual se mezclan los modos, se establece un *estado estacionario* de modos, a partir de la cual la distribución de energía entre los distintos modos se mantiene constante.

## Parámetros y métodos de medición de la fibra óptica

Resulta entonces muy importante medir los parámetros de transmisión en el mencionado estado estacionario, el cual técnicamente puede ser alcanzado de diferentes maneras. Una de ellas consiste en acoplar la luz al conductor bajo medición con ayuda de una *fibra de referencia* en la cual en virtud de su longitud ya haya sido alcanzado el estado estacionario. Dado que éste no se produce sino sólo al cabo de una longitud considerable de las fibras de referencia, éstas deberían ser de largo inadecuado. Ello se evita produciendo en un conductor de fibra óptica corto un fuerte acoplamiento de modos por medio de perturbaciones mecánicas estadísticamente irregulares, se obtiene así en este tramo de conductor, con suficiente aproximación, una distribución estacionaria de modos. Estos tramos se denominan *mezcladores de modos*. Para lograr este efecto se puede presionar ese tramo de fibra óptica contra una superficie áspera (como por ejemplo tela esmeril, una lima, etc.) o curvarlo en torno de pequeñas esferas, Una intensa mezcla de modos también se obtiene empalmando sucesivamente tramos de 1 a 2 m de largo de un conductor de fibra óptica con perfil escalonado con otro perfil gradual y nuevamente uno con perfil escalonado.

Se utiliza un *filtro de modos* si en un acoplamiento resulta necesario suprimir los modos de orden superior. Para confeccionar un filtro de estas características se arrolla el respectivo conductor de fibra óptica alrededor de una forma cilíndrica con un diámetro aproximado de 1 cm, suprimiendo, de esta manera, los modos de orden superiores.

En general, se puede decir que un mezclador de modos se utiliza para excitar a todos los modos y un filtro de modos, en cambio, para limitar dicha excitación a determinados modos (e especial modos de órdenes inferiores).

Además de estos medios mecánicos para obtener un estado estacionario también se utilizan, frecuentemente, medios ópticos auxiliares. Se pueden evitar los problemas con modos fugados y modos en el recubrimiento si se excitan únicamente modos de orden inferior. Para lograr esta característica se utiliza una combinación adecuada de lentes y diafragmas para acoplar un rayo luminoso que cubre aproximadamente el 70% del diámetro del núcleo y el 70% de la apertura numérica. Esta excitación se ilustra de manera muy clara en un diagrama de espacio de fases, por ejemplo para un conductor de fibra óptica con perfil gradual se representan en la figura 2.1 con grisado la zona en la cual se excitan a los modos con estos valores *reducidos al 70%*.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

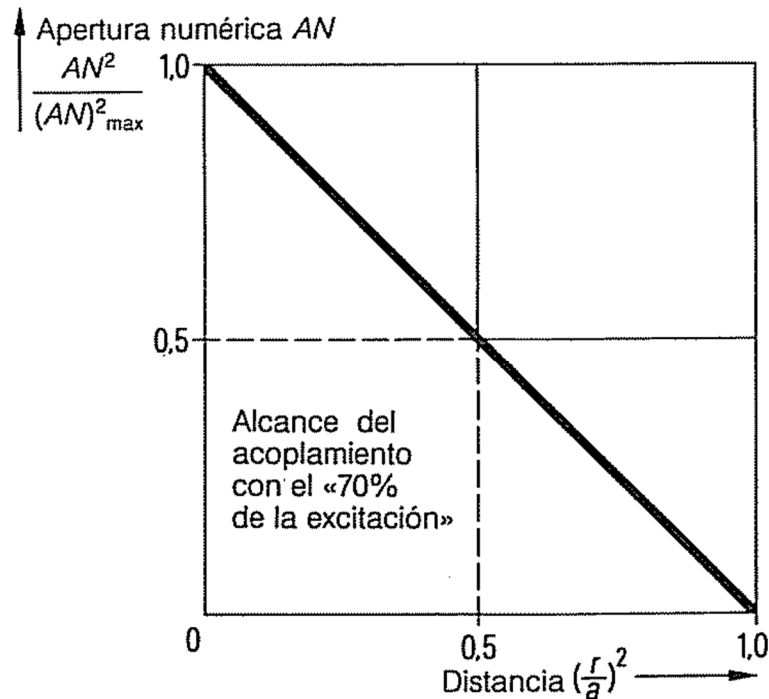


Figura 2.1. Diagrama de fases de un conductor de fibra óptica con perfil gradual y el 70% de excitación

$r$  Distancia radial

$a$  Radio del núcleo del conductor de fibra óptica

Para verificar si una excitación produce una distribución estacionaria o se acerca a este estado, se efectúa con un dispositivo especial una medición de los campos cercano y lejano. Se ha comprobado que por ejemplo en un conductor de fibra óptica con perfil gradual y diámetro del núcleo de  $50 \mu\text{m}$ , se alcanza aproximadamente un estado estacionario cuando, después de 2 m de conductor, la distribución del campo cercano radial de forma acampanada tiene un diámetro medio de unos  $26 \mu\text{m}$  y una correspondiente distribución de campo lejano, también de forma acampanada, indica, como función del ángulo, puntos de valor medio correspondiente a una apertura numérica de 0,113.

### - Fibra óptica monomodo

Con excitación total, en los conductores de fibra óptica monomodo se producen modos fugados y modos en el recubrimiento que se suprimen a los pocos centímetros utilizando un revestimiento con índice de refracción mayor que el del recubrimiento. Este revestimiento actúa como *supresor de modos*.



### 2.1.2. Atenuación

La luz que se propaga en un conductor de fibra óptica experimenta una atenuación: produce una pérdida de energía. Para cubrir grandes distancias sin emplear regeneradores intermedios es necesario mantener estas pérdidas en el mínimo posible. La atenuación de un conductor de fibra óptica es un parámetro importante para la planificación de redes de cables para telecomunicaciones ópticas y la producen principalmente los fenómenos físicos como son absorción y dispersión.

La magnitud de estas pérdidas luminosas depende entre otros factores de la longitud de onda de la luz acoplada. Por eso, para determinar las gamas de longitudes de onda adecuadas para la transmisión óptica con baja atenuación, resulta, en general, útil medir la atenuación de un conductor de fibra óptica en función de la longitud de onda (espectral).

Mientras que el fenómeno de la absorción se produce únicamente a determinadas longitudes de onda, las bandas de absorción, la pérdida luminosa a la dispersión existe para todas las longitudes de onda. Dado que la dispersión se produce por deshomogeneidades en la fibra, cuyas dimensiones son en general menores que la longitud de onda de la luz, se puede utilizar la *Ley de la Dispersión de Rayleigh* con buena aproximación, para explicar este fenómeno: indica que a medida que aumentan las longitudes de onda, la pérdida por dispersión decrece con la cuarta potencia de  $\lambda$  (figura 2.2):

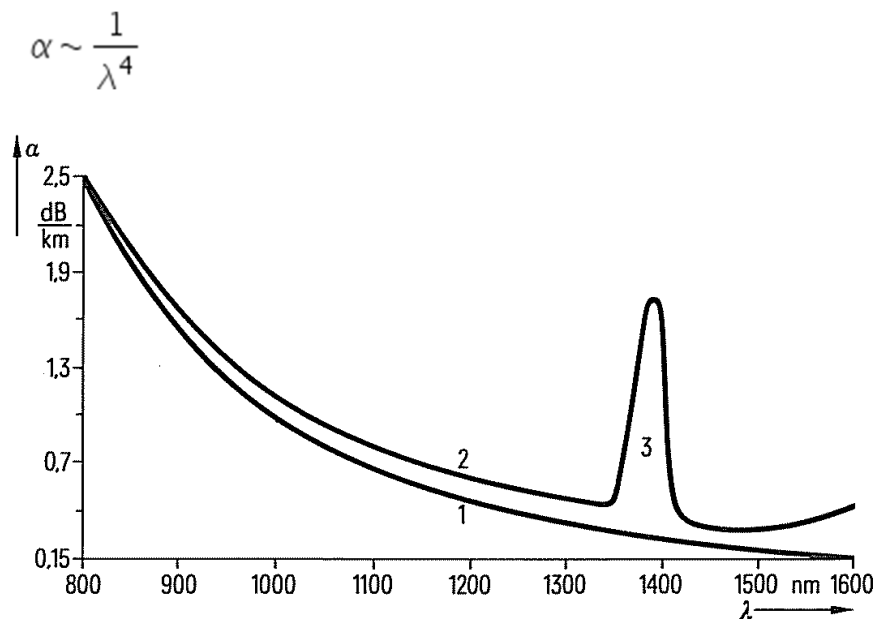


Figura 2.2. Curva de atenuación de Rayleigh

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Si se comparan por ejemplo las pérdidas por dispersión en las longitudes de onda preferidas para las telecomunicaciones ópticas (850, 1300 y 1550 nm) se observa que a 1300 nm las pérdidas ascienden a sólo 18% y a 1550 nm a sólo 9% del valor que tenían a 850 nm. Resulta pues ventajoso el servicio de los cables con conductores de fibras ópticas a estas longitudes de onda.

Si se observa la propagación de la luz en un conductor de fibra óptica en el estado estacionario, se verificará que la potencia luminosa  $P$  conducida decrece en forma exponencial con la longitud  $L$  del conductor:

$$P(L) = P(0) \cdot 10^{-\alpha \frac{L}{10}}$$

En esta fórmula,  $P(0)$  es la potencia luminosa que se acopla al comienzo del conductor de fibra óptica,  $P(L)$  la potencia luminosa aún existente en el conductor al cabo de la longitud  $L$  y  $\alpha$  el *coeficiente de atenuación*, con el cual se da la atenuación por unidad de longitud. Un conductor de fibra óptica de longitud  $L$  y coeficiente de atenuación  $\alpha$  tiene una atenuación de:

$$\alpha \cdot L = 10 \cdot \log \frac{P(0)}{P(L)}$$

$\alpha$       Coeficiente de atenuación en dB/km

$L$       Longitud del conductor de fibra óptica en km

### 2.1.3. Métodos de medición

Existen distintos métodos de medición de la atenuación, que serán nombrados a continuación:

- Método de medición de la atenuación por transmisión de la luz

Los métodos de medición de la atenuación por transmisión de la luz (figura 2.3) utilizados son: el método de corte y el método de inserción.

## Parámetros y métodos de medición de la fibra óptica

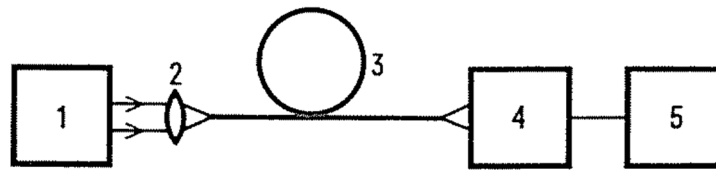


Figura 2.3. Método de medición de la atenuación por transmisión de luz

1. Fuente luminosa
2. Óptica
3. Conductor de fibra óptica
4. Detector
5. Equipo de evaluación

En el *método de corte* se determina la potencia luminosa en dos puntos  $L_1$  y  $L_2$  del conductor de fibra óptica, estando  $L_2$  habitualmente ubicado en el extremo de dicho conductor y  $L_1$  cerca de su comienzo. Cuando se realiza la medición, se mide primero la potencia lumínica  $P$  en el extremos  $L_2$  (en km) y luego 1 (en km). Para la medición de  $L_1$  se debe realizar un corte en el conductor sin afectar las condiciones de acoplamiento entre la fuente luminosa (emisor) y el conductor de fibra óptica. El coeficiente de atenuación  $\alpha$  (en dB/km) para el conductor de fibra óptica se calcula con la expresión:

$$\alpha = \frac{10}{L_2 - L_1} \cdot \log \frac{P(L_1)}{P(L_2)}$$

Este método es del tipo destructivo, ya que es necesario seccionar un corto tramo de conductor de fibra óptica, lo cual no tiene sentido en, por ejemplo, cables pre confeccionados (provistos de conectores). En este caso es más ventajoso el *método de inserción*, en el cual se determina la potencia luminosa en el extremo del conductor de fibra óptica bajo medición para luego compararla con la potencia luminosa en el extremo de un tramo corto de conductor de fibra óptica; este tramo corto se utiliza como referencia y debe tener las mismas características y conformación que el conductor de fibra óptica bajo medición. Cuando se efectúe la medición se debe verificar que las condiciones de acoplamiento al tramo de referencia sean, en lo posible, similares a los del conductor bajo medición. A causa de estas restricciones, son menos exactas y reproducibles las mediciones efectuadas con el método de inserción que las que se obtienen con el método de cortes.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

En el método de medición de la atenuación por transmisión de luz, la luz se acopla al principio del conductor de fibra óptica (lado emisor), luego recorre el conductor y finalmente se mide en los extremos de éste (lado receptor).

Se puede considerar como desventaja de este método el que la medición se efectúe en forma de sumatoria sobre el largo total del conductor de fibra óptica sin que se obtenga ningún tipo de información sobre variaciones de la atenuación a lo largo del conductor. Además debe ser accesible ambos extremos del conductor de fibra óptica.

### - Retrodispersión

En el método de la retrodispersión la luz se acopla y recibe en el mismo extremo del conductor de fibra óptica (figura 2.4). Además, este método suministra informaciones detalladas acerca de la variación de la atenuación a lo largo del conductor bajo medición.

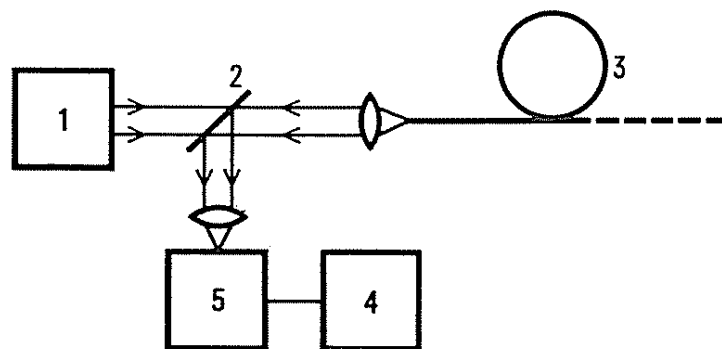


Figura 2.4. Método de retrodispersión

6. Fuente luminosa
7. Divisor de rayos luminosos
8. Conductor de fibra óptica
9. Equipo de evaluación
10. Detector

## Parámetros y métodos de medición de la fibra óptica

Este método de medición se basa en la dispersión de Rayleigh. Mientras que la fracción principal de la potencia luminosa se propaga hacia el extremo del conductor, una pequeña porción se dispersa retornando hacia el emisor. Esta potencia luminosa retrodispersada experimenta, a su vez, una amortiguación en el trayecto de retorno. La luz remanente que llega al principio del conductor, allí se desacopla y se mide por medio de un divisor de rayos.

Con esa potencia luminosa retrodispersada y el tiempo de recorrido en el conductor de fibra óptica es posible trazar un diagrama del cual se desprende la variación de la atenuación a lo largo de todo el conductor (figura 2.5) en la pantalla de un osciloscopio se podrá observar una curva exponencial decreciente desde el comienzo del mismo.

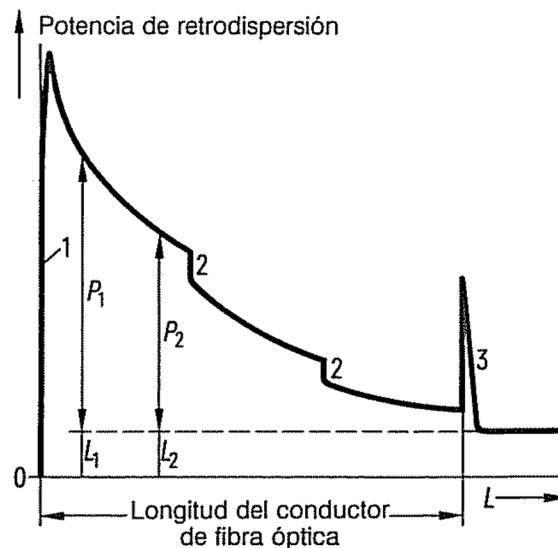


Figura 2.5. Curva obtenida en una medición por retrodispersión

11. Retrodispersión en el comienzo del conductor de fibra óptica
12. Retrodispersión en el empalme de conexión
13. Retrodispersión del extremo del conductor de fibra óptica

A causa del salto del índice de refracción al principio y al final del conductor de fibra óptica, se retrodispersa allí una gran proporción de potencia lumínica que produce un pico al principio y otro al final de la curva. La diferencia de tiempos  $\Delta t$  entre ambos picos, la velocidad de la luz en el vacío  $c_0$  y el índice de refracción del grupo  $n_g \approx 1,5$  en el núcleo permiten calcular la longitud  $L$  del conductor de fibra óptica:

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

$$L = \Delta t \cdot \frac{c_0}{n_g}$$

- $L$  Longitud del conductor de fibra óptica en km
- $\Delta t$  Diferencia de tiempos entre el pico del pulso inicial y el final, en s
- $c_0$  Velocidad de la luz en el vacío, 300000 km/s
- $n_g$  Índice efectivo de refracción del grupo en el núcleo

El coeficiente de atenuación  $\alpha$  de un tramo parcial del conductor de fibra óptica desde  $L_1$  hasta  $L_2$  se calcula con la expresión:

$$\alpha = \frac{5}{L_2 - L_1} \cdot \log \frac{P(L_1)}{P(L_2)}$$

Si se compara la ecuación precedente con la obtenida en el método por transmisión de luz, se observará que en presente caso el factor 5 se debe a que la luz recorre al conductor dos veces. Esta ecuación es válida a condición que el factor de retrodispersión, la apertura numérica y el diámetro del núcleo no varíen a lo largo del conductor de fibra óptica. Al no ser posible asegurar la invariabilidad de estos factores, se recomienda efectuar una medición desde cada uno de los extremos del conductor de fibra óptica y luego promediar los resultados de ambas mediciones. A causa de la potencia retrodispersada relativamente débil son mayores las exigencias a que debe ajustarse la sensibilidad de los receptores. Para mejorar la señal recibida se calcula el promedio de gran número de valores medidos individualmente. Los instrumentos que trabajan basados en el principio de la retrodispersion se llaman *reflectómetros* o *puesto de medición de la retrodispersion*. Con esta medición, además de determinar los coeficientes de atenuación, se verifica la localización de todos los puntos de discontinuidades (puentes) y pérdidas ópticas en empalmes (saltos de atenuación por uniones efectuadas con conectores o empalmes fijos) del conductor de fibra óptica.

### 2.1.4. Ancho de banda

El ancho de banda es, junto a la atenuación, uno de los dos parámetros más importantes que definen la transmisión en un conductor de fibra óptica.

## Parámetros y métodos de medición de la fibra óptica

Un pulso que se propaga a lo largo del conductor incrementa su duración a causa de la dispersión. Este efecto, trasladado al campo de las frecuencias, hace que el conductor de fibra óptica se comporte como un filtro pasabajo.

Por esto, se entiende que, a medida que aumenta la frecuencia de modulación  $f$ , decrece la amplitud de una onda luminosa hasta quedar anulada.

Si por cada frecuencia de modulación  $f_m$  se miden las amplitudes de la potencia luminosa al comienzo  $P_1(f_m)$  y al final  $P_2(f_m)$ , se obtiene una relación de ambas amplitudes denominada función de transferencia  $H(f_m)$ .

$$H(f_m) = \frac{P_2(f_m)}{P_1(f_m)}$$

$H(f_m)$  es una función de la frecuencia de modulación  $f_m$ . Habitualmente, se normaliza este valor dividiendo por  $H(0)$ , que corresponde en este caso con la función de transferencia correspondiente a la frecuencia de modulación  $f_m = 0$  Hz. En la figura 2.6 se representa una curva típica de la función de transferencia de un conductor de fibra óptica.

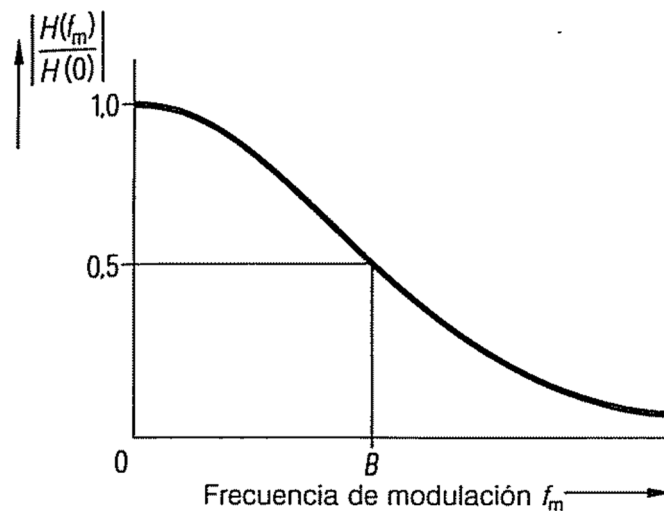


Figura 2.6. Función de transferencia de un conductor de fibra óptica

La frecuencia de modulación, para la cual el valor normalizado de la función de transferencia es 0,5, se denomina ancho de banda del conductor de fibra óptica. Será:

$$\frac{H(f_m = B)}{H(0)} = 0,5$$

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

El ancho de banda es pues aquella frecuencia de modulación a la cual la amplitud comparada con el valor que tiene la frecuencia nula, decae ópticamente un 50%, es decir, 3 dB.

### 2.1.5. Métodos de medición

La medición del ancho de banda en el conductor de fibra óptica multimodo depende de las condiciones de excitación de los modos, es decir de la forma de acoplarse la luz a dicho conductor. Si se irradia puntualmente luz con una apertura lo más pequeña posible sobre una reducida superficie del núcleo, solamente se excitarán los modos que allí se encuentren y se podrán analizar especialmente sus tiempos de propagación. Este método se denomina *medición DMD* (differential mode delay). Este método permite analizar si los perfiles de índices de refracción se acercan al ideal sin dispersión modal. Las perturbaciones en el perfil se señalan por diferencias en los tiempos de propagación de los correspondientes modos, las que, a su vez, se reconocen por medio de pulsos adelantados o atrasados en el tiempo.

A causa de la mezcla de modos, todos los modos con capacidad de propagación alcanzan un estado estacionario (en función de la característica del conductor de fibra óptica y de sus condiciones de contorno. En este caso, por medio de la medición de atenuación se obtienen valores proporcionales a la longitud del conductor, mientras que esto es válido de manera solo limitada para la medición del ancho de banda. Con el *factor*  $\gamma$  (denominado también exponente longitudinal) se describe, de forma simplificada, la dependencia del ancho de banda  $B$  de la longitud del conductor de fibra óptica, siendo este factor empero, a su vez, función de esta longitud, valiéndose la expresión:

$$\left(\frac{B}{B_1}\right) = \left(\frac{L}{L_1}\right)^{-\gamma}$$

- $B$  Ancho de banda del sistema, en MHz
- $B_1$  Ancho de banda del conductor de fibra óptica para  $L_1$ , en MHz
- $L$  Longitud del conductor de fibra óptica, en km
- $L_1$  Longitud del conductor de fibra óptica (normalmente 1 km) con el ancho de banda  $B_1$
- $\gamma$  Factor  $\gamma$



## Parámetros y métodos de medición de la fibra óptica

El factor  $\gamma$  tiene un valor igual a 1 al principio del conductor de fibra óptica y decrece a lo largo del mismo, tendiendo a ser 0,5 en un tramo de gran longitud. El factor  $\gamma$  de un conductor de fibra óptica sólo se puede determinar en la forma experimental midiendo el ancho de banda del conductor en función de su longitud  $L$ . Para efectuar esta medición se debe cortar el conductor en tramos; este procedimiento en general no es aplicable en la práctica. Es muy problemático trasladar por cálculo el ancho de banda medido de un conductor determinado largo a otra longitud. Sin embargo lo expresado no afecta la funcionalidad de la instalación de cables de fibras ópticas, cuando se cuenta con adecuada planificación.

Por ello en lo sucesivo se hará mención únicamente del ancho de banda  $B$  del conductor de fibra óptica y del valor de la función de transferencia  $H(f_m)$ , para lo cual se brindan dos métodos:

- Medición en el ámbito de las frecuencias

Consiste en medir la potencia lumínica que llega al extremo receptor de un conductor de fibra óptica inyectando en su principio una potencia lumínica modulada en amplitud con una frecuencia  $f_m$  que se incrementa continuamente. Con los resultados de estas mediciones se calcula el valor de la función de transferencia y del ancho de banda. Si se utiliza un transmisor en el que la amplitud de la potencia lumínica  $P_1(f_m)$  se mantiene constante, se puede comprobar directamente el valor del ancho de banda, expresado como la frecuencia a la cual la amplitud de la potencia lumínica  $P_2(f_m)$  en el receptor cae a un valor igual a la mitad de la potencia a frecuencia nula (puntos de media potencia). Este método de medición se puede realizar en poco tiempo y con un equipamiento reducido, lo que es útil en conductores de fibra óptica ya instalados.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

### - Medición en el ámbito del tiempo

Estas mediciones se realizan analizando el ensanchamiento de los pulsos ocasionados por los efectos de la dispersión en el conductor de fibra óptica. Para ello, se acopla un pulso de corta distancia al conductor bajo observación (valor típico 100 ps). Este pulso, al propagarse por el conductor de fibra óptica se ensancha a causa de la dispersión modal y en el material. El pulso de salida resultante actúa sobre el fotodiodo del receptor, que lo amplifica, y luego es analizado en un osciloscopio de muestreo. Para determinar el pulso de entrada se debe repetir la medición sobre un tramo corto (2 metros aprox.) y libre de perturbaciones.

En base a los datos almacenados del pulso de entrada  $g_1(t)$  y salida  $g_2(t)$  es posible calcular, por integración, la duración efectiva de los pulsos  $T_1$  y  $T_2$ . Con estos valores se determina el ensanchamiento efectivo del pulso con la siguiente expresión:

$$\Delta T_{ef} = \sqrt{T_2^2 - T_1^2}$$

Y el valor aproximado del ancho de banda con:

$$B \approx \frac{0,441}{\Delta T_{ef}}$$

## Parámetros y métodos de medición de la fibra óptica

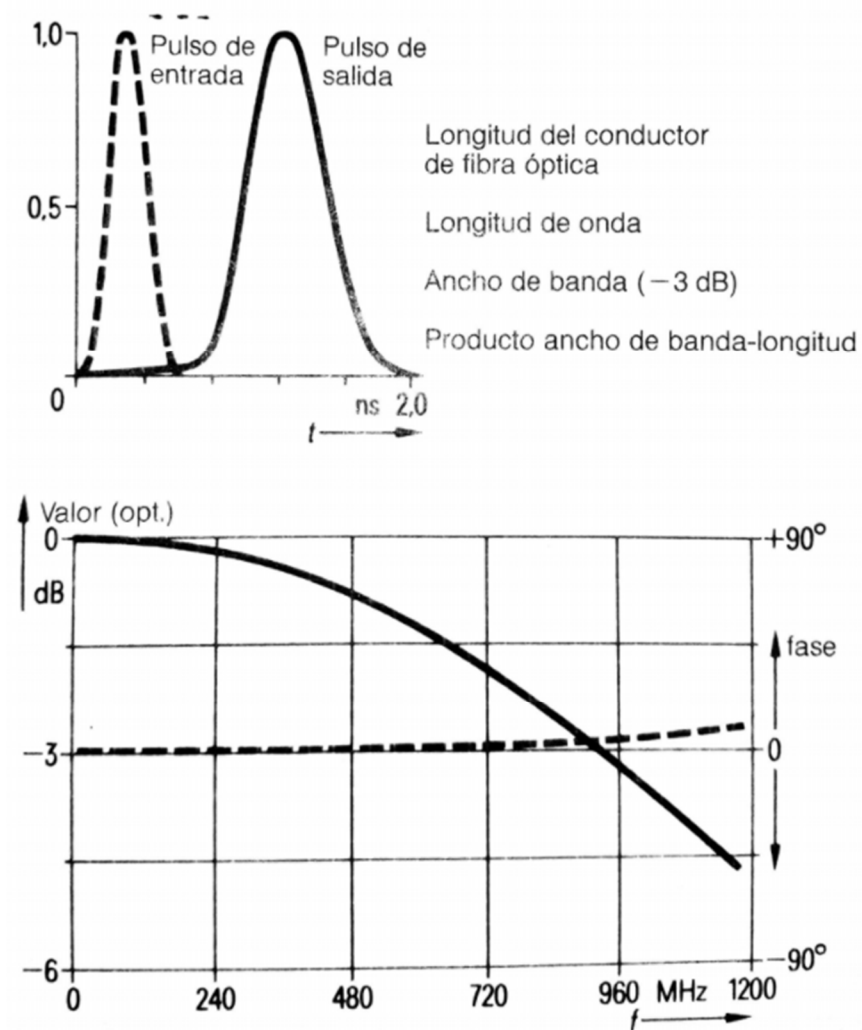


Figura 2.7. Protocolo de una medición del ancho de banda en el ámbito de tiempo

Arriba: pulso normalizado

Abajo: función de transferencia

### 2.2. Configuración de la fibra óptica

La fibra óptica no sólo está formada por las fibras que conducen la luz, también forma parte de ella varios elementos, así como distintas formas de configuración de las propias fibras. A continuación se abordaran distintas configuraciones de los cables de fibra óptica.

#### 2.2.1. Alma del cable

Para aumentar la estabilidad mecánica de los cables de fibras ópticas con conductores huecos o por grupos, se trenzan estos en torno a un *elemento central* que actúa como núcleo del cable y que puede servir tanto de soporte (protección contra dobladuras) como para compensar el esfuerzo de tracción. Principalmente dicho trenzado confiere a las fibras ópticas el espacio libre definido que tienen dentro de los conductores. En este espacio libre, las solicitaciones de tracción, compresión, aplastamiento y flexión que se producen dentro del marco especificado no influyen sobre las características de transmisión de las fibras ópticas. Además de los conductores simples o por grupos en conductores huecos macizos, compactos o cintas, se pueden incluir en el trenzado algunos *elementos ciegos*, es decir conductores sin fibras ópticas o elementos formados completamente por polietileno, así, como *conductores de cobre* como pares o cuadretes. Se denomina *alma del cable* al conjunto de los *elementos de trenzado*, los elementos de soporte y tracción y, de existir, la envoltura que cubre a todos estos elementos.

#### 2.2.2. Trenzado

En la técnica de los cables de fibras ópticas se utiliza principalmente el trenzado por capas. En este, los elementos trenzados se hallan dispuestos en una o más capas concéntricas en torno de un elemento central. Si se trata de elementos aislados como por ejemplo conductores de fibras ópticas, conductores por grupos de fibras ópticas, conductores de cobre o elementos ciegos, se habla de un *cable por grupos de fibras ópticas*; si, en cambio el alma del cable está formado por grupos de elementos trenzados, se habla de un *cable por conductores de fibras ópticas* (los cables por grupos no contienen, necesariamente, conductores por grupos).

## Configuración de la fibra óptica

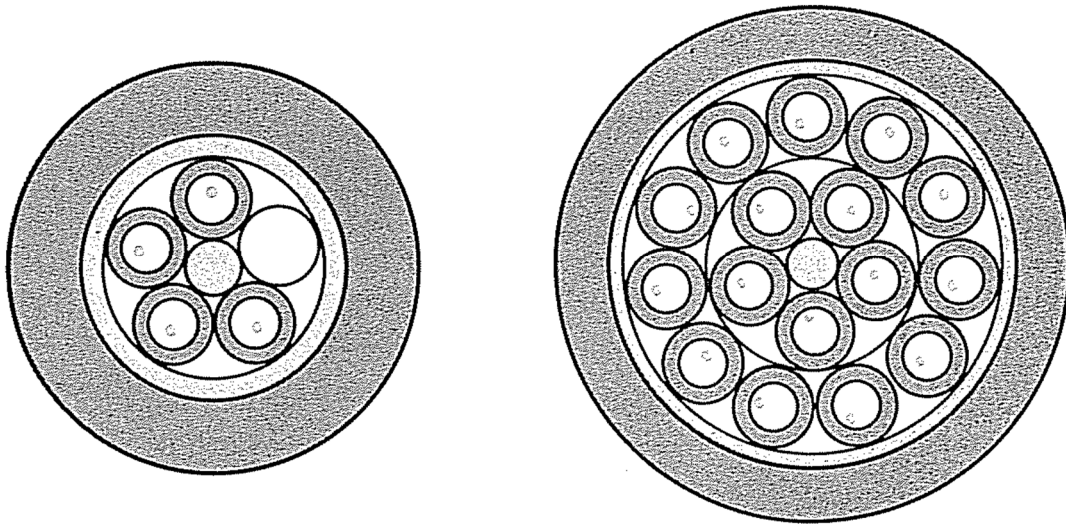


Figura 2.8. Cable con una capa (izda.) y con dos capas (dcha.)

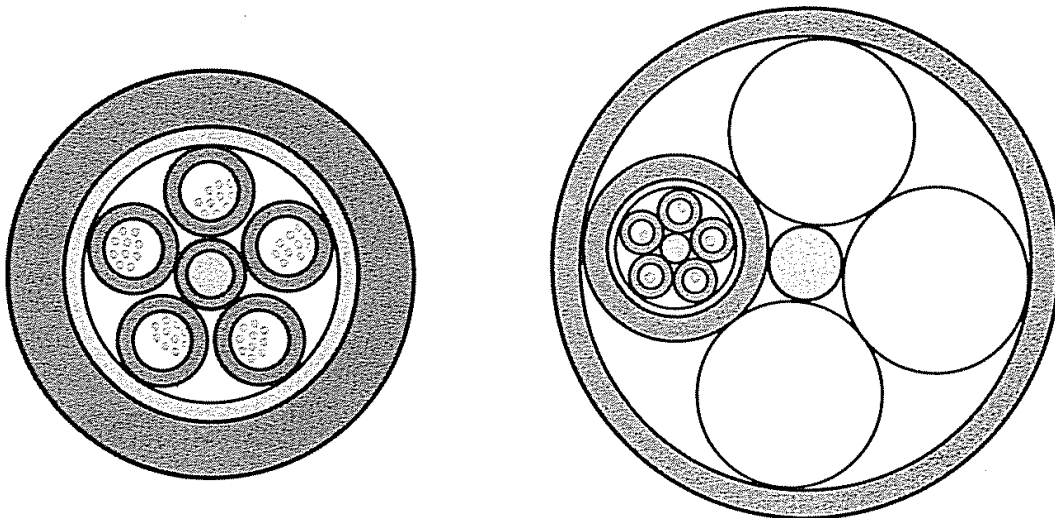


Figura 2.9. Cable de capas con conductores por grupos (izda.) y cable por grupos (dcha.)

Una forma constructiva especial del cable de una capa es el *cable ranurado*. En él, en lugar de su trenzado en capas, los conductores de fibras ópticas son alojados en ranuras practicadas en forma helicoidal en la superficie de elemento central (figura 2.3).

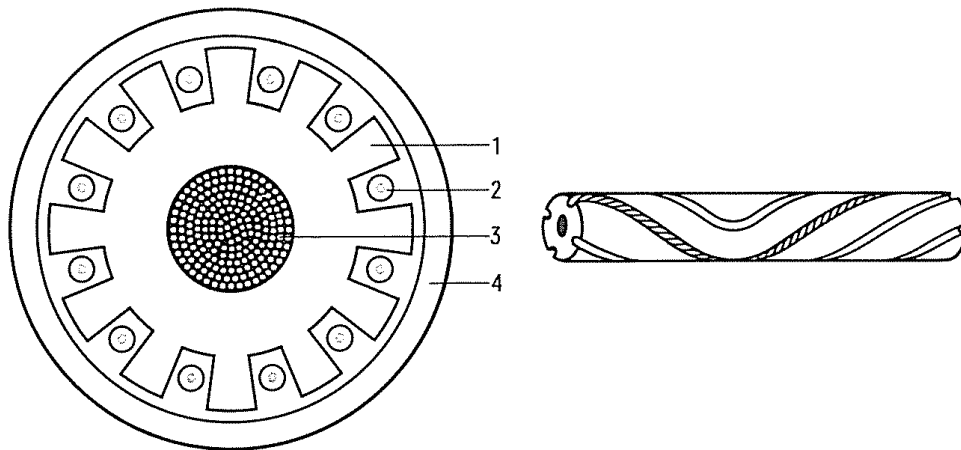


Figura 2.10. Cable ranurado

1. Plástico extruido
2. Conductor de fibra óptica
3. Elemento de tracción
4. Cubierta exterior

Según el tamaño y la forma de estas ranuras del elemento central pueden moverse libremente en ellas una o más fibras ópticas. Al igual que en el caso de los conductores huecos, en general se inyecta una masa de relleno en estas ranuras.

Otro caso especial de configuración de los cables conductores de fibras ópticas lo constituye el *cable de tubo central*, el cual no posee elementos trenzados en torno de un elemento central; en cambio, se trenzan los propios conductores de fibras ópticas dentro de un grupo mayor. Este maxigrupo forma el elemento central del cable.

Una construcción de este tipo se caracteriza por lo simple y compacto de su configuración. Se utiliza por ejemplo en cables de tierra aéreos.

Existen dos formas de cableado: el trenzado de paso constante y el trenzado S-Z.

En el *trenzado de paso constante*, los elementos se trenzan en una dirección y con ángulo constante respecto al eje longitudinal.

En el *trenzado S-Z* se cambia la dirección de trenzado luego de una determinada cantidad de vueltas. Así, los elementos que se trenzan a lo largo del eje del cable describen primero la forma de S y, tras el cambio, la de Z. En

## Configuración de la fibra óptica

los lugares donde se producen los cambios estos elementos se hallan paralelos al eje del cable (figura 2.11).

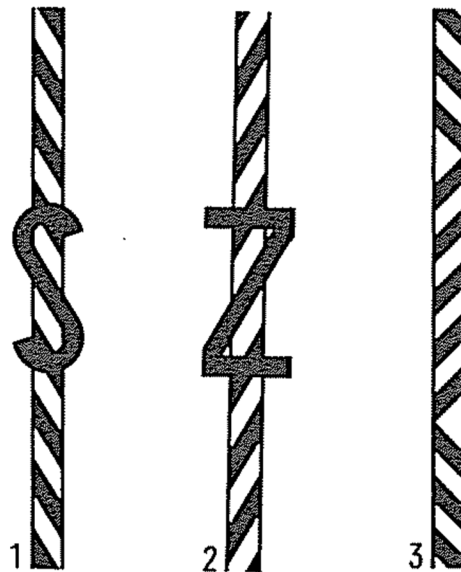


Figura 2.11. Trenzado S-Z

1. Sentido según S
2. Sentido según Z
3. Sentido según S-Z

A causa de la rigidez de los elementos trenzados es necesario, para sostenerlos en su lugar, practicar, en el caso del trenzado S-Z, una hilada en espiral como sostén en torno de esos elementos.

### 2.2.3. Relleno del alma

Para asegurar la hermeticidad longitudinal del cable de fibras ópticas a la irrupción de agua, se rellenan bajo alta presión (aproximadamente 15 bar) los intersticios libres del alma del cable con una masa cuya composición debe ser de tal naturaleza que no afecte a las características de los restantes elementos del cable. Tiene un insignificante efecto expansivo sobre las cubiertas de polietileno y un coeficiente de dilatación relativamente pequeño. Una capa de retención formada por una masa adhesiva de fundición, resistente al petróleo y relajante aplicada por extrusión en torno del alma del cable se utiliza, por una parte, como barrera adicional para la masa de relleno y, por la otra, como unión continua entre la cubierta resistente a la tracción y la vaina del cable sin que por ello afecte la flexibilidad del cable de fibras ópticas.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

El alma del cable no se rellena si no se requiere hermeticidad longitudinal, tal y como suele ser en el caso de cables interiores, En tal caso, se recubren los elementos trenzados con una o más delgadas hojas de plástico para protegerlos en los posteriores pasos del proceso de fabricación y mantener, simultáneamente, los intersticios libres de elementos de tracción o de los materiales de la vaina.

Para *identificar* la procedencia de un cable de conductores de fibra óptica, es decir para indicar la empresa fabricante del respectivo cable, se coloca durante el envainado del alma del cable un *hilo característico del fabricante* (secuencia verde - blanco - rojo - blanco) directamente sobre los elementos de trenzado, la mayoría de las veces paralelamente al eje del cable.

A pedido del cliente se puede agregar al hilo característico del fabricante una cinta métrica longitudinal, constituida por una cinta de papel de 6 mm de ancho con la división métrica continua impresa en ella.

### 2.2.4. Vaina del cable

La vaina del cable debe proteger el alma formada por conductores de fibras ópticas de

- Acciones mecánicas
- Influencias térmicas
- Ataque químico
- Acción de la humedad desde su exterior.

Al igual que en cables convencionales, existe toda una gama de vainas que se seleccionan en función de las eventuales influencias que actúan sobre el cable. En general se usa polietileno PE (de probada eficacia) con o sin envoltura protectora como el aluminio. Además del polivinilo de cloruro PVC para cables interiores, se dispone para aplicaciones especiales de otros materiales para vainas como por ejemplo propileno de perfluoretileno FEP, copolimeto de perfluoralcoxi PFA y vinilacetato de etileno EVA.

Cuando se requieren cables rellenos con vainas sin inclusiones metálicas, se introducen entre la vaina del cable y los hilos o la masa de relleno una capa de retención plástica formada por un adhesivo de fundición de poliamida (PA), la cual impide la migración de la masa de relleno desde el alma del cable hacia su vaina.



## Configuración de la fibra óptica

Esta capa se aplica por rociado en la etapa de producción previa al extruido de la vaina. Esta masa adhesiva produce en el cable una unión íntima entre la vaina, el alma y los hilos, la cual resulta ser especialmente ventajosa cuando se introduce el cable en un conductor.

En principio, también se pueden aplicar envolturas metálicas como por ejemplo cubiertas de plomo o armaduras onduladas de acero sobre los cables con almas de conductores de fibras ópticas. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que en el caso de esfuerzos por tracción, tales como suelen producirse al introducirse estos cables en conductos, se producen alargamientos permanentes del cable que, a largo plazo, podrían disminuir las características de transmisión de las fibras ópticas.

### 2.2.5. Vaina protectora

Se necesitan vainas protectoras de PE y PVC para cables exteriores o especiales (DIN VDE 0888 sección 3 y 0816); protegen a la armadura del cable contra corrosión y daños exteriores producidos por ejemplo durante la instalación o la inserción en conductos.

Las vainas protectoras son de PE y se aplican en general encima de las masas bituminosas protectoras de la corrosión, por el método de la termocontracción, a unos 200°C.

Cuando se requieren vainas exteriores teñidas o resistentes a derivados del petróleo, se aplica por extrusión una capa de PVC del espesor requerido en torno de las vainas de PE. Para otros usos se emplean vainas protectoras de PE negro.

### 2.2.6. Armaduras

En general, los cables con conductores de fibras ópticas se colocan sin armaduras tanto en tierra como en conductos.

Los elementos compensadores de la tracción formados por hilos, unidos con la vaina del cable por medio de adhesivos, y sus elementos de soporte, alcanzan para resistir bien a las sollicitaciones longitudinales habituales.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Se utiliza una armadura adicional para la protección del alma y la vaina del cable de conductores de fibra óptica en los casos de las aplicaciones especiales, como por ejemplo cables submarinos, en minas, o con protección contra roedores, cables aéreos autoportantes o cuando se requieren valores mecánicos extremos para sollicitaciones de tracción y/o compresión.

Para estos cables especiales se deben elegir elementos adecuados para la armadura que no incrementen excesivamente el peso del cable, no reduzcan su flexibilidad sustancialmente y además poseen una reducida dilatación: se debe lograr una buena relación entre el módulo de elasticidad y el peso.

Para la estructura de cables conductores de fibra ópticas se han impuesto los hilos de aramida (Kevlar) y el acero en sus más variadas formas; en el caso de los hilos de aramida la relación del módulo de elasticidad respecto del peso es varias veces mayor que para el acero.

Los hilos de aramida se utilizan principalmente debajo de las diferentes vainas como elementos compensadores de tracción. En el caso de esfuerzos mayores, como por ejemplo en cables aéreos autoportantes, se emplean haces debajo de la vaina exterior de hilos.

Para los cables con protección contra roedores se ha impuesto una *envoltura de flejes de acero*, formada por lo menos por una capa de fleje de acero galvanizado de 0,2 mm de espesor y las capas protectoras contra la corrosión (que fijan las normas VDE) así como una vaina protectora exterior de polietileno.

Como alternativa de las armaduras de fleje de acero existe una *cubierta de capas de acero*; se aplica directamente sobre el cable un fleje longitudinal de acero acanalado cubierto en ambas caras con un acetato de polietileno y unido a la vaina de polietileno de modo similar a la cubierta capas de aluminio. La forma ligeramente acanalada del fleje de acero incrementa la flexibilidad del cable.

### *Advertencia*

Las envolturas de flejes de acero no pueden absorber esfuerzos de tracción.

Para los cables aéreos autoportantes se han impuesto diversos materiales para *armaduras de alambre redondo*. Según los usos previstos se utilizan alambres de aluminio o de aldreya en una o más capas y se complementan con alambres de aluminio con alma de acero.

## Configuración de la fibra óptica

Para otras solicitudes extremas, como por ejemplo cables submarinos, se pueden utilizar alambres redondos macizos de acero con galvanizado de gran espesor o alambres de aceros especiales. Los aceros con galvanizado de gran espesor requieren, de todos modos, una protección anticorrosiva eficaz, adicional.

### 2.2.7. Clases constructivas

Los cables conductores de fibras ópticas se clasifican según determinadas características constructivas correspondientes a los siguientes grupos:

- Cables exteriores
- Cables interiores
- Cables especiales

Para explicar los conceptos se eligen, de entre los múltiples casos posibles, algunos tipos de cables de fibras ópticas con características destacadas, se tratan los usos posibles y se dan indicaciones sobre normas existentes.

Para todos los tipos constructivos se debe tener en cuenta, de igual manera, que tanto durante la fabricación como a causa de otras influencias admisibles, debe evitarse que se produzcan alteraciones permanentes de las características de transmisión a los conductores de fibra óptica.

Se puede elegir el conductor de fibra óptica adecuado en forma independiente de su tipo constructivo salvo el dimensionado del conductor de fibra óptica. En este caso son importantes los datos relativos a los tramos, así como el conocimiento, de las características técnicas de los sistemas de transmisión previstos. En la tabla 2 se han resumido, para las longitudes de onda de 850 y 1300 nm, los valores usuales en la actualidad correspondientes al coeficiente de atenuación, ancho de banda, etc. para conductores de fibra óptica monomodo y multimodo.

### 2.2.8. Cables exteriores

La configuración y dimensionamiento de los cables exteriores, en particular los que tienen una vaina de PE, es tal que se ajustan a todos los requerimientos que se les presenten tanto en instalaciones de canales que se efectúen en tierra como en conductos.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Según la cantidad de conductores de fibra óptica multimodo que se requieran, se utilizan conductores huecos con una fibra óptica o conductores de grupos con 2 a 12 fibras ópticas.

Teniendo en cuenta consideraciones constructivas y de rentabilidad se han impuesto para cables los conductores huecos de hasta 14 fibras ópticas y a partir de 16 fibras los conductores de grupo. En ambos casos, como es sabido, se rellenan a estos conductores con una masa adecuada.

Los siguientes ejemplos señalan, especialmente para cables con numerosas fibras, las ventajas de los conductores por grupos de fibras ópticas multimodo:

	Diámetro exterior en una disposición constructiva con conductores huecos, en mm	Diámetro exterior en una disposición constructiva con grupos de fibras, en mm
Cables con 16 fibras ópticas	15	14
Cables con 120 fibras ópticas	28	20

Los cables con fibras ópticas monomodo se conforman, en principio, como conductores por grupos.

## Configuración de la fibra óptica

Tabla 2. Características ópticas y de transmisión de conductores de fibras ópticas monomodo y multimodo, a temperatura ambiente (según DIN VDE sección 3)

	Conductores de fibra óptica			
	Multimodo G 50/125		Monomodo E 10/125	
	Longitud de onda		Longitud de onda	
	850 nm (...B...)		1300 nm (...F...)	
Coefficiente de atenuación <sup>1)</sup> máximo	3,5	2,7	1,5	1,0
	2,5		0,7	0,4
	0,4 (0,5)			
Ancho de banda a 1 km <sup>1)</sup> mínimo	200	400	600	800
	800	1000	1000	1200
	varios 10 GHz			
Dispersión en la gama de 1285 a 1330 nm máximo	-		-	-
	$\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$		3,5 (5 a 6)	
Apertura numérica Valor nominal	0,20		0,20	
Tolerancia admisible	± 0,02		± 0,02	
	10		10	
Díámetro de campo Valor nominal	-		-	
Tolerancia admisible	-		-	
	± 1		± 1	

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Tanto los conductores huecos como los por grupos se configuran trenzados por capas en torno a un elemento central.

Sobre los elementos de tracción no metálicos se aplica para usuarios del área industrial una vaina de PE. Gracias a la masa de relleno en los conductores huecos o por grupos así como en el alma de cables exteriores, estos son herméticos longitudinal y transversalmente. El color de la vaina es negro en todos los casos.

Los esfuerzos de tracción entre 1000 y 3000 N originados habitualmente durante el tendido de los cables exteriores, en especial cuando se los introduce en conductos, no provocan inconvenientes cuando se efectúa una correcta elección del tipo constructivo y se utilizan los cabezales o tapas de tracción adecuados.

Para usos particularmente críticos se puede aplicar, adicionalmente, sobre la vaina una armadura y encima de ésta una cubierta protectora. Los cables de larga distancia destinados a esta entidad se colocan dentro de caños de plásticos. Solamente en los casos que requieren protección contra roedores y los cables no se introducen en tubos, se pueden aplicar dos armaduras de flejes de acero de 0,1 mm o una de 0,2 mm con sus cubiertas interiores y exteriores según la norma DIN VDE 0816.

Los cables según la norma DIN VDE 0888 sección 3 deben contener como marca de fábrica (marca de origen) un hilo de identificación registrado del respectivo fabricante. Cuando éste lo solicita, la oficina de ensayos del VDE, una vez efectuadas las comprobaciones pertinentes, otorga autorización de colocar el hilo negro y rojo característico del VDE.

Los cables deben tener sobre la vaina o protección exterior una identificación continua según la norma DIN VDE 0888 sección 3 cap. 3.4.5.

A continuación se indican las temperaturas de transporte, almacenamiento, servicio y tendido para estos cables.

Observando los radios de curvatura mínimos de los cables de conductores de fibras ópticas, éstos para su tendido o colocación en caños o placas moldeadas pueden ser tratados igual que cables de cobre convencionales. Por su bajo peso brindan la ventaja adicional que se pueden colocar tramos de hasta 2000 m de longitud.

## Configuración de la fibra óptica

- Rangos de temperaturas

- Temperatura de transporte y almacenamiento: -25° a 70°C
- Temperatura de tendido: -5 a 50°C
- Temperatura de servicio: -20 a 60°C

De los cables con conductores de fibras ópticas para exteriores se suministran actualmente en tramos de 2000 y 1000 m (longitud estándar)

Según su diámetro, peso y aplicaciones se pueden fabricar tramos de hasta 5000 m de longitud.

En la tabla 3 se comparan valores nominales de algunos cables exteriores conductores de fibras ópticas seleccionados, con los de cobre.

Tabla 3. Comparación de cables conductores de fibras ópticas y de cobre

Número de conductores		Diámetro exterior, en mm		Peso, en $\frac{kg}{km}$		Longitud de suministro (longitud estándar), en m	
Conductor de fibra óptica	Conductor doble de cobre 0,6 mm	LWL	Cu	LWL	Cu	LWL	Cu
2, 4, 6	6	12	12	115	140	2000	1000
10	10	12,5	13,5	125	190	2000	1000
20	20	14	16,5	160	315	2000	1000
40	40	14	21,5	160	555	2000	1000
60	60	16	25,5	205	800	2000	1000
100	100	20	31,5	305	1245	2000	1000
500	500	43	65,5	1300	5700	1000	500
1000	1000	51	91,5	2100	11200	1000	250

En resumen, se puede advertir que para todas las aplicaciones de la técnica de conductores de cobre conocidas se dispone del adecuado cable exterior conductor de fibras ópticas.

Las principales ventajas de los cables exteriores de fibras ópticas son:

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

-> Mecánicas

- Reducido diámetro del cable
- Poco peso
- Se suministran en tramos de gran longitud
- Dimensiones convenientes de los carretes de cables y, por ende, reducido peso de éstos.

-> Influencias externas

No existen problemas ocasionados por influencias externas tales como rayos, líneas de alta tensión o trenes eléctricos ni por desplazamiento de potenciales, ni inconvenientes de puestas a tierra ya que existe la posibilidad de fabricar totalmente los cables materiales con materiales dieléctricos.

-> Características de transmisión

*Buena atenuación*

Conductor de fibra óptica multimodo con perfil gradual:

- a 850 nm, entre 2,5 y 3,5 dB/km
- a 1300 nm, entre 0,7 y 1,5 dB/km

Conductor de fibra óptica monomodo:

- a 1300 nm, entre 0,4 y 0,5 db/km

*Gran ancho de banda*

- para 1 km de conductor de fibra óptica multimodo, hasta 1,2 GHz
- para 1 km de conductor de fibra óptica monomodo, hasta varios múltiplos de 10 GHz



## Configuración de la fibra óptica

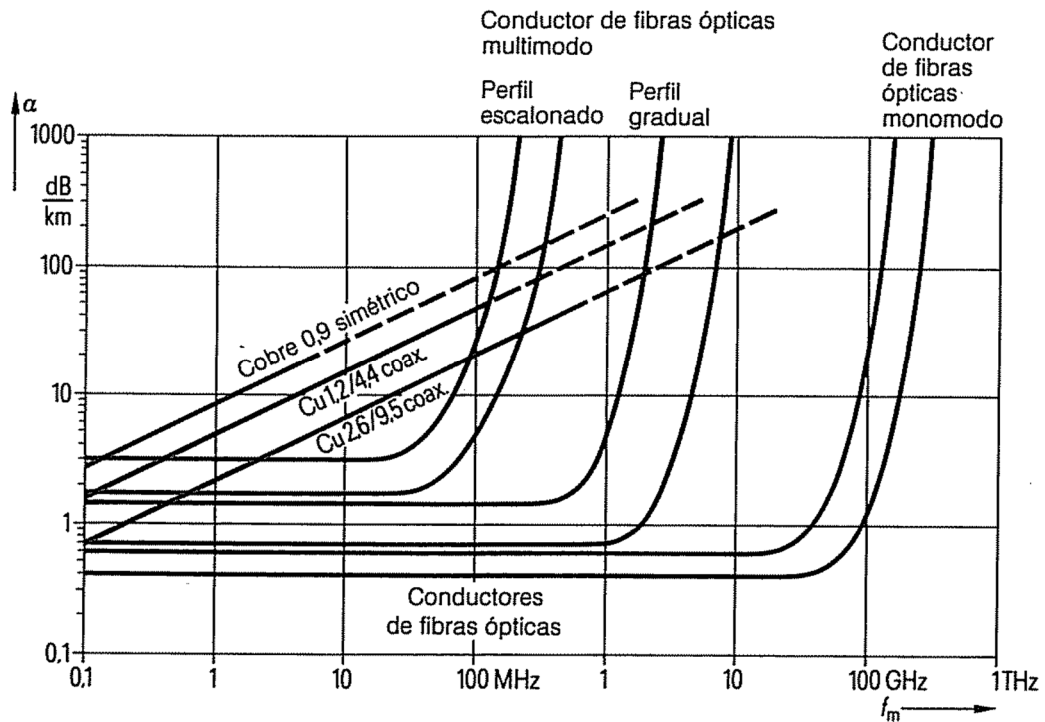


Figura 2.12. Coeficiente de atenuación en función de la frecuencia moduladora para cables de cobre sintéticos y coaxiales así como diversos cables de fibras ópticas

- Seguridad relativamente alta contra interceptación

La figura 2.12 ilustra una de las principales ventajas de los conductores de fibras ópticas al comparar los coeficientes de atenuación de diferentes cables coaxiales con los de fibras ópticas.

Los cables de conductores de fibras ópticas son adecuados tanto para los “sistemas de pocos canales” (< 30 canales) para la transmisión de señales telefónicas y de telecontrol como para los sistemas de banda ancha planeados para el futuro tales como por ejemplo la Red Digital de Servicios Integrados de banda ancha en la cual se han integrado en una red todas las formas de transmisión.

- Televisión, videotextos, radiofonía/estéreo
- datos, telex, teletexto, telefax
- servicios digitales integrados, telefonía
- videoconferencias, así como videoteléfono

Hoy en día con sistemas digitales y velocidades de transmisión de 565 Mbit/s ya se alcanzan longitudes de campo regenerador muy superiores a los de los cables de cobre simétricos o coaxiales.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

- Cables para exteriores con conductores huecos para fibras ópticas multimodo de perfil gradual

En cables para exteriores con un máximo de 14 fibras ópticas se utiliza el conductor hueco, una vaina protectora aplicable en forma universal. Como se sabe, este tubo plástico de 1,4 mm de espesor se rellena con una masa adecuada para lograr estanqueidad longitudinal.

En estos conductores huecos se usan todas las fibras ópticas multimodo usuales. La norma DIN VDE 0888 sección 2 establece las características de estos conductores.

En torno de un elemento central formado por plástico reforzado con fibras de vidrio se colocan hasta 14 elementos trenzados (conductores huecos o de cobre). Los intersticios del alma del cable se rellenan.

Sobre el alma del cable se ciñen elementos de tracción formados por hilos de aramida (Kevlar) que a su vez están firmemente unidos con la vaina exterior de PE, de 2 mm de espesor, por medio de un adhesivo termofundible.

En la figura 2.13 se ilustra un ejemplo típico de un cable exterior con conductores huecos.

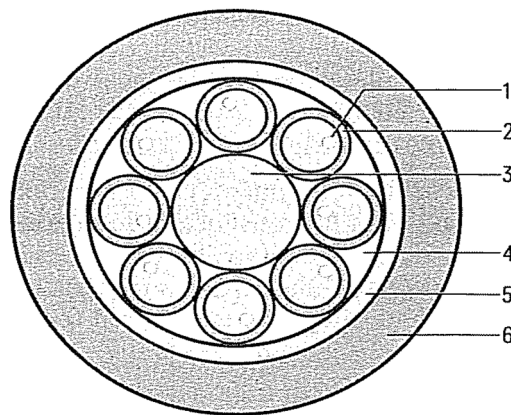


Figura 2.13. Cable exterior conformado totalmente por elementos dieléctricos con 8 fibras ópticas, en forma de conductores huecos

- |  |  |
|--|--|
| 1. Conductor de fibras ópticas               | 4 Masa de relleno                          |
| 2 Vaina de los conductores                   | 5 Elemento de tracción de hilos de aramida |
| 3 Elemento de soporte totalmente dieléctrico | 6 Vaina exterior de PE                     |

## Configuración de la fibra óptica

Tabla 4. Denominación

A – WF 2Y 8G 50/125 ... F ... Lg	
A	Cable exterior
W	Conductor hueco relleno
F	Alma del cable con relleno continuo
(ZN)2Y	Vaina de PE con elementos de tracción no metálicos
... F ...	Coefficiente de atenuación y ancho de banda para 1300 nm
Lg	Trenzado por capas.

Para los clientes del área industrial se han impuesto los números de 2, 4, 6, 8, 10 o 12 fibras ópticas en la norma DIN VDE 0888 sección 3 tabla 6. Para casos especiales se puede seleccionar otro número de fibras ópticas. Los elementos trenzados se identifican como sigue:

- Conductor hueco como elemento numerados rojo
- Restantes conductores huecos verde
- Conductores ciegos color natural

En caso que se coloquen conductores ciegos, estos deben estar en posición simétrica con respecto al conductor numerador.

Actualmente, en todas las líneas de servicio se cablean dos conductores de cobre de 0,6 mm de diámetro, aislados con polietileno.

Estos elementos trenzamos se identifican como sigue:

- 1. conductor (cobre) rojo
- 2. conductor (cobre) rojo con anillos
- Conductores huecos verde
- Conductores ciegos color natural

Los conductores de cobre se deben colocar en posición simétrica con respecto al conductor numerador. Si se utilizan conductores ciegos, los mismos se colocan a continuación, también en forma simétrica, luego se colocan los restantes conductores huecos. Estos se enumeran en forma correlativa

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

comenzando a partir del conductor numerador colocado entre los dos conductores de cobre. El conductor identificado con anillos no establece una dirección para la numeración.

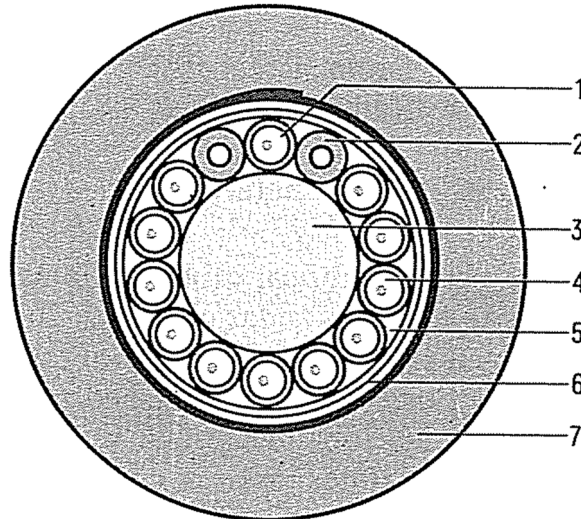


Figura 2.14. Figura \_ Cable de telecomunicaciones con vaina de capas de PE y 12 fibras ópticas en conductores huecos así como dos conductores de cobre

- 1 Conductor hueco, elemento numerador
- 2 Conductor de cobre
- 3 Elemento de soporte
- 4 Conductor hueco
- 5 Masa de relleno
- 6 Recubrimiento del alma
- 7 Vainas por capas de PE con elementos de tracción

Denominación

A - WSF (L) (ZN) 2Y 12G 50/125 ... F ... Lg

## Configuración de la fibra óptica

- Cables exteriores conductores por grupos de fibras ópticas multimodo con perfil gradual

En los cables exteriores se utilizan conductores por grupos a partir de las 20 (16) fibras ópticas (DIN VDE 0888 sección 3). Este elemento de cableado ahorra espacio; contiene hasta 12 fibras ópticas y se rellena con una masa al igual que los conductores huecos. La tabla (TABLA 6.3 LIBRO) indica los colores de identificación de estos cables. El diámetro del conductor por grupos es de 3,0 mm.

Tabla 5. Colores que se aplican en las vainas de las fibras

fibra 1	azul
fibra 2	amarillo
fibra 3	verde
fibra 4	rojo
fibra 5	color natural
fibra 6	azul (con anillos negros sobreimpresos)
fibra 7	amarillo (con anillos negros sobreimpresos)
fibra 8	verde (con anillos negros sobreimpresos)
fibra 9	rojo (con anillos negros sobreimpresos)
fibra 10	color natural (con anillos negros sobreimpresos)

En el cableado por capas se trenzan por lo menos 5 elementos en torno de un elemento central. De éstos, uno se debe prever como reserva con 102 fibras según establecen la norma DIN VDE 0888 sección 3 y las condiciones Técnicas para Suministros Deutsche Bundespost (Administración de Correos de Alemania Federal) 78TL2, pudiendo este elemento de reserva ser reemplazado por un conductor ciego.

Según las normas y prescripciones arriba citadas, los elementos trenzados se identifican como sigue:

Conductor por grupos de reserva

o conductor ciego que lo reemplaza

(elemento numerador)

rojo

Cuadrete (de cobre)

amarillo

Conductor por grupos

verde

Conductor ciego

color natural

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

El trenzado de los conductores por grupos permite fabricar cables de fibras ópticas muy compactos. Configuraciones de cables estándar contienen 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 o 120 fibras ópticas en grupos a razón de 10 fibras (figura 2.15).

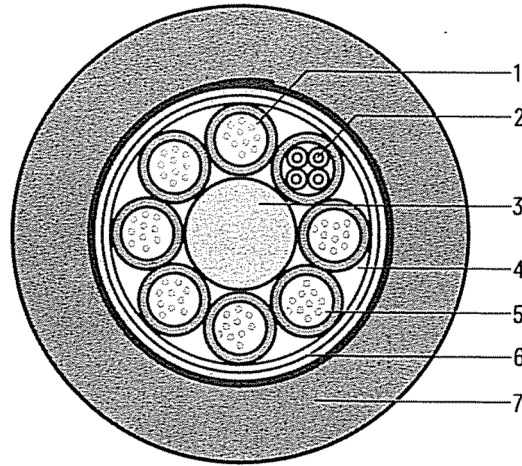


Figura 2.15. Cable de telecomunicaciones con vaina por capas de polietileno y hasta 60 fibras ópticas en conductores por grupos, así como un cuadrete de cobre

1. Conductor por grupos de reserva o conductor ciego
2. Cuadrete
3. Elemento de soporte
4. Masa de relleno
5. Conductor por grupos
6. Recubrimiento del alma
7. Vaina por capas de PE con elementos de tracción

### Denominación

A - DSF (L) (ZN)2Y 6 X 10G 50/125 ... F ... Lg

A fin de identificar en cables con más de 300 fibras ópticas más fácilmente a cada uno de los conductores por grupos, conviene usar, como elemento para el alma del cable, grupos principales con 50 ó 100 fibras ópticas. Estos, al igual que los conductores por grupos, se trenzan por capas con respecto al alma del cable. Para poder identificar a cada uno de los grupos principales, se marca a uno de ellos, correspondiente a cada capa y con carácter del así llamado grupo de numeración, con una espira de fijación teñida con determinado color.

## Configuración de la fibra óptica

En la figura 2.16 se ilustra una posibilidad para configurar un cable con 2000 fibras ópticas. En este caso se forma el alma del cable con grupos principales de 100 fibras ópticas cada uno. El grupo principal individual ilustrado en esta figura corresponde, también, en su configuración al alma de un cable con 100 fibras ópticas.

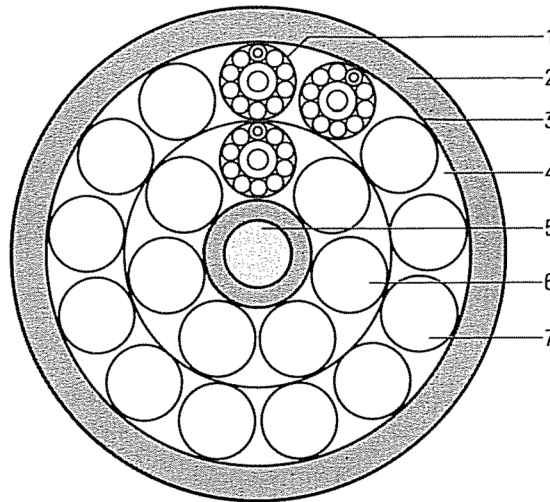


Figura 2.16. Cable de telecomunicaciones con vaina por capas de polietileno y hasta 60 fibras ópticas en conductores por grupos, así como un cuadrete de cobre

1. Conductor por grupos de reserva o conductor ciego
2. Cuadrete
3. Elemento de soporte
4. Masa de relleno
5. Conductor por grupos
6. Recubrimiento del alma
7. Vaina por capas de PE con elementos de tracción

### Denominación

A - DSF (L) (ZN)2Y 6 X 10G 50/125 ... F ... Lg

A fin de identificar en cables con más de 300 fibras ópticas más fácilmente a cada uno de los conductores por grupos, conviene usar, como elemento para el alma del cable, grupos principales con 50 ó 100 fibras ópticas. Estos, al igual que los conductores por grupos, se trenzan por capas con respecto al alma del cable. Para poder identificar a cada uno de los grupos principales, se marca a uno de ellos, correspondiente a cada capa y con carácter del así llamado grupo de numeración, con una espira de fijación teñida con determinado color.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

En la figura 2.17 se ilustra una posibilidad para configurar un cable con 2000 fibras ópticas. En este caso se forma el alma del cable con grupos principales de 100 fibras ópticas cada uno. El grupo principal individual ilustrado en esta figura corresponde, también, en su configuración al alma de un cable con 100 fibras ópticas.

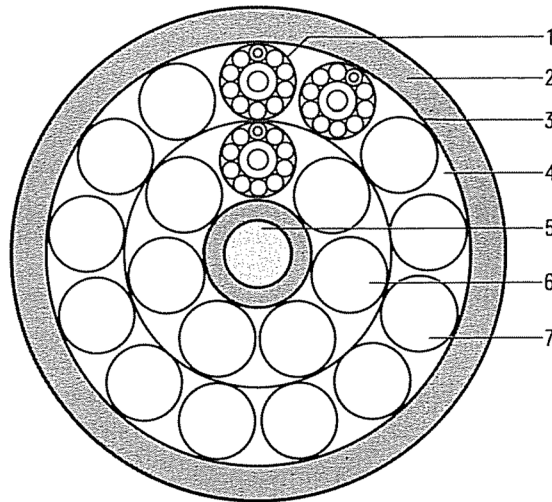


Figura 2.17. Cable con 2000 fibras ópticas

1. Grupo principal con 100 fibras ópticas
2. Vaina de polietileno
3. Capa barrera
4. Masa de relleno
5. Elemento central
6. 1ª capa: 7 x 100 fibras ópticas
7. 2ª capa: 13 x 100 fibras ópticas

Denominación

A - DF (ZN) 2 Y 200 X 10G 50/125 ... F ... Bd

Todos los restantes elementos constitutivos como puede ser la vaina, armadura, vaina protectora, etc. se emplean, de acuerdo a sus respectivos diámetros, al igual que en el caso de cables con conductores huecos.

En comparación, los cables de fibra óptica pesan mucho menos que los coaxiales.



## Configuración de la fibra óptica

- Cables exteriores con conductores por grupos para fibras ópticas monomodo

Adquieren creciente importancia los cables exteriores con conductores de fibras ópticas monomodo. En la configuración de los cables se debe prestar especial atención a que las fibras no se hallen expuestas a ninguna sollicitación mecánica en el cable. Además, se deben respetar todos los parámetros constructivos exigidos para conductores de fibras ópticas multimodo.

Según el número de fibras ópticas se emplean los siguientes conductores por grupos:

- 1 a 2 fibras ópticas: conductor por grupos con  $\varnothing$  2,0 mm
- 3 a 4 fibras ópticas: conductor por grupos con  $\varnothing$  2,8 mm
- 6 fibras ópticas: conductor por grupos con  $\varnothing$  3,0 mm

Los conductores por grupos se enumeran en forma correlativa comenzando por el numerador. El par de cobre no se debe contar y su posición no indica una dirección determinada de numeración; los conductores ciegos no se cuentan.

Según las Condiciones Técnicas de Suministro 78TL3 se ha determinado para estos cables el siguiente número de fibras ópticas: 8, 16, 24, 32, 40 y cada grupo contiene 4 fibras ópticas. Teniendo en cuenta que la técnica de conductores por grupos brinda un concepto constructivo flexible, también se puede conformar cables con más de 40 fibras ópticas.

Los cables con fibras ópticas monomodo se emplean en todos aquellos casos en los cuales, además de un gran ancho de banda, se requieren bajas atenuaciones.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Tabla 6. Estructura de la identificación de cables para exteriores según la norma DIN VDE 0888 sección 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9 <sup>1)</sup>	10	11	12 <sup>2)</sup>	13	14
													Trenzado por capas
													Ancho de banda en MHz/1 km
													Longitud de onda
													B $\cong$ 850 nm
													F $\cong$ 1300 nm
													H $\cong$ 1550 nm
													Coeficiente de atenuación, en $\frac{dB}{km}$
													Diámetro del recubrimiento, en $\mu m$
													Diámetro del núcleo, en $\mu m$
													Clase constructiva
													G Fibra óptica con perfil gradual
													E Fibra óptica monomodo
													Número de fibras ópticas o número de los conductores por grupos y número de fibras ópticas de cada conductor por grupo
													b Armadura
													bY Armadura con vaina protectora de PVC
													b2Y Armadura con vaina protectora de polietileno
													2Y Vaina de PE
													(L) 2Y Vaina por capas
													(ZN) 2Y Vaina con elementos de tracción no metálicos
													F Masa de relleno para los intersticios del trenzado en el alma del cable
													S Elemento metálico incluido en el alma del cable
													H Conductores huecos sin relleno
													W Conductores huecos con relleno
													B Conductores por grupos sin relleno
													D Conductores por grupos con relleno
Denominación del producto													
A-cables exteriores													

1) En el caso de fibras ópticas monomodo se indica el diámetro de campo en lugar del diámetro del núcleo.

2) En el caso de fibras monomodo se indica la dispersión en  $ps/(nm \cdot km)$  en lugar del ancho de banda

## Configuración de la fibra óptica

### 2.2.9. Cables interiores

Para las más diversas aplicaciones en el interior de edificios se requieren cables de fibras ópticas para interiores con vainas de PVC, dado que al igual que en el caso de instalaciones con cables convencionales, el uso de cables exteriores con vaina de PE no está permitido o lo está sólo en forma restringida en el interior de edificios. Por eso, los cables para exteriores finalizan inmediatamente después de ingresar en un edificio en una caja de empalme distribuidora de fibras ópticas o en un bastidor terminal para cables (KEG) siempre que éste se encuentre en la misma sección antiincendios. Desde la caja de empalmes se tienen hasta el distribuidor cables para interiores con una o más fibras ópticas según sea necesario. Para mantener los empalmes libres de puntos de juntura (e incrementos de atenuación) se utiliza, dentro de lo posible, cables para interiores con similares características ópticas de transmisión que los correspondientes para exteriores. Los cables para interiores están constituidos de tal forma que ninguno de estos cables experimente alteraciones inadmisibles causadas ni por sollicitaciones mecánicas ni variaciones de temperatura.

Los cables para interiores contienen hasta 6 fibras ópticas (diámetros del núcleo/recubrimiento 50/125  $\mu\text{m}$ ) y como vaina protectora un conductor macizo o compacto.

En la configuración con un conductor de fibra óptica utilizadas principalmente como cables divisores en cajas de empalme o para el cableado en bastidores y distribuidores, se aplica sobre el conductor un elemento de tracción /soporte no metálico de hilos de aramida-vidrio, así como una vaina de PVC gris de 0,6 mm de espesor. En razón del reducido diámetro de sólo 3,5 mm, estos cables son de utilización universal.

Las normas correspondientes a cables para interiores con un conductor de fibra óptica se dan en DIN VDE 0888 sección 4; en cambio los de 2 a 6 fibras ópticas son tratados constructivamente como cables exteriores. Sobre un elemento central se trenzan hasta 6 conductores macizos o compactos y luego se colocan los elementos no metálicos de tracción/soporte de hilos de aramida y a continuación una vaina de PVC de 0,9 mm de espesor.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

### - Rasgos de temperaturas

Tipo de cable	Temperatura de transporte y almacenamiento	Temperatura de tendido	Temperatura de servicio
J - HY 1G 50/125	-25°C a 70°C	-5°C a 50°C	-5°C a 50°C
J - WY 1G 50/125			
J - VY 1G 50/125			

Para el cableado de instalaciones interiores de redes de comunicaciones y datos o para cables de distribución se requieren cables para interiores con más de 6 fibras ópticas; para ello se constituyen conductores por grupos a partir de las 10 fibras ópticas multimodo. Cada conductor por grupos tiene un diámetro exterior de 3,0 mm y contiene un máximo de 10 fibras ópticas.

Las figuras 2.18 y 2.19 ilustran cables para interiores de 10 y 60 fibras ópticas con diámetros exteriores de aproximadamente 4,4 mm y 13,5 mm, respectivamente.

Con los correspondientes conductores ciegos se pueden constituir cables con un número distinto de fibras ópticas.

En los cables para interiores con fibras ópticas monomodo se utilizan conductores por grupos de 2,8 mm de espesor; cada uno contiene un máximo de 4 fibras ópticas. Los valores ópticos se adaptan a aquellos de los cables exteriores.

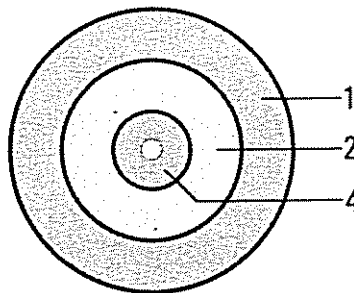


Figura 2.18. Cable interior con 1 fibra óptica

## Configuración de la fibra óptica

Denominación

J - VY 1G 50/125 ... F ...

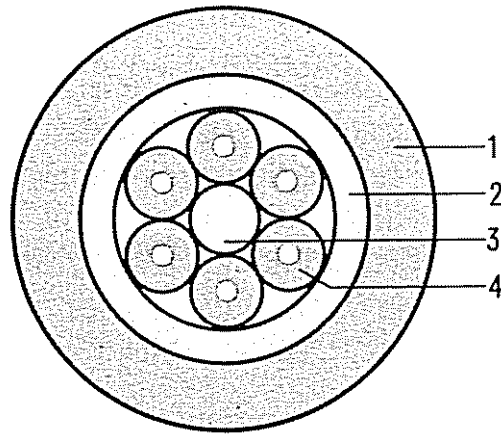


Figura 2.19. Cable interior con 6 fibras ópticas

Denominación

J - VY 6G 50/125 ... F ... Lg

J Cable interior

V Conductor macizo

Y Vaina de PVC

1G 50/125 Fibra óptica con un perfil gradual diámetro del núcleo/recubrimiento 50/125  $\mu\text{m}$

... F ... Coeficiente de atenuación y ancho de banda de 1300 nm

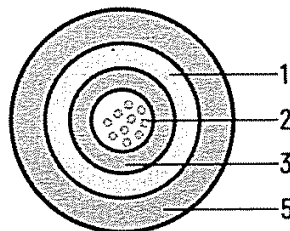


Figura 2.20. Cable interior de 10 fibras ópticas (conductor por grupos)

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Denominación

J - DY 1 X 10G 50/125 ... F ...

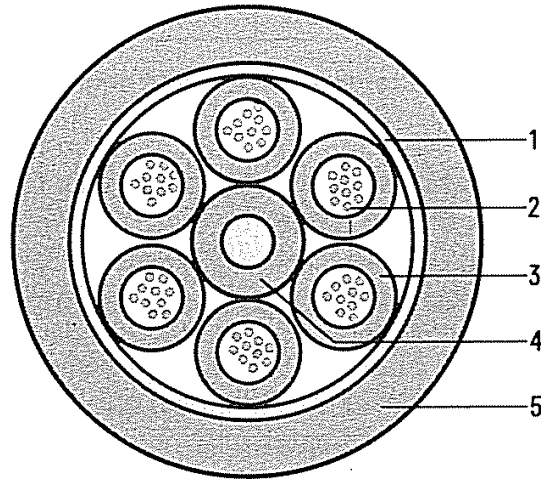


Figura 2.21. Cable interior con 60 fibras ópticas (conductor por grupos)

Denominación

J - DY 6 X 10G 50/125 ... F ... Lg

## Configuración de la fibra óptica

Tabla 7. Estructura de la identificación de cables interiores según la norma DIN VDE 0888 sección 4

1	2	3	4	5	6 <sup>1)</sup> / 7	8	9	10 <sup>2)</sup>
								Ancho de banda, en MHz para 1 km
								Longitud de onda B ≅ 850 nm F ≅ 1300 nm H ≅ 1550 nm
								Coeficiente de atenuación, en $\frac{dB}{km}$
								Diámetro del recubrimiento, en $\mu m$
								Diámetro del núcleo, en $\mu m$
								Clase constructiva G Fibra óptica con perfil gradual E Fibra óptica monomodo
								Número de fibras ópticas
								Y Vaina de PVC H Vaina de sustancias no halogenadas
								V Conductor macizo H Conductor hueco sin relleno W Conductor hueco con relleno
Denominación del producto								
J-Cable interior								

### 2.2.10. Cables especiales

Los cables con conductores de fibras ópticas son apropiados de manera excelente para instalaciones con requerimientos especiales. Comparados con cables de cobre brindan considerables ventajas, en especial por su pequeño diámetro y el reducido peso propio resultante así como, en el caso de los cables conformados totalmente con materiales dieléctricos, por su insensibilidad a las influencias eléctricas.

Las ventajas de los cables conductores de fibras ópticas se destacan especialmente en las instalaciones de las empresas de distribución de energía eléctrica, ya que con cables diseñados en forma adecuada no existen problemas de influencias, puestas a tierra o potenciales tales como pueden ocurrir en

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

cables de alta tensión o líneas aéreas (así como subestaciones o playas de maniobra) cuando cables con conductores de cobre están tendidos en forma paralela a la traza de aquellos. Bajas atenuaciones en conductores de fibras ópticas monomodo y multimodo así como grandes anchos de banda hasta la gama de los GHz, son en estas instalaciones tan importantes como en aplicaciones industriales como, por ejemplo, en sistemas de computación o procesamiento electrónico de datos.

Otras aplicaciones son las construcciones navieras y aeronáuticas (figura 2.22) donde se requieren cables especialmente livianos, mecánicamente estables, insensibles a las vibraciones y resistentes a temperaturas elevadas.

Para aplicaciones militares resulta particularmente ventajoso el que los cables de fibras ópticas construidos con materiales dieléctricos no son localizables eléctricamente y que, además, son altamente seguros contra escuchas.

Otros campos de aplicación son cables marinos (figura 2.23) y cables para instalaciones mineras.

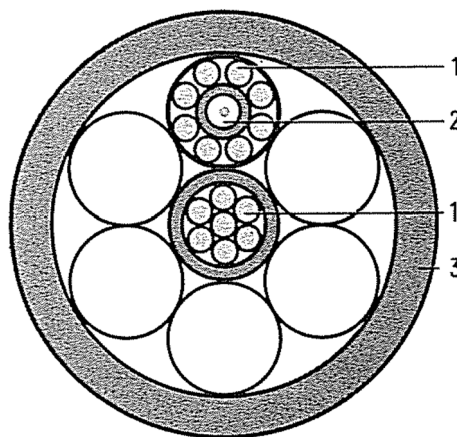


Figura 2.22. Cables para aviones

1. Hilos de vidrio saturados
2. Conductores huecos
3. Vaina de PFA



## Configuración de la fibra óptica

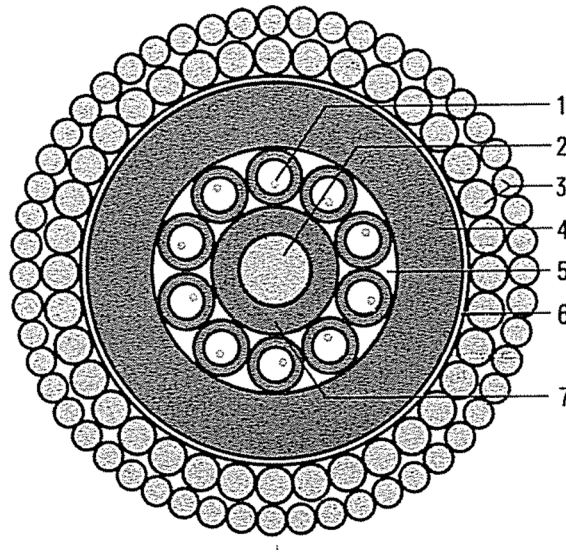


Figura 2.23. Cables marinos de fibras ópticas para grandes distancias

1. Conductores huecos
2. Elemento central conductor de cobre
3. Armadura de acero
4. Vaina de PE
5. Masa de relleno
6. Protección contra la presión
7. Aislación de PE

### 2.3. Fabricación de la fibra óptica

La fabricación de un conductor de fibra óptica suele efectuarse en procesos de varias etapas. Esta forma de fabricación permite una producción en grandes series, rápida y rentable, lo que resulta fundamental hoy en día en las telecomunicaciones por cables de fibra ópticas.

En casi todos los procesos actuales se fabrica en primer lugar una preforma. Se trata de una varilla de vidrio con núcleo y recubrimiento. Observando la sección de la preforma se ve que la misma es una ampliación a escala de las dimensiones geométricas y de perfil de índices de refracción del conductor de fibra óptica que se elabora con la misma. Calentando intensamente un extremo, se estira la preforma hasta obtener el conductor de fibra óptica final. A su vez, se aplica el revestimiento que hace las veces de cubierta protectora del conductor.

#### 2.3.1. Fabricación de la preforma

Existen dos métodos de fabricación, que se explicarán a continuación:

Uno de los primeros métodos utilizados fue el de *varilla en tubo*. En el mismo, se introduce una varilla de vidrio de cuarzo de alta pureza como núcleo en un tubo que hace de recubrimiento y está formado por vidrio de cuarzo con bajo índice de refracción. Las dimensiones de la varilla y del tubo son tales que prácticamente no queda espacio entre ellos. Las desventajas de este proceso consiste en que, después del estirado de la fibra, quedan pequeñísimos deterioros e impurezas en la superficie de separación entre ambos vidrios, que ocasionan elevadas atenuaciones (de 500 a 1000 dB/km) y además sólo se pueden fabricar fibras multimodo con perfil escalonado de esta manera.

Para evitar este problema, en otro método de fabricación los vidrios correspondientes al núcleo y al recubrimiento son unidos en estado de fusión y luego se estira la fibra de este material directamente al salir del estado de fusión. En este método no se utiliza una preforma sólida y se lo denomina *método de los dos crisoles*, ya que los vidrios que se utilizan para el núcleo y el recubrimiento se funden en dos crisoles separados. Se utilizan vidrios de alta pureza con varios componentes como por ejemplo silicato alcalino de plomo y borsilicato sódico.

## Fabricación de la fibra óptica

También se pueden fabricar conductores de fibra óptica con perfil gradual por difusión o intercambio de iones entre los vidrios del núcleo y del recubrimiento (Método Selfoc). Resulta imposible mantener totalmente limpio el interior de los crisoles por lo que las impurezas que por esta causa kegan al conductor de fibra óptica se agregan a los metales de transición ya existentes, incrementando la atenuación (entre 5 y 20 dB/km a 850 nm). Este método de producción se utiliza especialmente para la fabricación de conductores de fibra óptica con núcleo de gran diámetro ( $\geq 200 \mu\text{m}$ )

El *método de la separación de fases de vidrio* consiste en formar una varilla de vidrio borsilicato sódico a  $1200^{\circ}\text{C}$  y luego se mantiene durante algunas horas a  $600^{\circ}\text{C}$ , produciendo una transformación de una fase de vidrio de borato de sodio en una matriz de vidrio  $\text{SiO}_2$ .

En la fase de vidrio de borato de sodio se concentran los metales de transición como por ejemplo Fe y Cu, los que posteriormente se eliminan por medio de ataque de ácidos quedando una preforma porosa, a la cual se le impregna con una solución salina de alta pureza como por ejemplo nitrato de cesio y después se la somete a lavado externo. Este método permite fabricar conductores de fibra óptica con perfil escalonado y gradual con una atenuación de 10 hasta 50 dB/km a 850 nm.

Otro método utilizado para la fabricación de preformas consiste en formar para el núcleo una varilla de vidrio de cuarzo comercial y aplicarle, mientras se la estira, un *recubrimiento de plástico transparente* de bajo índice de refracción, obteniéndose atenuaciones de 5 hasta 50 dB/km a 850 nm. También existen conductores de fibra óptica cuyo núcleo y recubrimiento se fabrica empleando materiales plásticos ópticamente puros con diferentes índices de refracción, son los así llamados conductores de fibra óptica plásticos. Los valores de atenuación medidos en estos conductores, a 600 nm, varían de 100 a 400 dB/km.

- Fabricación de la preforma por deposición de vidrio a partir de la fase gaseosa

Gracias a la fabricación de la preforma por *deposición de vidrio a partir de la fase gaseosa* se logró fabricar conductores de fibras ópticas con atenuaciones extremadamente reducidas.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

La deposición puede ser efectuada de diferentes formas: sobre la superficie externa de una varilla de substrato en rotación (*Método OVD*, outside vapor deposition), sobre la superficie frontal de una varilla de cuarzo (*Método VAD*, vapor axial deposition), o sobre la superficie interior de un tubo de vidrio de cuarzo en rotación (*Método IVD*, inside vapor deposition). En este último método se puede suministrar la energía para la deposición del vidrio ya sea desde afuera por medio de un quemador de gas detonante (*Método MCVD*, modified chemical vapor deposition) o desde adentro con una llama de plasma (*Método PCVD*, plasma activated chemical vapor deposition).

En estos métodos (figura 2.24), la deposición se produce por medio de la descomposición de compuestos volátiles de alta pureza en una llama de gas detonante. Estos métodos se utilizan actualmente en la fabricación industrial en gran escala de preformas para conductores de fibra monomodo y multimodo con la más reducida atenuación (0,2 dB/km a 1550 nm) y gran ancho de banda (> 2 GHz x km a 1300 nm) o baja dispersión (< 3,5 ps/nm x km entre 1290 y 1330 nm). Por un lado, se atribuye gran importancia a la mejora de la velocidad de deposición, es decir, la masa de las partículas depositadas por minuto, cuyos valores típicos se hallan en el orden de 1 a 5 g/min. Por otro lado, se procura aumentar el tamaño de la preforma para obtener de cada una de las fibras con una longitud de más de 100 km. Los valores típicos actuales varían entre 20 y 50 km.

## Fabricación de la fibra óptica

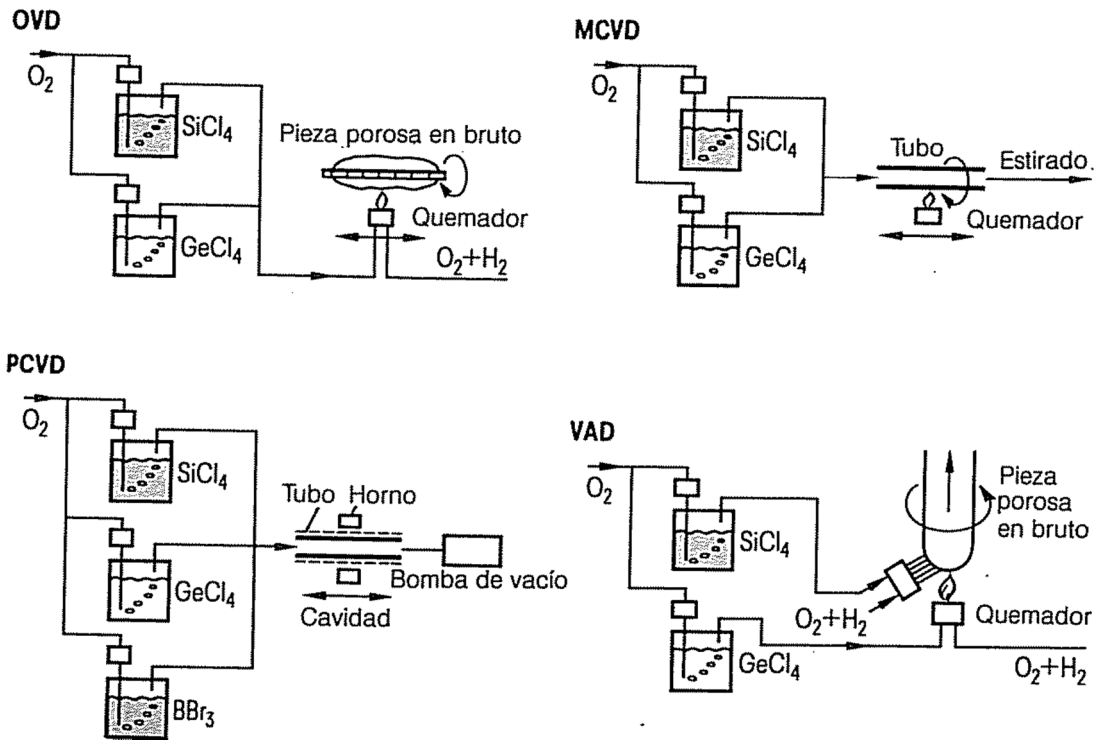


Figura 2.24. Fabricación de preformas por deposición de vidrio a partir de la fase gaseosa

### 2.3.2. Estirado de la fibra

Para el estirado de la fibra se coloca a la preforma en el soporte de la torre de estirado (figura 2.25).

La posición del soporte puede variar en sentido vertical por medio del dispositivo de avance. Con un elemento calefactor se calienta el extremo inferior de la preforma hasta aprox. 2000 °C, de tal forma que adquiera la viscosidad adecuada para estirar la fibra hacia abajo. La velocidad de estirado (valor típico 200 m/min) y la del dispositivo de avance se deben ajustar exactamente por medio de un circuito de regulación para obtener una fibra cuyo diámetro se mantenga constante en el valor requerido.

Durante la operación de estirado se mantienen constantes las relaciones geométricas del núcleo y el recubrimiento, aunque del diámetro de la preforma hasta el de la fibra estirada la reducción puede llegar a una relación de 300 a 1.

Directamente detrás del instrumento utilizado para la verificación del diámetro se aplica en torno de la fibra el *revestimiento*. La envoltura de su plástico protege al conductor de fibra óptica contra microcurvaturas, mejora su resistencia y facilita su manejo. Cuando el revestimiento se ha endurecido por efecto de calor o radiación ultravioleta, el conductor de fibra óptica es sometido

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

*al ensayo continuo* de resistencia la tracción, haciendo pasar a la fibra por una serie de poleas las cuales ejercen sobre el mismo una tensión mecánica ajustable con gran precisión. El conductor de fibra óptica debe resistir esta carga mínima antes de ser bobinado en un tambor cilíndrico.

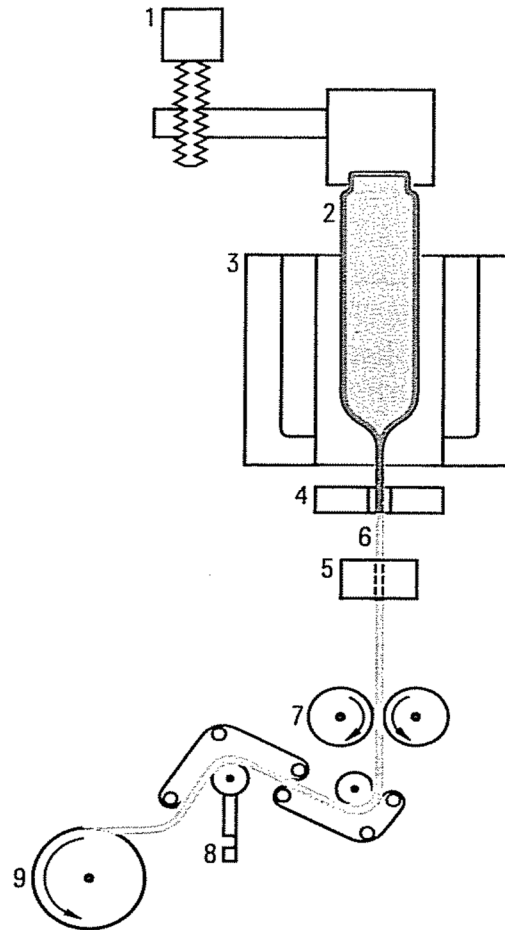


Figura 2.25. Esquema de estirado de la fibra

- |                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| 1. Dispositivo de avance | 6. Conductor de fibra óptica |
| 2. Preforma              | 7. Rodillos trefiladores     |
| 3. Horno                 | 8. Control de resistencia    |
| 4. Control del diámetro  | 9. Bobina de enrollado       |
| 5. Capa protectora       |                              |

### 2.4. Cables de fibra óptica

Para la mayoría de los usuarios, los cordones de fibra óptica monomodo y multimodo no son directamente aplicables. Las causas para ello radican, ante todo, en el alargamiento de rotura relativamente bajo (de algunas partes por mil) así como en el elevado incremento de la atenuación ante sollicitaciones de tracción, flexión y/o torsión. Sólo cuando se protege a los conductores de fibra óptica con una cubierta adecuada, son utilizables para las aplicaciones prácticas.

Por medio de medidas constructivas de la técnica de cables se alcanza el objetivo de mantener al conductor de fibra óptica, frente a las influencias externas, estable dentro de los límites mecánicos admisibles.

#### 2.4.1. Conductores huecos

Como conductor hueco se entiende un tubito de plástico - vaina - en cuyo interior se encuentra alojado, en forma estable, el conductor de fibra óptica, con poco rozamiento y resistente a las deformaciones. La vaina también debe ser tenaz, resistente al envejecimiento y muy flexible. Además, debe ser posible manejar el cable de forma similar a un cuadrore o un par coaxial en los cables tradicionales de cobre, sin que por ello el conductor de fibra óptica se vea sometido a esfuerzos mecánicos apreciables. De esta forma, el conductor hueco presenta todas las características de un elemento básico utilizado universalmente.

La vaina está compuesta por una capa interior de protección con un coeficiente de rozamiento muy bajo y otra exterior que protege mecánicamente al conductor de fibra óptica. La utilización de diferentes materiales o combinaciones de materiales posibilitan la adaptación de una amplia gama de condiciones ambientales.

El conductor de fibra óptica se encuentra alojado, con un juego de algunas décimas de milímetro y una longitud definida dentro de esta vaina protectora, la cual permite, además, la movilidad radial del conductor. Como la vaina es lisa en su exterior e interior, ofrece mínima resistencia al movimiento del conductor de fibra óptica dentro del conductor hueco.

Suponiendo que el conductor de fibra óptica y el conductor hueco tienen la misma longitud, se puede considerar que, con el trenzado de los conductores, el conductor hueco actúa como acumulador longitudinal que absorbe fácilmente el 0,4 % y hasta un máximo del doble de la variación de longitud del

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

cable sin que el conductor de fibra óptica se vea sometido a esfuerzos de compresión o tracción.

Una ventaja especial del conductor hueco radica en la facilidad con que se lo puede “desinstalar” para efectuar empalmes o conexiones y que resulta muy útil cuando se prepara un empalme o la colocación de un conector.

En las figuras 2.26 a 2.28, las diferentes posiciones del conductor de fibra óptica para distintos estados del cable ilustran las ventajas del conductor de fibra hueco.

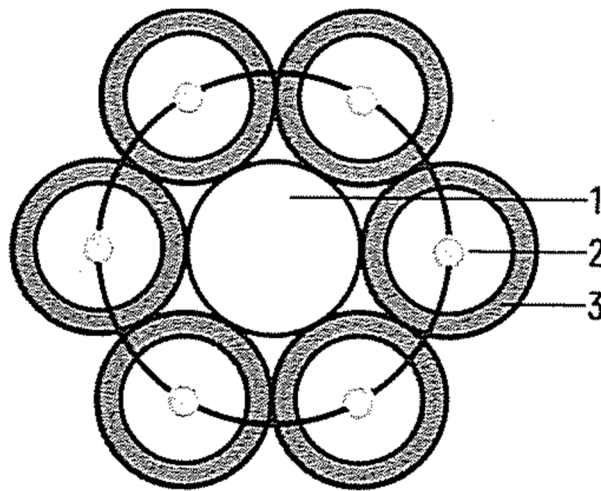


Figura 2.26. Posición del conductor de fibra óptica cuando no hay sollicitación

1. Elemento central
2. Conductor de fibra óptica
3. Cubierta protectora

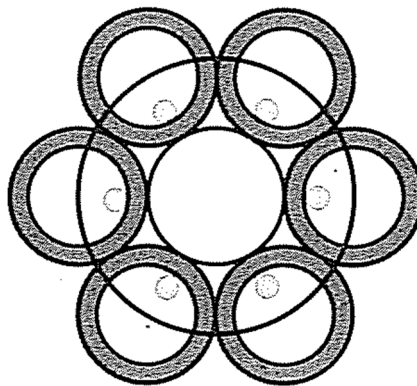


Figura 2.27. Posición del conductor de fibra óptica ante un alargamiento de cable



## Cables de fibra óptica

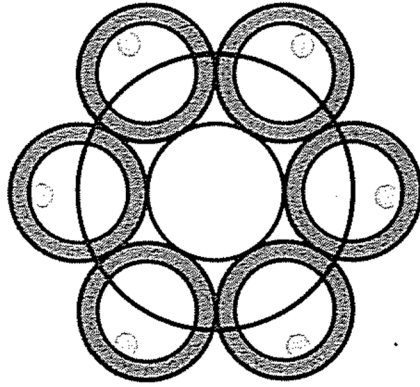


Figura 2.28. Posición del conductor de fibra óptica ante una contracción de cable

### 2.4.2. Relleno

Bajo determinadas condiciones ambientales, es posible que, ante una rotura del cable de conductores de fibra óptica, penetre agua en el conductor hueco y se escurra en su interior.

Debido a que esto puede ocasionar *microcurvaturas* y, a su vez, elevar de forma inadmisibile la atenuación, se procede a rellenar el conductor hueco con una sustancia químicamente neutra que, en el rango de temperatura de -30 a +70°C no se congela ni se escurre fuera del conductor hueco, no ataca al revestimiento protector de la fibra óptica y no provoca su hinchamiento. Tampoco deja residuos que pudieran dificultar las conexiones del conductor de fibra óptica y tampoco contiene sustancias inflamables (figura 2.29).

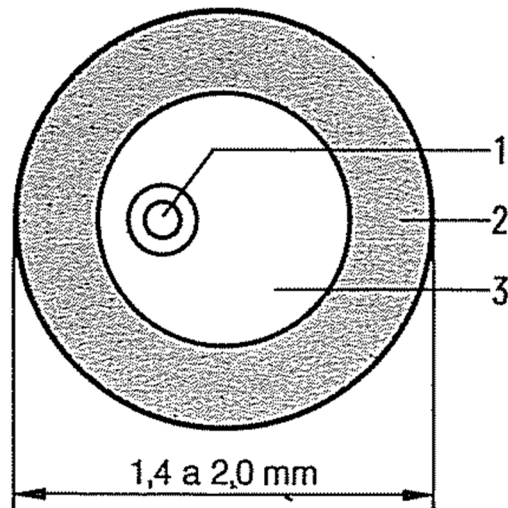


Figura 2.29. Relleno de conductor hueco

1. Conductor de fibra óptica
2. Vaina protectora
3. Masa de relleno

#### 2.4.3. Conductores por grupos

Como se ha visto hasta ahora, los conductores huecos han probado su eficacia práctica para albergar un único conductor de fibra óptica. Estos tubitos con diámetros variables se usan con preferencia para la configuración de cables de hasta 14 conductores.

Con el conductor hueco se pueden diseñar y fabricar cables con numerosos conductores de fibra óptica. Sin embargo, a medida que aumenta el número de fibras, crece la complejidad de la configuración de los cables, los diámetros exteriores resultan relativamente grandes y, en consecuencia, estos cables son cada vez más pesados, por lo que en la práctica, su manipulación se vuelve cada vez más difícil

Para reducir estas desventajas, se introducen de dos a doce conductores de fibras ópticas monomodo o multimodo en una cubierta algo más grande, formando *conductores por grupos*.

Al igual que en el caso de los conductores huecos, se rellena el cable con una masa, amoldable y ligeramente tixotrópica, que entre -0 y 70 no gotea ni se congela (figura 2.30).

## Cables de fibra óptica

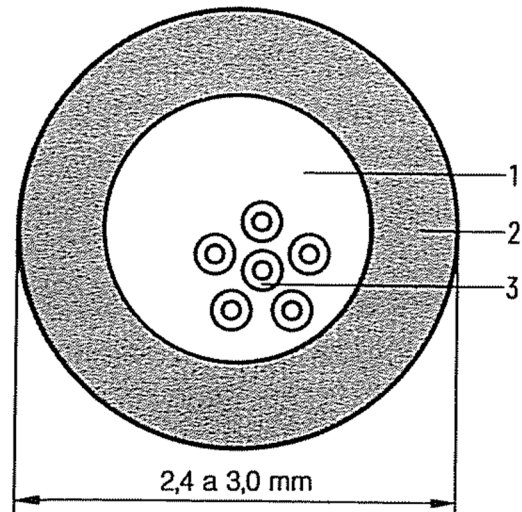


Figura 2.30. Conductor por grupos

1. Masa de relleno
2. Vaina protectora
3. Conductor de fibra óptica

Un perfeccionamiento del grupo de conductores lo constituye el *conductor en maxigrupos*. En un conductor de este tipo de mayor diámetro exterior (valor típico 6 mm) pueden alojarse hasta 12 fibras ópticas trenzadas. Gracias al trenzado en el *interior* del tubo existe una reserva de longitud de aproximadamente 6 a 8 por mil (figura 2.31). Este grupo de conductores es utilizado como elemento básico para otros cables, como los cables de fibra óptica aérea autoportantes.

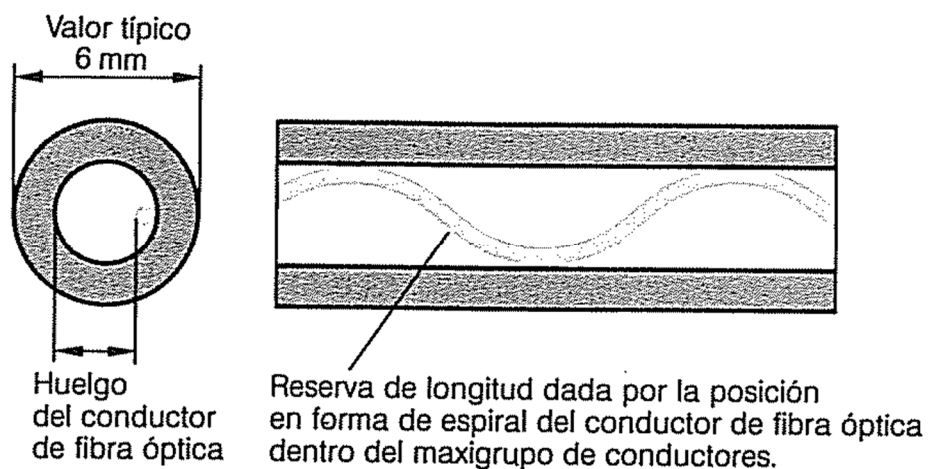


Figura 2.31. Reserva de longitud en los maxigrupos conductores

2.4.4. Características técnicas del conductor hueco y por grupos

A continuación se describen las características técnicas de los conductores huecos y por grupos, en lo que concierne a dimensiones, colores de identificación, rangos de temperatura y símbolos.

- Dimensiones.

La norma DIN VDE 0888 sección 2 establece los valores tipo para los diámetros exteriores de conductores huecos y por grupos (tabla 8).

Tabla 8. Valores tipo para los diámetros de conductores huecos y en grupos

	Diámetro exterior en mm	
	Conductor de fibras ópticas	
	Multimodo G 50/125	Monomodo E 10/125
Conductor hueco	1,4	2,0
Conductor por grupos	3,0 (hasta 10 cond.)	2,8 (hasta 4 cond.)

El espesor de la pared de los conductores huecos y por grupos es de aproximadamente el 20% del respectivo diámetro.

- Colores de identificación.

En general, los conductores huecos o por grupos tienen una cubierta verde.

Si se cablean alrededor de un elemento central una o más capas de conductores huecos, en cada una de estas capas se coloca una vaina de color rojo, con el que es posible identificar los restantes conductores de la respectiva capa; mirando en dirección del cable se cuentan los restantes conductores, comenzando desde el de color rojo. El primer conductor hueco o de grupo verde hacia la derecha se designa con el número 1 y así sucesivamente.

- Rangos de temperaturas

Temperatura de transporte y almacenamiento -20 a 50°C

Temperatura de tendido 5 a 40°C

Temperatura de servicio 0 a 50°C

## Cables de fibra óptica

### - Símbolos

En la norma DIN VDE 0888 sección 2 se establecen los símbolos que se utilizan, así como los criterios para la conformación de los símbolos compuestos para los conductores de fibras ópticas. En el anexo se han resumido todos los símbolos en una tabla.

### - Aplicaciones de los conductores huecos y por grupos

Los conductores huecos o en grupos de fibras ópticas se utilizan preferentemente en aquellas instalaciones en las cuales son muy elevadas las exigencias de calidad de transmisión aunque las influencias del medio ambiente sean variadas.

Por este motivo, se utilizan fundamentalmente en instalaciones exteriores.

#### 2.4.5. Conductores macizos

Una forma de proteger a las fibras ópticas de las influencias externas consiste en aplicar una cubierta sólida de materiales plásticos adecuados (figura 2.32) directamente sobre el revestimiento protector de las fibras. Con esta clase de configuración de los conductores se logra reducir su diámetro por lo menos 0,5 mm respecto de los conductores huecos.

Sin embargo, si existen demasiados esfuerzos de tracción, los consiguientes alargamientos elásticos del cable se pueden transmitir directamente a las fibras ópticas, ya que falta la necesaria reserva de longitud que existe en los cables con conductores huecos. Esta desventaja se puede compensar con una mayor sección, por ejemplo, alojando el conductor de fibra óptica suelta dentro del alma del cable y eligiendo un trenzado adecuado. Sin embargo, así, se pierde, respecto al cable hueco, la ventaja de un menor diámetro y de un peso más reducido.

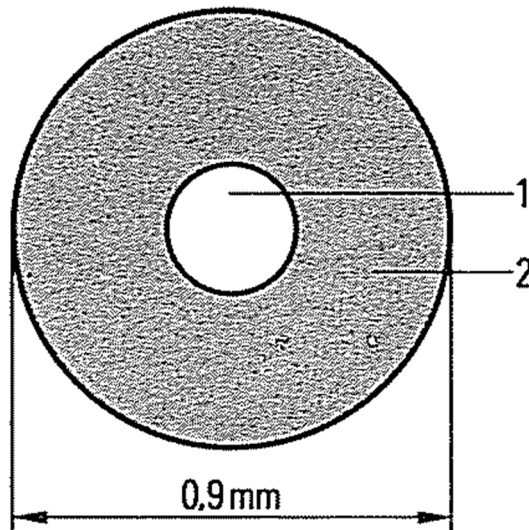


Figura 2.32. Conductor macizo

1. Conductor de fibra óptica
2. Vaina protectora

#### 2.4.6. Características técnicas de conductores macizos

A continuación se indican las dimensiones, características mecánicas y símbolos de conductores macizos.

##### - Dimensiones

El diámetro (valor nominal) de los conductores de fibras ópticas monomodo y multimodo es de 0,9 mm, con una tolerancia de  $\pm 0,1$  mm.

##### - Características mecánicas

Según la norma DIN VDE 0888 sección 2, un conductor macizo debe resistir en toda su longitud una carga de tracción de por lo menos 5 N durante 1 s.

##### - Aplicaciones

Los conductores macizos se pueden utilizar en todos los casos donde se requieran conexiones cortas con características de líneas o puentes como por ejemplo cableado interno de bastidores. Conductores macizos de una o dos fibras con vainas protectoras de materiales adecuados se pueden usar como cables interiores de longitudes limitadas.

## Cables de fibra óptica

Los cables exteriores como conductores huecos con hasta 14 fibras ópticas y, para mayores cantidades de fibras ópticas, como conductores por grupos.

### 2.4.7. Conductores compactos

Los conductores compactos surgieron a partir de una combinación de los conceptos básicos correspondientes a conductores huecos con relleno y conductores macizos. En comparación con el conductor hueco con relleno, el espacio hueco entre el relleno de la fibra óptica y la vaina protectora extremadamente sólida, se redujo a valores tan pequeños que la fibra óptica flota dentro de una capa deslizante con un huelgo radial de tan solo 50 a 100  $\mu\text{m}$ . El conductor compacto con un diámetro exterior de 0,9 mm permite una considerable economía de espacio respecto a los conductores huecos o por grupos, con diámetros de 1,4 a 3,0 mm. El conductor compacto se puede utilizar, de forma análoga, como un conductor macizo pero las fibras ópticas están algo mejor desacopladas de la vaina protectora. Las características de dilatación son iguales en ambas clases de conductores.

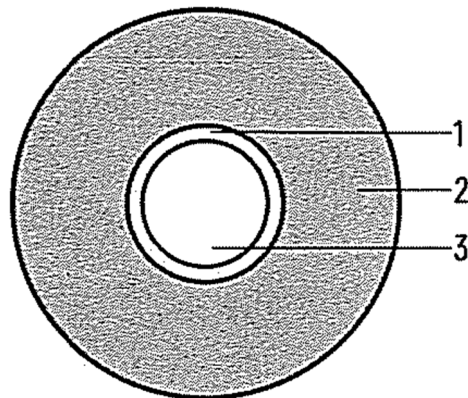


Figura 2.33. Conductor compacto

1. Capa deslizante
2. Vaina protectora
3. Conductor de fibra óptica

### 2.4.8. Características técnicas de los conductores compactos

A continuación se indican las dimensiones y símbolos de los conductores compactos.

#### - Dimensiones

El diámetro exterior, al igual que el de los conductores macizos, es de 0,9 mm con una tolerancia de +/- 0,1 mm.

El diámetro interior de la vaina es de:

- 0,45 mm para fibras ópticas con diámetro de 0,25 mm
- 0,65 mm para fibras ópticas.

#### - Símbolos

Un conductor compacto se denomina con los mismos símbolos que un conductor macizo.

#### - Aplicaciones

El conductor compacto se destina a los mismos usos que el conductor macizo: conductores interiores y en todos los lugares donde se requieren conexiones cortas con características de líneas o puentes. Apto también para el montaje de cableado interno de bastidores y armarios.

El conductor compacto reemplaza en muchas aplicaciones al conductor macizo por su rango de temperaturas más amplio y por responder mejor a las solicitudes de tracción.

### 2.4.9. Técnica de citas

Los conductores huecos por grupos, macizos y compactos, presentan una característica constructiva común: todos los elementos se ubican de forma concéntrica. La fibra óptica se halla en el centro del conductor y la rodean, en forma circular, las diferentes vainas.

La estructura de los cables a cintas difiere respecto de la disposición de los elementos, permitiendo alojar las fibras ópticas de la forma indicada en la figura 2.34.



## Cables de fibra óptica

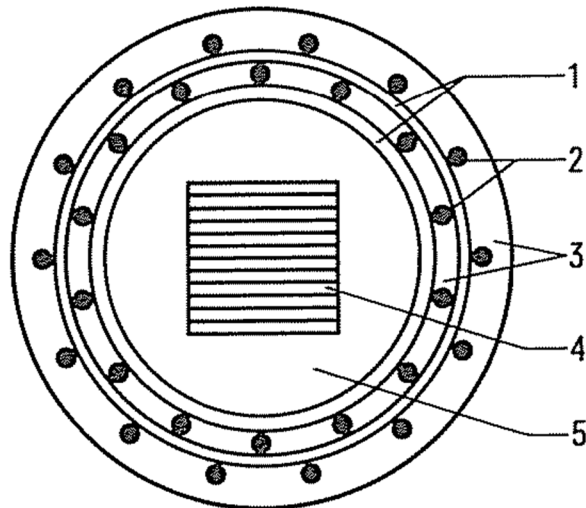


Figura 2.34. Esquema básico de un cable de cintas

1. Hoja de poliéster
2. Elementos de tracción en el recubrimiento
3. Vaina exterior de polietileno
4. Cintas apiladas
5. Masa de relleno
6. Masa de relleno

Una cinta de fibras ópticas está formada por hasta 12 fibras ópticas paralelas, equidistantes entre sí, pegadas en forma plana entre dos hojas de poliéster. Hasta 12 de estas cintas se pueden apilar formando un conjunto de gran paso que constituye el alma del cable (FIGURA). En torno de este alma relleno con petrolato se aplica por extrusión una doble vaina reforzada con alambre de acero.

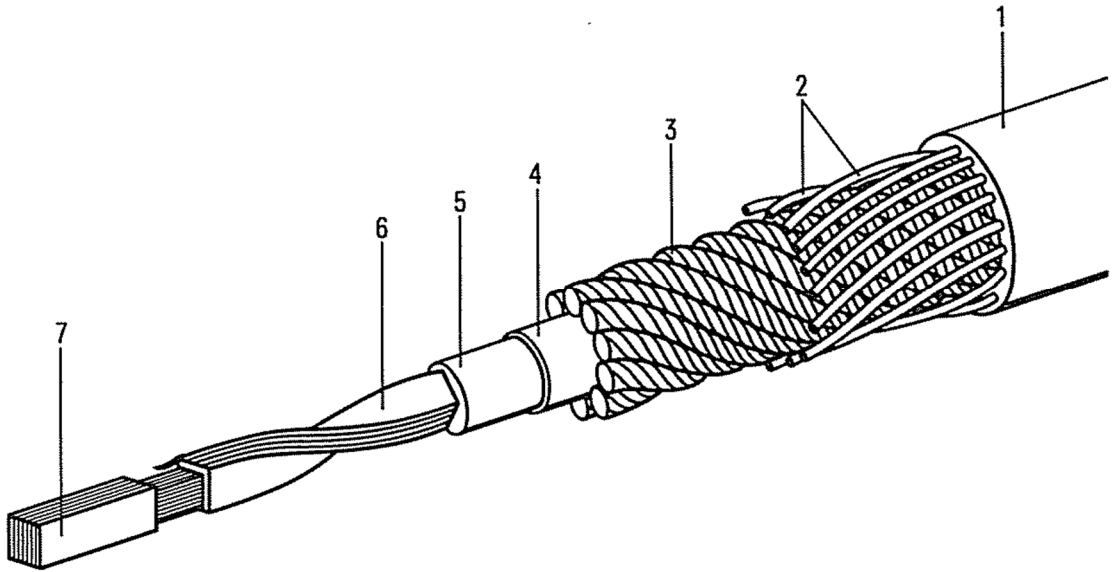


Figura 2.35. Configuración de un cable de cintas con 144 fibras ópticas

- |                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| 1. Vaina del cable      | 5. Papel         |
| 2. Armadura de tracción | 6. Cintas planas |
| 3. Hilos de poliolefina | 7. Conector      |
| 4. Vaina de poliéster   |                  |

Las ventajas de esta clase de construcción de cables con numerosas fibras ópticas ( $> 50$ ) radican, por una parte, en la alta densidad de alojamiento de fibras ópticas y, por la otra, en la técnica más sencilla para conectar las fibras ópticas gracias a su posicionamiento ordenado. De acuerdo a los conocimientos actuales de la tecnología, las fibras ópticas alojadas al borde de las cintas se hallan expuestas a un alargamiento mayor que puede afectar negativamente a la rigidez del conjunto. Asimismo pueden formarse microcurvaturas en las fibras ópticas interiores y ocasionar incrementos de la atenuación especialmente perjudiciales para conductores de fibras ópticas monomodo.

## 2.5. Conversión electro-óptica de señales

Para la transmisión de señales lumínicas a través de un conductor de fibras ópticas se requieren en su comienzo y final elementos de emisión y recepción adecuados para convertir las señales eléctricas en ópticas y viceversa (figura 2.36)

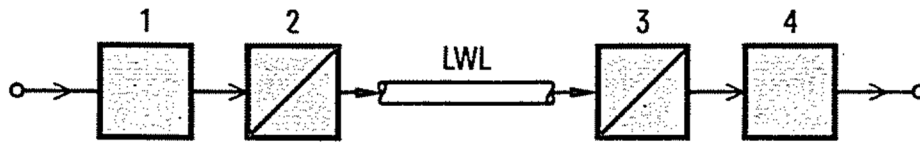


Figura 2.36. Principio funcional de un sistema de transmisión con conductor de fibra óptica

1 Modulador	3 Receptor	LWL: Conductor de
2 Emisor	4 Demodulador	fibra óptica

En el extremo emisor, una señal eléctrica modula la intensidad de una fuente luminosa. La señal óptica se acopla al conductor de fibra óptica y llega al extremo receptor, donde un receptor de la luz se convierte en una señal eléctrica.

En la técnica de los semiconductores, los conversores electro-ópticos en base a elementos químicos del tercer, cuarto y quinto grupo de la tabla periódica (tabla 9) y sus combinaciones han demostrado ser particularmente apto.

Tabla 9. Valores característicos de diodos emisores de luz

		Tipo		
		IRED <sup>1)</sup>	IRED de alta potencia	
Longitud de onda	nm	880 a 950	800 a 885	1300/1550 <sup>3)</sup>
Ancho espectral	nm	50	45	100 <sup>2)</sup>
Material semiconductor		GaAs	AlGaAs/ GaAs	InGaAsP/ InP
Estructura		Difusión simple	Doble heteroestructura	
Emisión		espontánea		
Tiempo de conmutación	ns	20 a 100	5 a 20	5 a 20
Potencia luminosa acoplable a un conductor de fibra óptica con $\varnothing$ del núcleo de 50 $\mu\text{m}$	$\mu\text{W}$	2	30 a 100	50 a 100
Longitud de transmisión en km a una velocidad de <sup>4)</sup>	km Mbit/s	0,01 a 0,1 5 a 10	1 a 5 30 a 100	1 a 5 50 a 200

1) Infrared emitting diode

2) No actúa negativamente sobre el ensanchado ya que a  $\lambda=1300$  nm la dispersión del material es casi nula

3) En desarrollo

4) El producto velocidad y longitud es constante

## Conversión electro-óptica de señales

Los semiconductores poseen dos bandas de energía para los electrones: *la banda de valencia y la banda de conducción* - separadas por una distancia  $E_g$  (energy gap) (figura 2.37).

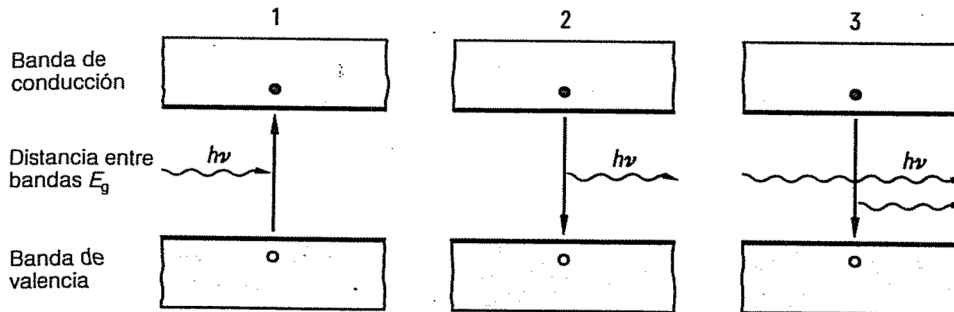


Figura 2.37. Interacciones electro-ópticas en un semiconductor

1 Absorción	· Electrón
2 Emisión espontánea	◦ Laguna
3 Emisión estimulada	$h\nu$ Fotón

Un fotón que incide sobre el semiconductor cede su energía  $h \times \nu$  a un electrón en la banda de valencia: éste incrementa su energía y pasa a la banda de conducción, de mayor energía, dejando en la banda de valencia un espacio denominado laguna; el fotón desaparece. Se trata de una absorción, una de las interacciones electro-ópticas (figura 2.37 (1)).

Los electrones pueden volver espontáneamente a lagunas de la banda de valencia si la banda de conducción está ocupada en exceso de su equilibrio, en cuyo caso el semiconductor puede emitir un fotón por cada electrón. Este proceso se denomina recombinación irradiante de portadores de carga en exceso pues en él se unen electrones y lagunas en exceso (figura 2.37 (2)). Se dice que tiene emisión espontánea o luminiscencia.

En cambio, se trata de emisión estimulada cuando los fotones existentes en el semiconductor excitan a los portadores de carga para obtener una recombinación irradiante, es decir para emitir fotones. En este caso es importante destacar que la radiación emitida tiene idéntica longitud de onda y fase que la radiación excitadora (figura 2.37 (3)).

Estos tres procesos siempre se desarrollan simultáneamente, predominando uno de ellos, el cual puede ser aprovechado técnicamente. Así, en el fotodiodo se utiliza la absorción, en el diodo emisor de luz (o luminiscente) la emisión espontánea y en el diodo láser la emisión estimulada.

Cabe mencionar, además, que un semiconductor en el cual la conducción está en su mayor parte a cargo de electrones (portadores de carga negativos), se denomina *semiconductor n*. En cambio, se denomina *semiconductor p* a uno con déficit de electrones, en el cual las lagunas (portadores de carga positivos) realizan principalmente la conducción. La unión de una capa de semiconductor p y otra n, o sea una juntura pn, conforma un diodo.

### 2.5.1. Elementos emisores

Para irradiar fotones por medio de la emisión espontánea o estimulada es necesario llevar portadores de carga en exceso al semiconductor, lo cual se logra inyectando portadores a través de una *juntura pn*.

Si se opera una juntura pn en la dirección de conducción, se inyectan electrones adicionales en la capa p y lagunas adicionales en la n, que se pueden “utilizar” para emitir fotones.

El proceso de inyección de portadores y la posterior emisión se denomina *luminiscencia por inyección*; en la práctica se la emplea en elementos emisores como por ejemplo diodos emisores de luz (LED) y diodos láser.

#### 2.5.1.1. Diodo emisor de luz (LED)

El diodo semiconductor que emite luz por emisión espontánea se denomina diodo emisor de luz (LED).

El rendimiento de la conversión de corriente eléctrica en luz se describe por medio del *rendimiento cuántico*, exterior, denominación dada a la relación entre los fotones emitidos por unidad de tiempo y el número de portadores que atraviesa la juntura pn del diodo semiconductor (para el GaAs, típicamente de 0,5 a 1,0 %).

Dado que, a medida que aumenta la temperatura decrece el rendimiento cuántico, se debe evitar el calentamiento de la zona de recombinación, asegurando la evacuación del calor por medio de una conformación adecuada del diodo.

## Conversión electro-óptica de señales

Para el funcionamiento del diodo emisor de luz es, además, muy importante la longitud de onda de la luz emitida, determinada principalmente por la separación entre bandas de energía  $E_g$ , valiéndose la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{1,24}{E_g}$$

$\lambda$  Longitud de onda

$E_g$  Separación entre bandas de energía, en eV

$$h \cdot \nu = 1,24$$

El ancho espectral medio  $\Delta\lambda$  de un diodo emisor de luz es aproximadamente proporcional al de la longitud de onda, o sea aumenta fuertemente a elevadas longitudes de onda.

Otro importante valor característico es el tiempo de conmutación del diodo. Sucede que el tiempo medio de vida de los portadores de carga en exceso determina la emisión de luz después de interrumpirse la corriente. Por debajo de este límite, el diodo ya no puede reaccionar ante las variaciones de la corriente inyectada. Tiempos mínimos típicos están en el orden de algunos nanosegundos, que corresponde a un ancho de banda de modulación en la gama de 100 MHz.

Dado que el tiempo de reacción y rendimiento cuántico son función de la concentración de lagunas, no es posible optimizarlos simultáneamente. Diodos emisores de luz muy “rápidos” irradian, con referencia a la corriente de inyección, menos fotones.

### 2.5.1.2. Diodo láser

Otra fuente emisora que utiliza la emisión estimulada es el diodo láser (2.37 (3)).

Láser es la abreviatura de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación).

En el diodo láser se provoca, por medio de una corriente de alta densidad, un gran exceso de portadores de carga en la banda de conducción, que posibilita una fuerte emisión estimulada. Este efecto amplificador producido por una avalancha de fotones es apoyado por un resonador óptico que, en general, está conformado por dos espejos planos paralelos semitransparentes. En el diodo láser, ambas superficies espejadas son superficies naturales de cristal que se

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

forman al dividirse el cristal semiconductor y se recubren con una capa protectora adicional.

Para demostrar la diferencia entre un diodo emisor de luz y un diodo láser, se ilustran en la figura 2.38 las curvas características típicas de potencia luminosa/corriente eléctrica. A medida que aumenta la corriente en el diodo se llega a un umbral donde la amplificación luminosa en el cristal compensa las pérdidas provocadas por atenuación y radiación. Pasando este umbral se produce una fuerte emisión láser. Al trabajar el diodo láser, se produce una emisión en una o unas pocas líneas espectrales, en contraposición a la amplia distribución espectral del diodo emisor de luz (2.39).

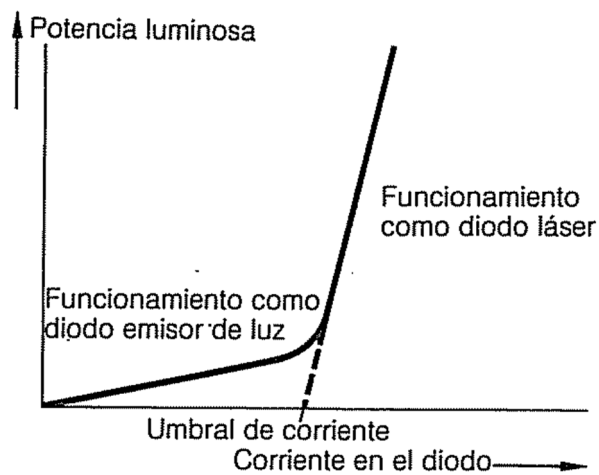


Figura 2.38. Curva característica potencia luminosa/corriente de un diodo láser



## Conversión electro-óptica de señales

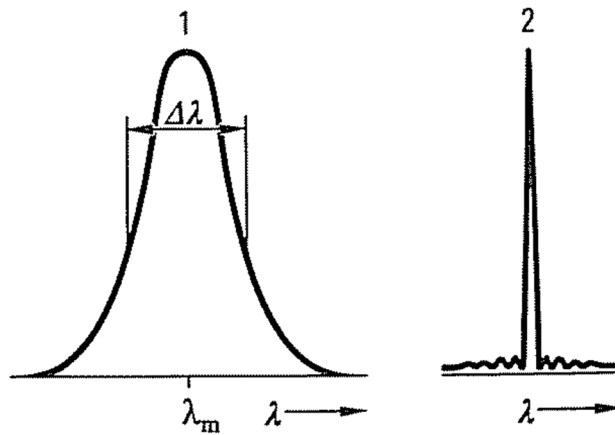


Figura 2.39. Distribución espectral de la irradiación de un diodo emisor de luz (1) y de un diodo láser (2)

1. Diodo emisor de luz
2. Diodo láser

El ancho del espectro de emisión se indica en general como ancho medio  $\Delta\lambda$  o ancho efectivo  $\Delta\lambda_{ef}$ , donde para un espectro gaussiano vale:

$$\Delta\lambda = \sqrt{\ln 4 \cdot \Delta\lambda_{ef}^2} \approx 1,18 \cdot \Delta\lambda_{ef}$$

$$\Delta\lambda_{ef} \approx 0,85 \cdot \Delta\lambda$$

La diferencia entre la radiación de un diodo emisor de luz y un diodo láser consiste en que este último, por emisión estimulada, emite luz coherente. El diagrama polar de radiación del diodo láser es mucho más angosto que el del diodo LED, lo cual facilita un acoplamiento particularmente efectivo con el conductor de fibra óptica (figura 2.40).

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

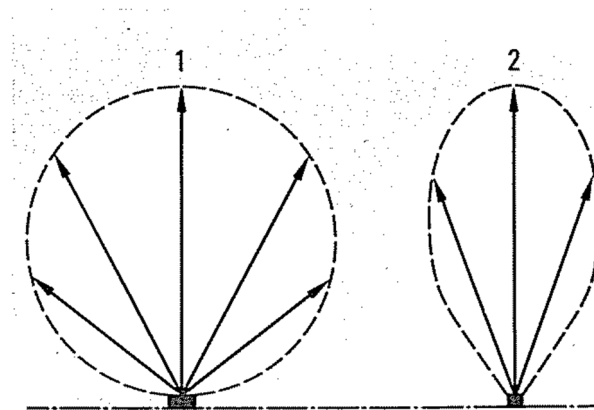


Figura 2.40. Distribución espacial de la radiación de un diodo emisor de luz (1) y de un diodo láser (2)

1. Diodo emisor de luz
2. Diodo láser

Tabla 10. Valores característicos de diodos láser

		Tipo	
		DL	DL-MCRW
Longitud de onda	nm	800 a 885	1300/1550 <sup>1)</sup>
Ancho espectral	nm	3 a 5	3 a 5
Material semiconductor		GaAlAs/GaAs	GaInAsP/InP
Estructura		Doble heteroestructura	
Emisión		Coherente	Coherente
Tiempo de conmutación	ns	< 1	< 1
Potencia lumínica acoplable a un conductor de fibra óptica	Núcleo Ø 50 µm	mW	1 a 5
	Campo Ø 10 µm	mW	–
Longitud del tramo de transmisión en km para velocidades de transmisión en Mbit/s <sup>2)</sup>	aprox. km Mbit/s	5 a 20 ≤ 565	hasta 35 ≤ 1200

## Conversión electro-óptica de señales

### 2.5.2. Elementos receptores

En el fotodiodo se aprovecha el efecto de la absorción de radiación luminosa por un semiconductor. En este proceso, para transportar corriente se libera un par electrón-laguna por la incidencia de un fotón con mayor energía que la separación  $E_g$  de las bandas de energía (proceso inverso a la de la emisión luminosa).

En principio, las junturas pn de semiconductores se pueden utilizar no sólo para excitación de portadores por inyección lumínica, sino también para la concentración de portadores de carga excitados ópticamente por medio de la separación, en el campo eléctrico, de la zona espacial de cargas, es decir, para la recepción de luz. La figura 2.41 ilustra esquemáticamente este proceso. En la concentración de los portadores de cargas intervienen tanto los generadores en la zona espacial de cargas de la juntura pn como los que se encuentran en la “zona de difusión”.

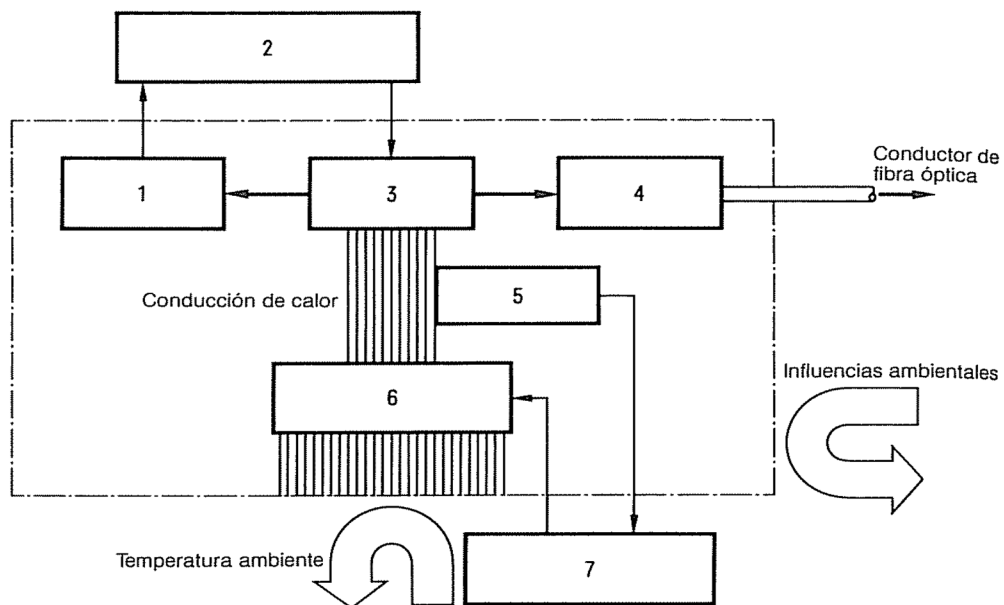


Figura 2.41. Diagrama de bloques de un módulo láser

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| 1. Diodo monitor                   | 5. Termistor                                 |
| 2. Regulación y control eléctricos | 6. Placas de enfriamiento por efecto Peltier |
| 3. Diodo láser                     | 7. Regulación de la temperatura              |
| 4. Adaptación óptica               |  |

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Mientras que en el primer caso los dos portadores de carga generados son separados inmediatamente por el campo eléctrico en la zona de carga espacial, en el segundo los portadores minoritarios generados se deben difundir hasta la juntura pn antes de que sean absorbidos por el campo de la zona de carga espacial y transportados a la zona semiconductor neutra ubicada enfrente. A causa de ambos procesos circula una corriente eléctrica en el circuito exterior.

Para la fabricación de estos receptores se utilizan principalmente silicio y germanio o compuestos de los grupos II, IV y V. En la figura 2.42 se dan los coeficientes de absorción  $\alpha$  de materiales semiconductores usuales en función de la onda  $\lambda$ .

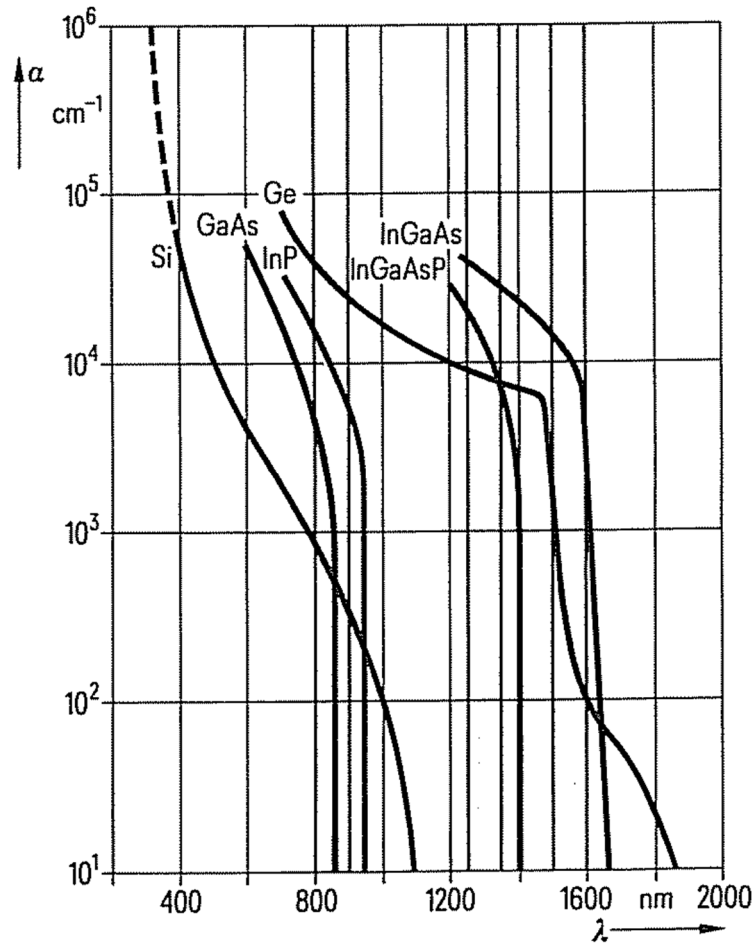


Figura 2.42. Coeficiente de absorción de materiales semiconductores en función de la longitud de onda

## Conversión electro-óptica de señales

Como se observa en la figura 2.42, el Si es especialmente apto para su uso por debajo de 1000 nm. Para longitudes mayores de onda, conviene más el de Ge. En el rango de los 1300 a 1600 nm, el InGaAs o InGaAsP es apto como material para fotodiodos.

### 2.5.2.2. Fotodiodo PIN

En semiconductores con bajo coeficiente de absorción se incrementa la zona de absorción para la radiación intercalando entre el semiconductor n y el p una capa de semiconductor no dopado (zona i, intrínseca). A este diodo se lo denomina fotodiodo PIN.

#### *Fotodiodos de silicio para longitudes de onda de hasta 1100 nm*

La figura 2.43 ilustra un corte esquemático de un diodo con una estructura pvn<sup>+</sup>, donde v significa que la zona i es conductora n. La luz infrarroja incide sobre el diodo a través de la zona p; la superficie se recubre con una capa de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> para evitar pérdidas por reflexión.

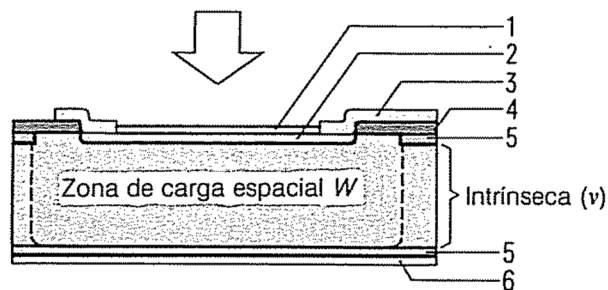


Figura 2.43. Corte esquemático de un fotodiodo PIN

- |                                   |                     |
|-----------------------------------|---------------------|
| 1. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | 4. SiO <sub>2</sub> |
| 2. p <sup>+</sup>                 | 5. n <sup>+</sup>   |
| 3. Contacto p                     | 6. Contacto n       |

Para aumentar la sensibilidad se puede agregar a los fotodiodos PIN un FET (transistor de efecto de campo). Con estos módulos híbridos PIN-FET se obtienen sensibilidades muy elevadas.

### 2.5.2.3. Fotodiodo de avalancha

Si los portadores de carga acelerados en el campo eléctrico adquieren velocidades tan altas que por efecto de choques se ionizan a otros portadores de cargas, se obtiene una corriente fotoeléctrica particularmente elevada.

Este proceso se denomina ruptura por avalancha y, en consecuencia, se dice del fotodiodo que es de avalancha (APD o FDA).

*Fotodiodo de avalancha (APD o FDA) de silicio para longitudes de onda de hasta 1100 nm*

En principio se puede utilizar el fotodiodo PIN descrito precedentemente como uno de avalancha. Son muy altos los requerimientos de tensión para lograr los elevados campos necesarios para la ruptura por avalancha.

En la figura 2.44 se ilustra el corte esquemático de un fotodiodo de avalancha. Por razones técnicas, en la actualidad casi todos estos diodos se realizan con una estructura  $p^+(pi)p$ .

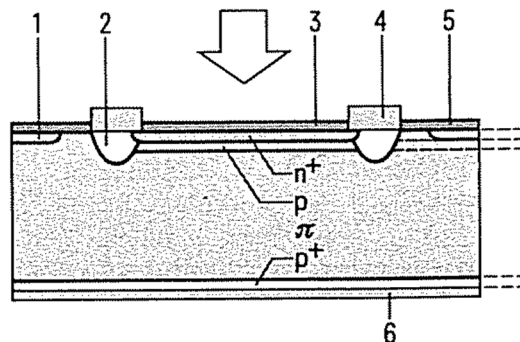


Figura 2.44. Corte esquemático de un fotodiodo de avalancha de silicio

- |                                     |                     |
|-------------------------------------|---------------------|
| 1. Control del canal p <sup>+</sup> | 4. Contacto n       |
| 2. Anillo de protección n           | 5. SiO <sub>2</sub> |
| 3. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>   | 6. Contacto p       |

En la figura 2.45 se compara la sensibilidad de receptores con fotodiodos PIN y de avalancha de silicio, con una tasa de error en bits de 10<sup>-9</sup>.

## Conversión electro-óptica de señales

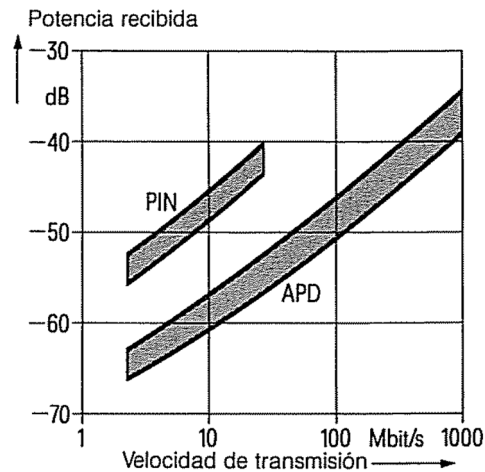


Figura 2.45. Sensibilidad de un fotodiodo PIN comparado con uno de avalancha (PD)

### *Fotodiodo de avalancha de InGaAs/InP para 1300 nm.*

En la figura 2.46 se ilustra el corte esquemático de este fotodiodo. En forma similar al del fotodiodo PIN, la iluminación se realiza a través del sustrato, pero la juntura pn no está en la capa absorbente del InGaAs sino en la In.

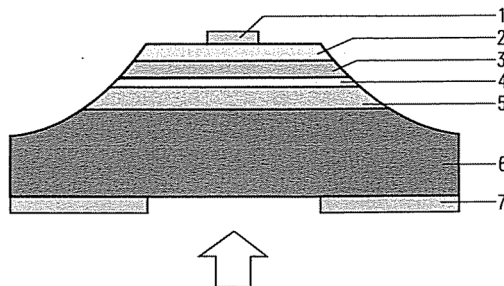


Figura 2.46. Corte esquemático de un fotodiodo de avalancha InGaAs/InP

Por ello se forma una zona con un campo eléctrico de elevada intensidad en la capa InP  $n^-$  donde se puede producir una ruptura por avalancha con mayor facilidad. Para concentrar las lagunas producidas por los fotones hace falta ajustar solamente un campo eléctrico de baja intensidad.

Otros diodos para la gama de las longitudes de onda de los 1300 nm con por ejemplo:

- Fotodiodo de avalancha de germanio, que se puede fabricar con una tecnología relativamente simple; se usa cada vez menos.
- Combinación de un fotodiodo de InGaAs/InP con un FET-GaAs

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

En la tabla 11 se han resumido los valores característicos de los fotodiodos de avalancha.

Tabla 11. Valores característicos de elementos receptores

Tipo	Longitud de onda nm	Material semiconductor	Estructura	Amplificación (veces)	Sensibilidad espectral A/W
PIN-FD	400 a 1000	Si	PIN/planar	No hay	} 0,7 a 0,9 <sup>1)</sup>
AFD	400 a 1000	Si	planar	10 a 100	
PIN-FD	1300	Ge	Mesa/planar	No hay	
AFD	1300	Ge	Mesa/planar	10	
PIN-FD	900 a 1600	InGaAs/InP	Mesa/planar	No hay	
AFD	900 a 1600	InGaAs/InP	Mesa/planar	10 a 50	

### 2.6. Sistemas de transmisión

Para transmitir señales eléctricas a través de conductores de fibras ópticas se utilizan sistemas de transmisión ópticos. Sus componentes son el conversor electroóptico como emisor de luz al comienzo del tramo, el tramo de conductor de fibra óptica propiamente dicho y el conversor óptico eléctrico, como receptor de luz, al final del tramo. Al igual que en los sistemas de conductores metálicos existen los equipos terminales al comienzo y al final de los tramos; entre ambos extremos están los amplificadores para la transmisión analógica y los regeneradores para la digital (figura 2.47)

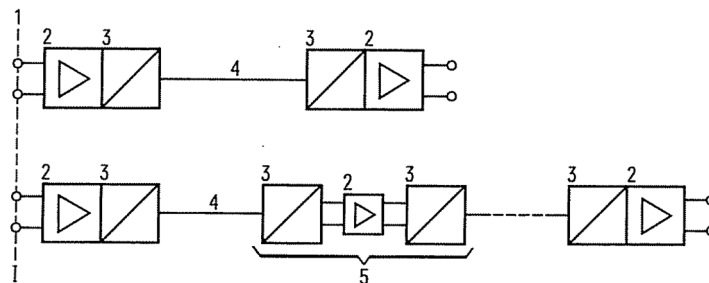


Figura 2.47. Componentes de transmisión básicos de la transmisión óptica sin regenerador intermedio (arriba) y con regenerador intermedio (abajo)



## Sistemas de transmisión

1. Punto de interconexión eléctrico
2. Regenerador
3. Conversor
4. Conductor de fibra óptica
5. Regenerador intermedio

Los sistemas de transmisión ópticos y eléctricos tienen, ambos, *los mismos* puntos de interconexión. De este modo se logró, con la introducción de la técnica de los conductores de fibras ópticas, alcanzar un importante objetivo con el cual, además, se facilitó de manera considerable la integración en redes existentes.

La técnica digital se impuso en la transmisión de señales por conductores de fibras ópticas, ya que permite la libre interconexión de velocidades de transmisión de las más diferentes fuentes (redes telefónicas, de datos, etc.). Con la incorporación de la técnica de los conductores de fibras ópticas, la transmisión de señales analógicas tiene cada vez menos importancia y se usa solo para determinadas áreas de aplicación.

### 2.6.2. Transmisión analógica

Los sistemas de fibras ópticas están diseñados, sobre todo, para la transmisión de señales digitales; sin embargo, existen algunos casos en los cuales se puede utilizar transmisión analógica, como por ejemplo para la transmisión de video dentro del marco de la protección contra intrusión o en las empresas de generación y distribución de energía eléctrica, donde resulta imposible integrar, sin problemas técnicos, sistemas analógicos de fibras ópticas en redes muy ramificadas - en su mayoría analógicas - (en general transmisión por onda portadora Z12 y Z60).

Cuando se seleccionan los sistemas analógicos de fibras ópticas, se debe prestar especial atención a la clase de modulación que se utilizará. Los factores más importantes son - además de la atenuación y el ancho de banda útil - el aporte de ruido de los emisores y receptores ópticos así como las distorsiones no lineales producidas por la curvatura de la característica de los diodos emisores.

En la modulación de amplitud directa (figura 2.48) de la luz, la variación de la potencia lumínica en función del tiempo es directamente proporcional a la variación de la señal eléctrica en función del tiempo. Como en esta clase de modulación resulta técnicamente más complejo obtener buenas características de ruido y de linealidad, se utiliza en general la *modulación de frecuencia* (figura

2.49), que tiene una relación señal/ruido favorable y es muy poco sensible a todo tipo de perturbaciones.

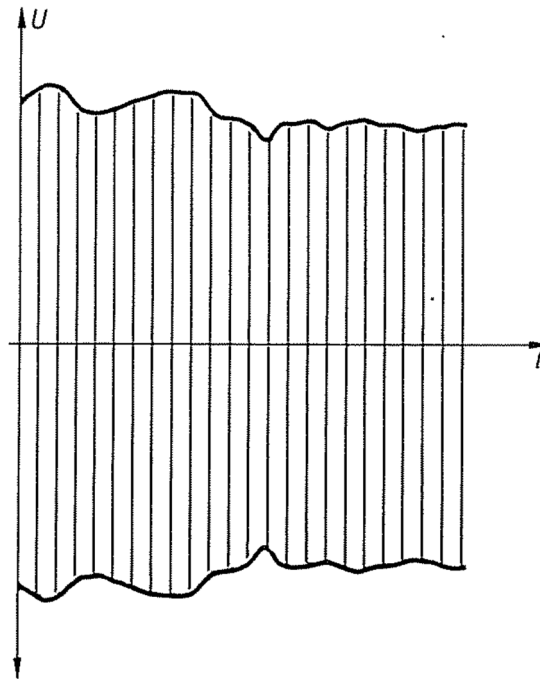


Figura 2.48. Modulación de amplitud

Los sistemas analógicos LA V12 hasta LA V 132 GF utilizan modulación de frecuencia, siendo usual emplear dos conductores de fibras ópticas para la transmisión en la dirección de ida y en la de retorno. Como módulos emisores utilizan IRED o diodos láser y como receptores PIN-FET o fotodiodos de avalancha (APD). Se utilizan fibras ópticas multimodo con perfil gradual (50/125  $\mu\text{m}$ ). Las longitudes de los tramos que se pueden cubrir varían entre 10 y 20 km, según los valores de los sistemas y los conductores de fibras ópticas. Para la transmisión de señales de video existen sistemas especiales, por ejemplo LA 7/20 GF.

## Sistemas de transmisión

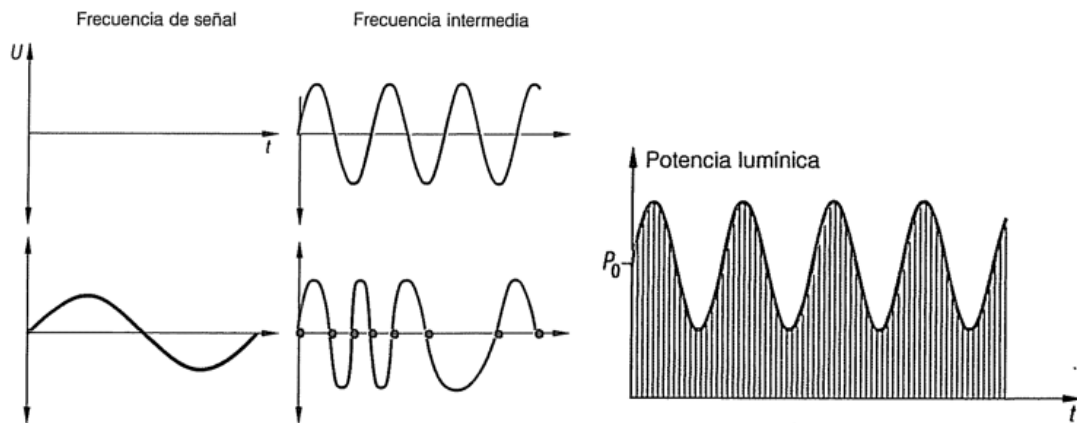


Figura 2.49. Modulación de frecuencia

### 2.6.3. Transmisión digital

Las principales funciones de la técnica de transmisión digital son: la conversión de señales analógicas en digitales multiplexadas con velocidades de transmisión normalizadas y la transmisión de dichas señales digitales, por ejemplo a través de conductores de fibras ópticas.

Con la introducción de la técnica digital, en especial el multiplexado por división de tiempo con modulación por pulsos codificados (PCM) se ha establecido las condiciones básicas para una integración de los servicios tales como telefonía, télex, transmisión de datos y telecopiado.

En el CCITT/CEPT (CCITT: Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique (Comité Consultivo Internacional Telegráfico y Telefónico); CEPT: Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications (Conferencia Europea de las Administraciones Postales y de Telecomunicaciones)) se fijaron sistemas de transmisión con determinadas velocidades (tabla 12).

El nivel básico de esta jerarquía está dado por el sistema PCM 20. En el mismo se agrupan en una secuencia de bits de 2048 kbit/s, 30 canales telefónicos de 64 kbit/s cada uno. En forma abreviada se indica que el sistema trabaja con una velocidad de transmisión de señales de 2 Mbit/s.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Tabla 12. Sistemas de transmisión para señales digitales

Número de canales de 64 kbit/s	Velocidad de transmisión (valor redondeado) Mbit/s
30	2
120	8
480	34
1920	140
7680	565 <sup>2)</sup>

2) No es un valor de la escala de jerarquías de CCITT/CEPT

Codificando cada muestra en una palabra de 8 bit se obtiene la velocidad de transmisión disponible para cada una de las señales telefónicas, o sea 8 kHz = 64 kbit/s. La secuencia de bits del sistema PCM es de 64 kbit/s x 32 = 2048 kbit/s.

Los sistemas de mayor número de canales transmiten con velocidades de bit de 8, 34, 140 o 565 Mbit/s; se basan en señales de 2 Mbit/s del equipo múltiplex PCM 30 y se forman con equipos múltiplex de señales digitales.

Para todos los niveles jerárquicos de la PVCM citados precedentemente existen equipos conductores terminales de líneas (LE) aptos para ser conectados a redes de conductores de fibras ópticas que trabajan con las longitudes de onda usuales.

# **Capítulo 3: Instalaciones de fibras ópticas**

### 3.1. Planificación de una instalación de fibra óptica

A continuación se resumen los aspectos más importantes para planificar una instalación de cables de fibras ópticas. Ante todo, y además de indicaciones correspondientes a la técnica del tendido de cables de fibra óptica, se dan informaciones referidas a métodos para calcular las magnitudes correspondientes a la transmisión como ser la atenuación y el ancho de banda.

Una instalación de cables de fibra óptica está compuesta por los tramos de cables tendidos y empalmados unos con otros y llega en sus extremos hasta las primeras conexiones desconectables, es decir los conectores.

Las referencias que siguen son de carácter general a fin de facilitar la comprensión de aspectos y relaciones en parte complejas.

#### 3.1.1. Planificación correspondiente a la transmisión

La atenuación y el ancho de banda del cable de fibra óptica utilizado así como los valores de atenuación de los empalmes son los parámetros más importantes para la transmisión que debe tenerse en cuenta cuando se planifican instalaciones de cables de fibra óptica.

En las consideraciones siguientes no se han tenido en cuenta atenuaciones producidas por conectores ni reservas que deben ser previstas en relación con los valores de los equipos, ni derivaciones o acopladores posiblemente existentes.

##### 3.1.1.1. Atenuación para conductores de fibra óptica monomodo y multimodo

La atenuación  $a_K$  de una instalación de cables está formada por la longitud de cable  $L$  con el coeficiente de atenuación  $\alpha_{LWL}$  y el número de las atenuaciones  $n$  de los empalmes  $a_{sp}$ . Vale:

$$a_K = L \cdot \alpha_{LWL} + n \cdot a_{sp}$$

$a_K$  Atenuación de la instalación de cables, en dB

$L$  Longitud del cable, en km

$\alpha_{LWL}$  Coeficiente de atenuación, en dB/km

$n$  Número de empalmes

$a_{sp}$  Atenuación de empalmes, en dB

## Planificación de una instalación de fibra óptica

Dado que las instalaciones de cables son proyectadas para una larga vida útil, es necesario prever, en la etapa de planificación, reservas para empalmes que se efectúen en caso de reparaciones. Estas reservas pueden adquirir particular importancia cuando al ocurrir deterioros causados por el trabajo de construcción o movimiento de tierra o al cambiar de posición los cables, resulte necesario añadir nuevos tramos de cable a la instalación. La magnitud de la reserva necesaria para estos casos depende de las circunstancias locales y de la importancia de la instalación y puede variar entre 0,1 dB/km, y 0,6 dB/km, según lo juzgue conveniente el usuario de la red.

De lo anterior sigue para la atenuación del campo regenerador  $a_R$ :

$$a_R = a_K + \alpha_{Res} \cdot L$$

$\alpha_{Res}$  Reserva de atenuación, en dB/km

### 3.1.1.2. Ancho de banda de conductores de fibra óptica con perfil gradual en instalaciones de cable

El ancho de banda de conductores de fibra óptica con perfil gradual se ve limitado principalmente por la dispersión de modos y/o de material.

Cuando se emplean diodos emisores de luz con gran ancho espectral medio y una longitud de onda de servicio  $\lambda = 850$  nm predomina la dispersión de material; en cambio es mayor la dispersión modal cuando se utilizan diodos láser con ancho espectral medio típicamente pequeño y una longitud de onda de servicio  $\lambda = 1300$  nm.

Existen varios métodos para calcular en forma aproximada la variación en función de la longitud del producto ancho de banda por longitud:

$$b_1 = B_1 \cdot L_1$$

De un conductor de fibra óptica con perfil gradual con un ancho de banda dado del sistema  $B$  y una longitud  $L$  del conductor de fibra óptica.

Existe un método que deriva de la ley de potencias:

$$\left(\frac{B}{B_1}\right) = \left(\frac{L}{L_1}\right)^{-\gamma}$$

$B$  Ancho de banda del sistema, en MHz

$b_1$  Producto del ancho de banda por longitud, en MHz·km

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

- $B_1$  Ancho de banda del conductor de fibra óptica, en MHz a  $L_1$
- $L$  Longitud del conductor de fibra óptica, en km
- $L_1$  Longitud del conductor de fibra óptica (usualmente 1 km) para el ancho de banda  $B_1$

Teniendo en cuenta que al ser conectados cables de longitudes variables el ancho de banda no disminuye linealmente con la longitud en razón de la dispersión de modos, se procura alcanzar una aproximación al desarrollo real por medio de cálculos empleando el factor  $\gamma$  (exponente longitudinal). Los valores correspondiente a  $\gamma$  por lo general se hallan entre 0,6 y 1,0, de modo que se pueden utilizar para los cálculos un valor empírico de 0,8.

### 3.1.1.3. Dispersión de conductores de fibras ópticas monomodo en instalaciones de cables

Cuando se planifican instalaciones con sistemas digitales de hasta 140 Mbit/s, en los cuales se utilizan exclusivamente diodos láser, se puede despreciar en general el ancho de banda del conductor de fibra óptica monomodo, dado que el mismo penetra profundamente en la gama de los GHz y en consecuencia cada una de las atenuaciones (conductor de fibra óptica, empalmes y reservas) limita la longitud del campo regenerador.

Para los conductores de fibra óptica monomodo se indica la dispersión en lugar del ancho de banda, pudiéndose calcular en base a ello, en forma particularmente ilustrativa, el ensanchamiento del pulso correspondiente al láser.

$$\Delta T = M(\lambda) \cdot \Delta \lambda \cdot L$$

- $\Delta T$  ensanchamiento del pulso, en ps
- $M(\lambda)$  dispersión cromática, en ps/(nm·km)
- $\Delta \lambda$  ancho espectral medio del emisor, en nm
- $L$  longitud del conductor de fibra óptica, en km



## Planificación de una instalación de fibra óptica

### 3.1.2. Planificación desde el punto de vista mecánico

El objetivo principal de la planificación desde el punto de vista mecánico consiste en diseñar la configuración de los cables de fibra óptica de tal manera que estos se encuentren protegidos de las influencias ambientales de la mejor manera posible. Para lograrlo es necesario obtener información lo más detallada posible para saber si las configuraciones de los cables deben ser de tipo estándar o diseñadas especialmente para un fin determinado.

Para establecer una diferencia en cuanto a los usos previstos se divide a los sistemas de cables en *exteriores, interiores y especiales*.

Resulta necesario verificar algunos parámetros referidos especialmente a las condiciones del trazado y el tipo de tendido, a saber:

#### - El trazado

De los planos de situación y de altura se desprenden las subidas y las pendientes así como los cruces a nivel y bajo nivel de ríos y calles, asimismo el número de curvas críticas (con indicación de ángulos).

#### - Características del terreno

Se debe verificar si se trata de, por ejemplo, de zona llana, montañosa, boscosa, pantanosa, de aguas, etc.

#### - Tipo de suelo

Hay que aclarar si el suelo es de humus, arcilloso o arenoso o si contiene impurezas químicas, etc.

#### - Tipo de tendido

Se debe diferenciar entre:

- Cables enterrados o colocados de surcos practicados en la tierra teniendo en cuenta la temperatura del suelo a la profundidad del tendido.
- Introducción en conductos tubulares teniendo en cuenta las longitudes de los cables y el máximo esfuerzo de tracción aplicable empleando amarras al cable o mangas de tracción.

En comparación con los conductores metálicos no se requieren para los cables de fibra óptica, por su bajo peso y su alta flexibilidad así como su diámetro relativamente reducido, emplear técnicas especiales de tendido.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

En ninguno de los tipos de tendido se pueden utilizar radios de curvatura menores que los valores mínimos indicados en las hojas de características de los cables. Es necesario ponderar los parámetros señalados precedentemente para decidir cuáles de los tipos de tendido son los más adecuados para cada caso.

Finalmente, la configuración de los cables se debe diseñar de tal manera que, cuando se han elegido y dimensionado correctamente sus elementos constitutivos, las influencias mecánicas, técnicas y químicas no deben provocar modificaciones permanentes de las características de transmisión. En principio, en todos los casos se debería procurar utilizar los tramos de cable con los máximos largos posibles a fin de limitar al mínimo las atenuaciones adicionales producidas por los empalmes entre tramos. Actualmente ya es común tender tramos de 2000 m de longitud.

En muchísimos casos, en los cuales se puede asegurar que es totalmente imposible sobrepasar la fuerza máxima de tracción, los cables de fibra óptica en razón de su reducido peso pueden ser tendidos *en forma manual*. Sin embargo, en estos casos debe prescindir de documentar la fuerza de tracción durante el tendido.

Para evaluar la fuerza de tracción a que estarán expuestos los cables durante el tendido se puede partir de la base de que cuando los trazados son rectilíneos y horizontales, dicha fuerza aumenta de forma lineal con la longitud del cable tendido. Es necesario tener en cuenta que en las curvas y los codos la fuerza de tracción aumenta en forma exponencial por efecto de los anglos de los codos y la fricción de estos.

Otra posibilidad de tender cables de fibra óptica consiste en introducirlos con presión en un tubo empleando aire comprimido. Esta forma de tendido es posible con longitudes de hasta aproximadamente 1000 m cuando el terreno es apropiado y existe una relación óptima entre el diámetro del tubo protector y el del cable de fibra óptica.

Para el tendido de cables de fibra óptica entramos muy extensos (por ejemplo mayor que 3 km en una dirección) se pueden emplear en el trayecto uno o más “dispositivos de extracción intermedios con accionamiento propio”.

Para aprovechar mejor los conductos tubulares ya existentes es posible introducir en los mismos hasta 4 tubos plásticos. Este tipo de división de un conducto tubular permite el tendido de varios cables independientes unos de otros.

## Planificación de una instalación de fibra óptica

En casos excepcionales también es posible introducir, en forma sucesiva, cables con reducido diámetro exterior en conductos tubulares no subdivididos. En estos casos, considerando la posibilidad del atascamiento o pinzamiento de los cables tendidos en la forma señalada, la diferencia máxima del diámetro exterior de estos no debería ser mayor que 5 mm.

Informaciones más detalladas para el tendido se pueden consultar en la norma DIN VDE 0888 sección 3.

En los sistemas de cables interiores debe tenerse en cuenta, además, factores tales como la inflamabilidad, ausencia de halógenos, etc. Las sollicitaciones mecánicas por lo general son insignificantes.

En los casos de sistemas de cables especiales, por ejemplo cables aéreos autoportantes, cables para instalaciones mineras, cables submarinos, etc., además de los aspectos señalados precedentemente es necesario tener en cuenta criterios específicos.

El empleo de cables de fibra óptica brinda grandes ventajas para las empresas de abastecimiento de energía, de acuerdo a los siguientes tres conceptos:

- Tendido de cables de fibra óptica enterrados y en conductos tubulares de acuerdo a los métodos descriptivos precedentemente.
- El principio de los cables aéreos autoportantes, conocido de la técnica de cables de cobre.

En este caso existe la posibilidad de usar configuraciones de cables totalmente dieléctricos lo mismo que aquellos con armadura de alambre de aluminio o una o varias capas, de acero, Aldrey o Stalum en una combinación de todos ellos

Existen asimismo configuraciones de cables de fibra óptica apropiadas para conductores de tierra aéreos.

Las distancias entre soportes de los cables, aun aquellas con largos mayores a 500 m, no constituyen problemas para ninguna de estas variantes, siempre que los cables hayan sido dimensionados en forma correspondiente y en función de las condiciones ambientales (condiciones estáticas de los mástiles, requerimientos de acuerdo a la norma VDE 220, et.).

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

La técnica y los equipos de tendido son los usuales para las construcciones de cables aéreos.

- La fijación de cables de fibras ópticas livianos, sin componentes metálicos, mediante abrazaderas a cables conductores de tensión de fase (siempre que sea conductor individual) en la gama de tensiones medias de hasta 20 kV, o cables a tierra en la gama de las altas tensiones de 110, 220 o 280 kV.

Existe una máquina para fijar abrazaderas, que “vincula” el cable de fibras ópticas al cable de tensión de fase o de tierra. la máquina “corre” sobre el cable tirado en forma manual o por un torno. A medida que avanza, las fuerzas de fricción accionan un mecanismo de trabajo, el cual toma abrazaderas prefabricadas de un cargador que forma parte de la máquina y las coloca en distancias aproximadamente 0,5 m de los lugares de unión (cable/cable soporte) y las cierra firmemente con un doblez. Sin embargo, para usar esta solución es necesario conocer las tolerancias de los diámetros del conductor de fase y de tierra así como el de las fibras ópticas.

En trayectos con conductores de fases, por razones de protección contra contactos accidentales, se conecta la cubierta del cable de fibras ópticas al final del trayecto y en los puntos de empalme con el mástil en forma conductiva, teniendo en cuenta las distancias correspondientes.

### 3.2. Empalmes de fibras ópticas

Para planificar el sistema es necesario tener en cuenta, además del coeficiente de atenuación de los conductores de fibra óptica, los valores de atenuación de los empalmes y de los conectores. Precisamente teniendo en cuenta el frecuente requerimiento de tender cables de fibras ópticas con tramos cada vez más largos sin el uso de regeneradores, además de cables de longitudes cada vez mayores y valores de atenuación de los conductores de fibra óptica cada vez más reducidos, también resulta necesario optimizar los empalmes y conectores en lo relativo a las atenuaciones de inserción de las respectivas uniones. Al hablar de conectores se dice que son conexiones *separables*, y de empalmes, que son *permanentes*.

## Empalmes de fibras ópticas

### 3.2.1. Empalme mecánico simple

El método de empalme ilustrado en la figura 3.1 se emplea para empalmar conductores de fibra óptica con perfil gradual en la técnica de conductores huecos.

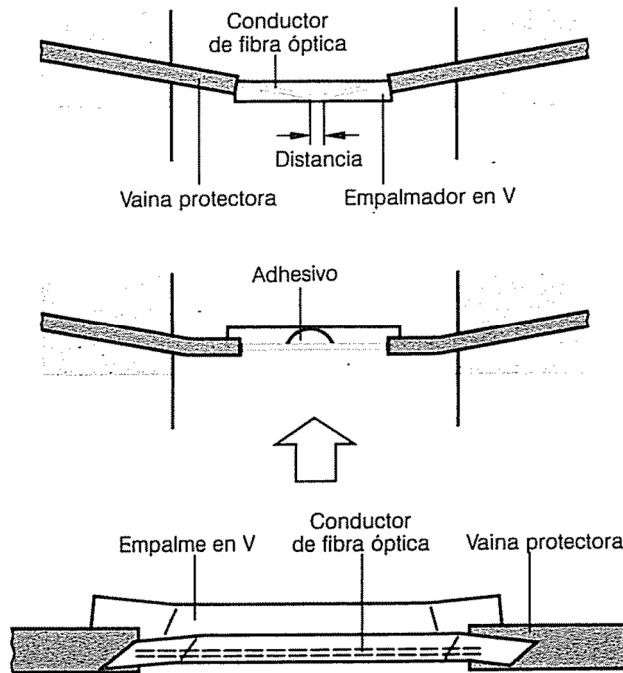


Figura 3.1. Método de empalme mecánico simple

El principio del empalme se basa sobre el autoconcentrado de los conductores de fibra óptica a ser unidos en una chapa con forma de V.

Dos brazos giratorios fijan las vainas así como los conductores de fibra óptica y los llevan, tras ser cortados al largo exacto, a la posición de empalme sobre la chapa en forma de V del empalmado, produciendo tras un tensado preliminar su unión. La fijación permanente de los conductores de fibra óptica se logra, con ayuda de un adhesivo de inmersión de rápido endurecimiento y otra chapa en forma de V la que, por acción de la fuerza proveniente de unos resortes ejerce presión sobre los lugares de empalme. La resistencia a la tracción de la unión se obtiene fijando el empalmador en forma de V por aplastamiento a las dos vainas de los conductores.

El empalme mecánico simple es de fácil manejo. Dado que no se requiere una llama abierta para empalmar, el equipo sirve también para efectuar trabajos de empalme en un ambiente expuesto a peligro de explosiones.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

La atenuación media de empalmes es de aproximadamente 0,2 dB (que depende, asimismo, de las tolerancias del conductor de fibra óptica.).

### 3.2.2. Empalme térmico simple

Para soldar conductores con una fibra óptica de vidrio de cuarzo con perfil gradual o de vidrio de varios componentes, existe un equipo empalmador término (figura 3.2) cuyo manejo también es sumamente sencillo.

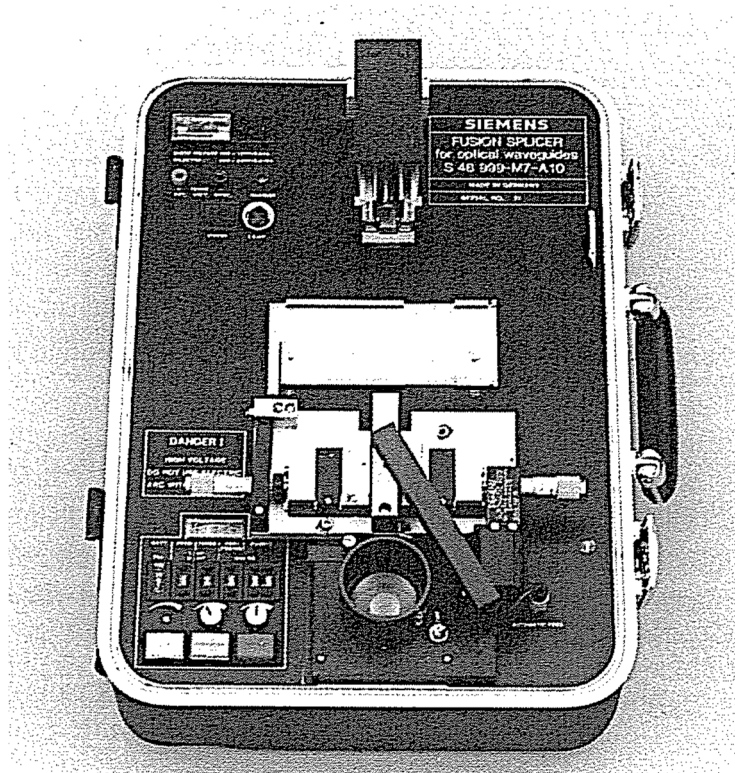


Figura 3.2. Equipo empalmador térmico simple

Para encender el arco se emplea una tensión alterna de alta frecuencia. Entre los electrodos se genera la descarga necesaria para efectuar el empalme. La tensión de superficie del vidrio fundido efectúa el autoconcentrado de los conductores de fibra óptica a ser unidos, compensándose automáticamente un desplazamiento de hasta 10  $\mu\text{m}$  sin una atenuación adicional significativa.

Un mecanismo de corte incorporado en el equipo garantiza cortes de fracturas netas con caras lisas como un espejo y con errores de ángulo menores que 3°.

## Empalmes de fibras ópticas

Gracias a la elevada precisión de las guías y de las buenas características de autocentrado del arco, el ajuste del conductor de fibra óptica en sentido longitudinal es el único que resta hacer (figura 3.3). El proceso de ajuste se puede observar con el auxilio de un microscopio de proyección.

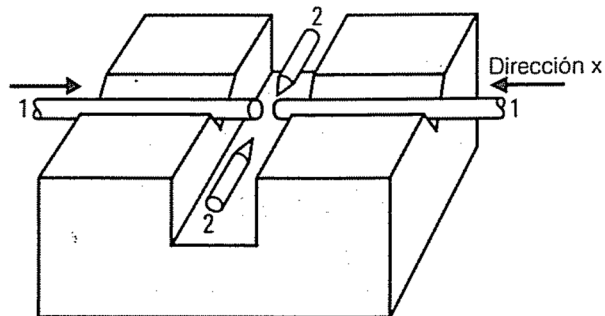


Figura 3.3. Método de ajuste del conductor de fibra óptica en sentido longitudinal

1. Conductor de fibra óptica
2. Electrodo

Ambos conductores de fibra óptica se ajustan, haciendo coincidir dos marcas de ajuste en el microscopio de proyección y luego se puede activar el proceso de soldadura accionando el correspondiente pulsador, tras lo cual los procesos de soldadura preliminar, unión de los conductores de fibra óptica y soldadura definitiva, se desarrollan en forma automática.

Tras terminar el proceso de empalme, los conductores de fibra óptica se colocan en un módulo de empalme que, además, los protege.

El equipo lleva incorporado un portamódulos o soporte, en condiciones de contener diferentes módulos de empalme. Estos pueden ser metálicos o cassettes de material plástico (figura 3.4).

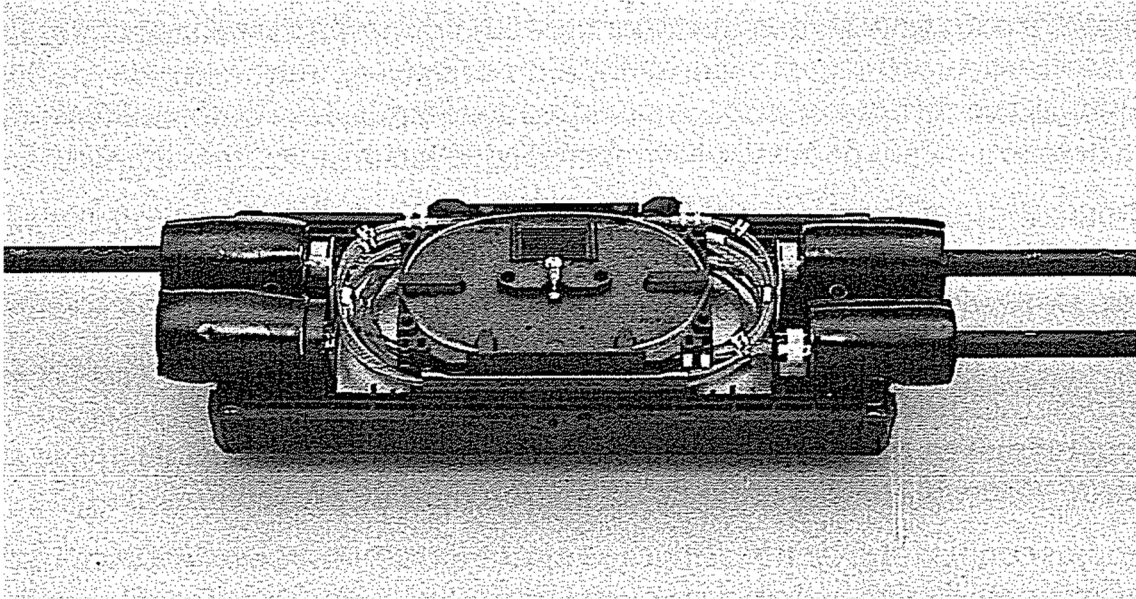


Figura 3.4. Módulo de empalme

Una batería de plomo fácilmente intercambiable suministra la energía eléctrica necesaria. Con su carga completa, la batería permite realizar más de 150 empalmes.

La atenuación media del empalme se encuentra en la gama de 0,1 hasta 0,2 dB (y depende además de las tolerancias de los conductores de fibra óptica).

### 3.3. Conectores de fibras ópticas

Las conexiones por conectores en líneas de transmisión óptica se emplean para separar fácilmente 2 conductores de fibra óptica y acoplarlos, cuando fuese necesario, con muy poca atenuación. En función del diámetro del núcleo del conductor de fibra óptica empleado y la atenuación de inserción requerida para la conexión, los conectores deben ajustarse a diversos requerimientos en cuanto a sus tolerancias mecánicas.

Los conectores más comunes son los conectores SMA (figura 3.5), que se acoplan a una única fibra cuyo extremo debe ser pulido antes de adaptarse al conector. En cuanto a estándares para interfaces de fibra óptica, el EIA 475-01 es el interfaz para un conector directo de fibra monomodo.



## Conectores de fibras ópticas

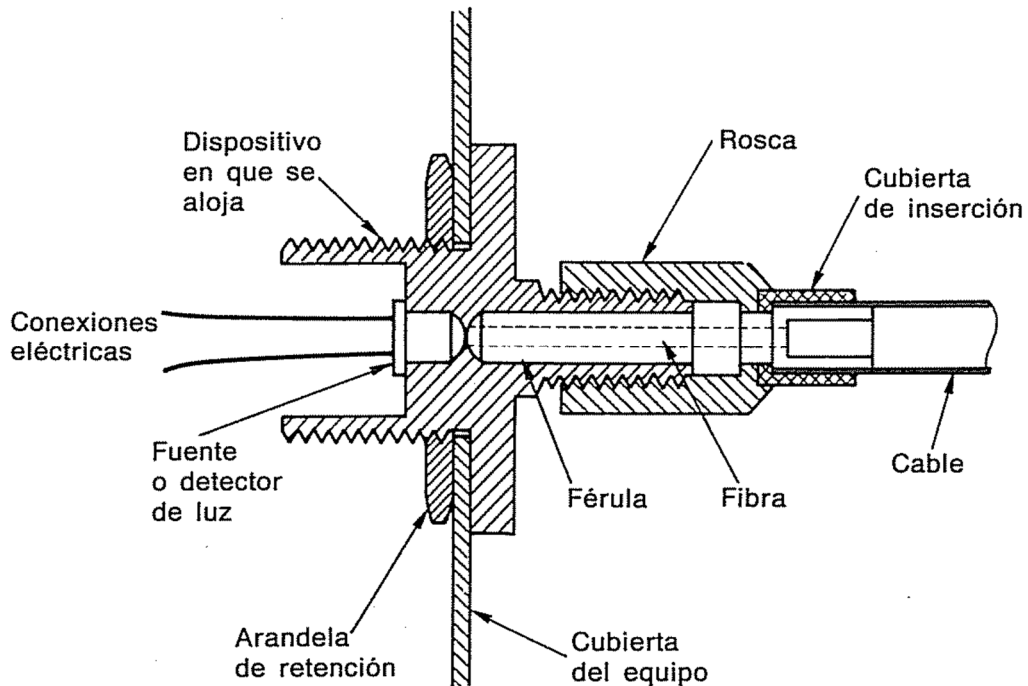


Figura 3.5. Sección de un conector SMA

Para conexiones inter/intra-equipos de corta distancia se dispone de conectores de plástico a bajo coste. El empleo de fibras plásticas o de fibras de cristal sin recubrimiento externo elimina la necesidad de una alineación cuidadosa de las fibras y consigue unos cables más flexibles. Existe un tipo de conector que lleva incorporado un dispositivo emisor/detector de luz y que puede conectarse a dos cables plásticos en 15 segundos. Este tiempo de conexión se logra adaptando unas cuchillas para cortar el cable al propio conector.

Las pérdidas inducidas por fibras mal conectadas se deben a las variaciones en el diámetro, forma y perfil, y a las alteraciones introducidas en la alineación concéntrica del núcleo o el recubrimiento. Todos estos factores están fuera del control de los fabricantes de los conectores, aunque existe otro conjunto de pérdidas provocadas por los propios conectores; entre éstas se incluyen desviaciones en las alineaciones lateral, angular y axial, así como desviaciones en el corte del cable. Las pérdidas debidas a las reflexiones en las uniones se sitúan en torno a los 0,36 dB, aunque éstas pueden eliminarse casi totalmente inyectando un líquido apropiado para ajustar el índice de reflexión entre los extremos de las fibras, si bien las conexiones secas son preferibles.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Se dispone de diversos tipos de conectores de fibra óptica. Los tipos más generales son:

- a) Férulas de precisión para alineaciones que permite alinear cada uno de los extremos de la fibra con respecto a una superficie de referencia, como un cilindro o un prisma. las pérdidas ópticas se sitúan en el rango de los 0,5 a 2 dB.
- b) Lentes conectoras que transforman la luz emergente de la fibra en un rayo paralelo que se enfoca sobre otra fibra que forma parte del empalme mediante una segunda lente del otro extremo del conector. Este método da como resultado que los conectores sean menos sensibles a la separación axial y mejora la tolerancia a los desplazamientos laterales, extendiendo el campo óptico. las pérdidas típicas se sitúan entre 1 y 2 dB, que es necesario utilizar protecciones especiales para evitar daños en la vista debido al rayo colimado.
- c) Conectores de localización cinemática, que utilizan componentes de alineación que se deslizan unos sobre otros para acoplarse en posición. Un ejemplo lo constituye el conector de triple bola que utiliza un sistemas de tres bolas para alinear la fibra. Cuando se acoplan los dos extremos del conector, los grupos de bolas se deslizan unos sobre otros y quedan fijos. Las pérdidas típicas para estos conectores se sitúan entre 0,8 y 1,5 dB.
- d) Conectores con detectores y fuentes de luz incorporados, que se emplean en cables de plásticos para enlaces de hasta 300 m y velocidades de transmisión de hasta 100 Kbits/s.

En lo referente a su funcionamiento pueden dividirse en dos grupos; el primero se basa en el principio del acoplamiento con lentes (figura 3.6) y el segundo, en el principio de acoplamiento frontal (figura 3.7).

## Conectores de fibras ópticas

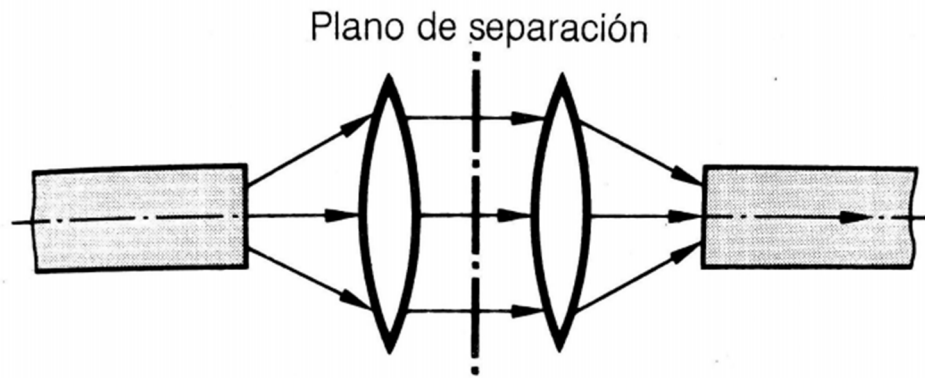


Figura 3.6. Principio de acoplamiento con lentes

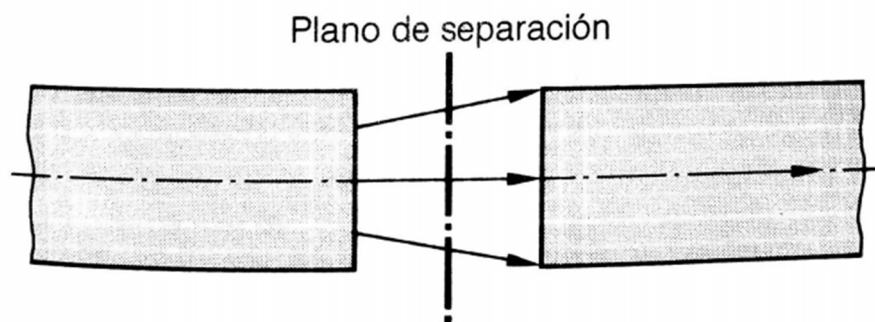


Figura 3.7. Principio de acoplamiento frontal

### 3.3.1. Acoplamiento con lentes

Para el acoplamiento con lentes se emplean lentes y otros sistemas ópticos formadores de imágenes, los cuales transforman la luz que sale del conductor de fibra óptica emisor en un rayo de luz casi paralelo de gran diámetro y lo vuelven a concentrar posteriormente sobre la cara frontal receptora del conductor de fibra óptica. La ventaja de esta clase de acoplamiento consiste en que en la zona de conexión (representada en la figura 3.6 por "Plano de separación") se admiten, en parte, mayores tolerancias respecto de las distancias.

Sin embargo, para tener esta ventaja es necesario aceptar pérdidas adicionales de los sistemas formadores de imágenes debido a reflexiones en las diversas capas límite de diferentes índices de refracción y reducida tolerancia del ángulo entre el eje longitudinal de ambas fibras. Por eso, con excepción de algunos usos específicos como por ejemplo el acoplamiento de diodos semiconductores a conductores de fibra óptica, en la práctica se usan conexiones por conectores de acuerdo del principio del acoplamiento frontal.

### 3.3.2. Acoplamiento frontal

Lo característico para el acoplamiento frontal (figura 3.7) es que las caras de emisión y recepción de luz se enfrentan una respecto de la otra a corta distancia y de forma paralela, independientemente de si se trata del conductor de fibra óptica o diodo. Únicamente este principio permite lograr conectores de muy baja atenuación para la gama de 850  $\mu\text{m}$ , 130 nm y 1500 nm.

Por eso las siguientes explicaciones se refieren únicamente a conectores según el principio de acoplamiento:

Para evaluar la calidad de transmisión de un conector, se considera su *atenuación de inserción*, es decir, se determina en cuánto aumenta la atenuación de una línea de transmisión óptica si se intercala en ella un conector (adicional).

La atenuación de inserción resulta de las tolerancias de los elementos del conector y del conductor de fibra óptica. De manera general, el corrimiento de conductores de fibra óptica (figura 3.8), el ángulo entre los ejes de ambas fibras (figura 3.9) y la distancia entre ambas caras frontales de los conductores de fibra óptica (3.10) deben quedar reducidos a valores mínimos. Es necesario limpiar prolijamente las caras frontales sin rayarlas, y luego secarlas.

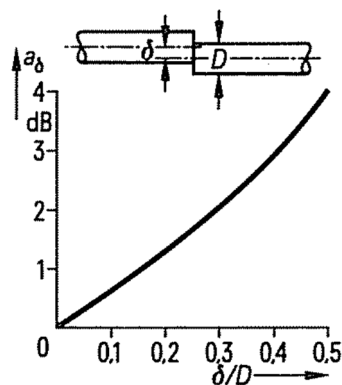


Figura 3.8. Corrimiento de conductores de fibra óptica

### Conectores de fibras ópticas

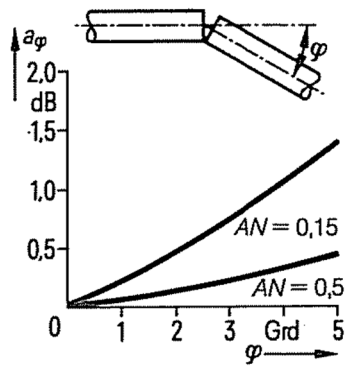


Figura 3.9. Ángulo entre el eje longitudinal de ambas fibras ópticas

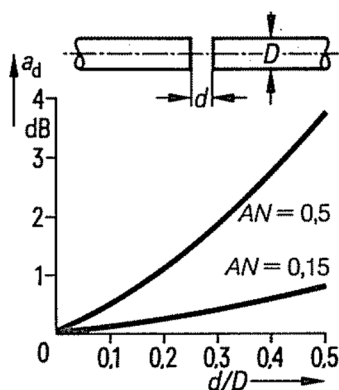


Figura 3.10. Distancia entre caras frontales de conductores de fibra óptica

Debe tenerse en cuenta, de manera general, que por efecto de reflexiones en las superficies límite entre vidrio y aire se producen no sólo pérdidas sino también variaciones en la atenuación debido a interferencias. Por medio de un tratamiento antireflexión óptico y/o de líquido que consiste en sumergir los extremos, es posible reducirlas.

Las tolerancias de las aperturas numéricas AN así como el diámetro de núcleos son parámetros específicos que influyen en el conductor de fibra óptica (en este caso multimodo) siempre cuando el valor de AN o el diámetro del núcleo del conductor de fibra óptica transmisor son más grandes que el valor AN y el diámetro del núcleo del conductor de fibra óptica receptor. El pasar de un núcleo fino a otro más grueso no constituye un aspecto crítico en conductores de fibra óptica multimodo.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

El diámetro de los pernos de conexión de los conectores más utilizado en el mercado es de 2,5 mm. Existen dos modelos, *el conductor de fibra óptica para atornillar* (DIN 47256) y *el conector de conductor de fibra óptica para sistemas intercambiables* (DIN 47257). Existen otras medidas para usos especiales (figura 3.11).

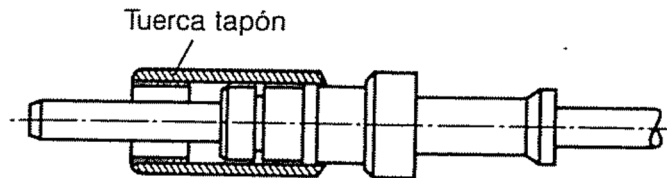


Figura 3.11. Conector simple para conductores de fibra óptica con perfil escalonado y gradual

Para sujetar en el conector cables con elementos de tracción de plástico o alambre de acero (para usos especiales) se puede establecer una buena conexión mecánica por crimpado). Según el diámetro del conductor de fibra óptica (también para compensar tolerancias de diámetros) se cuenta con un surtido de conectores hembra con agujeros de diferentes tolerancias (escalonamiento de los diámetros de los agujeros a razón de  $3 \mu\text{m}$ ).

Existen formatos especiales de conectores para otros usos, así por ejemplo para la conexión a transmisores optoelectrónicos o para la técnica de los sistemas intercambiables tipo 7R como conectores en regletas.

La atenuación de inserción es de aproximadamente 1 dB.

En conectores monomodo también se procura alcanzar para una conexión el valor máximo de 1 dB, lo cual naturalmente requiere tolerancias considerablemente más estrechas.

Para el montaje en obra, es decir, cuando no es posible preparar los conectores en fábrica, se encuentra disponible maletas de montaje, con las cuales es posible montar en forma rápida y sencilla cualquier conector. En estos casos, la atenuación de inserción es por lo general algo mayor que en el caso de conectores montados en fábrica.

### **3.4. Normativa relativa a las radiocomunicaciones a bordo**

Las instalaciones a bordo de los buques deben cumplir, según sea su tipo y tonelaje, con uno o varios textos reglamentarios, tales como el Convenio SOLAS, el Protocolo de Torremolinos de 1993, Decretos, Directivas, etc.

Como norma general, las disposiciones normativas que se aplican a los diferentes tipos de buques son las siguientes, dependiendo del tipo de utilización de los buques:

- Buques de Pasaje
- Buques de Pesca
- Buques de Carga y de Servicios de puerto
- Buques de Recreo

Los siguientes documentos hacen referencia a la Normativa de radiocomunicación:

- Real Decreto 1185/2006 de 16 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento por el que se regulan las radiocomunicaciones marítimas a bordo de los buques civiles españoles
- Real Decreto 1422/2002 de 27 de diciembre, por el que se modifica el Real Decreto 1032/1999, de 18 de junio, por el que se determinan las normas de seguridad a cumplir por los buques pesqueros de eslora igual o superior a 24 metros
- Real Decreto 1247/1999 de 16 de julio, sobre reglas y normas de seguridad aplicables a los buques de pasaje que realicen travesías entre puertos españoles
- Real Decreto 1032/1999 de 18 de junio, por el que se determinan las normas de seguridad a cumplir por los buques pesqueros de eslora igual o superior a 24 metros

# **Capítulo 4: Redes de fibras ópticas**



### 4.1. Topología y topografía de redes

Una red de comunicaciones es un recurso compartido empleado para intercambiar información entre usuarios. Una red de ordenadores es un conjunto distribuido de ordenadores, vistos por el usuario como un gran ordenador que atiende las diferentes peticiones sin intervención de los usuarios. Una red de comunicación de ordenadores puede considerarse como un conjunto de varios sistemas de ordenadores de los que el usuario puede seleccionar un servicio y comunicarse con cualquiera de ellos como usuario local.

El ISO define una red como un conjunto de nodos o estaciones interconectadas (los *nodos* se encuentran en la intersección de dos o más vías de transmisión, mientras que las *estaciones* pueden estar conectadas a un único camino de transmisión de la red).

La forma lógica en que se conectan los nodos mediante canales para constituir una red define la topología de la misma. La topografía de una red está definida por la forma en que se tienden los cables que conectan las distintas estaciones. A la hora de planificar la disposición de los cables, la topografía es más importante que la topología. Para ilustrar la diferencia existente entre topología y topografía, la figura 4.1 representa una red con topología en anillo, mientras que la figura 4.2 representa una topología en anillo cableada con topografía en estrella.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

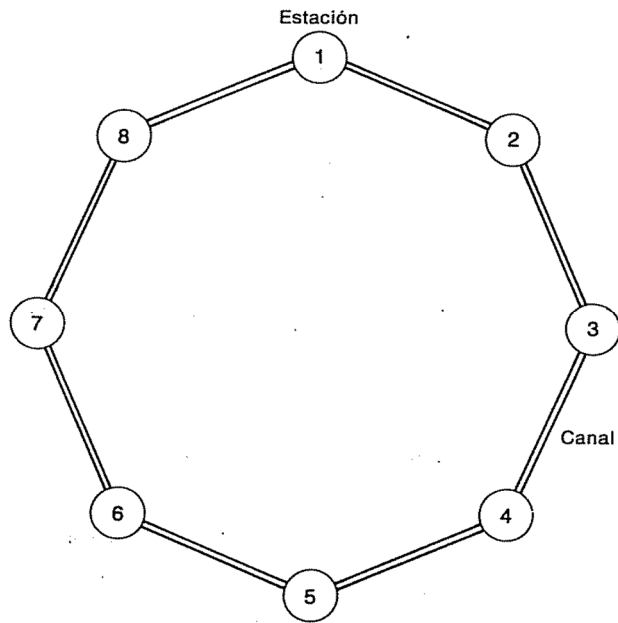


Figura 4.1. Topología en anillo

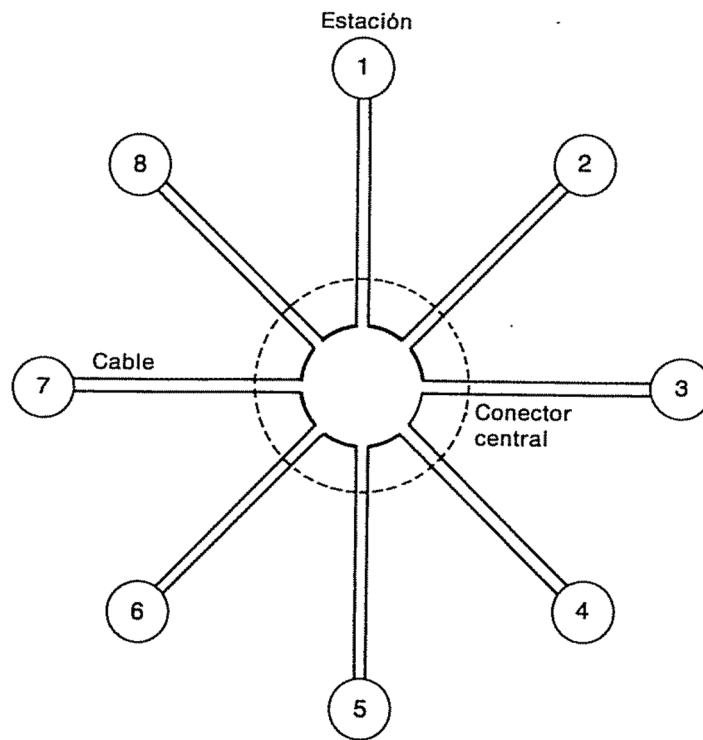


Figura 4.2. Topología en estrella

Se emplean varias topologías en las redes de comunicación de datos, que enumeraremos a continuación:

## Topología y topografía de redes

### 4.1.1. Redes de interconexión total

Disponen de una multitud de rutas para interconectar los dispositivos (figura 4.3).

Las redes de interconexión total son las más utilizadas para transmisiones de datos de largas distancias entre nodos que actúan como conmutadores de mensajes o paquetes. Una red de interconexión total entre  $n$  puntos requiere  $n(n - 1)/2$  conexiones, aunque es inusual que se proporcionen todas las conexiones posibles. La capacidad de respuesta de la red depende del medio de transmisión empleado y de la capacidad de los nodos. La distancia cubierta puede extenderse indefinidamente y el número de estaciones puede incrementarse hasta los límites impuestos por la capacidad de respuesta y por la capacidad de direccionamiento de las cabeceras de los mensajes. La existencia de múltiples rutas entre nodos reduce la vulnerabilidad de los enlaces ante un fallo si se dispone de facilidades de redireccionamiento adecuadas en los nodos. El retraso en los mensajes puede ser alto, debido a que la longitud de los medios de transmisión de larga distancia tienen velocidades de transmisión relativamente bajas y la capacidad limitada de los nodos puede dar lugar a la formación de colas en los nodos de almacenamiento y retransmisión (*store and forward*). El costo de una red de interconexión total puede optimizarse eliminando los enlaces redundantes.

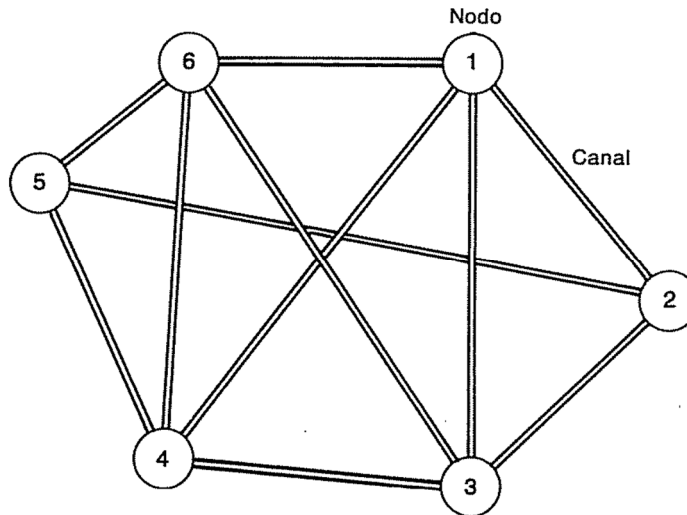


Figura 4.3. Red de interconexión total

### 4.1.2. Redes en estrella

Disponen de canales dedicados entre cada estación y el elemento central (figura 4.4). Todas las comunicaciones entre las estaciones deben pasar a través del elemento central.

Las redes en estrella son las más empleadas para conectar terminales locales y remotos a los ordenadores y en las centralitas privadas (PABX). La capacidad de una red en estrella basada en ordenadores depende de la capacidad del elemento central para aceptar mensajes y retransmitirlos cuando sea necesario. La distancia que cubre una red en estrella está limitada por los medios de comunicación utilizados; cada uno de ellos debe tener la longitud total necesaria para comunicar cada estación con el elemento central, frente a lo que ocurre en una red de intercomunicación total en la que pueden utilizarse cables de longitud total menor. El número de estaciones puede extenderse sólo hasta los límites impuestos por la capacidad total del elemento central. El elemento central es el único punto de la red que puede provocar el fallo total de ésta; los fallos en los cables de comunicación solo afectan a una de las estaciones. Los retrasos en los mensajes pueden ser elevados, debido a las limitaciones de capacidad del nodo central. El costo inicial de una red en estrella es alto, dado que hay que instalar el elemento central. Los costos incrementales de nuevas estaciones son reducidos hasta los límites de expansión del elemento central.

## Topología y topografía de redes

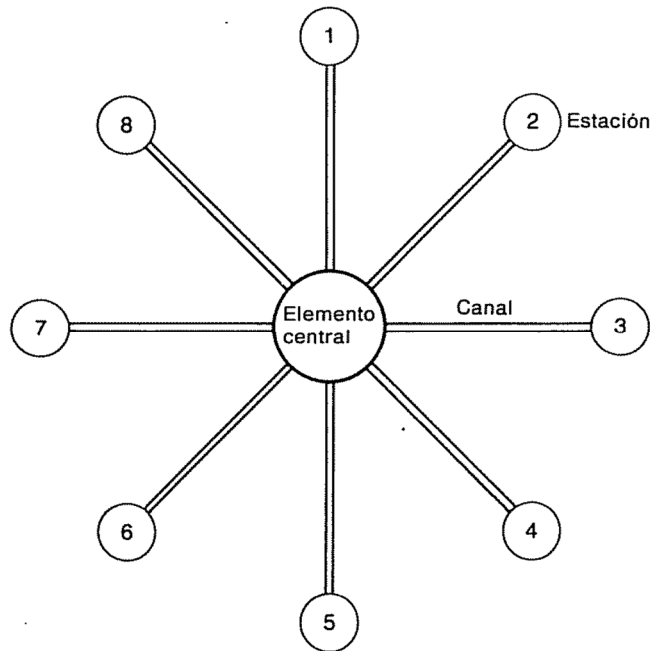


Figura 4.4. Red en estrella

### 4.1.3. Redes en bus

Tienen topología lineal y estaciones conectadas mediante adaptadores (figura 4.5).

Las topologías en *bus* se usan muchos para las redes de área local en banda base, *clusters* multipunto para terminales y redes militares de comunicación de datos. La capacidad de red está limitada por el medio empleado y por el mecanismo de control de acceso. La capacidad total de la red generalmente decrece a medida que aumenta el número de estaciones. La longitud máxima del cable suele ser reducida, dado que se necesita un gran ancho de banda para soportar muchos canales virtuales. Pueden añadirse nuevas estaciones sin necesidad de reconfigurar la red hasta alcanzar el máximo valor permitido por la capacidad o hasta alcanzar valores inaceptables para los retrasos. Los buses sondeados tienen un controlador que es el único punto del sistema que lo puede dejar inutilizado. Para evitar que el cable sea un punto débil del sistema en los sistemas militares suelen emplearse cables duales. El retraso de los mensajes en los sistemas de paso de testigo se incrementa con el número de estaciones, y en los sistemas de contienda, los retrasos aumentan con el tráfico. Los sistemas de sondeo experimentan unos retrasos definidos por

la secuencia de sondeo. El costo por cada estación es generalmente más bajo que en las redes en estrella, pero más alto que en las redes en anillo, y los buses no suponen una inversión inicial tan alta.

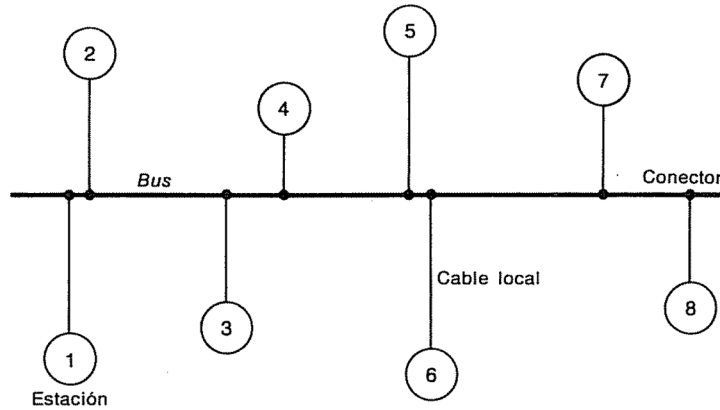


Figura 4.5. Red en bus

### 4.1.4. Redes en árbol

Son complejas redes en bus, consistentes en una serie de bifurcaciones que convergen indirectamente en un punto central y tienen un único camino de comunicaciones entre dos estaciones cualesquiera (figura 4.6).

Las redes en árbol pueden estar formadas por un conjunto de buses lineales encadenados, pero suelen encontrarse más comúnmente en las redes de área local de banda ancha. La capacidad de las redes de árbol es alta, y limitada únicamente por el ancho de banda del cable. La distancia máxima que pueden cubrir es mayor que la de los buses lineales, porque pueden encadenarse muchos buses utilizando repetidores. Los sistemas de banda ancha se pueden extender a varios kilómetros y se les pueden añadir muchísimas estaciones sin necesidad de reconfigurar la red. El único punto vulnerable de una red en árbol es el nodo raíz, que generalmente se encuentra duplicado. Un fallo en un repetidor o en un cable en cualquier otro punto de la red sólo deja fuera de servicio a las estaciones que se encuentran a partir de ese punto. Los retrasos en los sistemas de banda ancha son bajos cuando se emplean canales independientes haciendo uso de las técnicas de multiplexación por división de frecuencia. El costo es similar al de los sistemas buses lineales.

## Topología y topografía de redes

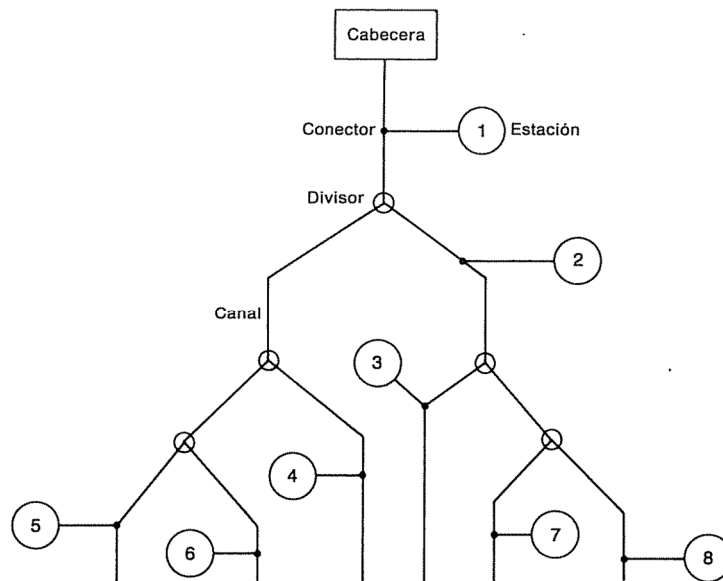


Figura 4.6. Red en árbol

### 4.1.5. Redes en anillo

En la que cada nodo está conectado a otros dos y los mensajes circulan alrededor del anillo cerrado. Una red en bucle es una red en anillo en la que una estación maestra controla la transmisión (figura 4.7).

La topología en anillo se emplea casi exclusivamente en las redes de área local basadas en paso de testigo (*token passing*) o en control de acceso al anillo mediante *slots*. La capacidad de la red está determinada por el medio y por la capacidad del repetidor que se necesita en cada nodo. La longitud total del anillo y la máxima distancia entre nodos es limitada, pero el alcance total de la red es generalmente mayor que el de un sistema lineal. El número máximo de nodos está limitado por el diseño del sistema. Cada nodo adicional supone una parada del sistema y a reducción de las prestaciones. El anillo es vulnerable al fallo en un único enlace o repetidor. Existen sistemas de doble anillo capaces de soportar dos roturas. El retraso en los mensajes aumenta a medida que se añaden más estaciones al anillo, y es mayor que el que se experimenta en un sistema de bus ligeramente cargado. El costo por nodo es generalmente menor que el de otras topologías que ofrecen prestaciones similares y la cantidad de cable requerido es generalmente menor que en las topologías en estrella.

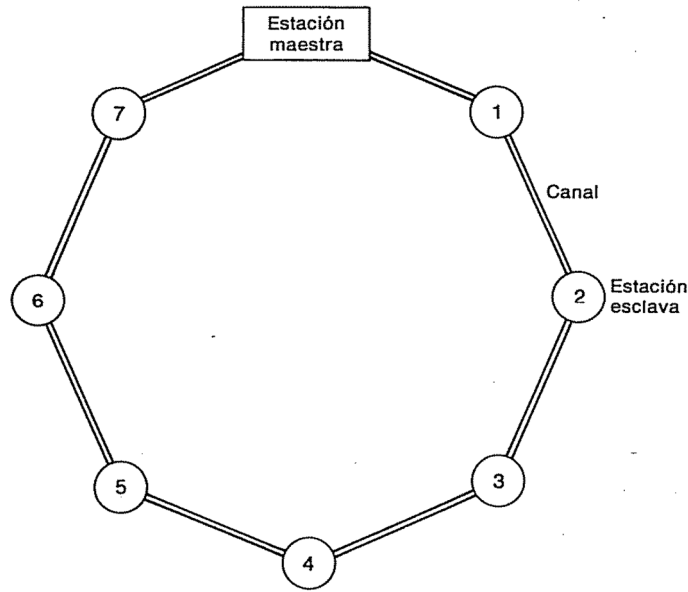


Figura 4.7. Red en anillo

### 4.1.6. Redes en anillo modificadas

Utilizan un anillo central de elementos de control a los que se conectan las estaciones en una topología de estrella en torno a dichos elementos (figura 4.8).

Las topologías en anillo modificadas se emplean en las redes de área local más recientes, como la IEEE 802.5 y la FDDI, para simplificar la expansión de la red y permitir el uso de interfaces menos complejos en las estaciones. La capacidad, distancia máxima, máximo número de terminales, vulnerabilidad y retraso en los mensajes es la misma que en el caso de sistemas en anillo convencionales, pero la facilidad de expansión es mayor si los elementos de control disponen de conexiones libres. Se necesita menos cable que en el caso de una topología en estrella, y el costo puede ser menos que el de un anillo convencional.



## Topología y topografía de redes

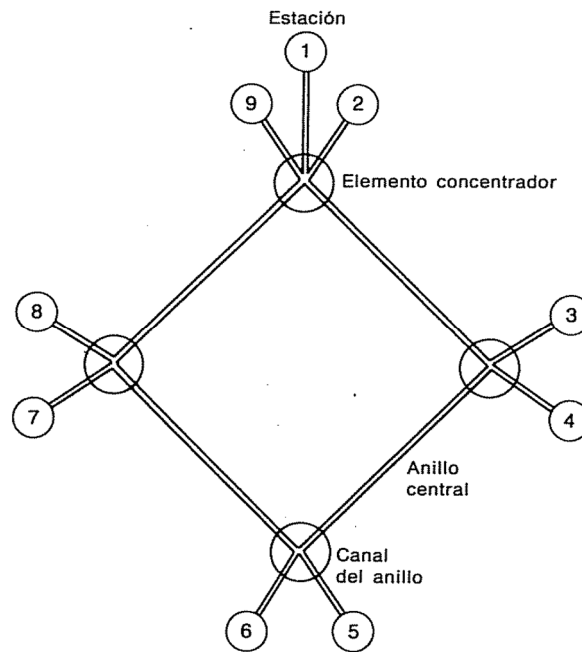


Figura 4.8. Red en anillo modificada. Emplea un anillo central de elementos concentradores a los que se conectan terminales en topología de estrella

Todas las topologías, excepto la de interconexión total y la de estrella, envía generalmente señales a todas las estaciones conectadas a la red; la estación receptora, o su equipo de comunicaciones, debe seleccionar sólo las señales que estén dirigidas a esa estación desde todas las transmisiones de la red. En las redes con interconexión total, cada nodo analiza los mensajes o paquetes entrantes, para decidir cuales están dirigidos a él; todos los demás mensajes son dirigidos a través de canales apropiados hacia su destino. El anillo central de una red de comunicación de circuitos en estrella enruta la señal recibida desde un enlace de entrada hacia el enlace de salida que conduce a la estación deseada.

Cada topología tiene sus ventajas y sus desventajas, que se pueden evaluar en función de:

- a) Capacidad de respuesta (*throughput*).
- b) Distancia máxima obtenible.
- c) Máximo número de estaciones.
- d) Vulnerabilidad a fallos de los enlaces o estaciones.
- e) Retraso en los mensajes.
- f) Costo.

## 4.2. Hardware de redes

Hay dos tipos de tecnología de transmisión que se utilizan de manera extensa:

1. Enlaces de difusión
2. Enlaces de punto a punto

Las redes de difusión (*broadcast*) tienen un solo canal de comunicación, por lo que todas las máquinas de la red lo comparten. Si una máquina envía un mensaje corto -En ciertos contextos conocidos como paquete-, todas las demás lo reciben. Un campo de dirección dentro del paquete especifica el destinatario. Cuando una máquina recibe un paquete, verifica el contenido de dirección. Si el paquete va destinado a esa máquina, éste lo procesa; si va destinado a alguna otra, lo ignora.

Por lo general, los sistemas de difusión también permiten el direccionamiento de un paquete a *todos* los destinos utilizando un código especial en el campo de dirección. Cuando se transmite un paquete con este código, todas las máquinas de la red lo reciben y procesan. Este modo de operación se conoce como difusión (*broadcasting*). Algunos sistemas de difusión también soportan la transmisión a un subconjunto de máquinas, algo conocido como multidifusión (*multicasting*).

En contraste, las redes punto a punto constan de muchas conexiones entre pares individuales de máquinas. Para ir del origen al destino, un paquete en este tipo de red podría tener que visitar primero una o más máquinas intermedias. A menudo es posible que haya varias rutas o longitudes diferentes, de manera que encontrar las correctas es importante en redes de punto a punto. Por regla general, las redes más pequeñas localizadas en una misma área geográfica tienen a utilizar la difusión, mientras que las más grandes suelen ser de punto a punto. La transmisión de punto a punto con un emisor y un receptor se conoce como unidifusión (*unicasting*).

### 4.2.1. Redes de área local

Las redes de área local (LANs) son redes de propiedad privada que se encuentran en un solo edificio o buque de pocos kilómetros de longitud. Se utilizan ampliamente para conectar computadoras personales y estaciones de trabajo de oficinas de una empresa y de fábricas para compartir recursos (por ejemplo, impresoras) e intercambiar información. Las LANs son diferentes de otros tipos de redes en tres aspectos: 1) tamaño, 2) tecnología de transmisión, y 3) topología.

## Hardware de redes

Las LANs están restringidas por tamaño, es decir, el tiempo de transmisión en el peor de los casos es limitado y conocido de antemano. El hecho de conocer este límite permite utilizar ciertos tipos de diseño, lo cual no sería posible de otra manera. Esto también simplifica la administración de la red.

Las LANs podrían utilizar una tecnología de transmisión que consiste en un cable al cual están unidas todas las máquinas, como alguna vez lo estuvo parte de las líneas de las compañías telefónicas en áreas rurales. Las LANs tradicionales se ejecutan a una velocidad de 10 a 100 Mbps, tienen un retardo bajo (microsegundos o nanosegundos) y cometen muy pocos errores. Las LANs más nuevas funcionan hasta a 10 Gbps. Para facilitar la comprensión, a partir de ahora consideraremos las velocidades de las líneas en megabits por segundo y gigabits por segundo.

Para las LANs de difusión son posibles varias topologías. La figura 4.9 muestra dos de ellas. En una red de bus (es decir, un cable lineal), en cualquier instante al menos una máquina es la maestra y puede transmitir. Todas las demás máquinas se abstienen de enviar. Cuando se presenta el conflicto de que dos o más máquinas desean transmitir al mismo tiempo, se requiere un mecanismo de arbitraje. Tal mecanismo podría ser centralizado o distribuido. Por ejemplo el IEEE 802.3, popularmente conocido como Ethernet, es una red de difusión basada en bus con control descentralizado, que por lo general funciona de 10 Mbps a 10 Gps. Las computadoras que están en una Ethernet pueden transmitir

Siempre que lo desee; si dos o más paquetes entran en colisión, cada computadora espera un tiempo aleatorio y lo intenta de nuevo más tarde.

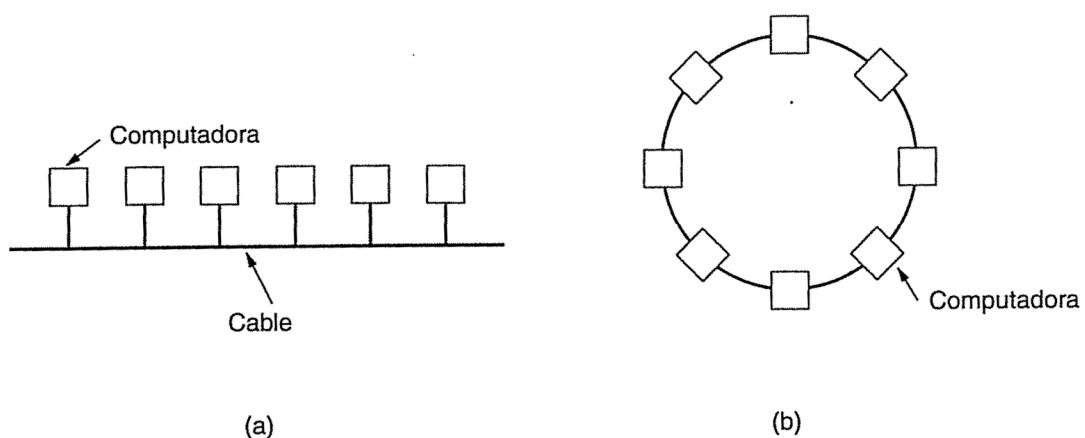


Figura 4.9. Dos redes de difusión: a) De bus. b) De anillo

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Un segundo tipo de sistema de difusión es el de anillo. En un anillo, cada bit se propaga por sí mismo, sin esperar al resto del paquete al que pertenece. Por lo común, cada bit navega por todo el anillo en el tiempo que le toma transmitir algunos bits, a veces incluso antes de que se haya transmitido el paquete completo. Al igual que con todos los demás sistemas de difusión, se requieren algunas reglas para controlar los accesos simultáneos al anillo. Se utilizan varios métodos, por ejemplo, el de que las máquinas deben tomar su turno. El IEEE 802.5 (el token ring de IBM) es una LAN basada en anillo que funciona a 4 y 16 Mbps. El FDDI es otro ejemplo de una red de anillo.

Las redes de difusión se pueden dividir aún más en estáticas y dinámicas, dependiendo de cómo se asigne el canal. Una asignación estática típica sería dividir el tiempo en intervalos discretos y utilizar un algoritmo *round-robin*, permitiendo que cada máquina transmita solo cuando llegue su turno. La asignación estática desperdicia capacidad de canal cuando una máquina no tiene nada que transmitir al llegar su turno, por lo que la mayoría de los sistemas trata de asignar el canal de forma dinámica (es decir, bajo demanda).

Los métodos de asignación dinámica para un canal común pueden ser centralizados o descentralizados. En el método centralizado hay una sola entidad, por ejemplo, una unidad de arbitraje de bus, la cual determina quién sigue. Esto se podría hacer aceptando solicitudes y tomando decisiones de acuerdo con algunos algoritmos internos. En el método descentralizado de asignación de canal no hay una entidad central; cada máquina debe decidir por sí misma cuándo transmitir.

### 4.2.2. Redes de área amplia

Una red de área amplia (WAN), abarca una gran área geográfica, con frecuencia un país o un continente. Contiene un conjunto de máquinas diseñado para programas (es decir, aplicaciones) de usuario (*host*). Los hosts están conectados por una subred de comunicación, o simplemente subred. Los clientes son quienes poseen a los hosts (es decir, las computadoras personales de los usuarios), mientras que, por lo general, las compañías telefónicas o los proveedores de servicios de Internet poseen y operan la subred de comunicación. La función de una subred es llevar mensajes de un host a otro, como lo hace el sistema telefónico con las palabras del que habla al que escucha. La separación de los aspectos de la comunicación pura de la red (la subred) de los aspectos de la aplicación (los hosts), simplifica en gran medida todo el diseño de la red.

## Hardware de redes

En la mayoría de las redes de área amplia la subred consta de dos componentes distintos: líneas de transmisión y elementos de conmutación. Las líneas de transmisión mueven bits entre máquinas. Pueden estar hechas de cable de cobre, fibra óptica o, incluso, radioenlaces. Los elementos de conmutación son computadoras especializadas que conectan tres o más líneas de transmisión. Cuando los datos llegan a una línea de entrada, el elemento de conmutación debe elegir una línea de salida en la cual reenviarlos. Estas computadoras de conmutación reciben varios nombres; conmutadores y enrutadores son los más comunes.

En este modelo, que se muestra en la figura 4.10, cada host está conectado frecuentemente a una LAN en la que existe un enrutador, aunque en algunos casos un host puede estar conectado de manera directa a un enrutador. El conjunto de líneas de comunicación y enrutadores (pero no de hosts) forma la subred.

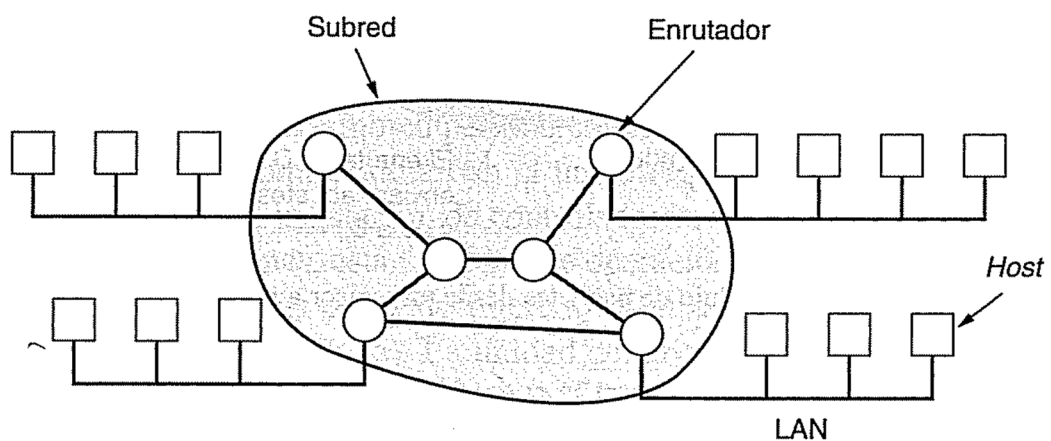


Figura 4.10. Relación entre hosts de LANs y subred

### 4.3. Tipos de interfaces para fibras ópticas

La fibra óptica se puede utilizar en LANs, así como en transmisiones de largo alcance, aunque conectarse a ellas es más complicado que a una Ethernet. Una forma de superar el problema es reconocer que una red de anillo es en realidad una colección de enlaces punto a punto, como se muestra en la figura 4.11. La interfaz en cada computadora pasa el flujo de pulsos de luz hacia el siguiente enlace y también sirve como una unión T para que la computadora pueda enviar y aceptar mensajes.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

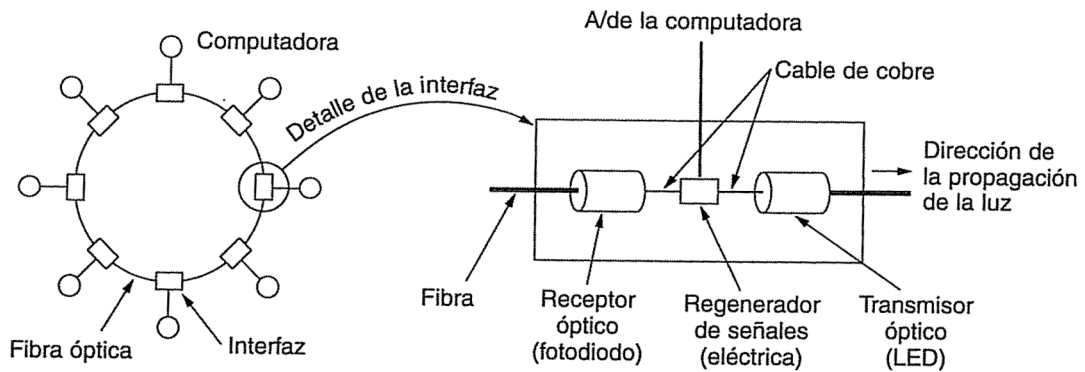


Figura 4.11. Anillo de fibra óptica con repetidores activos

Se usan dos tipos de interfaz. Una interfaz pasiva consiste en dos derivaciones fusionadas a la fibra principal. Una derivación tiene un LED o un diodo láser en su extremo (para transmitir) y la otra tiene un fotodiodo (para recibir). La derivación misma es pasiva por completo y, por lo mismo, es extremadamente confiable pues un LED o fotodiodo descompuesto no romperá el anillo, sólo dejará fuera de línea una computadora.

El otro tipo de interfaz, mostrado en la figura 4.11, es el repetidor activo. La luz entrante se convierte en una señal eléctrica que se regenera a toda su intensidad si se debilitó y se retransmite como luz. La interfaz con la computadora es un alambre ordinario de cobre que entra en el regenerador de señales. En la actualidad también se usan los repetidores puramente ópticos. Estos dispositivos no requieren las conversiones ópticas a eléctrica a óptica, lo que significa que pueden operar con anchos de banda muy altos.

Si falla un repetidor activo, el anillo se rompe y la red se cae. Por otro lado, puesto que la señal se regenera en cada interfaz, los enlaces individuales de computadora a computadora pueden tener una longitud de kilómetros, virtualmente sin un límite para el tamaño total del anillo. Las interfaces pasivas pierden luz en cada unión, de modo que la cantidad de computadoras y la longitud total del anillo se restringen de forma considerable.

La topología de anillo no es la única manera de construir una LAN con fibra óptica. También es posible tener difusión por hardware utilizando la construcción estrella pasiva de la figura 4.12. En este diseño, cada interfaz tiene una fibra que corre desde su transmisor hasta un cilindro de sílice, con las fibras entrantes fusionadas a un extremo del cilindro. En forma similar, las fibras fusionadas al otro extremo del cilindro

## Tipos de interfaces para fibras ópticas

corren hacia cada uno de los receptores. Siempre que una interfaz emite un pulso de luz, se difunde dentro de la estrella pasiva para iluminar a todos los receptores, con lo que se alcanza la difusión. En efecto, la estrella pasiva combina todas las señales entrantes y transmite el resultado combinado por todas las líneas. Puesto que la energía entrante se divide entre todas las líneas que salen, la cantidad de nodos en la red está limitada por la sensibilidad de los fotodiodos.

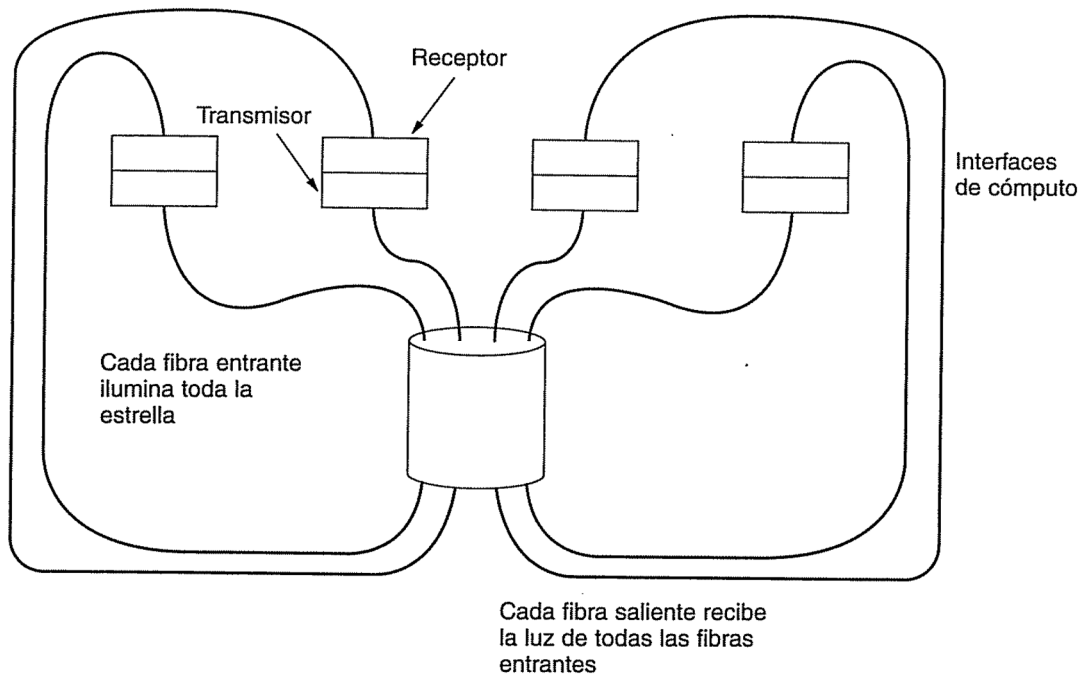


Figura 4.12. Conexión de estrella pasiva en una red de fibra óptica

# **Capítulo 5: Aplicaciones de la fibra óptica**



### 5.1. Ventajas y desventajas de la fibra óptica frente al cobre

Es instructivo comparar la fibra con el cobre. La fibra tiene muchas ventajas. Para empezar, puede manejar anchos de banda mucho mayores que el cobre. Tan sólo por eso, su uso sería indispensable en redes de alto rendimiento. Debido a la baja atenuación, sólo se necesitan repetidores cada 50 km aproximadamente en líneas largas, contra casi cada 5 km cuando se usa cobre, lo que implica un ahorro considerable. La fibra también tiene la ventaja de que las sobrecargas de energía, la interferencia electromagnética o los cortes en el suministro de energía no le afectan, puesto que no conduce electricidad. Las sustancias corrosivas del ambiente tampoco le afectan, lo que la hace ideal para ambientes fabriles pesados.

A las compañías telefónicas les gusta la fibra óptica por una razón diferente: es delgada y ligera. Muchos conductos de cable existentes están completamente llenos, por lo que no hay espacio para agregar más capacidad. Al eliminar todo el cobre y reemplazarlo por fibra, se vacían los conductos y el cobre tiene un valor de reventa excelente para los refinadores de cobre quienes lo aprecian como materia prima de alta calidad. Además, las fibras son más ligeras que el cobre. Mil cables de par trenzado de 1 km pesan 800 kg. Dos fibras tienen más capacidad y pesan sólo 100 kg, lo cual reduce de manera significativa la necesidad de sistemas mecánicos de apoyo que tienen que mantenerse. Para las nuevas rutas, la fibra se impone debido a su bajo coste de instalación.

Por último, las fibras no tienen fugas de luz y es difícil intervenirlas y conectarse a ellas. Estas propiedades dan a las fibras una seguridad excelente contra posibles espías.

Su parte negativa consiste en que es una tecnología poco familiar que requiere habilidades de las cuales carece la mayoría de ingenieros, y en que las fibras pueden dañarse con facilidad si se doblan demasiado. Debido a que la transmisión óptica es unidireccional, la comunicación en ambos sentidos requiere ya que sean dos fibras o dos bandas de frecuencia en una fibra. Por último, las interfaces de fibra cuestan más que las eléctricas. No obstante, el futuro de todas las comunicaciones fijas de datos para distancias de más de unos cuantos metros claramente es la fibra.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Tabla 13. Comparación entre cables trenzados, coaxiales y fibra óptica

	Pares trenzados	Cables coaxiales	Fibra óptica multimodo Fuente LED
Atenuación a:			
10 MHz	Sólo adecuado para usarlo hasta 3 MHz	20-120 dB/km	4-7 dB/km
100 MHz		40-300 dB/km	4-7 dB/km
400 MHz		90-700 dB/km	4-7 dB/km (8-18 dB/km, fuente LED)
Sensibilidad a las interferencias de RF	Alta	Baja	Ninguna
Potencia (máx.-mín.)	60-80 dB	60-80 dB	20-30 dB
Costo	Bajo	Alto, estable	Alto, bajando

### VENTAJAS DE LA FIBRA OPTICA

- Gran capacidad: La fibra óptica tiene la capacidad de transmitir grandes cantidades de información, hasta 60.000 conversaciones simultáneamente con dos fibras. Un cable de fibra óptica con 2 centímetros de diámetro exterior (DE), puede contener hasta 200 fibras ópticas, lo que incrementaría la capacidad de enlace a 6.000.000 de conversaciones. Un cable multipar puede llevar 500 conversaciones, un cable coaxial 10.000 y un enlace de radio por microondas o satélite puede llevar 2.000 conversaciones.
- Menos costosa: Es más barato por unidad de longitud que el alambre de cobre, haciendo que las compañías de telecomunicaciones tengan que invertir menos en el cableado que si fuesen cables normales, de esta forma también pueden tener un servicio más económico para el cliente.
- Diámetro reducido: Las fibras ópticas tienen un diámetro más pequeño que el alambre de cobre y es más ligero que uno de capacidad similar, esto lo hace fácil de instalar especialmente en localizaciones donde ya existen cables y el espacio es escaso.
- Capacidad de carga más alta: Como las fibras ópticas son más finas que los alambres de cobre, se puede "meter" un mayor número de fibras en un cable de cierto diámetro que alambres de cobre. Esto permite que haya más líneas telefónicas en un mismo cable o que a una casa llegue un mayor número de canales de televisión que si fuesen cables de cobre.

## Ventajas y desventajas de la fibra óptica frente al cobre

- Interferencia eléctrica: La fibra óptica no se ve afectada por la interferencia eléctrica (EMI) o interferencia de radiofrecuencia (RFI) y no genera por si misma interferencia. Puede suministrar un camino para una comunicación limpia en el más hostil de los entornos EMI. Las empresas eléctricas utilizan la fibra óptica a lo largo de las líneas de alta tensión para proporcionar una comunicación clara entre sus estaciones de conmutación. La fibra óptica esta también libre de conversaciones cruzadas. Incluso si una fibra radiara no podría ser recapturada por otra fibra.
- Aislamiento: La fibra óptica es un dieléctrico. Las fibras de vidrio eliminan la necesidad de corrientes eléctricas. Un cable de fibra óptica propiamente dieléctrico no contiene conductores eléctricos y puede suministrar un aislamiento eléctrico normal para multitud de aplicaciones. Puede eliminar la interferencia originada por las corrientes a tierra o por condiciones potencialmente peligrosas causadas por descargas eléctricas en las líneas de comunicación, como los rayos o faltas eléctricas. Es un medio intrínsecamente seguro que se utiliza a menudo donde el aislamiento eléctrico es esencial.
- Menos degradación de la señal: la pérdida de señal en fibra óptica es significativamente menor que en el alambre de cobre.
- Seguridad: La fibra óptica ofrece un alto grado de seguridad. Una fibra óptica no se puede intervenir por medio de mecanismos eléctricos convencionales como conducción superficial o inducción electromagnética y es muy difícil de pinchar ópticamente. Los rayos luminosos viajan por el centro de la fibra y pocos o ninguno pueden escapar. Incluso si la intervención resultara un éxito, se podría detectar monitorizando la señal óptica recibida la final de la fibra. Las señales de comunicación vía satélite o radio se pueden intervenir fácilmente para su decodificación.
- Fiabilidad y mantenimiento: La fibra óptica es un medio constante y no envejece. Los enlaces de fibra óptica bien diseñados son inmunes a condiciones adversas de humedad y temperatura y se pueden utilizar incluso para cables subacuáticos. Tiene también una larga vida de servicio estimada en mas de 30 años para algunos cables. El mantenimiento que se requiere para un sistema de fibra óptica es menor que el requerido para un sistema convencional, debido a que se requieren pocos repetidores electrónicos en un enlace de comunicaciones, no hay corrosión y no se ve afectado por cortocircuitos, sobretensiones o electricidad estática.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

- Menor gasto de energía: Como las señales de luz en las fibras ópticas se degradan menos que las señales eléctricas en los cables de metal, los transmisores no necesitan ser transmisores de alto voltaje sino transmisores de luz de poca potencia, lo cual da el mismo resultado o mejor y es más económico.
- Señales digitales: Las fibras ópticas son ideales para transmitir información digital, ya que dependen solamente de que haya luz o no la haya, por eso son muy utilizadas en las redes de computadoras.
- No Inflamable: Al no pasar electricidad a través de fibras ópticas, no hay riesgo de incendios.
- Ligera: Un cable óptico pesa menos que un cable de alambre de cobre de la misma longitud.
- Flexible: Por ser flexible y poder transmitir y recibir luz, se utilizan en muchas cámaras fotográficas digitales flexibles para varios propósitos:
  - Medicina: En los endoscopios y laparoscopias
  - Mecánica: En la inspección de tuberías y motores (en aviones, cohetes, carros, etc.)
- Versatilidad: Los sistemas de comunicaciones por fibra óptica son los adecuados para la mayoría de los formatos de comunicaciones de datos, voz y video. Estos sistemas son adecuados para RS232, RS422, V.35, Ethernet, Arcnet, FDDI, T1, T2, T3, Sonet, Señal E&M, 2/4 cable de voz, video compuesto y mucho mas.
- Expansión: Los sistemas de fibra óptica bien diseñados se pueden expandir fácilmente. Un sistema diseñado para una transmisión de datos a baja velocidad, por ejemplo, T1 (1,544 Mbps), se puede transformar en un sistema de velocidad mas alta, OC-12 (622 Mbps), cambiando la electrónica y el cable de fibra seguir siendo el mismo.
- Regeneración de la señal: Se pueden suministrar comunicaciones por fibra óptica más allá de los 70 Km. Antes de que se requiera regenerar la señal, la cual puede extenderse a 150 Km. Usando amplificadores laser. El ahorro del costo del equipamiento repetidor intermedio, así como su mantenimiento puede ser sustancial.

### **DESVENTAJAS DE LA FIBRA OPTICA**

- Conversión electro óptica: Antes de conectar una señal eléctrica de comunicación a una fibra óptica, la señal debe convertirse al espectro luminoso (850, 1310 o 1550 nanómetros (nm.)). Esto se realiza por medios electrónicos en el extremo del transmisor, el cual da un formato propio a la señal de comunicaciones y la convierte en una señal óptica usando un LED o un laser de estado sólido. Esta señal óptica se propaga por la fibra óptica y en el extremo receptor de la fibra la señal se debe convertir nuevamente a una señal eléctrica antes de ser utilizada. Este costo de conversión asociado a la electrónica debe ser tenido en cuenta en todas las aplicaciones de la fibra óptica.

- Caminos homogéneos: Se necesita un camino físico recto para el cable de fibra óptica. El cable se puede enterrar directamente, situar en tubos o disponer en cables aéreos a lo largo de caminos homogéneos. Esto puede requerir la compra o alquiler de la propiedad. Algunos derechos del camino pueden ser imposibles de adquirir o demasiados costosos. Para localizaciones con terrenos montañosos o algunos entornos urbanos puede ser más adecuado otros métodos de comunicación sin hilos.

- Instalación especial: Debido a que la fibra óptica es predominante vidrio de sílice, son necesarias técnicas especiales para la ingeniería e instalación de los enlaces. Ya no se aplican los métodos convencionales de instalación de cables de hilos, como por ejemplo, sujeción, soldadura y wire-wrapping. También se requiere un equipamiento adecuado para probar y poner en servicio las fibras ópticas. Los técnicos deben ser entrenados para la instalación y puesta en servicio de los cables de fibra.

- Reparaciones: Un cable de fibra óptica que ha resultado dañado no es fácil de reparar. Los procedimientos de reparación requieren un equipo de técnicos con mucha destreza y habilidad en el manejo del equipamiento. En algunas situaciones puede ser necesario reparar el cable entero. Este problema puede ser aun más complicado si hay un gran número de usuarios que dependen de ese servicio. Es importante por ello, el diseño de un sistema propio que cuente con rutas físicamente diversas, que permitan afrontar tales contingencias.

## 5.2. Aplicaciones de la fibra óptica

Existen numerosas aplicaciones a día de hoy de la fibra óptica. A continuación se nombrarán algunas de ellas.

### - Sensor de temperatura

Los cambios experimentados en sus índices de refracción por las alteraciones de temperatura permiten que las fibras ópticas sean utilizables en concepto de sensores de temperatura.

Partiendo del principio de que el núcleo y su envoltura son de distinta composición, sus índices refractivos se modifican en diferente grado al ser sometidos a idéntica alteración de la temperatura. Ello pone de manifiesto que cuando ésta aumenta, la diferencia entre el índice refractor del envolvente y el del núcleo disminuye por lo que al revestimiento llega menor cantidad de la luz transmitida, dando como resultado una atenuación que mantiene relación directa con la temperatura detectada.

### - Sensor acústico interferométrico

Un sensor por interferometría permite detectar hasta la más ligera alteración que afecte a la fase de las señales de luz que se transmiten por medio de una fibra óptica y una de las aplicaciones más generalizadas es la de detectar el sonido.

Una parte del haz láser aplicado se transmite por la guía óptica, mientras que a otra lo hace por una fibra que actúa como referencia, dispuesta fuera de la zona en que se lleve a cabo la detección.

Al producirse compresiones acústicas o cualquier otro efecto perturbador, se motiva una distorsión en la fibra sensible con alteración de su longitud óptica y, consecuente cambio de la relación de fases entre las dos fibras, que se pone de manifiesto en la interferencia generada al recombinarse los dos haces.

### - Detector de niveles de líquido.

También en este equipo las fibras ópticas tienen aplicación como elemento conductor, en coordinación con un prisma situado con anterioridad al nivel que se trate de controlar. En tanto que el prisma está situado con anterioridad al nivel que se trate de controlar. En tanto que el prisma está rodeado por un elemento de bajo índice de refracción, como es el aire, la luz que se desplaza a lo largo de la fibra es reflejada en su totalidad en la base del prisma, transmitiendo a través de otra fibra hacia el detector.

## Aplicaciones de la fibra óptica

En el caso de que un líquido con un índice de refracción más elevado que el del aire cubra la base del prisma, desaparecen las condiciones en que es posible conseguir la reflexión interna y la luz se refleja hacia el líquido, produciendo un haz luminoso de retorno que puede ser derivado a un ordenador, revelador o mecanismo conveniente, para que motive el cierre de la entrada de líquido.

### - Aeronáutica

La aplicación de las fibras ópticas a la aeronáutica puede subdividirse en dos partes: la que afecta al funcionamiento de los distintos instrumentos de vuelo, orientación y enlace con tierra y la que concierne de manera más estricta a la fabricación, montaje y ajuste de todas y cada una de las piezas que en su conjunto constituyen el aparato de vuelo o permiten su orientación, parte que está relacionada de manera más directa con el temario de investigación que nos afecta.

Nos referimos en primer término al sector que concierne a la comprobación de los componentes de superficie bastante considerable, con el objetivo de localizar eventuales grietas sin recurrir a microscopio, pero sin dejar de lado la necesidad de contar con un aumento del campo visual y de los ángulos de visión a base del empleo de una lente de aumento montada en un dispositivo articulado, conforme es apreciable a título de ejemplo en la figura (figura 5.1).

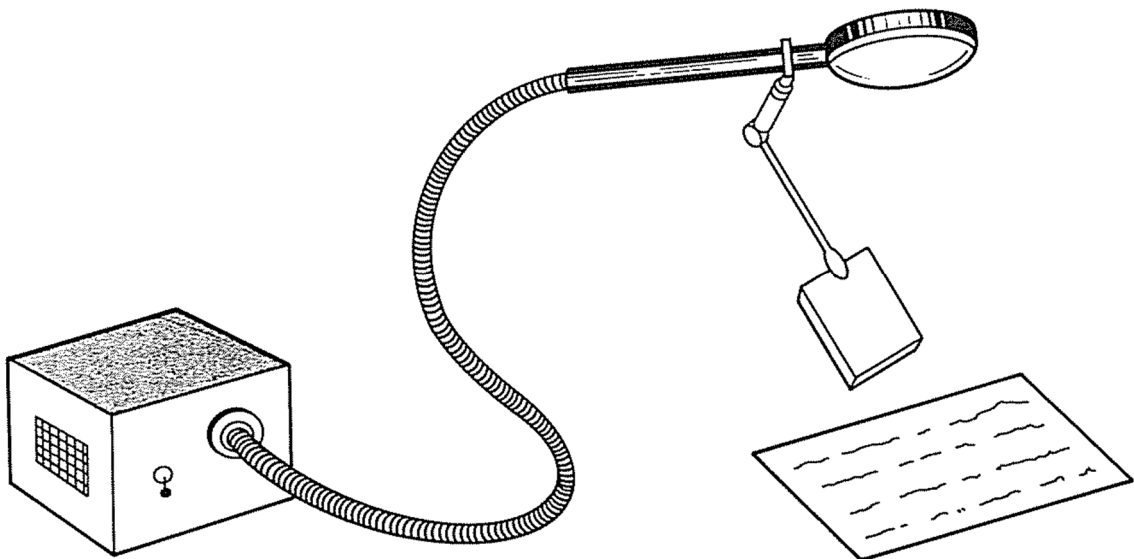


Figura 5.1. Mecanismo para aumento de campo visual

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

El equipo necesario consiste en una fuente de luz halógena-cuarzo de 150 W en conjunción con un soporte articulado y, eventualmente, con fuentes coloreadas. Mediante este soporte, la iluminación anular se orienta con arreglo al ángulo apropiado y a las dimensiones de la pieza que se trata de revisar, dejando un espacio libre para manipular dicho elemento, que vamos a suponer que se trate de la turbina o una de sus partes.

En el caso de que la superficie sea reflectante en extremo, la intensidad de la luz puede acomodarse por medio del regulador de intensidad, así como por el empleo de filtros coloreados.

- Inspección de cavidades.

En determinadas piezas pueden existir cavidades motivadas por burbujas de aire introducidas en el proceso de fundición que, en algunos casos, pueden ser de dimensiones tan reducidas que no permitan el empleo de un endoscopio industria ni que pueda ser dispuesta la pieza sometida a examen bajo ningún microscopio. Ello determina que ni limaduras, cuerpos extraños o burbujas, que pueden afectar a un dispositivo carburador o parte del motor de explosión, puedan ser localizados.

La figura 5.2 ilustra un endoscopio para cavidad profunda, provisto de un monocular y un objetivo, actuando todo ello bajo la alimentación de una fuente de luz halógena-cuarzo de tipo incandescente.



## Aplicaciones de la fibra óptica

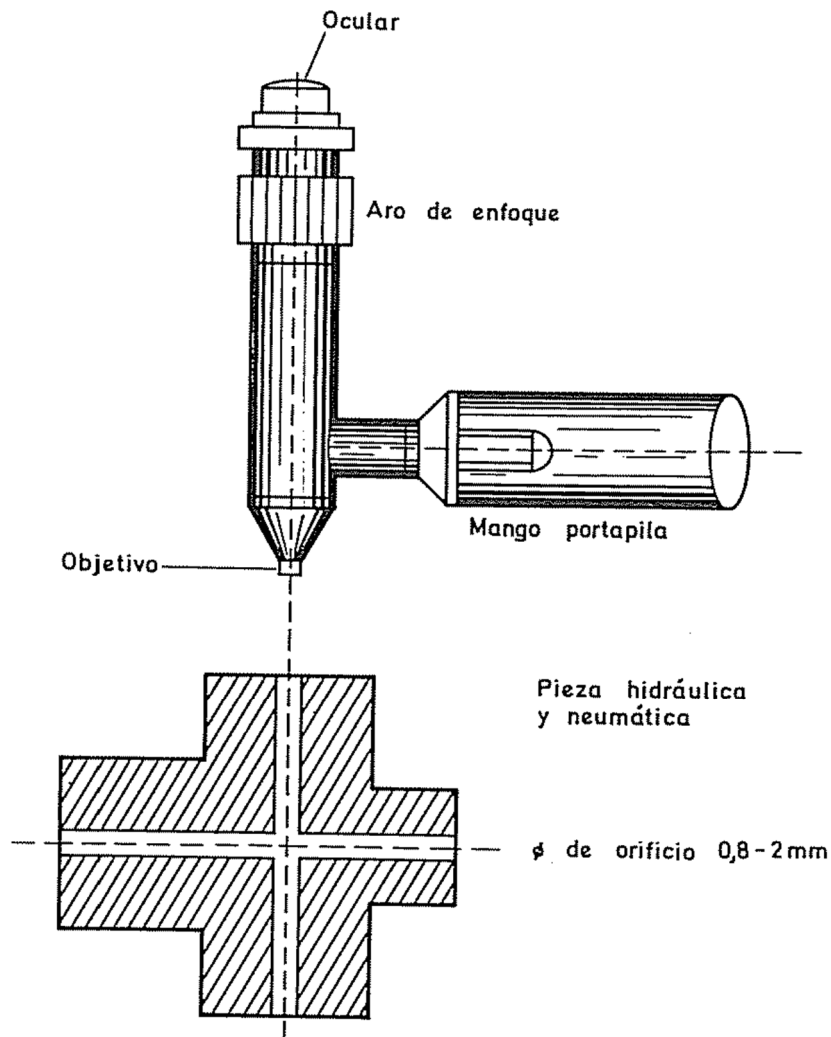


Figura 5.2. Endoscopio para cavidad profunda

- Inspección de los motores.

En la figura 5.3 ponemos de manifiesto los puntos de un motor a reacción que deben ser objeto de examen, examen que es posible realizar mediante los equipos a fibras ópticas antes mencionados. En ciertos casos puede ser conveniente que el endoscopio adoptado disponga de objetivo previsto para visión lateral, es decir, que cuente con la disposición de un prisma.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

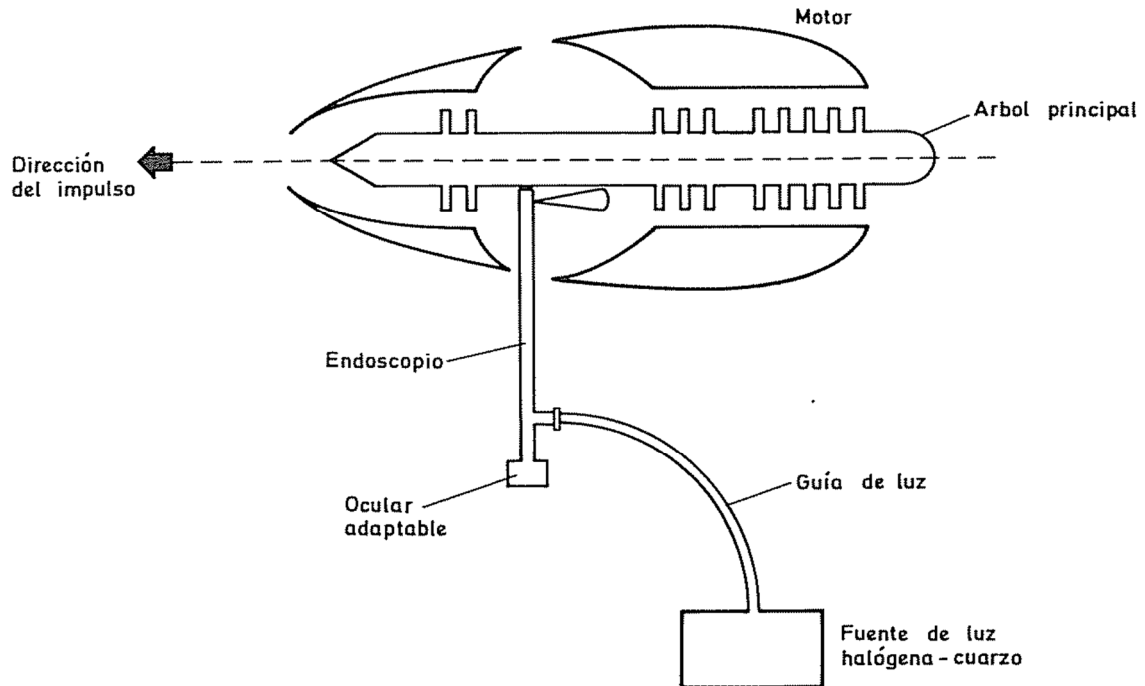


Figura 5.3. Diversos puntos a examinar en un motor a reacción

Al tratarse de puntos de difícil acceso se requerirá de un fibroscopio 8 X 1000, preferentemente con un extremo móvil, que disponga de una guía de luz incorporada. En calidad de elementos complementarios se hace uso de una cámara y un monitor de televisión en circuito cerrado.

Para llevar a efecto una inspección irreprochable, el endoscopio o fibroscopio se introduce en la zona que se trate de revisar, regulándose la fuente de luz halógena-cuarzo para conseguir la máxima iluminación al moverse lentamente el motor a fin de que todos los puntos, las aletas de la turbina y cada elemento puedan ser examinados, bien sea a través del monocular o a través de la pantalla del monitor.

Otras aplicaciones se centran en el examen de las láminas metálicas encorvadas, como pueden ser las aletas de un ventilador, o para comprobar las soldaduras. Se requiere una guía de luz constituida por diez fibras sintéticas de 1 mm de diámetro, dispuesta en un tubo de plástico de la longitud conveniente. Esta guía de luz se introduce en los huecos existentes, desplazándola en todos los sentidos y prestando especial atención a los rincones y las aristas.

De igual manera, resulta indicado el empleo de una monofibra sintética, que resulta fácil de introducir en cualquier orificio para verificar su correcta disposición. Asimismo, es indicado el sistema endoscópico para la comprobación de zonas de

## Aplicaciones de la fibra óptica

reducida superficie en un componente de gran tamaño como, por ejemplo, un disco de turbina.

### - Sistemas de seguridad y control

Uno de los objetivos de un sistema de seguridad fundamentado en el empleo de fibras ópticas consiste en la detección de cavidades de forma irregular que pueden ser adoptadas para esconder joyas o cualquier objeto de contrabando, el aparato puede disponerse en un punto de acceso sin que se retenga al portador ni se moleste al público.

De igual manera puede actuar en la localización de recipientes que contengan líquidos inflamables, como por ejemplo, los depósitos de gasolina de los automóviles. Para ello se requiere una fuente de luz alimentada por pilas y un aparato de visualización activado por ondas luminosas de longitud y diámetro medio.

Para el acceso directo puede hacerse uso de un endoscopio de visión frontal, con un objetivo de 30º y una amplificación adecuada, o un acceso encorvado por medio de un fibroscopio del tipo cuello de cisne o un monoscopio, que puede ser flexible o rígido, para su correcta introducción en la cavidad.

### - Sistema de alarma

Una fibra óptica del tipo corrientemente empleado en telecomunicaciones se agrega a una barrera de seguridad de mallas metálicas. En un extremo de la guía se dispone un emisor que emite luz hacia el receptor situado en el otro extremo mientras la fibra, de muy reducido diámetro, tenga continuidad, y si un intruso rompe al atravesar la barrera el equipo electrónico se pone en actuación.

## 5.3. Aplicaciones marinas

De manera continua se realizan investigaciones a alto nivel, bien sea en el proceso de construcción de navíos como en el tendido del sistema de iluminación de la nave una vez se halla en servicio. Tanto si se trata de embarcaciones de mediano calado como de grandes transatlánticos o navíos de guerra, los peligros de incendio son constantes, lo que ya pone de manifiesto las indudables ventajas que comporta la adopción de un sistema que evite esta eventualidad.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Nos referiremos, a título de ejemplo, a la inspección de los motores diesel, bien sea en el transcurso de su realización o de reparaciones, siendo necesario revisar los revestimientos de los cilindros, las coronas de los pistones y la zona posterior del inyector sin necesidad de proceder a desmontarlos.

Como es lógico, se requiere el empleo de un endoscopio industrial de longitud y diámetro apropiados, con un objetivo de 30º y provisto de espejos que permitan visión lateral a 70, 90 y 115º, así como la posibilidad de abarcar diversas direcciones de visión en los casos de empleo de prismas. En el caso de motores de gran tamaño cabe la necesidad de hacer uso de un intrascopio.

Otra aplicación de los sistemas optoelectrónicos estriba en la iluminación anular, que resulta apropiada para la inspección de canalizaciones, una revisión local con aumento de las soldaduras externas por medio de una lente y la inspección de inyectores, pruebas que pueden realizarse por medio del empleo de endoscopios de gran diámetro con ángulos distintos de visión.

- Giroscopio con fibra óptica.

Este dispositivo mecánico se caracteriza por mantener una determinada dirección angular debida al rápido movimiento rotativo de su marcha, fundamentándose en el principio de la rotación de un volante pesado que gira con rapidez - con tendencia a conservar el plano de rotación - reaccionando contra cualquier fuerza que lo aparte de dicho plano. Los giroscopios tienen una aplicación concreta en naves de pasaje, permitiendo determinar su nivel de estabilidad y con ello evitar los efectos del mareo.

La aplicación de la fibra óptica a buena cantidad de instrumentos empleados en física ha permitido realizar un giroscopio optoelectrónico partiendo del principio del interferómetro de Sagnac, que es un circuito óptico cerrado y plano, en el cual una luz monocromática se propaga en el área en ambos sentidos de circulación. (buscar imagen).

La aplicación de este principio ha permitido realizar el giroscopio a láser o girolaser, en el cual el tubo de un láser a gas (He-Ne) constituye parte integrante de un circuito triangular o rectangular, es decir, con tres o cuatro espejos es posible apreciar el funcionamiento de un giroscopio óptico a partir de la coincidencia entre las imágenes reflejadas de dichos espejos.

## Aplicaciones marinas

Partiendo de esta base, se ha llegado a la realización del giroscopio a fibra óptica, en el cual el circuito óptico está compuesto por una fibra monomodo de algunos centenares de metros bobinada, que hace posible poner de manifiesto hasta la menor discrepancia rotativa.

- Fibras ópticas en el sónar.

Uno de los aspectos en los cuales la Marina está trabajando constantemente es en la aplicación de las fibras para el desarrollo de nuevos y eficaces sensores acústicos para los equipos de sónar. Ya en la actualidad estos equipos se utilizan para la localización de bancos de pesca, lo que motiva que la aplicación de este sistema detector no quede relegada a las finalidades bélicas sino, más concretamente, al campo industrial.

Ha podido determinarse, de manera muy concreta, que la presión ejercida por las ondas acústicas transmitidas por el agua tienen la particularidad de modificar las características físicas de las fibras ópticas alterando el índice de refracción, lo que hace variar la longitud de la trayectoria de desplazamiento de las señales de luz por el interior del núcleo.

Este cambio, mucho más reducido que la longitud de una onda luminosa, se detecta tan solo en interferometría, por medio de comparación de la fase de la onda de luz al final de la fibra sensible con la onda de luz procedente de otra segunda fibra mantenida bajo riguroso control, que se toma como referencia. Este sistema es ya corriente en técnica hidrofónica.

Este sistema requiere la existencia de luz coherente y no cabe la posibilidad de que la luz del láser conserve tal coherencia durante un largo recorrido por una fibra multimodo, lo que pone de manifiesto la necesidad de adoptar fibras monomodo.

Variando esta técnica se llevan a efecto extensas investigaciones fundamentadas en el sistema de utilizar una sola fibra, que es arrollada alrededor de un cilindro que registra las presiones ejercidas por las ondas acústicas y, al difundirse esta acción a lo largo de la guía óptica, se consigue un desplazamiento de fase entre dos ondas de luz de idéntica polarización. La aplicación de este efecto a dado origen al hidrófono.

- Hidrófono con fibra óptica.

Los instrumentos hidrofónicos mantienen relación directa con los sistemas de sónar, permitiendo la transformación de los ruidos en señales ópticas o visuales. En el sistema de hidrófono con fibra óptica se introduce en el agua un sensor acústico,

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

constituido por una fibra monomodo, que lleva otra idéntica en paralelo con aislamiento absoluto.

Las ondas salientes tienen aproximadamente la misma amplitud, pero se hallan en distinta fase y cualquier referencia de presión se traduce en una separación en la fase relativa.

La interferencia entre las dos ondas de luz, una de ellas de referencia invariable y la otra modulada en fase por la presión acústica, se patentiza en la superficie del fotodetector, cuya representación esquemática es la de la figura 5.4, estando el núcleo de la fibra  $n_1$  y la envoltura  $n_2$  relacionados con un espejo. Cualquier modificación en los valores de la fibra se pondrá de manifiesto por la variación de la longitud de onda.

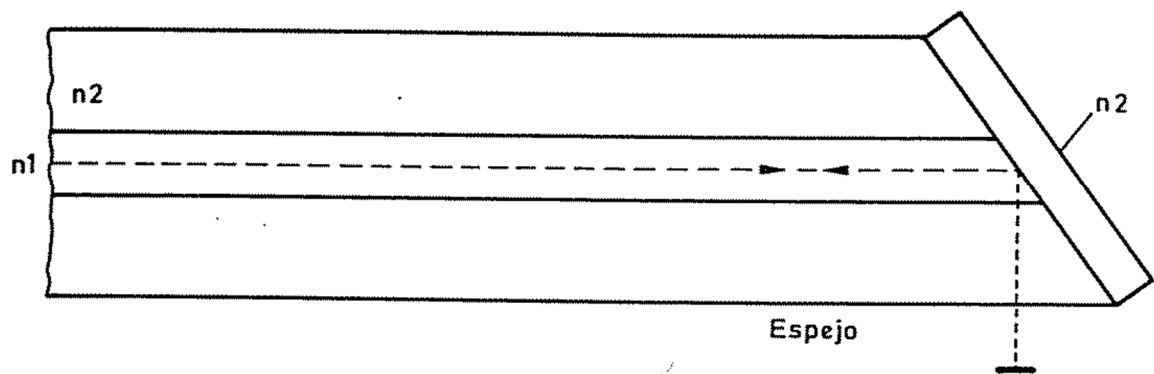


Figura 5.4. Representación esquemática de un fotodetector

## Aplicaciones marinas

### - Antenas y enlaces

Existen diversos modelos de antenas, tanto para uso marítimo como para uso terrestre, utilizadas para emisión y recepción de información. Algunos ejemplos son:

- Antena náutica KNS de acceso a Internet

La antena náutica KNS tiene un diámetro de 85 centímetros y pesa 53 kilos, dispone de un sistema auto-orientable que permite conexión permanente de servicios de banda ancha y voz sobre IP gracias a un movimiento de alto rendimiento en tres ejes.

Gracias a su precio y funcionalidades, la nueva antena reduce las barreras económicas para la conexión a Internet de cualquier embarcación, desde un yate de recreo a un gran carguero. El sistema soporta aplicaciones como el acceso a Internet, correo electrónico, transferencia de datos, herramientas corporativas y navegación Web o VPN.



Figura 5.5. Antena náutica KNS de acceso a Internet

- Antenas combo 2J6A con 4G/LTE ,GPS ,MIMO y certificación IK09, IP67 e IP69K

Las antenas 2J6A están diseñadas para aplicaciones telemáticas 4G LTE en entornos agresivos. Además, están equipadas con dos conectores coaxiales para que puedan combinar las comunicaciones 4G/LTE con la recepción de señal GPS, o con la funcionalidad MIMO por disponer de dos señales 4G/LTE en la misma antena.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Las bandas de frecuencias soportadas por la familia 2J6A cubren todas las bandas utilizadas en las tres últimas generaciones de comunicaciones móviles celulares: 4G/LTE, 3G y GSM/GPRS, pero también permiten utilizar estas antenas en sistemas WiFi, Bluetooth, ZifBee, o cualquier otro sistema de 2.4GHz.



Figura 5.6. Antenas combo 2J6A

### - Cámaras de seguridad

Son muchos los motivos que nos pueden llevar a instalar un sistema de videovigilancia en el barco: monitorizar la actividad a bordo, ayuda en la navegación, protección durante periodos de amarre o incluso disponer de evidencias en caso de incidente. Por ello, es importante seleccionar cámaras de seguridad específicas para entornos marinos que puedan obtener la mejor imagen independientemente de las condiciones medioambientales.

#### 1. Para exteriores:

- Serie Xtreme de Gost

El minidomo Xtreme destaca por su elegante carcasa en acero y por sus reducidas dimensiones.



## Aplicaciones marinas



Figura 5.7. Serie Xtreme de Gost

- Mobotix M15

La cámara más robusta con imágenes de hasta 180°. La alternativa al acero.



Figura 5.8. Mobotix M15

2. Para interiores:

- Gost minidome:

Elegante cámara con acabado en madera.



Figura 5.9. Gost minidome

- Mobotix S15:

La cámara más discreta, montaje empotrado, en acabados varios.



Figura 5.10. Mobotix S15

## Aplicaciones marinas

### 5.3.1. La fibra óptica submarina

El cable de fibra óptica submarina garantiza la protección de las fibras ópticas contra la presión del agua, la propagación longitudinal del agua, los daños provocados por agentes químicos y los efectos de la contaminación causados por el hidrógeno durante la vida nominal del cable. Asimismo, garantiza que no se producirán degradaciones de calidad de funcionamiento de la fibra cuando el cable se tiende, se entierra, se recupera y se manipula aplicando procedimientos submarinos normalizados. Además, los elementos mecánicos que componen el cable de fibra óptica se utilizan para monitorear internamente el estado del sistema de transmisión, lo que permite la detección y localización de roturas en el cable. Cabe destacar que los materiales utilizados para la fabricación del cable de fibra óptica submarina están realizados de manera que no sean perjudiciales para el medio ambiente, ya que se tratan de materiales que pueden integrarse casi de forma natural al entorno.

#### 5.3.1.1. Estructura del cable de fibra óptica submarina.

En la figura 5.5 se pueden observar las partes que componen un cable de fibra óptica submarina.

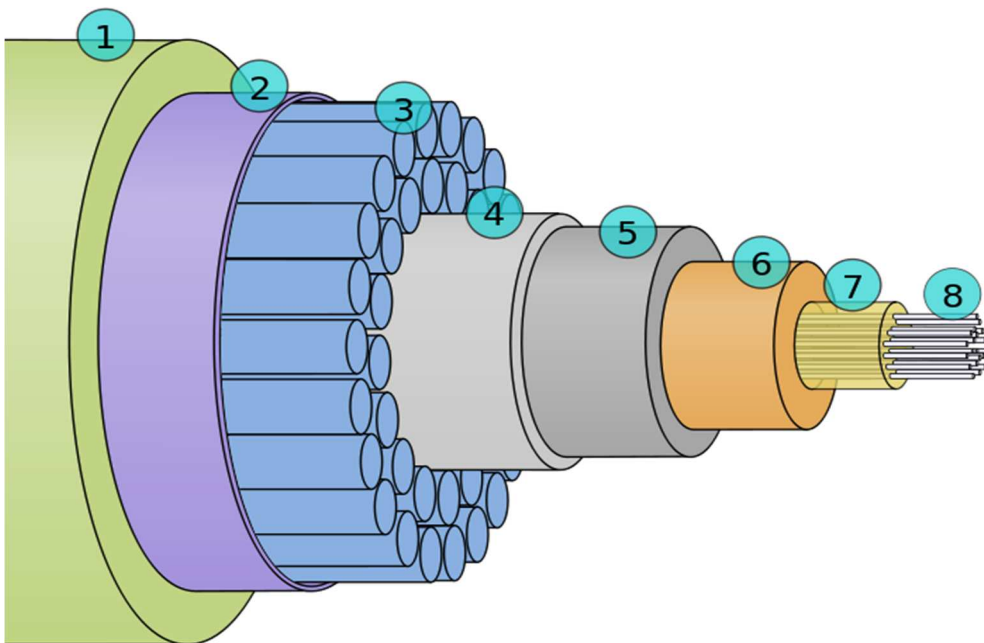


Figura 5.11. Partes de un cable de fibra óptica submarina

## Aplicaciones de la fibra óptica

1. Polietileno.
2. Cinta de mylar.
3. Alambres de acero trenzado.
4. Barrera de aluminio resistente al agua.
5. Policarbonato.
6. Tubo de cobre o aluminio.
7. Vaselina.
8. Fibra óptica.

### 5.3.1.2. Instalación de cables de fibra óptica submarino

Las grandes inversiones requeridas originaron que, tradicionalmente, el sector del cable submarino estuviera liderado por empresas con un potente músculo financiero, operando frecuentemente en régimen de monopolio.

La importancia de los cables de fibra submarinos es enorme. Los cables submarinos concentran la mayor parte de los datos transmitidos en el mundo, con alrededor del 90% del tráfico. El 10% restante se transmite mediante satélites.

Tender un cable submarino es tan complicado como poner un satélite en órbita. El cable y los repetidores son muy caros, el tendido lo realizan barcos especiales en una operación controlada al centímetro por ordenador. El cable es almacenado y probado en grandes tanques cilíndricos situados en las fábricas, antes de ser cargado a bordo del barco de tendido de cable.

Es necesario tener una estación terminal en la que se controla las operaciones y donde se encuentra el equipo alimentador. También son necesarias diferentes estaciones terrestre entre los lugares que se van a conectar, denominadas estaciones de amarre.

Luego de su verificación, los cilindros se cargan en los barcos, dejando un extremo del cable en la orilla. El tendido físico del cable es bastante complejo. Los problemas de encauzamiento se pueden minimizar con el empleo de barcos especializados que llevan a cabo una investigación geofísica y geotécnica de la ruta propuesta y, si se localizan obstáculos, trabajan para encontrar las mejores alternativas. La ruta definida se debe ejecutar con una precisión de alrededor de 100 metros, incluso cuando el cable se tiende a profundidades de hasta 8000 metros. Es necesario conectar la estación terminal con la playa, donde existe una parte del cableado que va en forma terrestre.

## Aplicaciones marinas

Las operaciones marinas comienzan situando el cable a flote desde el barco de cableado hasta la posición de tierra. Una vez que el extremo del cable está asegurado en la orilla, las bolsas de flotación se retiran permitiendo al cable asentarse en el mar.

Los ajustes para tensar el cable y posicionar el barco se hacen de forma continuada para asegurar la conformidad con la ruta del cable. Cuando el cable llega al punto de destino, un extremo del mismo (que ha sido previamente instalado y mantenido a flote) se lleva a bordo y se empalma al cable que está siendo tendido. Es necesario tener especial cuidado con los cables, puesto que son especialmente frágiles. Un fallo en el aislamiento podría inutilizar los repetidores o deteriorar las fibras. Además, las corrientes submarinas, terremotos, anclas y las redes de arrastre son un peligro constante. Existen barcos de reparación que están en constante estado de alerta en todo el mundo.

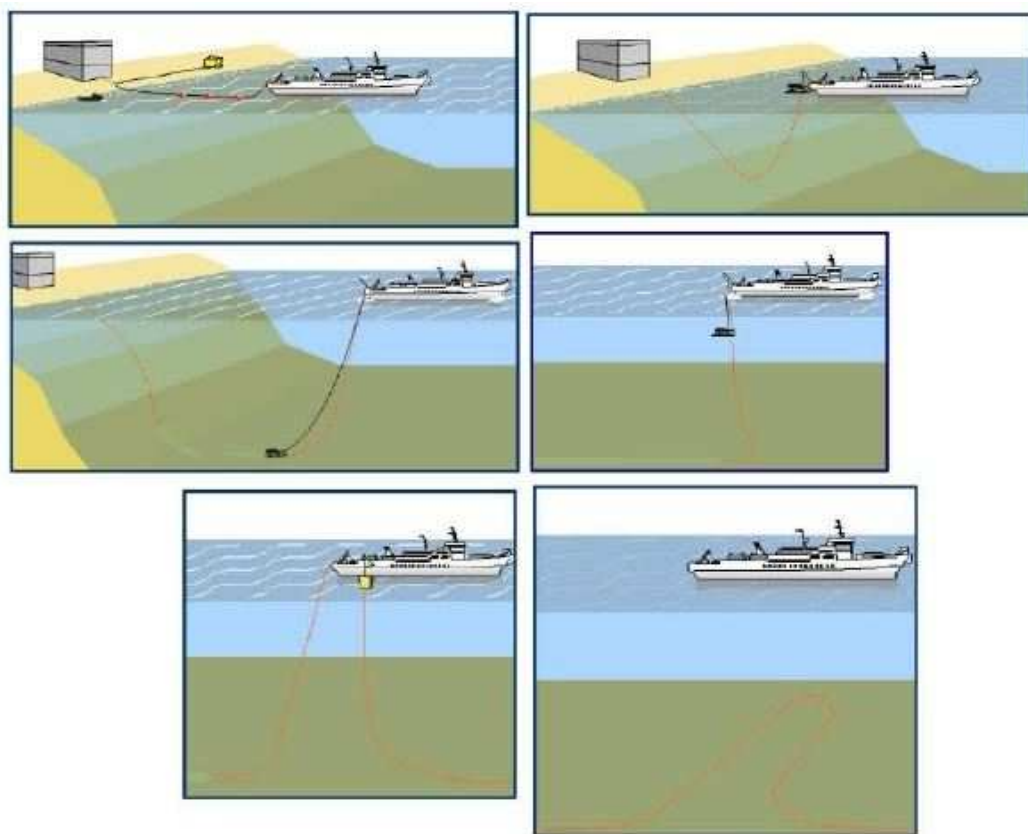


Figura 5.12. Instalación de un cable de fibra óptica submarina

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

Llevar a cabo una reparación de cable de fibra óptica submarina resulta sumamente antieconómico ya que, debido a las características del medio, las interrupciones pueden llegar a ser de larga duración, lo que implica grandes pérdidas para la empresa propietaria. Luego de que la ubicación de una falla se detecta, un equipo es enviado por barco al lugar de reparación. La recuperación del enlace suele llevarse a cabo en tiempos de 1 a 2 días según la profundidad del tendido. Se estima que un barco tarda un promedio de 10 días y 2 semanas en llegar al lugar de la reparación, pero esta puede variar según la importancia de la falla.

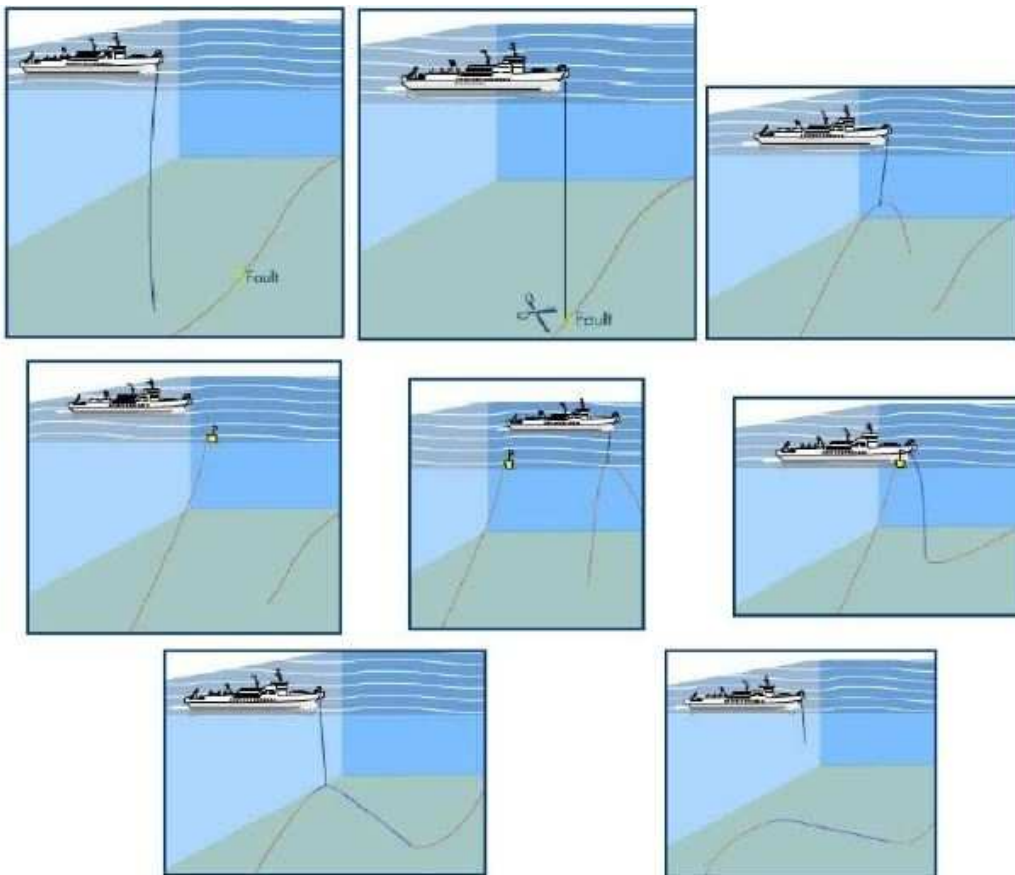


Figura 5.13. Reparación de un cable de fibra óptica submarina

## Aplicaciones marinas

### 5.3.2. Redes NMEA

La red NMEA es un estándar mundial en el protocolo de datos de electrónica marina, establecido por la National Marine Electronics Association, para la creación de redes en el buque. Se crea ante la necesidad de definir un protocolo común a todos los equipos del buque, desde GPS hasta sensores de temperatura, viento, etc. Así, en 1980 se crea el NMEA 180, que más adelante, en el año 1983, evoluciona hasta el NMEA 183. Tiempo después, en el año 2000, debido a la demanda de velocidad por parte de los equipos, se crea el NMEA 2000

Esta interfaz transmite, en modo serie, las distintas señales electrónicas en un bus de datos por el que la información se envía a los distintos equipos de la red.

El NMEA 183 sólo admite la transmisión de información por un único dispositivo, mientras que los demás equipos deben permanecer a la escucha. Un ejemplo es el de una antena GPS y una pantalla multifunción. Si queremos añadir más de un dispositivo que emita NMEA 183, será necesario el uso de un multiplexor.

El NMEA 2000 está basado en un cable de dos pares de hilo trenzados, por el primero circula información y por el segundo corriente. Con esto, se elimina la necesidad del 183 de utilizar multiplexores. Una red de NMEA 2000 está formada por un troncal principal del que salen ramas a los diferentes equipos mediante el montaje de piezas en "T".

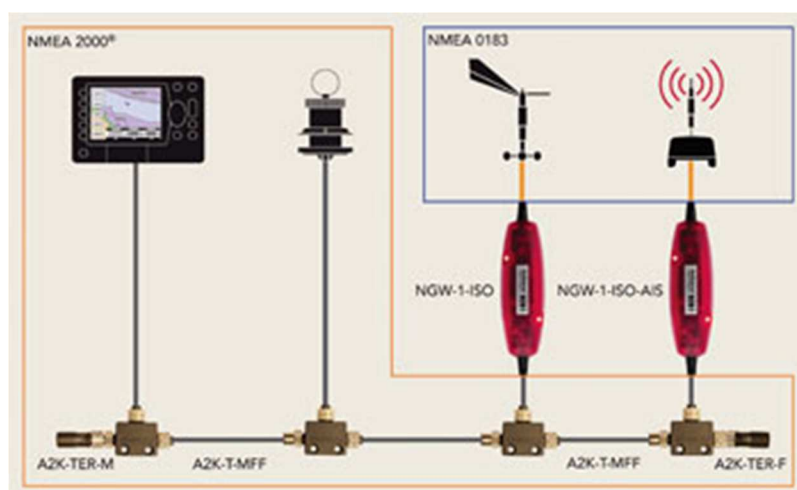


Figura 5.14. Esquema de interconexión NMEA 0183 y 2000

### 5.3.2.1. Características NMEA 2000

La red NMEA 2000 se basa en un cable de dos pares de hilos con una malla. Un par es para información y el otro para corriente.

La longitud máxima del cableado es de 100 metros y con un máximo de 50 nodos. Su velocidad de transmisión máxima es de 250 kbits por segundo.

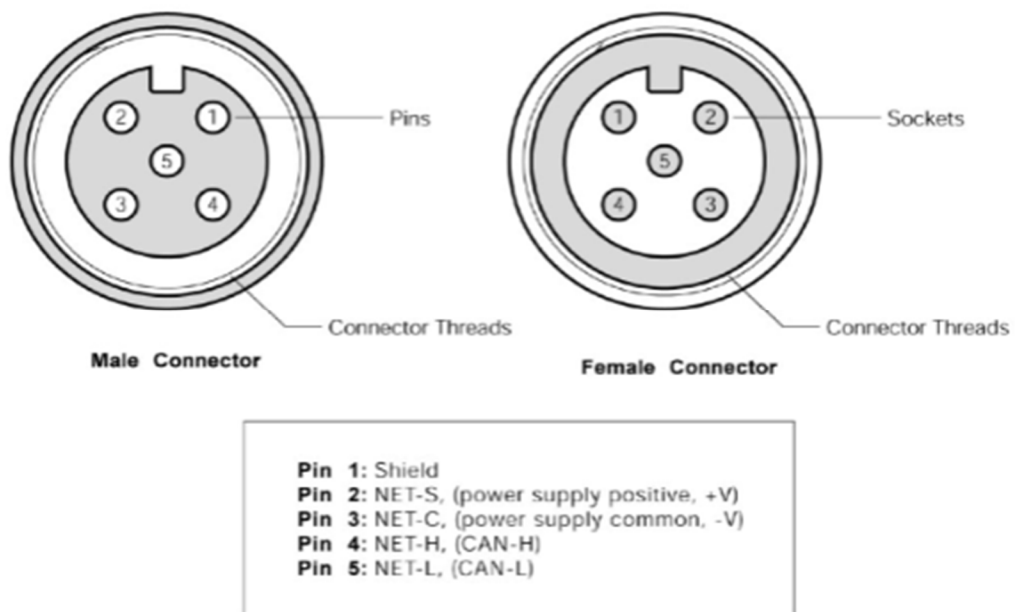


Figura 5.15. Distribución de pines de conectores NMEA 2000

### 5.3.2.2. Componentes de una red NMEA 2000

A continuación se muestran los distintos conectores y cables utilizados para una red NMEA 2000:

- Conector tipo T: Conector de tres direcciones con un micro-conector macho y dos hembra. Se utiliza para conectar dispositivos NMEA 2000 al cable principal.



## Aplicaciones marinas

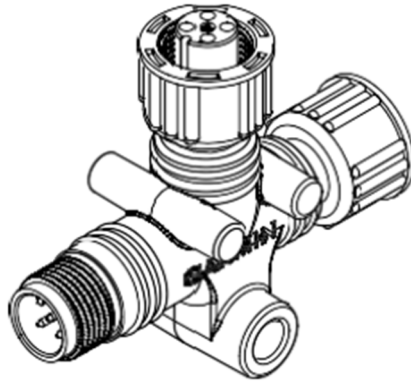


Figura 5.16. Conector tipo T

- Terminador: Resistencia de  $120 \Omega$  que se coloca a cada extremo de la red, ayudando a garantizar la integridad de la señal a través de toda la red.

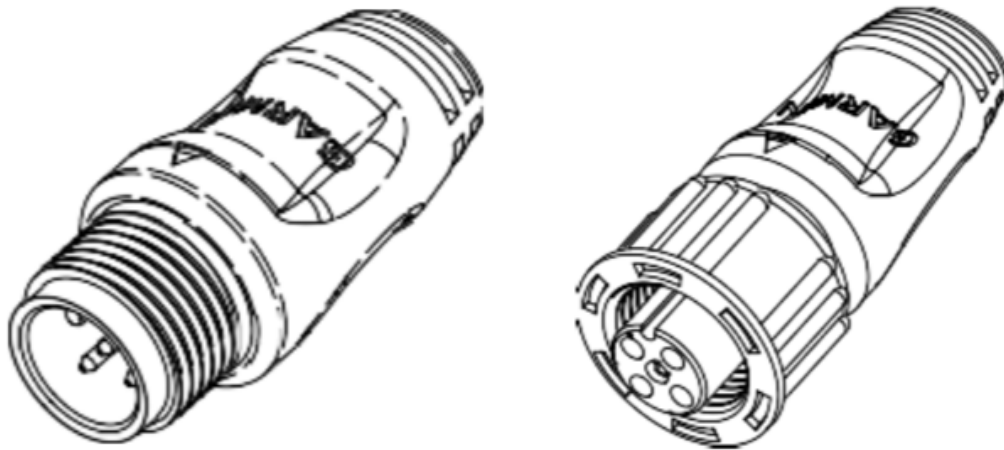


Figura 5.17. Terminador macho (izda.) y terminador hembra (dcha.)

- Terminador en línea: Terminador especial con conectores macho y hembra en cada extremo. Permite la conexión directa a un dispositivo situado en el extremo del cable principal.

## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

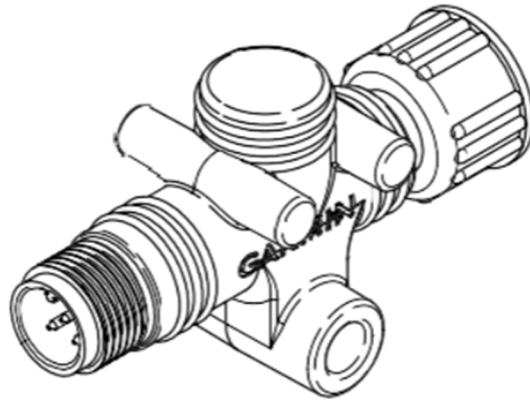


Figura 5.18. Terminador en línea

- Cable de alimentación de la red: Cable fabricado para una tensión nominal de 12 V a cc, necesarios para la red y los dispositivos NMEA 2000. Debe estar conectado a un conmutador, debido que algunos dispositivos deben estar siempre encendidos cuando reciben alimentación NMEA 2000.

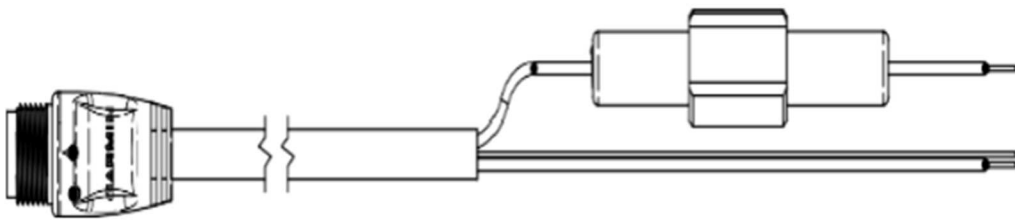


Figura 5.19. Cable de alimentación NMEA 2000

- Cable principal: Principal vía de comunicación de la red NMEA 2000. Su longitud máxima es de 100 m.
- Cable de caída de voltaje: Cable que conecta un dispositivo a una red NMEA 2000. Máxima longitud 6 m.

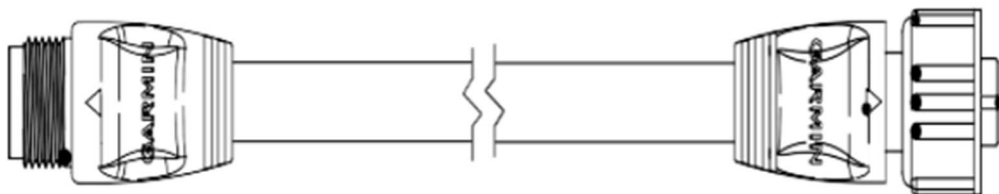


Figura 5.20. Cable principal de caída de voltaje

## Aplicaciones marinas

Un ejemplo de red a bordo del barco sería el siguiente:

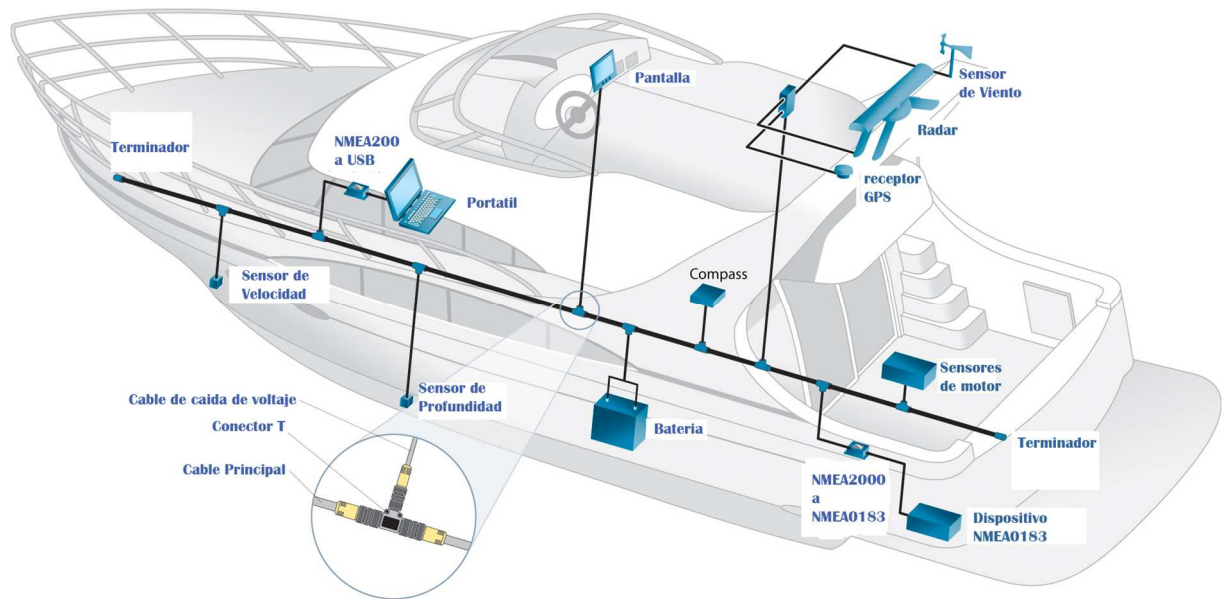


Figura 5.21. Red NMEA a bordo

### Conclusión

1. El empleo de la fibra óptica como conductor de información tiene numerosas ventajas, no solo por el abaratamiento frente al cable de cobre, sino sobre todo, por su amplio ancho de banda, que hace que la velocidad de transmisión sea mucho mayor que con lo que podría conseguirse con el cobre convencional.
2. No conduce electricidad, lo que contribuye a la seguridad mencionada al principio de la introducción.
3. Resistencia a la corrosión, a diferencia de los cables de cobre, siendo una opción mucho más óptima para ambientes húmedos.

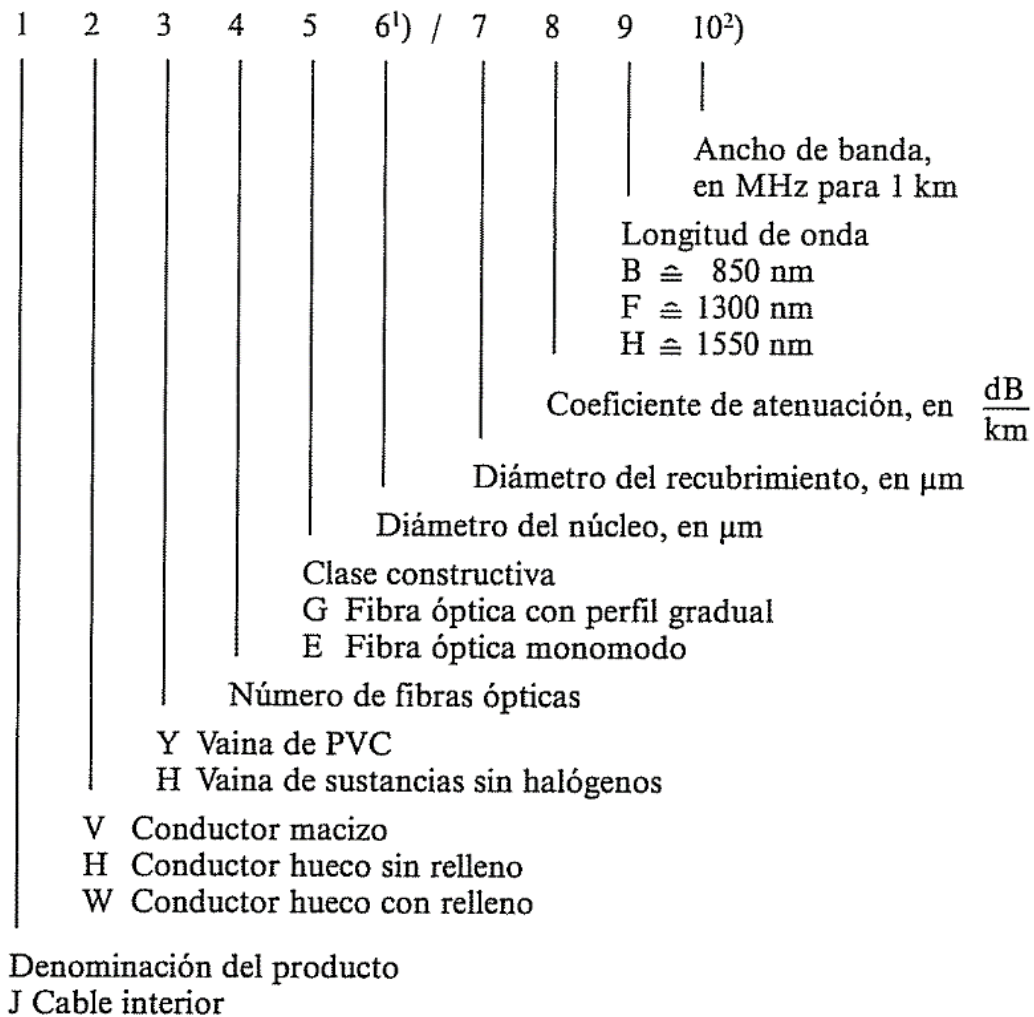
Se ha podido comprobar también que, a pesar de nombrar la transferencia de datos, no se ha hecho hincapié en este tema a lo largo del proyecto, no por falta de importancia, sino por intentar hacer de este un proyecto ligeramente más concreto. Sería fructuoso, en un futuro, poder continuar este trabajo ahondando en los temas de la transferencia de datos y de, sobre todo, la posible compatibilidad de redes, dando prioridad a la fibra óptica.

Con todo, espero que este proyecto haya sido, dentro de sus objetivos, lo más completo posible.



## La Fibra Óptica: Redes y Aplicaciones

- Configuración del símbolo de identificación correspondiente a cables interiores en base a la norma DIN VDE 0888 sección 3.



- 1) En el caso de las fibras ópticas monomodo se indica el diámetro de campo en lugar del diámetro del núcleo
- 2) En el caso de las fibras ópticas monomodo se indica la dispersión en ps/(nm·km) en lugar del ancho de banda

- Mapa de cables de fibra óptica submarino

<https://www.submarinecablemap.com/>

### Bibliografía

Para la realización de este trabajo, se ha consultado en distintas fuentes bibliográficas, así como en diversas páginas web. A continuación se enumerarán todas y cada una de las fuentes utilizadas:

- Dennis Derickson, *Fiber optics test and measurement*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, cop.
- Yeh, Chai, *Handbook of fiber optics: theory and applications*. San Diego [etc.]: Academic Press, cop. 1990.
- Keiser, Gerd, *Optical fiber communications*, 3rd ed. Boston [etc.]: McGraw-Hill, 2000.
- Buck, John A., *Fundamentals of optical fibers*. New York: John Wiley, 1995.
- Tur Terrasa, Juan; M<sup>a</sup> Rosario Martínez Jiménez, *Todo sobre las fibras ópticas*. Barcelona: Marcombo, D. L. 1988.
- Mahlke, Günther; Peter Gössing, *Conductores de fibras ópticas: conceptos básicos: cables, diseño, producción e instalación: planificación de las instalaciones*. Barcelona: Marcombo, D. L. 1987.
- Hentschel, Christian, *Fibras ópticas: manual: una guía de referencia e introducción a la tecnología y técnicas de medida en las fibras ópticas*. 1<sup>a</sup> ed. Madrid: Instituto oficial de Radio y Televisión, 1986.
- Tanenbaum, Andrew S., *Redes de computadoras*. 4<sup>a</sup> ed. Naucalpan de Juárez (México) [etc.]: Pearson Educación, 2003.
- Freer, John, *Introducción a la tecnología y diseño de sistemas de comunicaciones y redes de ordenadores*. Madrid: Anaya multimedia, 1990.
- Martín Pereda, José Antonio, *Sistemas y redes ópticas de comunicaciones*. Madrid: Paerson Educación, 2004.
- Santos González, Manuel, *Diseño de redes telemáticas*. Paracuellos de Jarama (Madrid): Ra-Ma, 2014.
- Dave Bellon, "Submarine Cable Map" [en línea], 2011. URL: <https://www.submarinecablemap.com/>
- Angela Hewitt, "Las mejores cámaras de seguridad para aplicaciones náuticas, yates y embarcaciones". [En línea]. 2004. <http://www.imatri-sistemas.com/blog/entry/las-mejores-camaras-de-seguridad-para-aplicaciones-nauticas-yates-y-embarcaciones>.
- Carlos Martínez, "Antenas y enlaces – Conectores-Redes-Fibra óptica-FTTh-Ethernet". [En línea]. 1998. <https://www.whois.com/whois/conectronica.com>.