



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTILÁN

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DÍGITAL MULTIPLEXADO DE 64 Kbps VÍA FIBRA  
ÓPTICA UTILIZANDO LEGUAJE C

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

PRESENTA:

ORLANDO EMILIANO GIL GIL

ASESOR: IME JUAN MANUEL TORRES MERINO

CUAUTILÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO

2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
 ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES CUAUTITLAN

DRA. SUEMI RODRIGUEZ ROMO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 PRESENTE



DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES  
 ATN: L. A. ARACELI HERRERA HERNANDEZ  
 Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis :

"Estudio de un Sistema de Comunicación Digital Multiplexado de 64 Kbps, Vía Fibra Optica Utilizando Lenguaje C"

que presenta el pasante: Orlando Emiliano Gil Gil  
 con número de cuenta: 08134412-7 para obtener el título de :  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 29 de abril de 2011.

PRESIDENTE Fis. José de Jesús Cruz Guzmán

VOCAL Ing. José Ubaldo Ramírez Urizar

SECRETARIO Ing. Juan Manuel Torres Merino

PRIMER SUPLENTE Ing. Jorge Buendia Gómez

SEGUNDO SUPLENTE Dr. Zbigniew Oziewicz Kwass

## Dedicatoria

A dios que me permite concluir un ciclo en mi vida.

A mi madre que me apoya siempre.

A mis hermanos que me motivaron.

A mis sobrinos que puedan ver un camino a seguir.

A mi esposa que me alienta a seguir adelante.

## I N D I C E

<b>CAPITULO 1</b>		<b>Página</b>
	<b>INTRODUCCION (Historia de la comunicación).</b>	<b>1</b>
1.1	Historia de la comunicación	2
1.2	Orígenes del lenguaje	2
1.3	La escritura y el alfabeto	3
1.4	Signos y señales	3
1.5	La imprenta y el papel	3
1.6	Surge la electricidad	4
1.7	La transmisión inalámbrica	4
1.8	Fechas decisivas para el desarrollo de la comunicación	5
1.9	Mensajes analógicos y digitales	8
 <b>CAPITULO 2</b>		
	<b>FUENTES DE LUZ</b>	<b>10</b>
2.1	Introducción al Diodo Emisor de Luz (LED)	10
2.2	Parámetros y tipos de LED`s	14
2.3	Características de operación del LED	17
2.4	El Diodo Láser	19
2.4.1	Estructura y características del LD	21
 <b>CAPITULO 3</b>		
	<b>MEDIO DE COMUNICACIÓN</b>	<b>27</b>
3.1	Introducción	27
3.2	Historia de la fibra óptica	27
3.3	La naturaleza de la luz	29
3.3.1	La naturaleza ondulatoria de la luz	29
3.3.2	Naturaleza corpuscular de la luz	31
3.4	Leyes básicas de óptica y definiciones	32
3.5	Tipos de fibra óptica	34
3.5.1	Fibras multimodo	36
3.5.2	Fibras monomodo	37
3.6	Apertura numérica	38
3.7	Atenuación	40
3.7.1	Absorción del material	41

	<b>Página</b>	
3.7.2	Dispersión lineal	42
3.7.3	Dispersión no lineal	42
3.7.4	Atenuación de guía de onda	43
3.7.5	Modos que salen	43
3.7.6	Efectos de radiación	43
3.8	Ventajas de la fibra óptica	44
3.8.1	Elevado ancho de banda	44
3.8.2	Bajas pérdidas	45
3.9	Tipos de cable de fibra óptica	46
3.10	Empalmes y conectores	49

## CAPITULO 4

	<b>FOTODETECTORES</b>	<b>50</b>
4.1	Principios Físicos de los Fotodiodos	50
4.1.1	El fotodiodo PIN	50
4.2	El fotodiodo de avalancha APD	57
4.3	Comparación de los fotodiodos PIN y APD	59
4.4	El receptor óptico	60

## CAPITULO 5

	<b>MODULACIÓN Y DEMODULACIÓN (DIGITAL)</b>	<b>64</b>
5.1	El teorema del muestreo	64
5.2	Muestreo práctico	67
5.3	El teorema del muestreo y sistemas de comunicación por pulso	69
5.4	Modulación por codificación de pulso	70
5.5	Sistemas de portadora digital	72
5.6	Manipulación por encendido y apagado	72
5.7	Manipulación por corrimiento de frecuencia	74
5.8	Manipulación por corrimiento de fase	76
5.9	Detección de señales binarias	76
5.10	codificación de línea	78
5.10.1	Código NRZ	79
5.10.2	Código RZ	79
5.10.3	Código bifase	80
5.10.4	Código Miller	80
5.11	Modulando LED`s	81
5.12	Modulación digital de un LED	82
5.13	Modulación digital de LD`s	83

<b>CAPITULO 6</b>		<b>Página</b>
	<b>LINEAS MULTIPLEXADAS (MULTICANALIZACIÓN)</b>	<b>86</b>
6.1	Multicanalización por división de frecuencia	86
6.2	Multicanalización por división de tiempo	88
6.3	Comparación entre sistemas de multicanalización por división de frecuencia y por división de tiempo.	91
6.4	Multiplexión por división de longitud de onda	93
6.5	Multiplexión por división de longitud de onda densa	100
6.5.1	Características de la multiplexión por división de longitud de onda densa	102
6.5.2	Parámetros de la multiplexión de longitud de onda densa en enlaces de larga distancia	103
6.5.3	Espectativas de la multiplexión por división de longitud de onda densa	103
 <b>CAPITULO 7</b>		
	<b>DISEÑO, CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>105</b>
7.1	Historia del lenguaje C	105
7.2	Diseño del sistema	107
7.2.1	Especificaciones del enlace	108
7.2.2	Diseño de longitud y ancho de banda por tabla cuadrículada	108
7.2.3	Procedimiento para el diseño del sistema digital	109
7.3	Diseño de una línea de transmisión digital multiplexada, de 64 Kbps, vía fibra óptica, empleando lenguaje C	114
	 CONCLUSIONES	 120
	 Apéndice A	
	Corrida del programa en lenguaje C	122
	 <b>BIBLIOGRAFÍA</b>	 <b>123</b>

## CAPITULO 1

### INTRODUCCIÓN (HISTORIA DE LA COMUNICACIÓN)

En el presente capítulo se estudia, en forma breve, la historia de la comunicación, desde que el hombre aparece en la superficie de la tierra hasta nuestros días. Al final se hace una comparación de los mensajes digitales y analógicos.

La comunicación podemos definirla como un proceso en el cual utilizamos un conjunto de medios, instrumentos y recursos que permiten transmitir ideas, actitudes e imágenes de una persona, generación o sociedad a otra.

La figura 1-1 muestra tres ejemplos de sistemas de comunicación.



Figura 1-1. Algunos ejemplos de sistemas de comunicación.

"Nuestros gestos, palabras y escritos pueden ser comunicados mediante una variadísima serie de recursos que el hombre ha ideado a través de los siglos. Estos recursos se inician con el lenguaje, la escritura y el dibujo, y vienen a culminar con la radio, el cine, la televisión y el teléfono de nuestros días."<sup>1</sup>

<sup>1</sup> "Enciclopedia Ilustrada Cumbre", Editorial Cumbre S.A., 1988, tomo 4, pag. 157.

## 1.1 Historia de la comunicación.

"Cualquier animal puede comunicar a su prole las sensaciones de hambre o de peligro, pero no puede conservarlas a través del tiempo; sólo las civilizaciones humanas tienen conciencia del pasado. Las sociedades no existirían si el hombre no fuese capaz de transmitir sus pensamientos a través del tiempo y del espacio."<sup>2</sup>

## 1.2 Orígenes del lenguaje.

De las dos primeras etapas de comunicación, la comunicación mímica o imitativa y la comunicación verbal, no se tiene información de su desarrollo; sin embargo, se tienen ideas sobre su evolución.

"El período de la comunicación mímica o imitativa se extiende desde la aparición del ser humano hasta el fin del hombre de Neanderthal. "No se sabe a ciencia cierta, sólo se tienen conocimientos de que el hombre de Neanderthal apareció en la primera mitad de la época cuaternaria y que su cultura pervivió durante más de 200,000 años."<sup>3</sup>

"La segunda etapa de la comunicación corresponde a la transmisión verbal, que tiene como instrumento el lenguaje."<sup>4</sup>

"Las características anatómicas indispensables para emitir la voz llegaron a su pleno desarrollo en el hombre de Cromañón; pero ya el hombre de Neanderthal en su última fase pudo emitir sonidos claramente diferenciados."<sup>5</sup>

El hombre de Cromañón constituyó el arte rupestre que se encuentra en una multitud de cavernas.

El conocimiento sobre la historia de la comunicación se va haciendo más claro a medida que aparecen los primeros signos escritos.

---

<sup>2,4,5</sup> "Enciclopedia Ilustrada Cumbre", Ed. Cumbre, 1988, tomo 4, pags. 157, 158

<sup>3</sup> "Historia de la comunicación audiovisual" Roberto Moreno y Ma. de la Luz López Ortiz, Ed. Patria, 1962, pags. 14 y 15.

### **1.3 La escritura y el alfabeto.**

"La forma más antigua de escritura es la pictografía, la cual consiste en dibujar una imagen esquemática de las cosas y los actos; y de esta manera pueden combinar formando narraciones religiosas, cronológicas y leyendas transmisibles a generaciones futuras"<sup>6</sup>. En las civilizaciones más avanzadas, de aquel tiempo, su escritura llegó a transformarse en ideogramas (combinación de imágenes o símbolos que representan ideas). Combinando veintidós imágenes, cada una de las cuales representaba un sonido, los fenicios crearon el primer alfabeto. "Con el agregado posterior de varias letras suplementarias, el sistema ideado por estos mercaderes de la antigüedad ha pasado a ser el fundamento de nuestros alfabetos actuales."<sup>7</sup>

### **1.4 Signos y señales.**

"Junto con el alfabeto, el ingenio humano había ido creando gran número de formas de comunicación. Para transmitir informaciones entre ciudades alejadas aparecieron las señales de fuego y de humo"<sup>8</sup>. Estas señales de humo fueron utilizadas por los griegos y también por los indígenas americanos. Los romanos utilizaban grandes espejos que reflejaban los rayos del sol y transmitían de acuerdo con un código especial, las órdenes militares y administrativas de las autoridades imperiales. Los indígenas de algunas religiones africanas y americanas enviaban mensajes a grandes distancias mediante sus tambores, cuyo rítmico sonido atravesaba selvas y desiertos. "El imperio incaico y la civilización azteca tenían equipos de corredores mensajeros para llevar información a las más apartadas zonas de sus territorios."<sup>9</sup>

### **1.5 La imprenta y el papel.**

La invención de la imprenta, atribuida al alemán Johann Gutenberg, vino a abaratar y a multiplicar el mensaje cultural de nuestra civilización. "La fabricación de papel vino a facilitar el auge de la imprenta. El libro dejó de ser la herramienta secreta de los eruditos; el mundo árabe, la religión de Israel, la tradición intelectual grecorromana, las escrituras cristianas, todo el patrimonio acumulado en muchos siglos de esfuerzo intelectual comenzó a transmitirse y extenderse."<sup>10</sup>

---

<sup>6, 7, 8, 9, 10</sup> "Enciclopedia ilustrada cumbre", Ed. Cumbre, S.A., 1988, pags. 158,159 tomo 4

"Concluía el siglo XVIII cuando el francés Claudio Chape inventó el telégrafo óptico, instrumento formado por dos brazos móviles que podían enviar mensajes por medio de señales"<sup>11</sup>

"El aparato que podía transmitir a grandes distancias quedó olvidado cuando aparecieron las revolucionarias innovaciones del siglo XX"<sup>12</sup>.

### **1.6 Surge la electricidad.**

Los descubrimientos de los principios del electromagnetismo hicieron posible la aplicación de la corriente eléctrica a las comunicaciones. En 1835 apareció el telégrafo inventado casi al mismo tiempo por el inglés Wheatstone y el norteamericano Morse; éste último, construyó en 1844 la primera línea telegráfica y poco tiempo después creó su famoso alfabeto de puntos y rayas. El progreso técnico se volvió vertiginoso a partir de ese momento. "Lograda la transmisión de sonido a través de un alambre, comenzaron las experiencias tendientes a transmitir la voz humana. Un maestro alemán llamado Reis, logró construir un aparato que comunicaba a cierta distancia el sonido de las notas musicales. Poco después los norteamericanos Elisa Gray y Alejandro Graham Bell patentaban un teléfono más perfecto, capaz de reproducir con fidelidad los matices de la voz humana"<sup>13</sup>.

### **1.7 La transmisión inalámbrica.**

"Los principios establecidos por el sabio alemán Enrique Hertz fueron aplicados por el ingeniero italiano Guillermo Marconi, quien logró crear en 1896 el primer transmisor telegráfico sin alambre. Poco tiempo transcurrió antes de que apareciera la radiotelefonía. La válvula ideada por el norteamericano Lee de Forest solucionó muchos problemas técnicos y permitió los grandes progresos alcanzados por la aviación. Nuevos desarrollos de los mismos principios permitieron establecer las primeras estaciones permanentes de radiotelefonía. En los años posteriores a la Primera Guerra Mundial, los receptores de radio cubrieron casi toda la tierra y llegaron a convertirse en el medio de diversión más popular y difundido. En los años que siguieron a la Segunda

---

<sup>11, 12, 13</sup> Enciclopedia ilustrada cumbre", Ed. Cumbre, S.A., 1988, pag. 159 y 160 tomo 4

Guerra Mundial la televisión alcanzó un desarrollo tan rápido y sorprendente como el que antes había logrado la radiotelefonía"<sup>14</sup>.

"Pero la ciencia electrónica no se detiene aquí; sus aplicaciones han dado origen al radar, aparato detector que anuncia la presencia de obstáculos interpuestos en la ruta de buques y aviones"<sup>15</sup>.

### **1.8 Fechas decisivas para el desarrollo de la comunicación.**

La historia de las comunicaciones humanas se puede resumir mencionando algunas fechas que marcan el comienzo de nuevas etapas y quedan como hitos decisivos en su camino. "La primera se hunde en la penumbra de la historia antigua y la última se halla junto a nosotros anunciando nuevas conquistas"<sup>16</sup>.

- El hombre primitivo usó la comunicación visual por medio de señales manuales y de fuego. Después utilizó el lenguaje hablado.
- 1600 A.C. los fenicios y semitas desarrollaron el alfabeto, que sustituye a los signos pictográficos e ideográficos de las civilizaciones primitivas.
- 1084 A.C. se utilizaron señales de fuego a lo largo de 800 km. para anunciar la caída de Troya.
- 800 A.C. en la ciudad asiria de Nínive las bibliotecas guardan en cilindros de arcilla los documentos cuneiformes de los pobladores de la Mesopotamia.
- 400 A.C. los hindúes inventan la numeración, cuyos principios transmiten a otros pueblos orientales, y se desarrollan las matemáticas.
- 63 A.C. el esclavo romano Marco Tulio Tiro crea el primer sistema de taquigrafía y con él recoge los discursos de los oradores republicanos.

---

<sup>14, 15, 16</sup> "Enciclopedia ilustrada cumbre", Ed. Cumbre, S.A., 1988, pags. 160 y 161 tomo 4

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

- 50 D.C. Plinio "el joven" agrupa todos los conocimientos de su época en una enciclopedia, que marca el camino para las obras posteriores.
- 1454, en Alemania aparece la Biblia impresa con tipos móviles por Johan Gutenberg.
- 1609, en Italia, Galileo inventa el telescopio.
- En 1792, aparece en Francia el telégrafo óptico de Claude Chappe, aparato que transmite señales y noticias a distancia, mediante un código. En el Reino Unido, Maxwell predice la existencia de las ondas electromagnéticas.
- En 1796, el alemán Senefelder inventa el sistema de la litografía, que permite reproducir los dibujos grabados sobre piedra.
- En 1799, el investigador Bousand, llegado al Egipto con la expedición napoleónica, descubre la piedra de Rosetta, clave que revela los secretos de los idiomas antiguos.
- En 1816, el alemán Enrique Hertz confirma la existencia de las ondas electromagnéticas.
- En 1829, Luis Braille desarrolla en París su alfabeto para ciegos.
- En 1839, Luis Daguerre perfecciona el primer aparato de fotografía.
- En 1844, Samuel Morse transmite el primer mensaje a través de los hilos de su telégrafo, que se extiende desde Baltimore a Washington.
- En 1867, los inventores norteamericanos Shole, Soule y Gliden logran construir una máquina de escribir.
- En 1876, los norteamericanos Gray y Bell patentan en el mismo día dos teléfonos capaces de transmitir la voz humana.
- En 1878, Edison logra registrar en un cilindro la voz humana, con lo que surge su primer fonógrafo.

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

- En 1884, combinando un ingenioso sistema de matrices Ottmar Mengerthaler produce la primera linotipia, máquina que acelera y abarata la producción de libros y periódicos.
- En 1888, George Eastman perfeccionó la película fotográfica.
- En 1890, en el Reino Unido, Lord Tyndall demostró que la luz podía ser guiada en medios dieléctricos.
- En 1895, Guillermo Marconi crea el primer transmisor Telegráfico sin alambre.
- En 1905 aparece la primera película cinematográfica con argumento, desarrollada en trescientos metros de celuloide.
- En 1907, la válvula al vacío, inventada por Lee de Forest y otros investigadores, resuelve muchos problemas de transmisión inalámbrica.
- En 1917, Albert Einstein predice dos formas de emisión de radiación: Emisión Estimulada y Emisión Espontánea.
- En 1920 se tienen las primeras transmisiones públicas de radiodifusión en los Estados Unidos por la Westinghouse Electric Company, en Pittsburgh, Pensilvania.
- En 1925 comienza a difundirse el teletipo, máquina que permite enviar noticias telegráficas con enorme rapidez, sin acudir al lento código Morse.
- En 1930, Vladimir Zworykin y sus colaboradores después de Varios años de experimentos con tubos de Rayos Catódicos y escudriñadores electrónicos, perfeccionan el iconoscopio, elemento fundamental de la televisión electrónica.
- En 1936 se tienen las primeras transmisiones públicas de televisión en Londres por la British Broadcasting Corporation, y en Nueva York, por la Radio Corporation de América desde el edificio Empire State.
- En 1957, la Unión Soviética lanza al espacio su primer satélite, el Sputnik I, provisto de cuatro antenas y dos equipos de radioemisores, que transmiten mensajes en frecuencias de 20 y 40 Megaciclos.

- En 1960 se desarrolla el primer Laser.
- En 1968 Uchida de la Nipon Sheet Glass presentó la primera Fibra óptica comercial.

Desde entonces hasta la fecha se han desarrollado técnicas para los sistemas de comunicación por fibra óptica.

### 1.9 Mensajes Analógicos y Digitales.

“Los mensajes pueden ser digitales o analógicos. Los mensajes digitales se construyen con un número finito de símbolos; por ejemplo, el lenguaje escrito consta de 28 letras, 10 números, un "espacio" y varios signos de puntuación. De este modo, cualquier texto es un mensaje digital construido por alrededor de 50 símbolos. La voz humana es también un mensaje digital, ya que se construye con un vocabulario finito de un lenguaje [aquí se implica el texto escrito del discurso, más que sus detalles como son la pronunciación de las palabras y las inflexiones de la voz, tono, énfasis, etc. La señal de voz que procede del micrófono contiene todos estos detalles. Esta señal es analógica y su contenido de información es más de mil veces la información en el texto escrito del mismo discurso]. De manera similar un mensaje telegráfico en código Morse es un mensaje digital construido con dos símbolos: raya y punto; y es, por lo tanto un mensaje binario. Un mensaje digital construido con M símbolos se llama mensaje M-ario”<sup>17</sup>.

“Por otro lado, los mensajes analógicos se caracterizan por contener datos cuyo valor varía en un rango continuo. Por ejemplo, la presión atmosférica o temperatura de cierta región pueden variar dentro de un rango continuo y pueden tomar un número infinito de valores posibles. De esta manera, la forma de onda de un discurso contiene amplitudes que varían dentro de un rango continuo. En un intervalo de tiempo dado, existe un número infinito de formas de onda de la voz, en contraste con un número finito de mensajes digitales posibles”<sup>18</sup>.

“Los mensajes digitales se transmiten utilizando un conjunto finito de formas de onda eléctricas u ópticas; por ejemplo, en el Código Morse, una raya puede transmitirse por un pulso eléctrico

---

<sup>17, 18</sup> “Sistemas de comunicación” B.P.Lathi, Ed Interamericana, 1986, pag

con amplitud  $A/2$ , y un espacio puede transmitirse con un pulso con amplitud  $-A/2$ . En un caso M-ario, se utilizan M pulsos o formas de onda distintas; cada uno de los M pulsos representa a uno de los posibles M símbolos. La extracción del mensaje, en el receptor, es en ocasiones más fácil en las señales digitales que en las señales analógicas. Consideremos un caso binario: se codifican dos símbolos como pulsos rectangulares de amplitudes  $A/2$  y  $-A/2$ . La única decisión en el receptor será la selección entre dos posibles pulsos recibidos, y no entre los detalles de la forma del pulso; la decisión se toma rápidamente con razonable certidumbre, aún si los pulsos se encuentran distorsionados y afectados por ruido. Como consecuencia, un sistema de comunicación digital puede transmitir mensajes con mayor exactitud que un sistema analógico en presencia de distorsión y ruido"<sup>19</sup>.

"La posibilidad de utilizar repetidores regenerativos es una ventaja adicional para la comunicación digital. Una estación repetidora detecta los pulsos y transmite nuevos pulsos, eliminando en esta forma la acumulación de distorsión y ruido; y, por lo tanto, permitiendo la transmisión de información a distancias más largas y con más exactitud"<sup>20</sup>.

La forma de onda de los mensajes analógicos es importante, y una leve distorsión o interferencia en la forma de onda provocará un error en la señal recibida.

También se debe señalar que la tendencia es el reemplazo de los sistemas analógicos por los sistemas digitales (aunque no en la totalidad). Esto es, porque los sistemas digitales son más económicos debido a una drástica reducción de costos que se ha logrado en la fabricación de circuitos digitales.

En este texto se manejarán los conceptos de las señales digitales.

---

<sup>19, 20</sup> "Sistemas de comunicación" B.P.Lathi, Ed Interamericana, 1986, pag

## CAPITULO 2

### FUENTES DE LUZ

En los sistemas de comunicación por fibra óptica, la información es transportada por un haz, generado por una fuente de luz. Las fuentes de luz más comúnmente utilizadas son: el Diodo Emisor de Luz (LED) y el Diodo Láser LD (también conocidos como Diodos Láser de Inyección o ILD's). Estos dispositivos -LED y LD- son indispensables y apropiados para los sistemas de comunicación vía fibra óptica, pues en menor o mayor medida cumplen con lo siguiente: su estructura es sólida y cumple con los requerimientos de baja potencia y además son compatibles con los modernos dispositivos de estado sólido; su eficiencia es alta debido a la gran conversión de la potencia eléctrica de entrada en potencia óptica acoplada, esto a la entrada de la fibra; los esquemas de modulación son sencillos, por ejemplo, su salida de potencia óptica puede ser directamente modulada por variación de la corriente de entrada al dispositivo; sus características dimensionales son compatibles con los de la fibra óptica; y además sus costos son razonables.

#### 2.1 Introducción al Diodo Emisor de Luz [LED].

Un Diodo Emisor de Luz, es la unión p-n de material semiconductor que emite luz cuando es polarizado directamente. En la figura 2-1 se puede observar la unión p-n, su símbolo, el tipo de polarización directa y la energía asociada a las bandas del diodo.

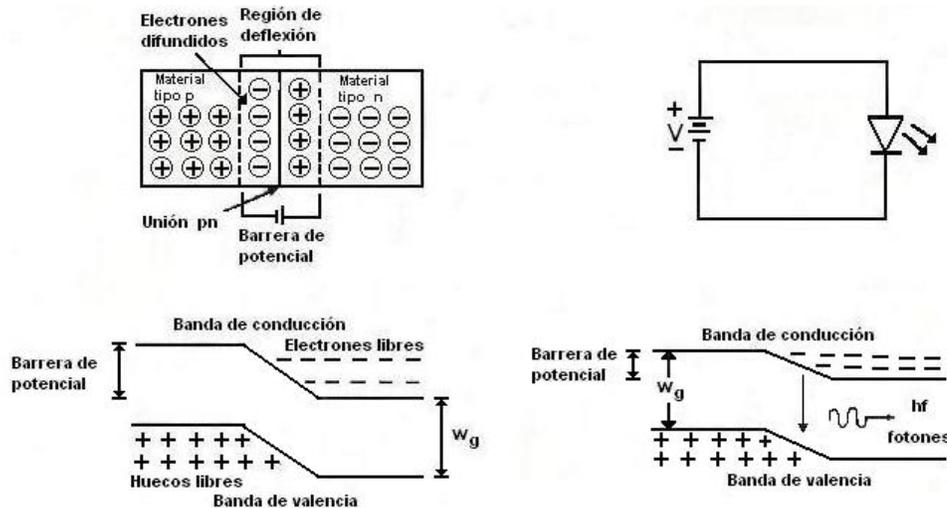


Figura 2-1. (a) Unión p-n sin potencial externo (b) Unión polarizada directamente.

La teoría de las bandas permite dar una explicación sencilla de la operación del diodo semiconductor emisor. En la figura 2-1 se muestran dos de las bandas de energía permitidas, separadas por una región prohibida, cuyo ancho tiene una energía  $w_g$ . El nivel superior de energía es llamado banda de conducción y el nivel inferior es llamado banda de valencia.

En la figura 2-1(a) se puede apreciar que en la unión de los dos semiconductores tipo p y tipo n aparece una barrera de potencial entre ambos. Bajo estas condiciones los electrones libres del material n, no tienen la suficiente energía para cruzar la barrera de potencial y desplazarse dentro de la región P. Similarmente los huecos tampoco tienen la energía necesaria para superar la barrera de potencial. De esto, podemos ver que con un voltaje cero en las terminales del diodo no hay cargas en movimiento. En la figura 2-1(b) podemos apreciar que una polarización en directa al LED, decrementa la barrera de potencial; ahora los electrones y huecos libres tienen la energía suficiente para sobrepasar la barrera de potencial. Cuando un electrón libre encuentra un hueco libre, el electrón puede bajar de la banda de conducción y combinarse con el hueco. La mayor energía en la transición es convertida en energía óptica, en la forma de un fotón<sup>1</sup>. En términos simples, la radiación de un LED es producida por la recombinación de los electrones y huecos que son introducidos adentro de la unión por un voltaje apropiado.

Existen dos formas para que un átomo pueda emitir radiación: por emisión espontánea y por emisión estimulada, esto fue predicho por Albert Einstein en 1917. A continuación explicaremos la emisión espontánea, en forma breve, que es una característica de los LED's.

Dentro de un sólido o un gas, los electrones pueden excitarse desde estados de energía iniciales (banda de valencia, nivel  $E_1$ ) hacia estados de energía superiores (banda de conducción, nivel  $E_2$ ), como se muestra en la figura 2-2, produciéndose una población de electrones fuera de equilibrio en los niveles de energía superiores. Estos electrones excitados, eventualmente regresan a su nivel original de energía; cuando esto ocurre, los electrones liberan energía que puede aparecer como luz (fotón) o como calor (fonón). Esta característica del LED se realiza en tiempos de  $10^{-8}$  o  $10^{-9}$  segundos después de la excitación.

---

<sup>1</sup> Cuando la recombinación es radioactiva un fotón de energía es emitido, pero si la recombinación es noradioactiva la energía liberada en el proceso es disipada en forma de calor.

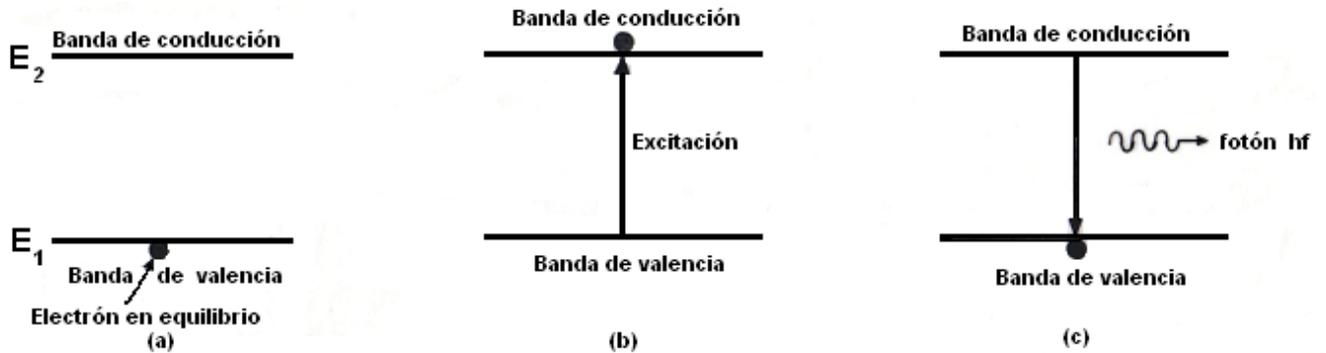


Figura 2-2. (a) Estado inicial (b) Excitación del electrón (c) Emisión Espontánea.

La energía del fotón y la frecuencia están relacionados por  $w=hf$ . La longitud de onda radiada entonces es<sup>2</sup>;

$$\lambda = \frac{hc}{w_g} \quad (2-1)$$

donde  $h$  es la constante de Planck ( $6.28 \times 10^{-24}$ ),  $c$  la velocidad de la luz, con la separación de las bandas de energía [Joule] y la longitud de onda [metros]. Expresando la separación de las bandas de energía en electrón-volt y la longitud de onda en micras, la ecuación (2-1) cambia a:

$$\lambda = \frac{0.24}{w_g} \quad (2-2)$$

Un material semiconductor que es utilizado para la capa activa de una fuente óptica, debe tener un espacio de banda directo para que la recombinación radioactiva sea suficientemente alta; y así producir un nivel adecuado de emisión óptica. En la tabla 2-1 se muestran los materiales emisores comunes, así como también su operación de longitud de onda y su separación aproximada de las bandas de energía. El silicio no aparece en esta tabla debido a que sus electrones y huecos no se recombinan directamente haciendo una emisión ineficiente. Los diferentes materiales y aleaciones tienen diferente separación de las bandas de energía; para una operación en el espectro de 800 a 900 nm., el principal material utilizado es la aleación terciaria  $Ga_{1-x}Al_xAs$ . La relación  $x$  de arseniuro de aluminio a arseniuro de galio determina la separación de banda de la aleación y, correspondientemente, la longitud de

<sup>2</sup> Debe recordarse que  $\lambda = v/f$ .

Tabla 2-1. Semiconductores emisores de luz.

Material	Rango de longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Separación de banda de energía (eV)
GaAs	0.9	1.4
AlGaAs	0.8 - 0.9	1.4 - 1.55
InGaAs	1.0 - 1.3	0.95 - 1.24
InGaAsP	0.9 - 1.7	0.73 - 1.35

onda de la radiación pico emitida. Esto es ilustrado en la figura 2-3. El valor  $x$  para el área activa del material debe ser escogido para una emisión de longitud de onda de 800 a 850 nm. Un ejemplo del espectro de emisión de un LED de  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  es mostrado en la figura 2-4. La potencia pico de salida ocurre a 810 nm. y la potencia media del ancho espectral  $\sigma_x$  es 36 nm.

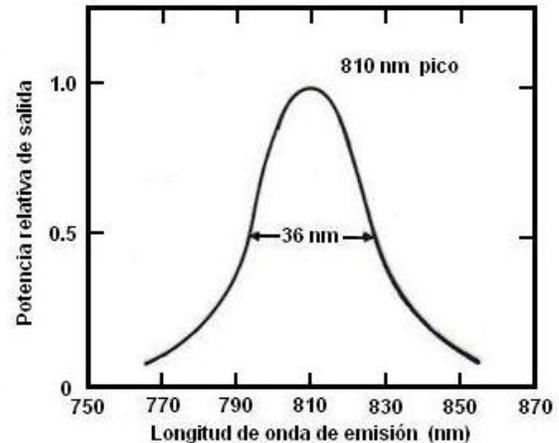
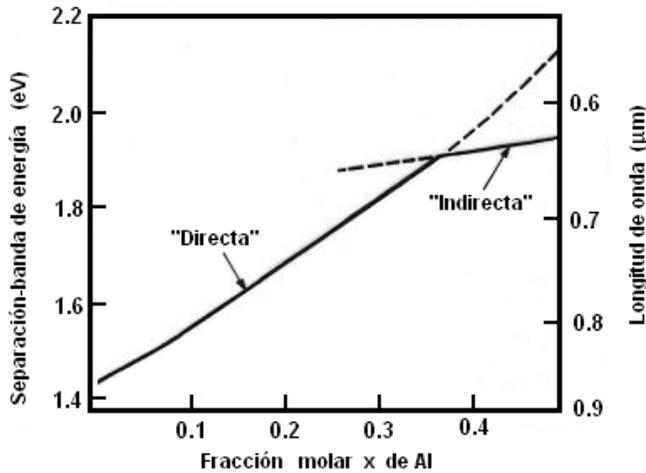


Figura 2-3. Separación de banda de energía y longitud de onda de salida como una función de la fracción molar del aluminio  $x$ , para  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  a temperatura ambiente.

Figura 2-4. Patrón de emisión espectral de un representativo LED de  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$  con  $x=0.08$

A mayores longitudes de onda la aleación cuaternaria  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  es uno de los primeros materiales candidatos. Por variación de la fracción molecular " $x$ " e " $y$ " en el área activa, LED's con potencia de salida pico a una longitud de onda entre 1 y 1.7  $\mu\text{m}$ .

## 2.2 Parámetros y tipos de LED's.

A continuación se listan algunos de los parámetros más importantes en LED's:

- 1) Potencia óptica de salida. Es la potencia óptica que sale del dispositivo, sus unidades son watts ( $P_0$ ).
- 2) Eficiencia externa. Es la relación de la potencia óptica de salida a la potencia óptica de entrada, se da en %.

$$\eta = \frac{P_o}{P_e}$$

- 3) Intensidad de radiación.- Es la potencia óptica de salida por unidad de ángulo sólido  $\Omega$  en la dirección considerada, es dada en unidades de w/Sr

$$\frac{dP_o}{d\Omega}$$

- 4) Radianza. Es la intensidad de radiación por unidad de área emisora A norma a la dirección considerada, está dada en w/Sr-cm<sup>2</sup>.

$$B(\theta) = \frac{d^2P_o}{d\Omega A \cos\theta} \quad \frac{\text{Watts}}{\text{Sr} - \text{cm}^2}$$

- 5) Longitud de onda pico. Es la longitud de onda a la cual el espectro de la fuente tiene su valor máximo de  $P_0$ , está dado en nm; y el ancho espectral  $\Delta\lambda$ , es la diferencia entre las longitudes de onda para las cuales la potencia de salida  $P_0$  es la mitad del valor pico. Esto puede verse en la figura 2-4.
- 6) Tiempo de elevación. Es el tiempo que tarda para que  $P_0$  aumente del 10 al 90% del valor final, cuando la entrada es una onda escalón de corriente. Este concepto lo veremos en más detalle en la sección 2-3.

Apertura Numérica (NA). La apertura numérica es una medida de capacidad de recolección de luz de una fibra; describe la distribución angular de luz aceptada por la fibra.

Existen dos estructuras de LED's: de homounión (mostrada en la figura 2-1) y de heterounión. Un LED de homounión no confina bien

la radiación emitida; donde se radían fotones desde los límites de la unión y desde una gran superficie planar; estos LED's son muy ineficientes acoplados a fibras pequeñas. Dos razones de este comportamiento pueden ser identificadas: primero, los portadores de carga existen sobre una gran área, provocando recombinación y emisión sobre una extensa región; segundo, después de que los fotones son creados y estos divergen libres sobre varios caminos. Estos problemas son resueltos por los LED's de heterounión.

Las dos configuraciones básicas LED's de heterounión, existentes usadas para fibras ópticas son de emisor de superficie y emisor de borde.

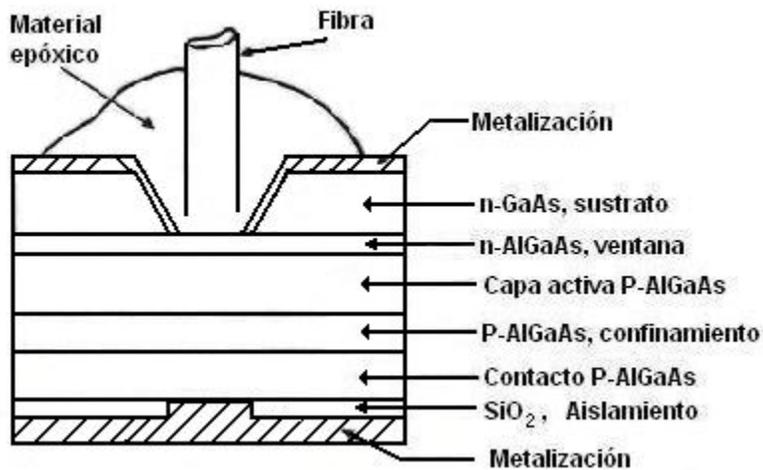


Figura 2-5. LED emisor de superficie tipo Burrus.

En la figura 2-5 se muestra un LED de heterounión. Una heterounión es una unión formada por diferentes materiales semiconductores. Los dos materiales tienen diferente separación de las bandas de energía y diferentes índices de refracción. Los cambios de la separación de las bandas de energía, producen barreras de potencial para ambos, huecos y electrones. Las cargas libres pueden solamente unirse y recombinarse en un límite definido, conocido como, capa activa. Porque la región activa muestra un más alto índice de refracción que los materiales de otras caras, una guíaonda óptica es formada. El ángulo crítico de reflexiones mantiene algunos de los fotones en la región activa, creando una pequeña área de alta intensidad. La emisión confinada, mejora la eficiencia de acoplamiento, particularmente para fibras pequeñas.

Los LED's de Emisión de Superficie (SLED) más eficiente son los que se conocen como Burrus, su construcción es mostrada en la figura 2-5. El diodo típico de AlGaAs emite a  $0.82 \mu\text{m}$ , cuando el

crystal de la fibra tiene baja atenuación, se puede observar la capa de aislamiento  $\text{SiO}_2$  y el revestimiento metálico en la base del diodo. El contacto metálico es circular y se extiende hasta un hueco en la capa de  $\text{SiO}_2$ . Esta construcción limita las cargas inyectadas a una pequeña parte central del diodo. Su patrón de radiación es lambertiano, esto es, la potencia disminuye de acuerdo a  $\cos\theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de observación. La potencia no será totalmente conectada a la fibra, porque está limitada por la apertura numérica.

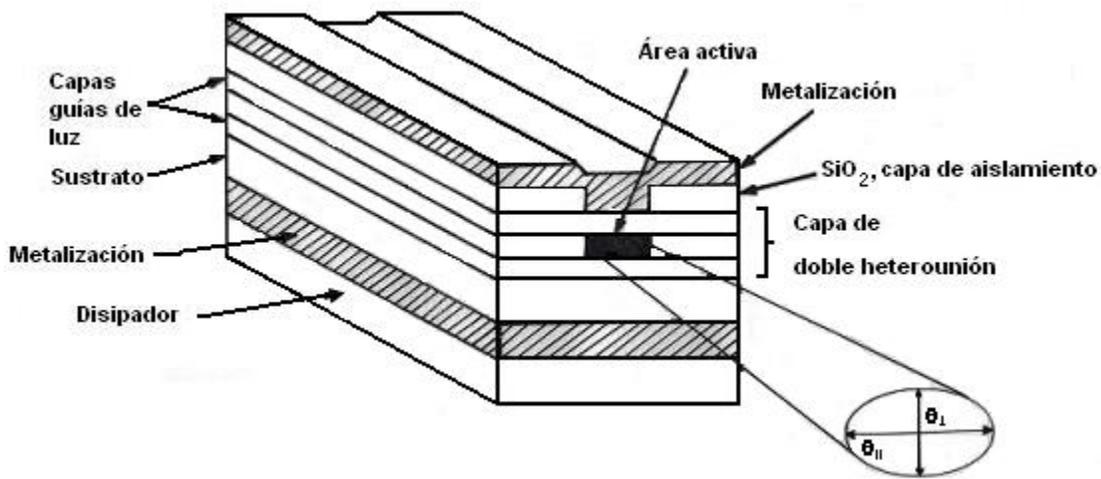


Figura 2-6. Esquema de un LED de emisión de borde de doble heterounión. El haz de salida es lambertiano en el plano de la unión pn ( $\theta = 120^\circ$ ) y altamente direccional perpendicularmente a la unión pn ( $\theta = 30^\circ$ ).

El diodo de emisor de borde (ELED) dibujado en la figura 2-6 consiste de una unión, región activa (la cual es la fuente de luz incoherente), y dos capas guías. Ambas capas guías tienen un índice de refracción, el cual es más bajo que el de la región activa pero más alto que el índice del material de alrededor. Esta estructura forma un canal de guía de onda que dirige la radiación óptica hacia adelante en el centro de la fibra. El área de emisión es rectangular. El grosor de la región emisora puede ser sobre el orden de varias micras, y una anchura sobre el orden de décimas de micras. El patrón de emisión del emisor de borde es más direccional que el de emisor de superficie, como es ilustrado en la figura 2-6. En el plano paralelo de la unión, donde no hay un efecto de guía de onda, el haz emitido es lambertiano (variando con  $\cos\theta$ ) con un ancho de potencia media de  $\theta_{11} = 120^\circ$ . En el plano perpendicular a la unión, la potencia media del ancho del haz  $\theta_1$

es tan pequeño, que puede ser 25° a 35° para una apropiada selección del grueso de la guía de onda.

### 2.3 Características de operación del LED.

La potencia óptica generada por un LED es linealmente proporcional a la corriente conducida, en polarización directa. Una curva típica potencia-corriente es trazada en la figura siguiente.

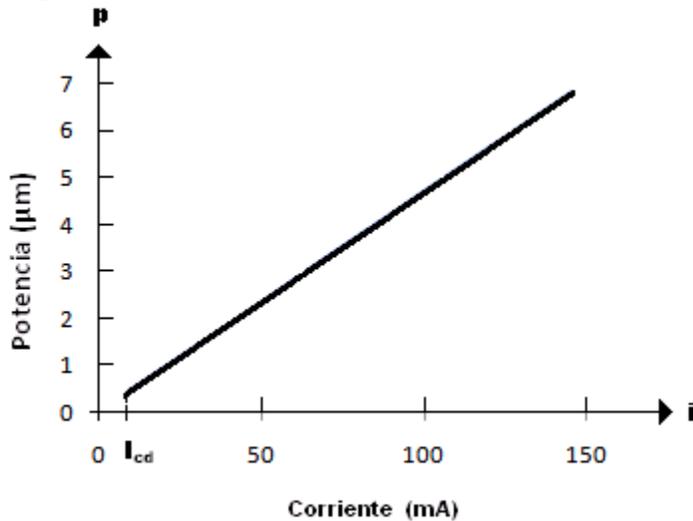


Figura 2-7. Relación potencia - corriente para un LED.

La relación lineal puede ser entendida por el siguiente argumento: La corriente  $i$ , es la carga inyectada por segundo; el número de cargas por segundo es entonces  $N=i/e$  donde  $e$  es la magnitud de la carga en cada electrón, si  $\eta$  es la fracción de estas cargas que recombinará y producirá fotones, la potencia óptica de salida será:

$$P = \eta N w_g = \frac{\eta w_g i}{e} \quad (2-3)$$

Resultando la relación lineal entre la potencia óptica y la corriente. En este resultado, la separación de energía está en Joule; si esta está en electrón-volts, la ecuación se simplifica a:

$$P = \eta i w_g \quad (2-4)$$

La potencia en la figura 2-7 no es la potencia disponible en el interior de la fibra. La apertura numérica limitada de la fibra

reduce significativamente la potencia acoplada. Una variedad de LED 's están disponibles. Típicamente operan alrededor de 50 a 110 mA., y requieren un voltaje de 1.2 a 1.8 volts; se pueden modular en forma digital o analógica.

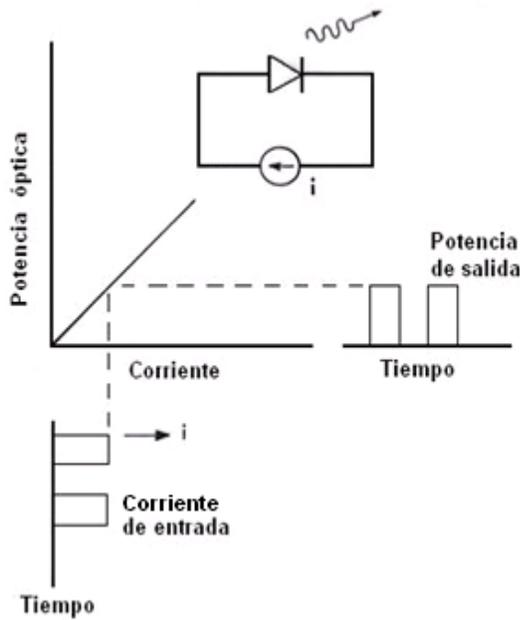


Figura 2-8. Modulación Digital de un LED.

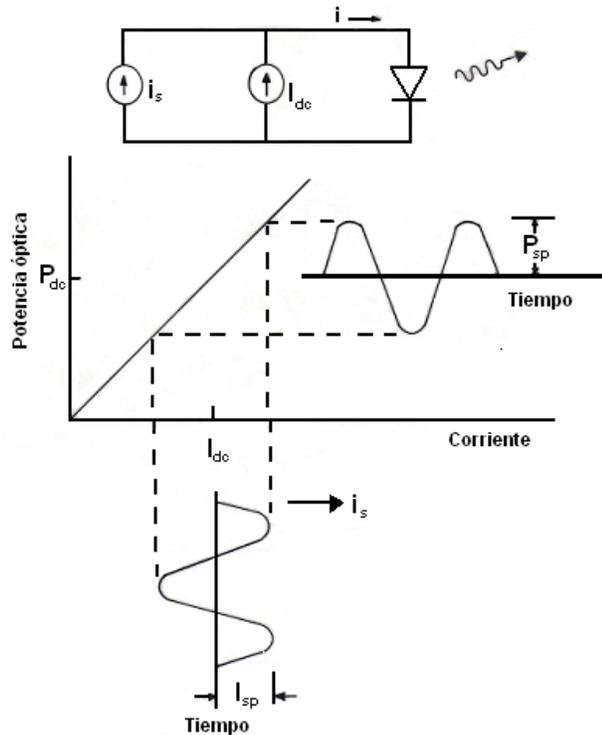


Figura 2-9. Modulación Analógica de un LED.

La modulación digital es ilustrada en la figura 2-8. El diodo es modulado por una fuente de corriente, la cual simplemente conmuta el LED de encendido (ON) a apagado (OFF). La modulación analógica requiere una polarización de cd para mantener la corriente total en la polarización directa todo el tiempo, sin la corriente de cd, una cresta negativa en la señal de corriente, polariza en inversa al diodo, llevando a la no conducción al LED.

La corriente total del diodo es:

$$i = I_{cd} + I_{sp} \text{sen } \omega t \quad (2-5)$$

y la correspondiente salida de la potencia óptica es:

$$p = P_{cd} + P_{sp} \text{sen } \omega t \quad (2-6)$$

donde  $P_{sp}$  es la potencia pico de la señal.

A frecuencias bajas de modulación  $P_{sp} = a_1 I_{sp}$ , donde  $a_1 = \Delta p / \Delta i$  (pendiente de la curva en la figura 2-9). A altas frecuencias de modulación la unión y capacidad parásitas acortan, en el circuito, la rapidez en la variación de la corriente, reduciendo la potencia  $P_{sp}$ . La mayor limitación de la modulación para altas frecuencias es el tiempo de vida de los portadores  $\tau$ , el porcentaje de tiempo para inyectado de cargas y recombinación. La respuesta limitada por el tiempo de vida de los portadores de la señal eléctrica de un LED, de frecuencia  $w$  es:

$$P_{sp} = \frac{a_1 I_{sp}}{(1 + w^2 \tau^2)} \quad (2-7)$$

Para la frecuencia de modulación  $w=1/\tau$ , la potencia óptica pico de salida disminuye por el factor 0.707 y la potencia eléctrica en el receptor se reduce por el factor  $0.707^2 = 0.5$ , es decir, es la potencia 3 dB abajo. De aquí que a  $1/\tau$  se le conoce como el ancho de banda de modulación a

$$f_{3-dB} = \frac{1}{2\pi\tau} = B_{3dB} \quad (2-8)$$

El ancho de banda a 3-dB eléctricos y el tiempo de elevación  $tr$  se puede expresar por

$$f_{3-dB} = B_{3dB} = \frac{0.35}{tr} \quad (2-9)$$

Los LED's comerciales tienen típicamente anchos de banda entre 1 y 100 MHz. Los tiempos de elevación comunes están entre unos pocos ns y 250 ns.

## 2.4 El diodo Laser.

Los láseres vienen en muchas formas con diversas dimensiones; rangos desde el tamaño de un grano de sal a uno que ocupará una habitación completa. El medio Laser puede ser un gas, un líquido, un cristal (estado sólido), o un semiconductor. Para sistemas de fibra óptica las fuentes Láser usadas casi exclusivamente son diodos Láser de semiconductor. Estos son similares a otros Láseres, tal como Láseres convencionales de estado sólido y gas; en que la radiación emitida tiene coherencia espacial y temporal;

esto es, la radiación de salida es altamente monocromática y el haz de Luz es muy direccional.

A pesar de sus diferencias el principio básico de operación es el mismo para cada tipo de Láser. La acción Láser es el resultado de tres procesos claves. Estos son: absorción del fotón, emisión espontánea y emisión estimulada. Estos tres procesos son representados por los sencillos diagramas de dos niveles de energía en la figura 2-10, donde  $E_1$  es el estado tierra de energía y  $E_2$  es el estado excitado de energía. De acuerdo al principio de Planck, una transición entre estos dos estados implica la absorción de un fotón de energía  $hf_{1,2} = E_2 - E_1$ . Normalmente el sistema está en el estado tierra. Cuando un fotón de energía  $hf_{1,2}$  invade sobre el sistema, un electrón en estado  $E_1$  puede absorber el fotón de energía y es excitado al estado  $E_2$  como es mostrado en la figura 2-10a. Desde entonces este es un estado inestable, el electrón brevemente regresa al estado tierra, de esta manera, emite un fotón de energía  $hf_{1,2}$ . Esto ocurre sin una estimulación externa y es llamado emisión espontánea. Estas emisiones son isotrópicas y de fase al azar y, de esta manera, aparece una banda estrecha y gaussiana de salida.

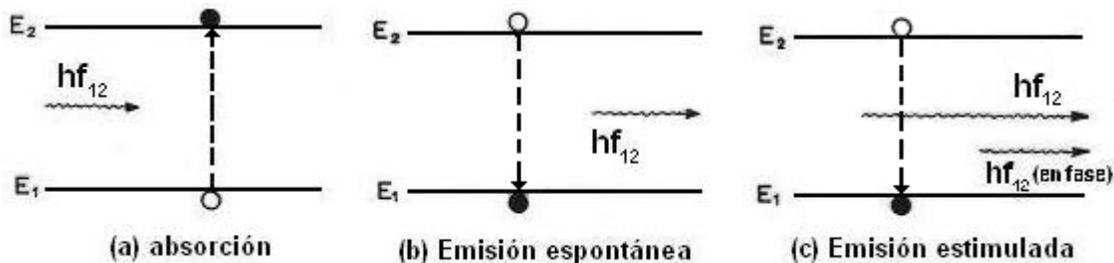


Figura 2-10. Los tres procesos claves involucrados en la acción Láser. El círculo claro representa el estado inicial del electrón y el círculo relleno representa el estado final. Los fotones incidentes son mostrados sobre la izquierda de cada diagrama y los fotones emitidos son mostrados sobre la derecha.

El electrón también puede ser inducido a hacer una transición descendente desde el nivel excitado al nivel de estado tierra por una estimulación externa; como se muestra en la figura 2-10c. Si un fotón de energía  $hf_{1,2}$  invade en un sistema mientras el electrón está inmóvil en el estado excitado, el electrón es inmediatamente estimulado a caer al estado tierra y dar un fotón de energía  $hf_{1,2}$ . Este fotón emitido está en fase con el fotón incidente y la emisión resultante es conocida como emisión estimulada.

### 2.4.1 Estructura y características del LD.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica requieren anchos de banda muy grandes de aproximadamente 50 MHz, el diodo Láser de inyección, de semiconductor, es preferido sobre el LED. Los diodos Láser tienen respuestas en tiempo típicas menores a 1 ns., tienen anchos de banda ópticos de 2 nm o menos, y, en general, son capaces de acoplar varios miliwatts de potencia luminiscente útil dentro de las fibras ópticas con pequeños núcleos y pequeña apertura numérica. Virtualmente todos los diodos Láser en uso y bajo investigación actuales son dispositivos de heterounión multicapas.

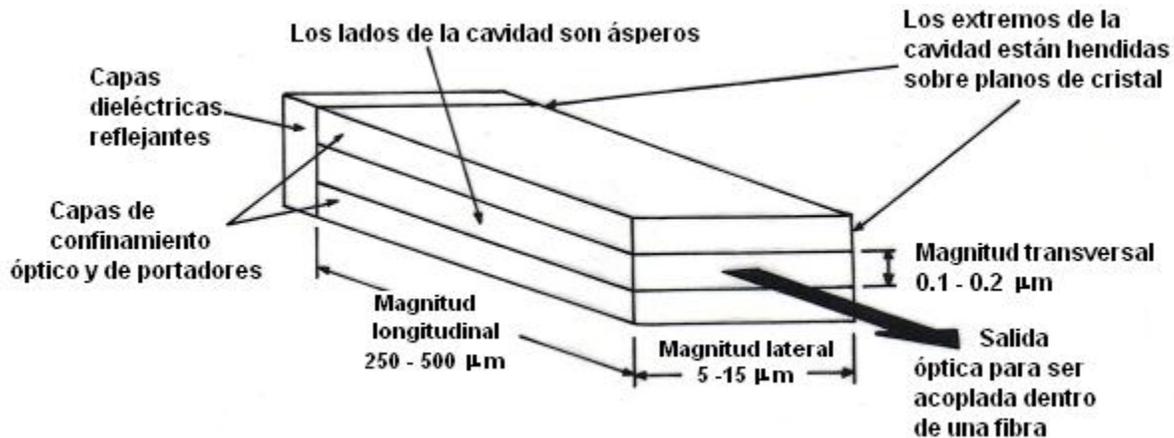


Figura 2-11. Cavidad resonador Fabry - Perot para un diodo Láser. Las hendiduras de los extremos del cristal funcionan como espejos parcialmente reflejantes. El extremo no usado puede ser cubierto con un reflector dieléctrico para reducir la pérdida óptica en la cavidad.

La radiación en el diodo Láser es generada en una cavidad, resonador Fabry-Perot, mostrada en la figura 2-11, como en otros tipos de Láseres. De cualquier modo, esta cavidad es mucho más pequeña, la magnitud es aproximadamente de 250 a 500  $\mu\text{m}$  de longitud, 5 a 15  $\mu\text{m}$  de ancho, y de 0.1 a 0.2  $\mu\text{m}$  de grosor. Estas dimensiones son comúnmente conocidas como las dimensiones longitudinal, lateral y transversal, de la cavidad respectivamente.

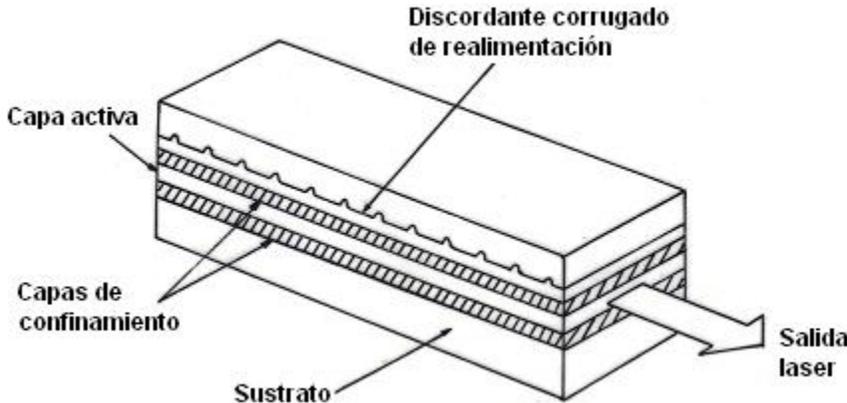


Figura 2-12. Estructura de un diodo Láser de retroalimentación distribuida (DFB).

En el diodo Láser resonador Fabry-Perot, un par de superficies, espejos parcialmente reflejantes, son colocados directamente y próximos uno del otro, encerrados en la cavidad. Las facetas de los espejos son construidas haciendo dos hendiduras paralelas a lo largo del cristal semiconductor. En otros tipos de LD's, comúnmente referidos tal como el Láser de retroalimentación distribuida (DFB), las facetas partidas no son requeridas para la retroalimentación óptica. Una configuración típica del Láser DFB es dada en la figura 2-12. La fabricación de este dispositivo es similar a los tipos de Fabry-Perot, excepto que la acción Láser es obtenida desde reflectores Bragg (discordantes) o variaciones periódicas del índice refractivo (llamado corrugaciones de retroalimentación - distribuida) el cual es incorporado dentro, a lo largo de la estructura multicapa de la longitud del diodo.

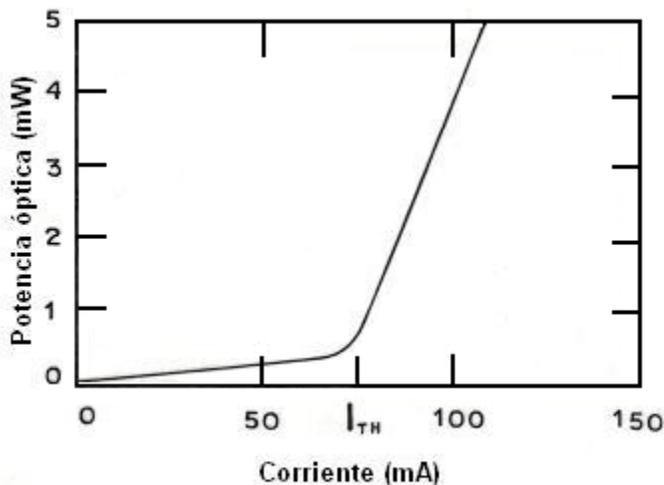


Figura 2-13. Relación Potencia - Corriente para un diodo Láser.

La curva característica de la potencia óptica de salida y la corriente directa de entrada de un típico diodo Láser es trazada en la figura 2-13. La corriente de umbral para este diodo es 75 mA. Abajo de este nivel hay un pequeño incremento en potencia con conducción de corriente. Esta radiación no coherente es causada por emisión espontánea en la recombinación, en la capa activa. Para la mayoría de los diodos, las corrientes de umbral van desde 30 a 250 mA. Los voltajes son del orden de 1.2 a 2V. de umbral. La corriente directa se incrementa rápidamente con voltaje como en un diodo, como se muestra en la figura 2-14, de tal forma que un pequeño incremento en el voltaje después del valor del umbral, provocará la corriente en el punto de operación. La potencia de salida para Láseres de onda continua (cw) está en el orden de 1 a 10 mw, estos dispositivos pueden conmutar (encender y apagar) a velocidades altas. La corriente de operación es generalmente alrededor de 20 a 40 mA. por encima de la corriente de umbral.

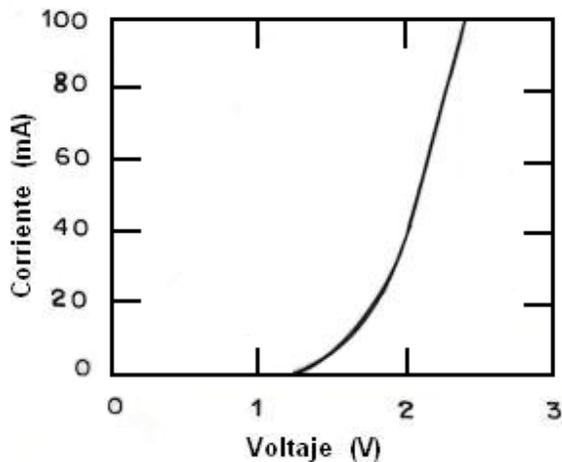


Figura 2-14. Características típicas Voltaje-Corriente para un diodo Láser.

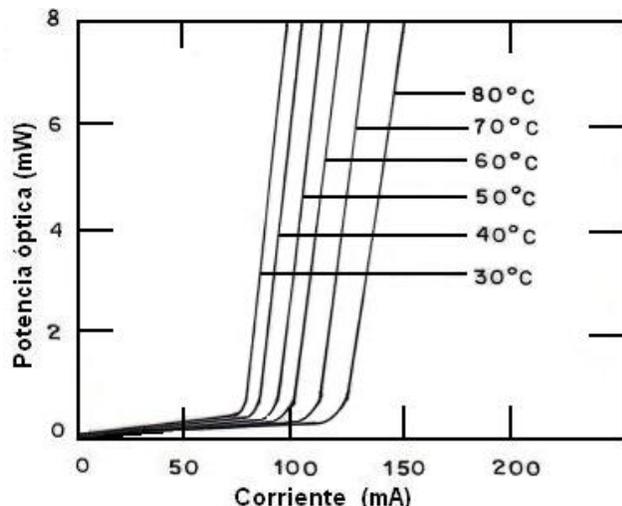


Figura 2-15. Dependencia de temperatura de un diodo Láser.

Los diodos Láser son mucho más sensibles a la temperatura que los LED's, como se ilustra en la figura 2-15 para un diodo representativo. Cuando la temperatura se incrementa, la corriente de umbral se hace más grande (incrementándose alrededor de 15%/C). A una corriente constante la potencia de salida disminuirá si la temperatura aumenta; de esta forma aumenta la posibilidad de errores en la recepción. Este problema se resuelve por medio de controladores de temperatura que por supuesto complican la circuitería y elevan el costo del dispositivo.

Los LD's de AlGaAs cubren la región de 0.8 a 0.9  $\mu\text{m}$ . Los LD's de InGaAsP emiten con una longitud de onda mayor, segunda ventana.

Los LD's son mucho más rápidos que los LED's. El tiempo de elevación de un buen diodo Láser está entre 0.1 y 1 ns. Estos pueden ser modulados analógicamente a frecuencias tan altas como varios cientos de MHz.

Los diodos Láser típicamente poseen anchos espectrales de 1 a 5nm., son considerablemente bastante más pequeños que la salida espectral de los LED's. El espectro de un LD representativo operando cerca a 1.3  $\mu\text{m}$ . es dibujado en la figura 2-16. Los múltiples picos corresponden a los modos longitudinales del dispositivo.

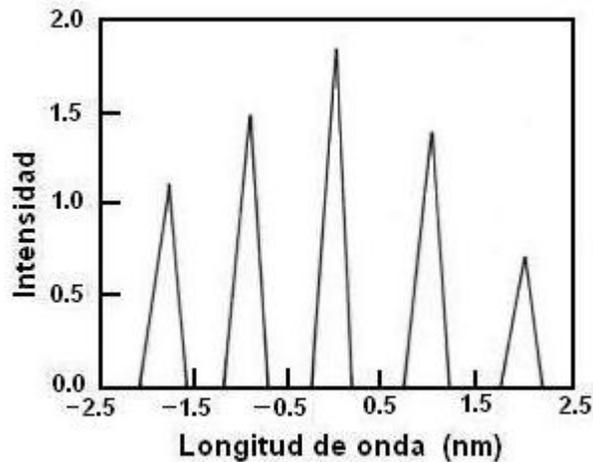


Figura 2-16. Espectro de salida de un diodo Láser multimodo.

Cuando la corriente de conducción está justamente encima del umbral, los LD's producen espectros multimodo, típico que es mostrado en la figura 2-16. Como la corriente incrementa, el ancho de línea total decrece y el número de modos longitudinales disminuye. A una corriente suficientemente alta, el espectro contiene justo un modo. La figura 2-17 ilustra el efecto de un solo modo longitudinal Láser. Como es esperado, el ancho de línea es mucho más pequeño que el de un Láser multimodo. El ancho de línea es alrededor de 0.2nm. para el espectro en la figura 2-17.

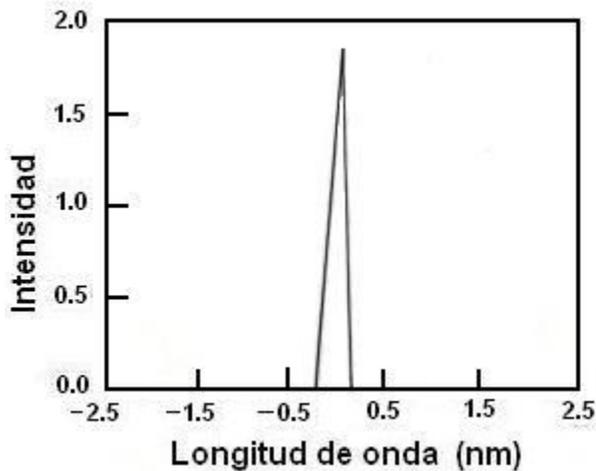


Figura 2-17. Espectro de salida de un diodo Láser de un solo modo longitudinal.

La emisión óptica de un LD es más direccional que la de un LED (ya sea de borde o de superficie); haciendo acoplamiento a una fibra fácilmente y mayor eficiencia. En la figura 2-18 se representa el patrón de radiación de un LD, como puede observarse el ancho del haz es de  $10^\circ$  en el plano paralelo y  $35^\circ$  en el plano perpendicular.

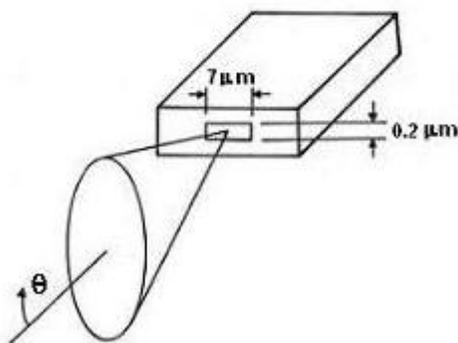
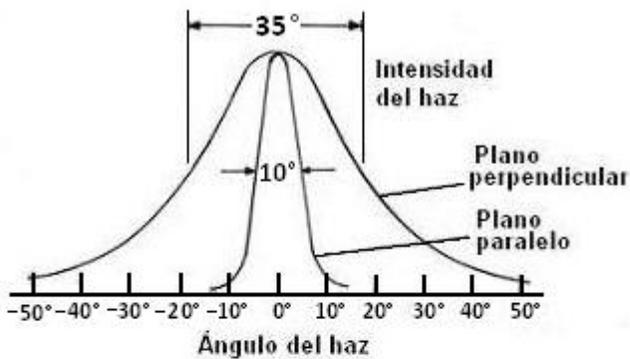


Figura 2-18. Patrón de radiación de un diodo Láser.

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

Tabla 2-1. Características típicas de LED's y LD's.

Propiedad	LED	Diodo Láser	Mono-modo Diodo Láser
ancho espectral (nm)	20-100	1-5	< 0.2
tiempo de elevación (ns)	2-250	0.1 - 1	0.05 - 1
Ancho de banda de modulación (MHz)	< 300	2000	6000
Eficiencia de acoplamiento	muy baja	Moderada	alta
Fibra compatible	Multimodo SI <sup>b</sup> Multimodo GRIN	Multimodo GRIN mono-modo	mono-modo
Sensibilidad a la temperatura	Baja	Alta	alta
complejidad del circuito	Simple	complejo	complejo
Tiempo de vida (Horas)	10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup>
Costo	Bajo	Alto	muy alto
uso principal	Caminos moderados moderada velocidad de datos	caminos largos alta velocidad de datos	caminos muy largos, muy altas velocidades de datos

a) La eficiencia de acoplamiento puede ser mejorada con lentes.

b) Sistema de la primera ventana.

c) Sistema de la segunda ventana.

## CAPITULO 3

### MEDIO DE CONDUCCION

#### 3.1 Introducción.

En este capítulo estudiamos la fibra óptica como medio de comunicación de un sistema. Comenzamos con un breve resumen de historia de la fibra óptica. Después se analizan algunos conceptos de física para poder comprender la propagación de la luz en la fibra, así como las propiedades de la fibra óptica. También se estudian los tipos de fibra y su estructura, los tipos de cable de fibra y sus ventajas como medio de comunicación (comparándola con el cable coaxial).

#### 3.2 Historia de la fibra óptica.

Con la historia de la fibra óptica se relacionan eventos históricos importantes.

En 1880 Alejandro Graham Bell inventó el "fotófono", el cual es un sistema de comunicación que emplea luz como portadora. Sin embargo, no fue viable debido a la falta de fuentes adecuadas y de un medio de comunicación de bajas pérdidas.

En 1890 John Tyndall demostró a la sociedad Royal, en Inglaterra, que la luz podría ser guiada en un medio dieléctrico.

En 1897 Lord Rayleigh analiza por primera vez las guías de onda.

En 1910 Hondros y Debie realizan el primer análisis teórico (completo) sobre la propagación electromagnética en un medio dieléctrico cilíndrico.

En 1960 Maiman desarrolló el primer sistema Láser. Esto representaba la disponibilidad de una fuente de luz coherente y monocromática que estimuló la exploración de las comunicaciones ópticas. El problema estaba en que, en este tiempo, las fibras de vidrio disponibles representaban pérdidas de varios miles de decibelios por kilómetro.

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

En 1966 Kao y Hockman, y A. Werts casi simultáneamente señalan que las altas pérdidas, observadas en las fibras de vidrio, eran resultado de las impurezas en el material de la fibra y que las pérdidas podrían ser reducidas con la perfección de los procesos de fabricación.

En 1968 Kao y Davis publican valores bajos de atenuación en sílica fusionada. En este mismo año Uchida de la Nippon Sheet Glass presenta la primera fibra comercial.

En 1970 Kappron, Keck y Maurer de la Corning Glas Works fabrican una fibra teniendo una atenuación de 20 dB/Km. En este mismo año se construyó el primer Láser de AlGaAs, capaz de operar en forma continua a temperatura ambiente (20-25 °C).

En 1971 C.A. Burrus desarrolló un LED de pequeña superficie radiante (unas 50  $\mu\text{m}$  de diámetro).

En 1972 Olgive y Esdaile fabrican una fibra con núcleo líquido con una atenuación de 8 dB/Km.

En 1973 la Corning Glas Company desarrolla fibras con núcleo de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) de alta pureza, con una atenuación de 4 dB/Km. a una longitud de onda  $\lambda = 0.8-0.85 \mu\text{m}$ ; estas fibras fueron fabricadas por el método de "Deposición externa de Vapor".

En 1974 se descubre el método de "Deposición química de vapor modificada" y se fabrican fibras  $\text{SiO}_2$  con atenuación de 2 dB/Km. con  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ .

En 1975 se identifica que hay un mínimo de dispersión sobre 1.3  $\mu\text{m}$  en fibras de  $\text{SiO}_2$ .

En 1976 se demuestran empalmes de fibras mediante fusión por arco eléctrico. Se desarrollan LASER's para altas longitudes de onda, basados en InGaAsP/InP, capaces de operar de modo continuo a temperatura ambiente. También en este año, en Japón se desarrollan fibras de  $\text{SiO}_2 - \text{GeO}_2$  con 0.5 dB/Km. de atenuación en longitudes de onda de 1.3  $\mu\text{m}$  y 1.55  $\mu\text{m}$ .

En 1977 se fabricaron LED's de InGaAsP/InP, y diodos PIN de InGaAs. También se descubre el método llamado "Deposición Axial de Vapor", para fabricar fibras: En este mismo año se instaló en Chicago, E.U.A., el primer sistema comercial de fibra óptica.

En 1978 se fabricó el primer fotodiodo de avalancha (APD) de InGaAsP.

En 1979 se fabricaron fibras monomodo con atenuación de 0.2 dB/Km. con  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ .

En 1980 se incrementaron rápidamente las instalaciones que en su mayoría utilizaron fibra monomodo, para enlazar centrales telefónicas.

En 1983 se empezaron a instalar sistemas de fibra monomodo por vía terrestre y marina; estos son enlaces de gran distancia y alta velocidad de transmisión.

En 1984 se instalaron sistemas operando a velocidades de 400 Mb/s. y repetidores espaciados a 25 Km para un número de portadores de teléfono a larga - distancia. La velocidad de 400 Mb/s representa 6000 circuitos simultáneos digitalizadores de voz. La tendencia es hacia las fibras monomodo operando a longitudes de onda de 1300 nm. (para dispersión mínima) y 1500 nm (para mínima atenuación).

### **3.3 La naturaleza de la luz.**

Desde que la tecnología de las fibras ópticas involucra la emisión, transmisión y detección de luz; es necesario considerar la naturaleza de la luz; y después examinar varias leyes y definiciones básicas de óptica.

Los conceptos concernientes a la naturaleza de la luz han experimentado distintas variaciones durante la historia de la física. La luz es interpretada en diferentes caminos para explicar diferentes experimentos y observaciones. Algunas veces la luz se comporta como una onda; otras veces la luz se comporta como una partícula.

#### **3.3.1 La naturaleza ondulatoria de la luz.**

Muchos fenómenos de luz pueden ser explicados si nos damos cuenta que la luz es una onda electromagnética teniendo una muy alta frecuencia de oscilación y una muy corta longitud de onda. Las frecuencias del espectro electromagnético son mostradas en la figura 3-1. Utilizamos el término óptico (también como el término luz) para referirnos a frecuencias en el infrarrojo, visible y porciones ultravioleta.

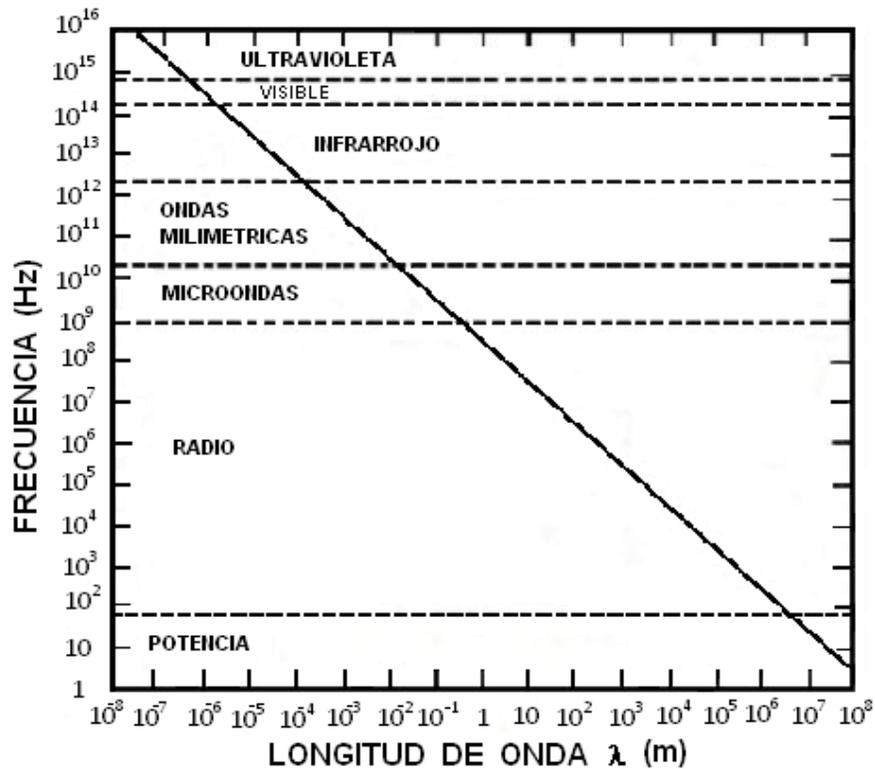


Figura 3-1. El espectro electromagnético. Los nombres asociados con varias regiones de frecuencia son mostrados. La frecuencia y longitud de onda son relacionados por  $f=c/\lambda$ , donde  $c= 3 \times 10^8$  m/s.

Si bien las ondas de Luz tienen muy altas frecuencias comparadas a las ondas de radio. Además obedecen las mismas leyes y comparten muchas características. Las ondas electromagnéticas tienen campos eléctricos y magnéticos asociados con ellas, y todas ellas viajan muy rápidamente.

En el espacio vacío (usualmente referido como un espacio libre), las ondas electromagnéticas viajan a una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s. Esta velocidad, indicada por la letra  $c$ , es apropiada para ondas viajando en la atmósfera. En un medio sólido, la velocidad de la onda difiere; este valor depende sobre el material y sobre la geometría de algunas estructuras de guíaonda que pueden estar presente. La longitud de onda de un haz de luz es dado por

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{3-1}$$

donde  $v$  es la velocidad del haz y  $f$  es su frecuencia. La frecuencia es determinada por la fuente que emite y no cambia cuando la luz viaja de un material a otro. En cambio, la

diferencia de velocidad causa un cambio en la longitud de onda conforme a la ecuación (3-1).

La naturaleza ondulatoria de la luz es utilizada para analizar cómo los haces ópticos viajan a través de fibras.

### 3.3.2 Naturaleza corpuscular de la luz.

Hasta aquí hemos descrito a la luz como una onda. Algunas veces la luz se comporta como si fuera hecha de muy pequeñas partículas llamadas fotones. La energía de un sólo fotón es:

$$w = hf \quad (3-2)$$

donde  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  Jxs y es llamada constante de Planck. La energía determinada de la ecuación (3-2) tiene unidades de Joule. Es imposible descomponer una onda en divisiones más pequeñas que el fotón. Ordinariamente los haces de luz contienen un enorme número de fotones.

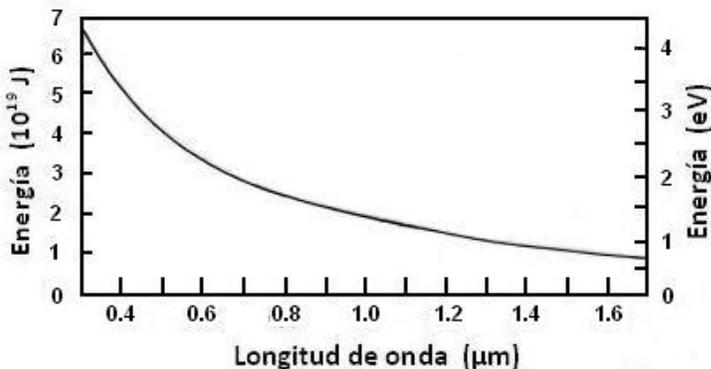


Figura 3-2. Energía del fotón.

En la figura 3-2 aparece una gráfica mostrando la energía del fotón (en Joule y electrón - volts) y sus correspondientes longitudes de onda.

La teoría corpuscular explica la generación de luz por fuentes, tal como LED's LASER's y LD's. También explica la detección de luz por conversión de radiación óptica a corriente eléctrica.

### 3.4 Leyes básicas de óptica y definiciones.

Ahora debemos analizar algunas de las leyes básicas de óptica y definiciones relevantes para fibras ópticas. Un parámetro fundamental de óptica de un material es el índice refractivo (o índice de refracción). En el espacio libre una onda de luz viaja a una velocidad  $c=3 \times 10^8$  m/s. La velocidad de la luz es relacionada a la frecuencia  $f$  y a la longitud de onda  $\lambda$  por  $c = \lambda f$ . Entrando en un medio dieléctrico o no conductor la onda ahora viaja a una velocidad  $v$ , la cual es característica del material y menor que  $c$ . La relación de velocidad de luz en un vacío a aquella en materia es el índice de refracción  $n$  de la materia y es dado por

$$n = \frac{c}{v} \quad (3-3)$$

La siguiente tabla lista los índices refractivos de distintos materiales.

Tabla 3-1. Índice de refracción para algunos materiales.

Material	Índice de refracción
Aire	1.0
Dióxido de Carbono	1.0
Alcohol Etilico	1.36
Agua	1.33
Sílica fundida	1.46
Vidrio	1.5
Polietileno	1.59
Silicio	3.5
Germanio	4.0
Sapphire	1.8
Calcite	1.6
Cloruro de Sodio	1.54
Fluoruro de Magnesio	1.38
Sulfuro de Zinc	2.3
Arseniuro de Galio	3.35
Arseniuro de Aluminio - Galio	3.6

Los conceptos de reflexión y refracción pueden ser interpretados más fácilmente considerando el comportamiento de los rayos de luz asociados con ondas planas viajando en un material dieléctrico. Cuando un rayo de luz encuentra una frontera separando dos medios diferentes, parte del rayo es reflejado atrás dentro del primer medio y el resto es doblado (o refractado) cuando entra al segundo material. Esto es mostrado en la figura 3-3 donde  $n_2 < n_1$ . La inclinación o refracción del rayo de luz en la interface es un resultado de la diferencia en la velocidad de la luz en dos materiales teniendo diferentes índices refractivos. La

relación en la interface es conocida como Ley de Snell y es dada por

$$n_1 \text{ sen } \phi_1 = n_2 \text{ sen } \phi_2 \quad (3-4)$$

o equivalentemente como

$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (3-5)$$

donde los ángulos son definidos en la figura 3-3.

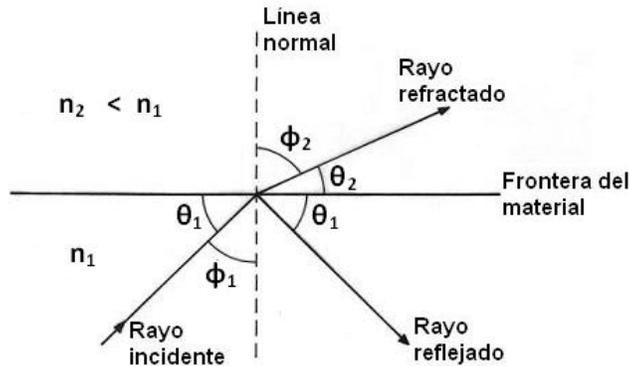


Figura 3-3. Refracción y reflexión de un rayo de luz en un material frontera.

De acuerdo a la ley de reflexión, el ángulo  $\theta_1$  a el cual el rayo incidente choca con la interface es exactamente igual al ángulo que el rayo reflejado hace con la misma interface. El rayo incidente, la normal a la interface y el rayo reflejado están en el mismo plano, el cual es perpendicular al plano de interface entre los dos materiales.

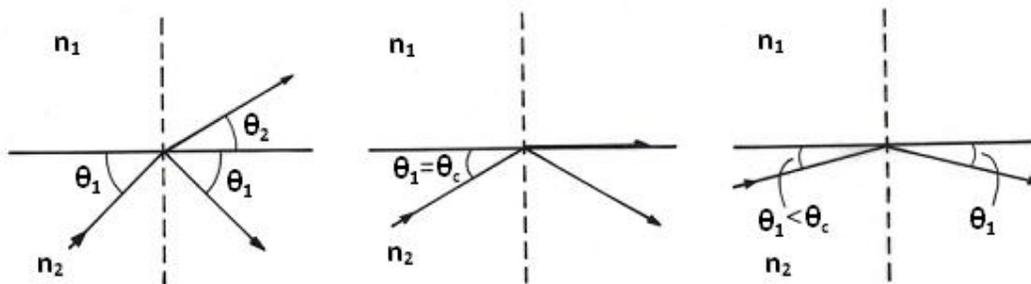


Figura 3-4. Representación del ángulo crítico y la reflexión interna total de una interface vidrio - aire.

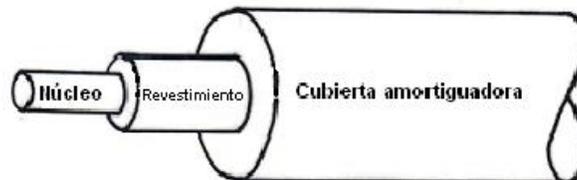
Cuando el ángulo de incidencia  $\theta_1$  en un material ópticamente más denso (índice refractivo más alto) se vuelve más pequeño, el ángulo refractado  $\theta_2$  se aproxima a cero. Después de este punto la refracción no es posible y los rayos presentan reflexión interna total. Las condiciones requeridas para reflexión interna total pueden ser determinadas usando la ley de Snell [ecuación(3-5)].

Considerando la figura 3-4 la cual muestra la interface de vidrio - aire; un rayo de luz consigue doblar con la superficie del vidrio mientras sale del vidrio de acuerdo a la ley de Snell. Si el ángulo de incidencia  $\theta_1$  es reducido, eventualmente un punto será alcanzado donde el rayo de luz en el aire es paralelo a la superficie del vidrio. Este punto es conocido como el ángulo crítico de incidencia  $\theta_c$ . Cuando el ángulo de incidencia  $\theta$ , es menor que el ángulo crítico, la condición para reflexión interna total es satisfecha; esto es, la luz es totalmente reflejada "atrás", dentro del vidrio; la luz no puede escapar de la superficie del cristal. Esta última situación es idealizada; en la práctica hay siempre algunos túneles de energía óptica a través de la interface.

### 3.5 Tipos de fibra óptica.

Una fibra óptica es una guíaonda dieléctrica que opera a frecuencias ópticas. Esta guía de fibra es normalmente en forma cilíndrica. Confina energía electromagnética en la forma de luz hacia dentro de sus superficies y guía la luz en una dirección paralela a sus ejes. Las propiedades de transmisión de una guíaonda óptica son dictadas por sus características estructurales, las cuales tienen un mayor efecto en determinar cómo una señal óptica es afectada cuando se propaga a lo largo de la fibra. La estructura establece básicamente la capacidad de información transportada de la fibra y además influye en la respuesta de la guíaonda por perturbaciones ambientales.

La propagación de la luz a lo largo de una guíaonda puede ser descrita en términos de una serie de ondas electromagnéticas guiadas llamadas "los modos de la guíaonda". Estos modos guiados son referidos como los modos encontrados y atrapados de la guíaonda cada modo guiado es un patrón de líneas de campo eléctrico y magnético que es repetido a lo largo de la fibra en intervalos iguales a la longitud de onda, sólo un número discreto de modos son capaces de propagarse a lo largo de la guía.

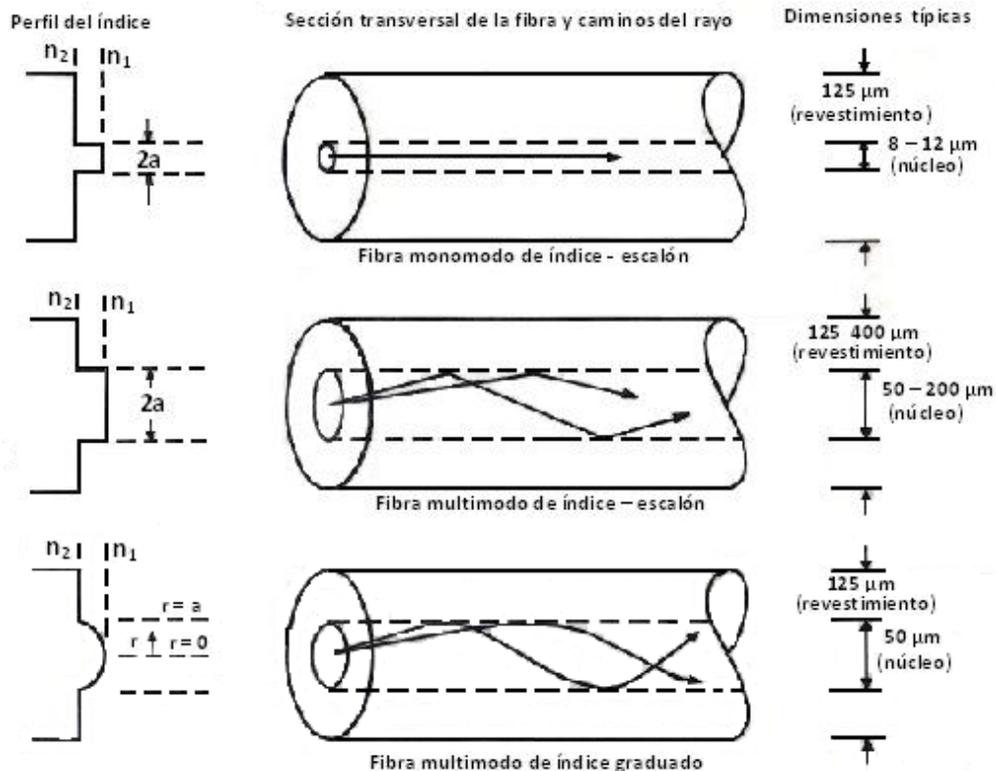


**Figura 3-5.** Esquema de una estructura de una sola fibra. Un núcleo circular sólido de índice refractivo  $n_1$  es rodeado por un revestimiento teniendo un índice refractivo  $n_2 < n_1$ . Un encapsulado de plástico elástico amortigua la fibra.

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C**

La estructura de guíaonda óptica más extensamente aceptada es el individual cilindro dieléctrico sólido de radio "a" e índice de refracción  $n_1$  mostrado en la figura 3-5. Este cilindro es conocido como el núcleo de la fibra. El núcleo es rodeado por un sólido revestimiento dieléctrico que tiene un índice refractivo  $n_2$  que es menor que  $n_1$ . Aunque, en principio, un revestimiento no es necesario por la luz para propagarse a lo largo del núcleo de la fibra, atendiendo propósitos distintos. El revestimiento reduce pérdidas de distorsión que resultan de las discontinuidades dieléctricas en la superficie del núcleo, en adición al esfuerzo mecánico en la fibra, y protegen el núcleo de contaminantes que absorbe la superficie con lo cual puede venir en contacto.

En fibras de pérdidas bajas y medias, el material del núcleo es generalmente vidrio el cual es rodeado por cualquiera de los dos revestimientos: de vidrio o de plástico. La mayoría de las fibras son encapsuladas en un material plástico elástico, resistente a la abrasión. Este material adiciona más fuerza a la fibra y aísla mecánicamente o amortigua las fibras de pequeñas irregularidades geométricas, distorsión o rugosidades de superficies adyacentes.



**Figura 3-6. Comparación de fibras monomodo y multimodo de índice escalón e índice graduado.**

Las fibras son clasificadas de acuerdo al perfil del índice refractivo del núcleo. Como se muestra en la figura 3-6, podemos distinguir entre fibras de índice escalón, en las cuales el índice refractivo es homogéneo en el núcleo y cambia abruptamente de núcleo a revestimiento, y fibras de índice graduado, en las cuales el índice refractivo decrece continuamente desde el núcleo hacia la región interna del revestimiento. Una distinción más puede ser hecha dependiendo sobre si sólo un modo, o distintos modos pueden propagarse en una fibra dada; son llamadas fibras monomodo y fibras multimodo respectivamente.

### 3.5.1 Fibras multimodo.

Este tipo de fibra soporta un número de modos en adición al dominante modo híbrido  $HE_{11}$  o el modo linealmente polarizado  $LP_{01}$ . Las fibras multimodo pueden ser de índice escalón o índice graduado. Las fibras multimodo de índice escalón consisten de un núcleo homogéneo de índice refractivo  $n_1$  rodeado por un revestimiento de índice refractivo  $n_2$ . (Escasamente más bajo). La diferencia relativa de índices

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3-6)$$

es usualmente del orden de 1% o menos para pérdida baja en fibras basadas sobre sílica fundida. Existe una diferencia parcial de propagación de rayos a diferentes ángulos y, por lo tanto, exhiben diferentes tiempos de tránsito, resultando en un limitado ancho de banda de la fibra.

En el caso de fibras multimodo de índice graduado, una reducción de la diferencia en tiempos de tránsito entre los modos propagándose es realizado por una degradación del índice refractivo del centro hacia la parte externa. Esto causa que la luz no sea guiada por reflexión total, sino por refracción distribuida.

Todos los modos propagándose pueden tener aproximadamente la misma velocidad promedio, si el perfil del índice es elegido convenientemente. El perfil de índice óptico es aproximadamente parabólico. Las figuras 3-6b y c, ilustran el perfil del índice refractivo de fibras multimodo de índice escalón y de índice graduado.

### 3.5.2 Fibras monomodo.

La estructura común para la fibra monomodo de índice escalón es mostrada en la figura 3-6a.

Las fibras monomodo portan sólo el modo dominante  $HE_{11}$ , sin embargo son doblemente degradadas en polarización. Esta degeneración resulta porque en un guíaondas circular todas las orientaciones son equivalentes, lo que permite que existan dos modos polarizados ortogonalmente con el mismo número de onda.

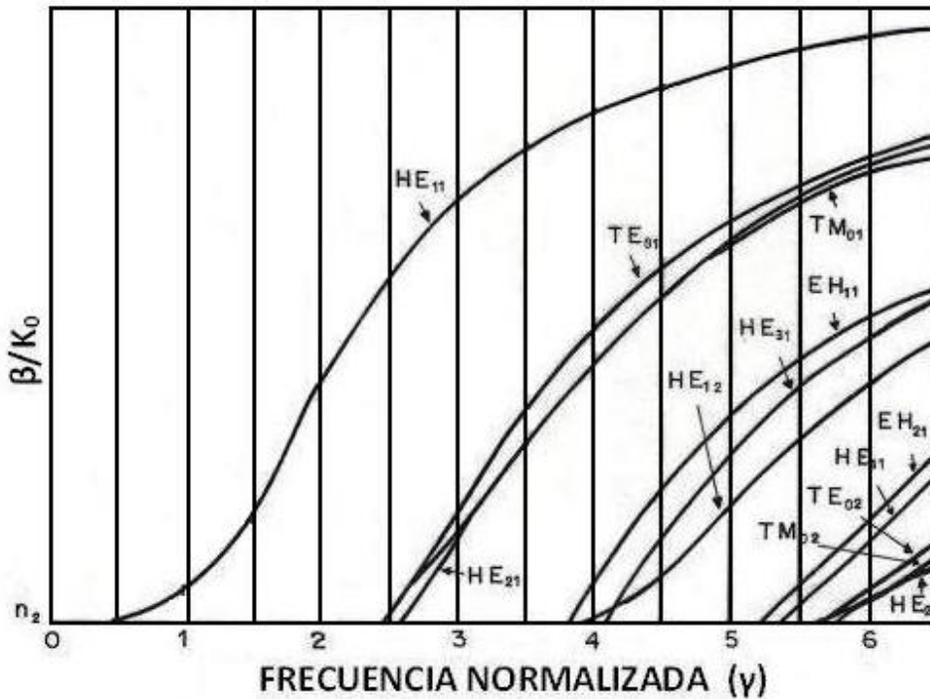


Figura 3-7. Índice efectivo modal para fibras de índice escalón como una función de la frecuencia normalizada.

La figura 3-7 presenta un cuadro de índice efectivo modal  $\beta/k_0$  para perfil de fibras de índice - escalón como una función de la frecuencia normalizada  $V$ . Aquí  $k_0$  es el número de ondas en el espacio libre y  $\beta$  es la constante de propagación de un modo. Abajo de  $V=2.405$ , existe un solo modo  $HE_{11}$ , mientras que para  $V > 2.405$  otros modos son posibles.

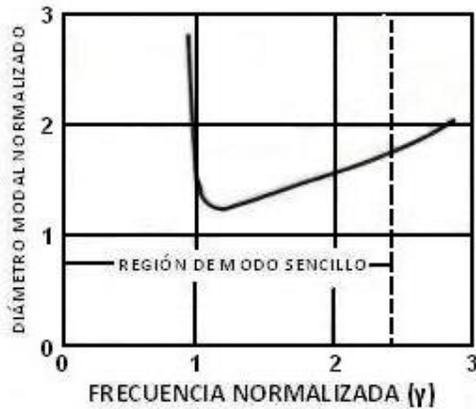


Figura 3-8. Tamaño normalizado del haz como una función de la frecuencia normalizada.

La propagación monomodo se realiza diseñando la magnitud del núcleo a ser de pocas longitudes de onda en la sección transversal y haciendo pequeñas diferencias de índice entre el núcleo y revestimiento. Desde que

$$V = \left( \frac{2^{3/2} \Pi a_1}{\lambda} \right) \Delta^{1/2} \quad (3-7)$$

Uno puede ver que el radio  $a_1$  del núcleo y la diferencia del índice de refracción  $\Delta$  del núcleo - revestimiento puede ser variada sobre un rango considerable. La figura 3-8 indica la relación entre la frecuencia normalizada  $V$  y la extensión física (puntos  $1/e$ ) del modo guiado  $HE_{11}$ .

Ahora puesto que sólo un camino es posible para el haz en una fibra monomodo, la dispersión, que es provocada por las diferencias de velocidades en los diferentes haces en una fibra multimodo, estarán completamente ausentes y, por lo tanto, la capacidad de transmisión de información de la fibra monomodo deberá ser mucho mayor que la de una fibra multimodo.

### 3.6 Apertura numérica.

La apertura numérica es una medida de capacidad de recolección de luz de una fibra. Cuando se acoplan fuentes a fibras, fibras a fibras y fibras a detectores, la eficiencia de acoplamiento depende sobre la distribución angular de energía tanto como sobre el alineamiento. La apertura numérica (NA) describe la distribución angular de luz aceptada por una fibra.

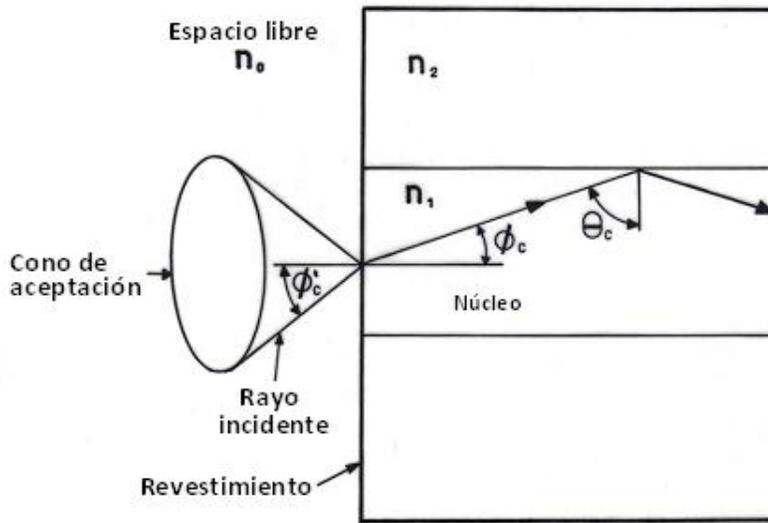


Figura 3-9. Acoplamiento fuente - fibra (en una fibra óptica).

Para acoplamiento eficiente en una fibra, dos requerimientos deben ser satisfechos. La luz debe ser incidente sobre el núcleo, y debe también ser inyectada dentro de la fibra a un ángulo relativo al eje de la fibra que es menor que el ángulo de aceptación (formado rotando un rayo en el ángulo de aceptación  $\phi_c$  alrededor del eje, como se muestra en la figura 3-9), se propagará en la fibra.

Una expresión para la apertura numérica en fibras de índice escalón se obtiene de la figura 3-9. La luz incidente en la interfaz núcleo-revestimiento debe tener un ángulo de incidencia más grande que el ángulo crítico  $\theta_c$ , donde

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3-8)$$

es el seno del ángulo crítico. Los ángulos  $\phi'_c$ ,  $\phi_c$  y  $\theta_c$  en la figura 3-9 son relacionados por

$$n_0 \text{ sen } \phi'_c = n_1 \text{ sen } \phi_c = n_1 (1 - \text{sen}^2 \theta_c)^{\frac{1}{2}} \quad (3-9)$$

donde  $n_0$  es el índice refractivo del espacio libre. El término sobre el lado izquierdo de la ecuación es la apertura numérica (NA) de la fibra y puede ser escrita

$$NA = [(n_1)^2 - (n_2)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3-10)$$

Para el caso usual de diferencias pequeñas entre  $n_1$  y  $n_2$

$$NA = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}} \quad (3-11)$$

La luz saliendo de una fibra es confinada con el mismo ángulo de aceptación con el que los rayos entran a la fibra. Las mediciones de apertura numérica son usualmente hechas sobre la luz saliendo de una fibra excitada por luz, rellenando completamente el cono de aceptación del extremo de envío de una fibra.

### 3.7 Atenuación.

Dos propiedades de gran importancia en la propagación de una señal óptica a través de la fibra son la atenuación de la señal y la dispersión. La atenuación (o pérdida) determina la distancia sobre la cual una señal puede ser transmitida. La dispersión determina el número de bits de información que puede ser transmitido sobre una fibra dada en un período especificado. Aunque la atenuación y dispersión son fenómenos físicos separados, ambos causan distorsión de la señal. En un sistema de comunicación donde la velocidad de error de bit es una medida de funcionamiento del sistema, los efectos de atenuación pueden ser tratados aparte de los efectos de dispersión. La atenuación  $\alpha$ , es expresada en términos de decibeles por unidad de longitud y es dada por

$$\alpha = 10 \ln \left[ \frac{\left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)}{L} \right] \quad (3-12)$$

donde  $P_{out}$  es la potencia de salida,  $P_{in}$  es la potencia de entrada, y  $L$  es la longitud de la fibra. Si  $\alpha$  refiere a una longitud estándar  $L$ , es usualmente expresado en decibelios por kilómetro (dB/Km).

La absorción baja del material ha sido lograda reduciendo la absorción por impurezas debido a transiciones de iones de metal, tal como acero, cromo, cobalto y cobre. La absorción de iones  $O^{\ominus}H^{\ominus}$  debido a impurezas del agua es también un factor importante.

La dependencia de la atenuación sobre la longitud de onda es mostrada en la figura 3-10.

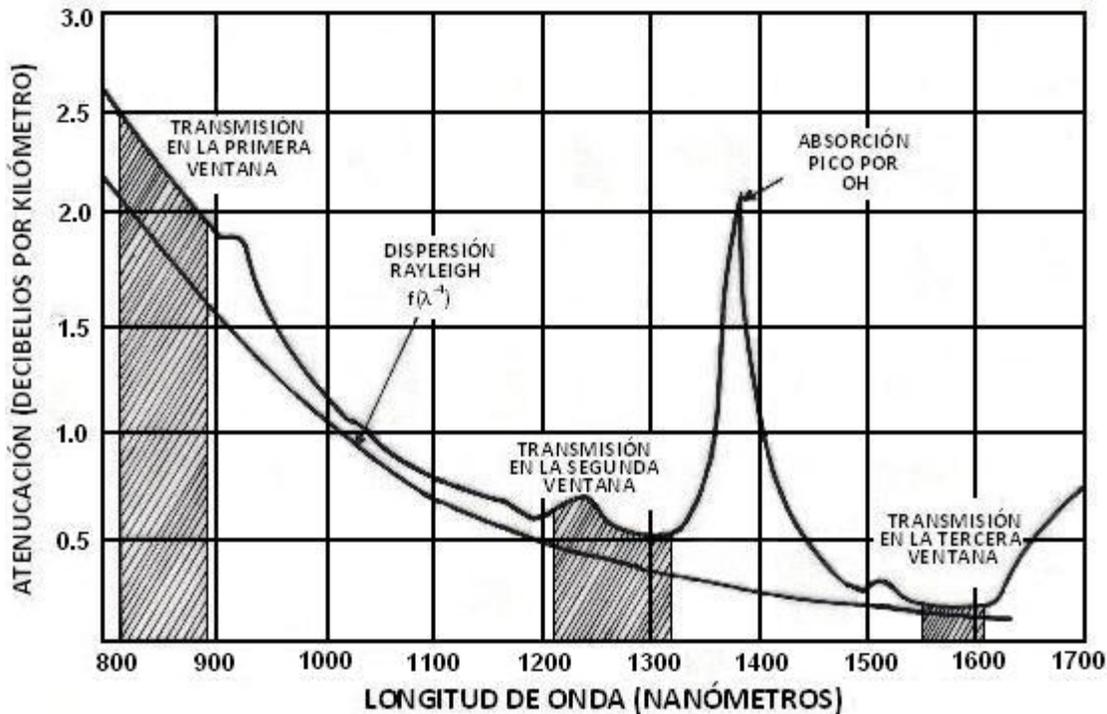


Figura 3-10. Atenuación de la fibra óptica como una función de la longitud de onda.

La dependencia de la atenuación sobre la longitud de onda es mostrada en la figura 3-10. Hay tres ventanas de transmisión. La primer ventana es en la región de 810 a 850nm.

Hay varios mecanismos que conducen a pérdidas de transmisión en fibras. Estas son (1) Absorción del material, (2) dispersión lineal, (3) dispersión no lineal (4) atenuación de guíaonda (5) modos que salen, y diseño de fibras, y (6) exposición a radiación por ionización.

### 3.7.1 Absorción del material.

La absorción del material es un mecanismo de pérdida, en el cual parte de la potencia transmitida es disipada como calor en la guíaonda. La natural resonancia mecánica de la sílica ( $\text{SiO}_2$ ) estructura cristalina y resonancias debidas a impurezas están situadas fuera de las longitudes de onda usadas para transmisión. Estas pérdidas dependen de la composición del material y del método usado en la fabricación de la fibra.

### 3.7.2 Dispersión lineal.

La dispersión lineal ocurre cuando parte de la potencia de un modo de la fibra es transferido linealmente (proporcional para aquella potencia) dentro de otro modo. Como en todos los procesos lineales ningún cambio de frecuencia es requerido. Este acoplamiento en medio de modos ocurre porque la guía no es matemáticamente perfecta en su estructura cilíndrica.

### 3.7.3 Dispersión no lineal.

Si la intensidad de campo en una fibra es muy alta, ocurre un fenómeno no lineal, y potencia desde un modo puede ser transferida hacia él mismo u otros modos viajando en la misma dirección o en dirección opuesta, dando un corrimiento en frecuencia. Diferente de la dispersión lineal, donde los coeficientes de acoplamiento son independientes de las potencias ópticas en los modos involucrados, los coeficientes de acoplamiento en dispersión no lineal son funciones de estas potencias.

Las dispersiones estimuladas Brillouin y Raman son no lineales, y como en cualquier fenómeno estimulado, ellas tienen un umbral. El mínimo umbral, y consecuentemente el más crítico para comunicación óptica, ocurre en una fibra monomodo, de sílica, transmitiendo luz monocromática, donde la potencia de umbral en watts por dispersión Brillouin es

$$P_T = 8 \times 10^{-5} \alpha / \omega^2 \quad (3-13)$$

En esta expresión  $\alpha$ , en decibeles por kilómetro, es el coeficiente de atenuación lineal de la fibra, y  $\omega$  es el ancho completo del haz en la densidad de potencia medida, en micras.

Ocurre dispersión Raman en la dirección adelantada (directa). Para la misma fibra el umbral Raman es tres órdenes mayor en magnitud que el umbral Brillouin. Para una fuente de espectro extenso y una fibra multimodo los umbrales Brillouin y Raman son más altos. Pérdidas introducidas por dispersión no lineal pueden ser evitadas por la selección sensata del diámetro del núcleo y nivel de la señal.

#### **3.7.4 Atenuación de guía de onda.**

Las pérdidas debidas a la estructura del guíaonda aumentan a causa de curvaturas, microcurvaturas del eje de la fibra y defectos de unión entre ejes.

Las pérdidas por curvatura se incrementan cuando los radios de curvatura decrecen. Una diferencia alta de índice decrecerá las pérdidas de curvatura.

Las pérdidas por microcurvaturas corresponden a una fibra excitando aleatoriamente alrededor de su posición normal con pequeñas desviaciones. A pesar de la pequeña desviación, los periodos típicos de las oscilaciones pueden ser pequeños y por lo tanto la fibra puede tener marcadas curvas locales.

Problemas de alineamiento, geometría y diferencias de índice refractivo entre fibras puede conducir a pérdidas cuando las fibras son unidas por empalme. La fibra multimodo presenta en empalmes, pérdidas promedio de 0.2 dB. Los empalmes de fibras monomodo requieren más cuidado, sin embargo, en un ambiente de laboratorio, una pérdida promedio de menos de 0.1 dB ha sido lograda usando la técnica de fusión.

#### **3.7.5 Modos que salen.**

En una fibra multimodo, hay modos que pueden ser excitados los cuales no son refractados ni guiados completamente. Estos son referidos como modos que salen. Estos modos radían de acuerdo a un fenómeno similar para tornar a través de una barrera de potencial, en sistema de mecánica cuántica. La mayoría de estos modos tienen altos coeficientes de atenuación, pero todavía pueden propagarse sobre algunos kilómetros. Los modos que salen son especialmente excitados por fuentes incoherentes y deben ser tomados en cuenta en ciertas mediciones de fibra óptica que involucran cortas longitudes de fibra.

#### **3.7.6 Efectos de radiación.**

La atenuación de guíaonda óptica puede ser fuertemente afectada por exposición a radiación nuclear. Efectos de ionización causan defectos en el centro del material absorbiendo luz. Hay una correlación entre el nivel de radiación, pérdida inducida, y la pérdida intrínseca del material. Las fibras con más alta pérdida

intrínseca tienen una más alta sensibilidad a la radiación, lo cual es probablemente debido a una más alta concentración de impurezas. Las fibras puras de núcleo de sílica muestran sustancialmente menores daños que fibras de sílica dopada.

### 3.8 Ventajas de la fibra óptica.

La fibra óptica ha surgido como la mejor alternativa en muchos casos de telecomunicación. Las ventajas más notables de las fibras ópticas son las bajas pérdidas y grandes anchos de banda. Hay también otras ventajas originadas por las propiedades físicas de las fibras ópticas. La tabla 3-2 resume algunas propiedades de las fibras ópticas como guíaondas y diversos beneficios derivados de estas propiedades.

**Tabla 3-2. Propiedades y ventajas de las comunicaciones por fibra óptica.**

Propiedades	Beneficios
Bajas pérdidas	Menor número de repetidores
Alto ancho de banda	Bajo costo por canal
Pequeño tamaño, bajo precio y flexibilidad	Facilidad de instalación y transporte
Resistencia a las radiaciones	No precisa apantallamientos
Inmunidad a interferencias electromagnéticas y ausencia de radiaciones	Fiabilidad
Alta estabilidad con la temperatura	Viabilidad como medio de transmisión en condiciones climáticas adversas
Dificultad para captar sus emisiones	Seguridad
Material dieléctrico	Aislamiento eléctrico y disponibilidad de materia prima

#### 3.8.1 Elevado ancho de banda.

Con el empleo de los LASER's y de los LED's se abre una ventana del espectro electromagnético en frecuencias 10 mil veces superiores a las más grandes empleadas en transmisiones de radio. Debido a que la capacidad potencial de información se incrementa de modo directamente proporcional a la frecuencia, con el LASER se hace posible transmitir a  $10^{14}$  bits/s. Esto es reflejado en la figura 3-11, en donde se ilustra la evolución de la capacidad de soporte de información por diversos medios, en función del tiempo. La figura 3-12 muestra unas curvas de atenuación / frecuencia, en banda base, comparando las fibras ópticas con algunos portadores metálicos convencionales.

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

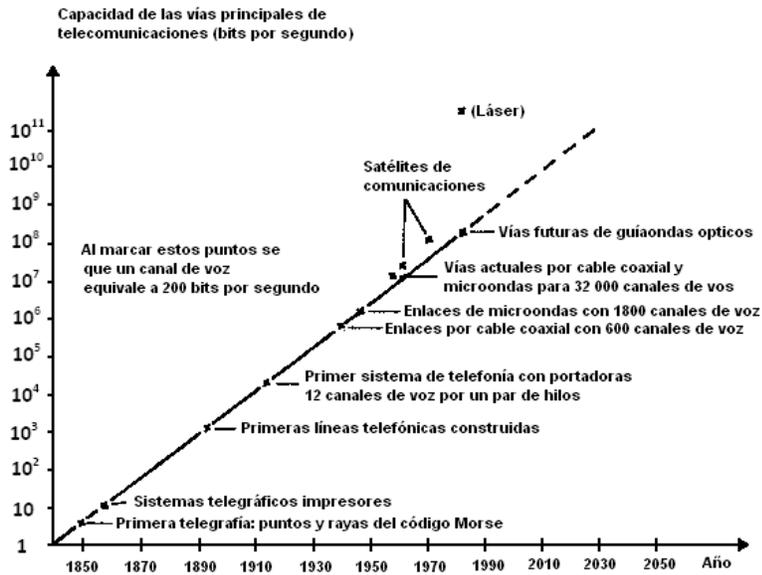


Figura 3-11. Evolución en la capacidad de los sistemas de telecomunicación.

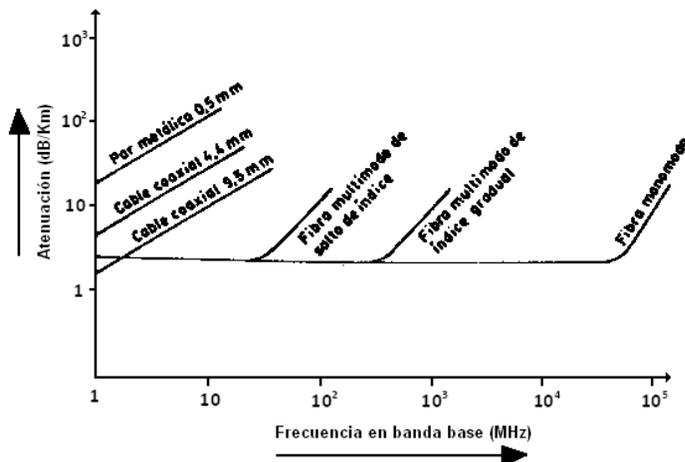


Figura 3-12. Comparación entre la respuesta en banda base de las fibras ópticas y de varios cables metálicos convencionales. La respuesta de las fibras es plana en la banda de paso: el nivel de la atenuación en la banda de paso depende de la longitud de onda de trabajo.

### 3.8.2 Bajas pérdidas.

“Puesto que intrínsecamente las pérdidas de las fibras son bajas (menos de 2.5 dB/Km a 0.85  $\mu\text{m}$  y 0.7 dB/Km a 1.3  $\mu\text{m}$  en las disponibles en el mercado) el distanciamiento entre repetidores resulta multiplicado si se le compara con el exigido por los cables metálicos en análogas condiciones de tráfico. La figura 3-

13 ilustra las sucesivas mejoras tecnológicas en la reducción de la atenuación en las fibras ópticas<sup>1</sup>.

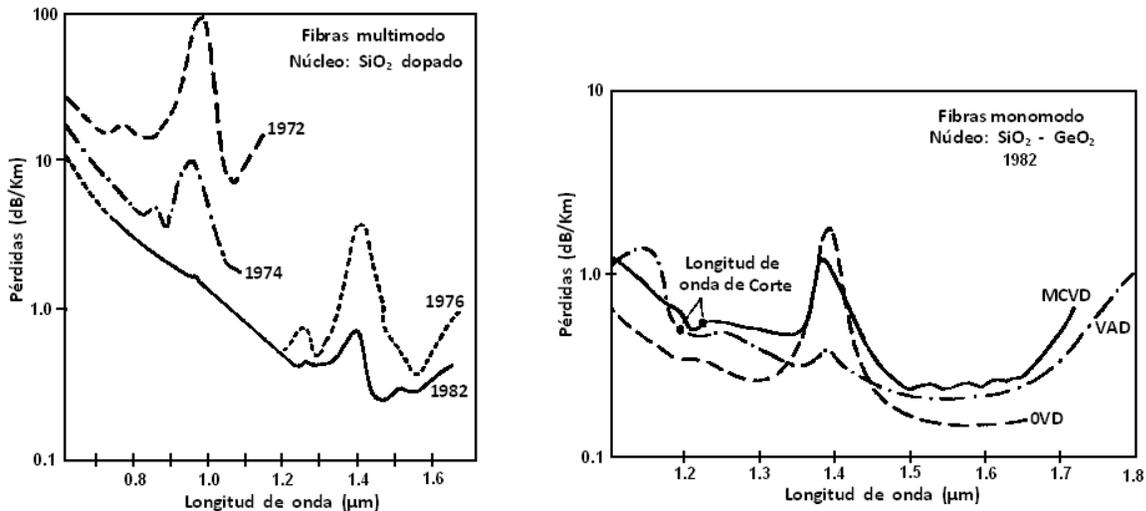


Figura 3-13. a) Progresos durante una década en la atenuación de las fibras ópticas multimodo; b) Pérdidas de las fibras monomodo según el método de fabricación.

### 3.9 Tipos de cable de fibra óptica.

En el diseño del cable de fibra óptica se debe tener presente la protección contra la tracción, las curvaturas, la tensión, los esfuerzos laterales y, en general, los derivados de su fabricación, transporte e instalación.

En esta sección sólo se pretende cubrir las características mecánicas, configuraciones, dimensiones y propiedades de algunos ejemplos de los grupos de cables más usuales. Se contemplaría los siguientes cables:

- a) Cable monofibra para instalaciones interiores.
- b) Cable multifibra para instalaciones en conductos.
- c) Cables multifibra para instalaciones aéreas o directamente enterradas.
- d) Cables marinos.

<sup>1</sup> "Comunicación por fibra óptica" Díaz de la Iglesia Raymundo Ed. Marcombo, 1985, cap.4, pag. 15

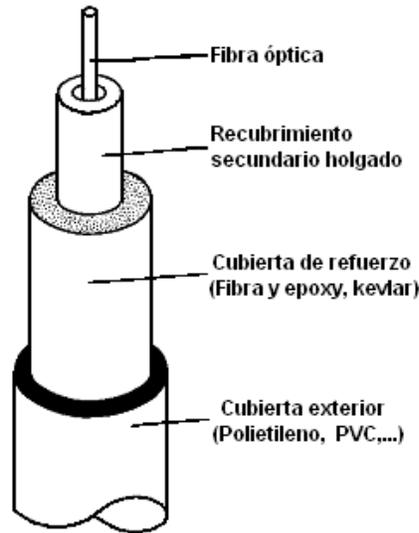


Figura 3-14. Ejemplo de cable monofibra para instalaciones de planta interior.

La figura 3-14 representa una configuración de cable monofibra y la tabla 3-3 recoge algunas características mecánicas representativa. "En el caso particular de la figura 3-14, la fibra presenta un recubrimiento secundario de tipo holgado, por encima del cual se aplica una cubierta de refuerzo a base de kevlar 49 o fibras de vidrio con resina epóxica"<sup>2</sup>.

Tabla 3-3. Especificaciones típicas para cables monofibra en aplicaciones de planta interior.

Parámetro	Cable óptico monofibra
Radio de curvatura	$\geq 15 - 20$ mm
Diámetro exterior	2 - 3 mm
Peso	8 - 15 Kg/Km
Resistencia a la presión	500 N cent.
Tracción de ruptura	$\approx 1500$ N
Máxima tracción de tendido	$\approx 300$ N

"Para los cables de planta exterior son constituciones frecuentes las indicadas en las figuras 3-15 y 3-16 para instalaciones en ductos o directamente enterradas. La diferencia esencial entre estos dos tipos de cable radica en la mejor protección del último frente al medio ambiente"<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> "Comunicación por fibra óptica" Díaz de la Iglesia Raymundo Ed. Marcombo, 1985, cap.4, pags. 81.

<sup>3</sup> "Comunicación por fibra óptica" Díaz de la Iglesia Raymundo Ed. Marcombo, 1985, cap.4, pag. 81

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

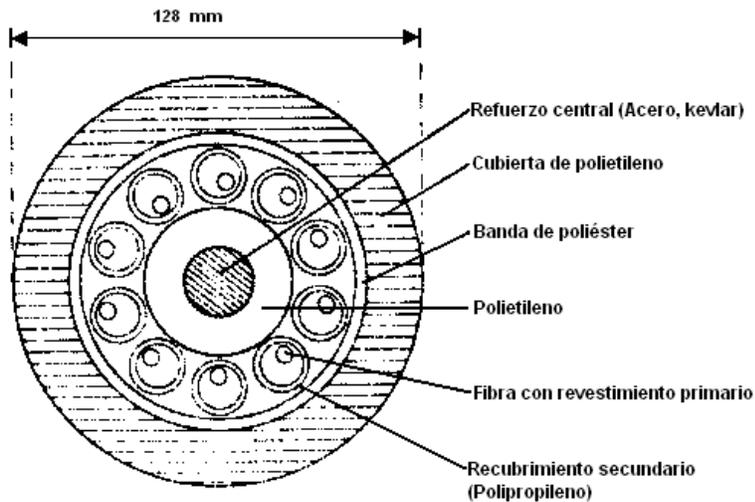


Figura 3-15. Ejemplo de cable multifibra para instalación en conductores de PVC, por ejemplo.

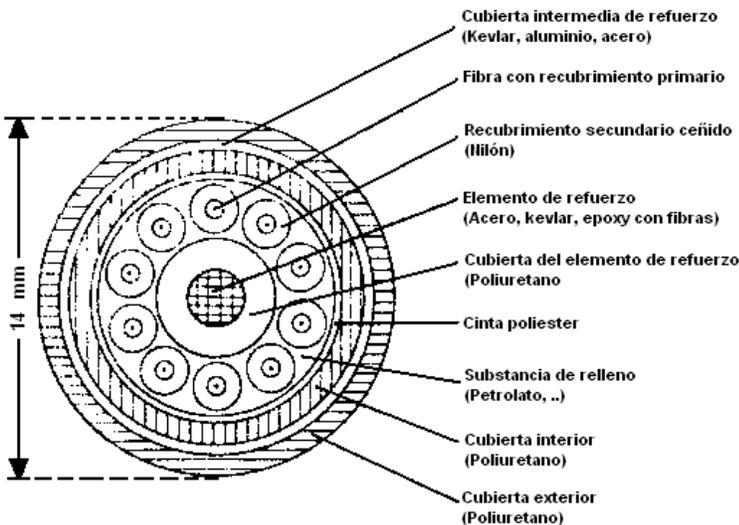


Figura 3-16. Ejemplo de cable multifibra para instalación directamente enterrada.

La tabla 3-4 contempla algunos de los datos sobre los parámetros mecánicos y geométricos de los cables de fibra óptica para instalación en canalizaciones.

Tabla 3-4. Especificaciones típicas para cables multifibra en aplicaciones de planta exterior.

Parámetro	Cable de seis fibras (no metálico)
Diámetro exterior	9 - 14 mm
Peso	50 - 100 Kg/Km
Radio curvatura mínima	100 mm
Máxima tracción de tendido	60 - 150 Kg
Margen de temperaturas	20 a 50 C
Máxima presión lateral	60 - 150 Kg/cm

“Los cables submarinos requieren diseños apropiados a las exigentes condiciones mecánicas a que se ven sometidos. La tabla 3-4 reúne algunas de las características mecánicas exigibles a estos dos tipos de cable. La figura 3-17 presenta el esquema de un cable típico de aguas profundas”<sup>4</sup>.

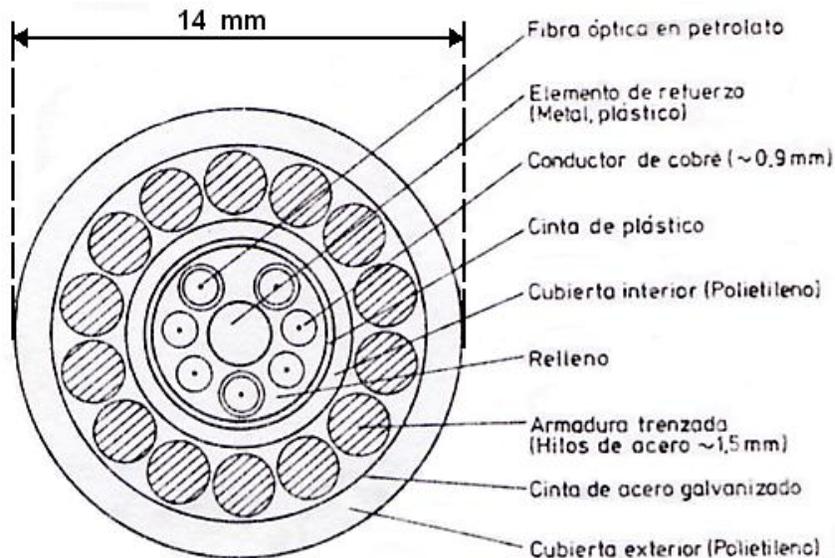


Figura 3-17. Ejemplo de cable submarino.

### 3.10 Empalmes y conectores.

Para la realización práctica de sistemas de fibra óptica es necesario utilizar dispositivos de interconexión, como son empalmes y conectores. El empalme es una unión fija y el conector es una unión móvil.

El empalme encuentra su mayor aplicación en la planta exterior y en menor grado en el equipo de oficina. El empalme puede ser de dos tipos: 1) Mecánico, el alineamiento y sujeción de la fibra se realiza por medios mecánicos, térmicos y adhesivos 2) Por fusión, se aplica a las fibras una elevada temperatura que las funde, al normalizar la temperatura las fibras quedan unidas permanentemente, es el que se emplea mayormente y se realiza por microflama o arco eléctrico, siendo esta última técnica la que ha dado mejores resultados. El conector se usa más en el equipo de oficina que en la planta externa.

<sup>4</sup> “Comunicación por fibra óptica” Díaz de la Iglesia Raymundo Ed. Marcombo, 1985, cap.4, pag. 82

## CAPITULO 4

### FOTODETECTORES

A la salida de una línea de transmisión debe estar un dispositivo recibiendo, el cual interpreta la información contenida en la señal óptica. El primer elemento de este receptor es un fotodetector. El fotodetector sensa la potencia luminiscente que cae sobre éste y convierte la variación de esta potencia óptica en una correspondiente variación de corriente eléctrica. La señal óptica es generalmente debilitada y distorsionada cuando emerge desde el final de la fibra, el fotodetector debe contar con muy altos requerimientos de rendimiento. los principales requerimientos son: una alta respuesta o sensibilidad en el rango de emisión de longitud de onda de la fuente óptica, una mínima adición de ruido al sistema, y una rápida velocidad de respuesta o suficiente ancho de banda. El fotodetector deberá ser insensible a variaciones en temperatura, ser compatible con las dimensiones físicas de la fibra óptica, tener un razonable costo en relación a los otros componentes del sistema, y una larga vida de operación.

Entre los diferentes tipos de fotodetectores están los fotomultiplicadores, detectores pyroeléctricos, fotoconductores basados en semiconductor, fototransistores y fotodiodos. muchos de estos detectores no satisfacen uno o más de los requerimientos previos.

De los fotodetectores basados en semiconductor, el fotodiodo es usado casi exclusivamente para sistemas de fibra óptica a causa de su pequeño tamaño, material compatible, alta sensibilidad y rápido tiempo de respuesta. Los dos tipos de fotodiodos usados son el fotodetector PIN y el fotodiodo de avalancha (APD). En las siguientes secciones se estudiarán las características fundamentales de estos dos tipos de dispositivos.

#### 4.1 Principios de los fotodiodos.

##### 4.1.1 El fotodiodo PIN.

El fotodetector de semiconductor más común es el fotodiodo PIN mostrado esquemáticamente en la figura 4-1. La estructura del dispositivo consiste de regiones p y n separadas por una región intrínseca n muy ligeramente dopada. En operación normal un voltaje suficientemente grande de polarización inversa es aplicado

a través del dispositivo para que la región intrínseca sea completamente agotada de portadores presentando una alta resistencia.

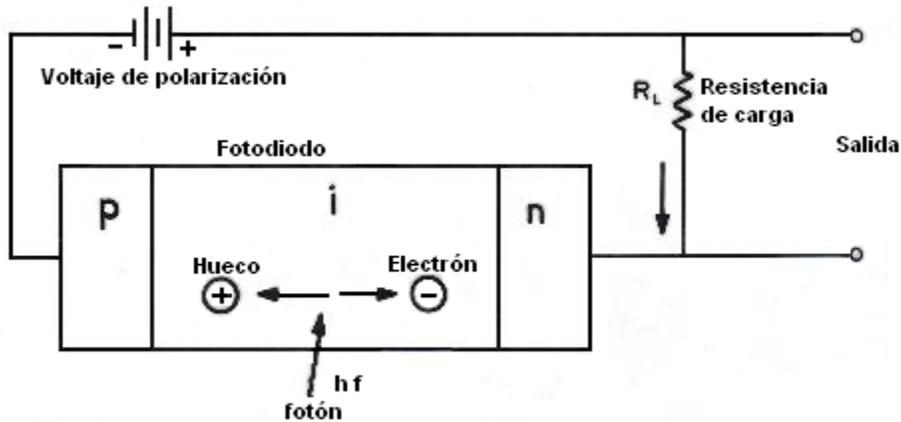


Figura 4-1. Representación esquemática de un circuito con fotodiodo PIN y una polarización inversa aplicada.

Cuando un fotón incidente tiene una energía más grande que o igual a la separación de la banda de energía del material semiconductor, el fotón puede transferir esta energía y excitar un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Este proceso genera pares libres electrón-hueco, los cuales son conocidos como fotoportadores desde que son portadores de carga generados por fotones, como es mostrado en la figura 4-2. El fotodetector es normalmente diseñado para que estos portadores sean generados principalmente en la región de agotamiento (la región intrínseca de agotamiento) donde la mayoría de la luz incidente es absorbida. El alto campo eléctrico presente en la región de agotamiento provoca separación de los portadores y son colectados a través de la unión polarizada inversamente. Esto proporciona aumento en el flujo de corriente en un circuito externo, con un electrón fluyendo por cada par de portador generado. Este flujo de corriente es conocido como la fotocorriente.

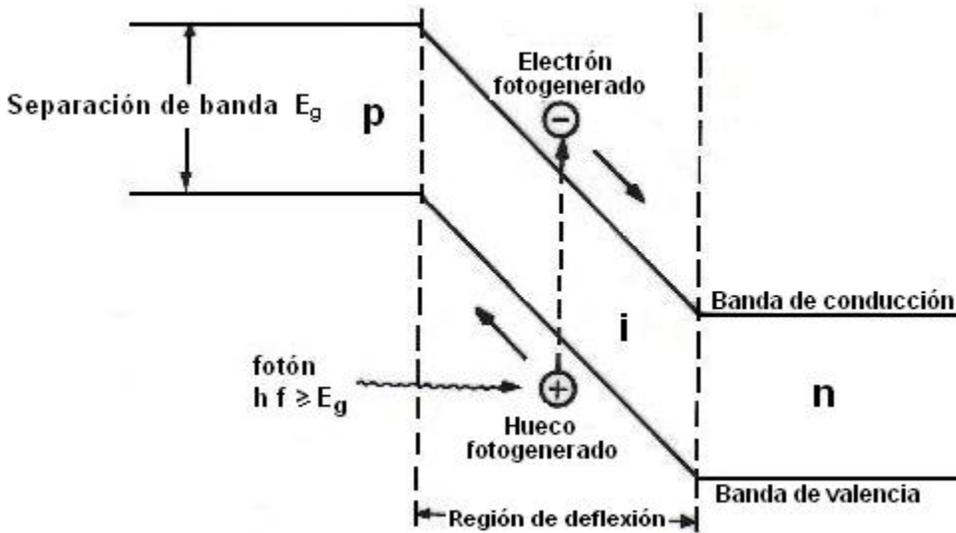


Figura 4-2. Diagrama simple de banda de energía para un fotodiodo PIN. Los fotones con una energía mayor o igual a la energía de separación de banda  $E_g$  pueden generar pares libres electrón-hueco, los cuales actúan como portadores de fotocorriente.

Como los portadores de carga fluyen a través del material algunos pares electrón-hueco se recombinarán y, por lo tanto, desaparecerán. Sobre el promedio, los portadores de carga se mueven a distancias  $L_n$  ó  $L_p$  para electrones y huecos, respectivamente. Esta distancia es conocida como la longitud de difusión. El tiempo tomado por un electrón o hueco para recombinarse es conocido como el tiempo de vida del portador y representado por  $\tau_n$  y  $\tau_p$ , respectivamente. Los tiempos de vida y la longitud de difusión son relacionados por las expresiones

$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2} \text{ y } L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$$

donde  $D_n$  y  $D_p$  son los coeficientes (o constantes) de difusión del electrón y hueco, respectivamente, los cuales son expresados en unidades de centímetro cuadrado por segundo.

La radiación óptica es absorbida en el material semiconductor de acuerdo a la ley exponencial

$$P(x) = P_0 (1 - e^{-\alpha_s(\lambda)x}) \quad (4-1)$$

donde  $\alpha_s(\lambda)$  es el coeficiente de absorción a una longitud de onda  $\lambda$ ,  $P_0$  es el nivel de potencia óptica incidente, y  $P(x)$  es la potencia óptica absorbida en una distancia  $x$ .

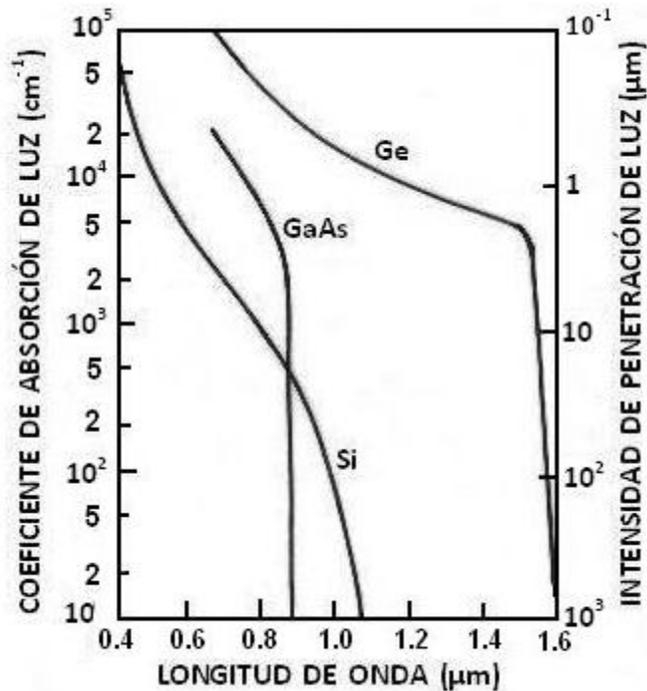


Figura 4-3. Coeficiente de absorción óptica como una función de longitud de onda para silicio, germanio y arseniuro de galio.

La dependencia del coeficiente de absorción óptica sobre la longitud de onda es mostrado en la figura 4-3, para varios materiales de fotodiodos. En dicha figura observamos que para un particular material semiconductor puede ser usado sobre un rango limitado de longitud de onda. La más alta longitud de onda de corte  $\lambda_c$  es determinada por la separación de la banda de energía  $E_g$  del material. Si  $E_g$  es expresado en unidades de electrón-volts (eV), entonces  $\lambda_c$  es dada en unidades de micras ( $\mu\text{m}$ ) por

$$\lambda_c(\mu\text{m}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad [\text{eV}] \quad (4-2)$$

La longitud de onda de corte es alrededor de 1.06  $\mu\text{m}$  para el Si y 1.6  $\mu\text{m}$  para el Ge. Para mayores longitudes de onda la energía del fotón no es suficiente para excitar un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción.

De las características más importantes de un fotodetector PIN que estudiaremos son las siguientes:

- 1) Eficiencia cuántica.
- 2) Responsividad.
- 3) Tiempo de respuesta.

Estos parámetros dependen de la separación de banda del material, la longitud de onda de operación, y el dopado y grosor de las regiones p,i y n del dispositivo.

La eficiencia cuántica  $\eta$  es el número de pares de portadores electrón-hueco generado por un fotón incidente de energía  $h\nu$  y es dado por

$$\eta = \frac{\text{Número de pares electrón - hueco generados}}{\text{Número de fotones incidentes}} = \frac{I_p/q}{P_o/h\nu} \quad (4-3)$$

Aquí  $I_p$  es el promedio de fotocorriente generada por un promedio de estado estable de la potencia óptica  $P_o$  incidente sobre el fotodetector,  $h$  es la constante de Planck,  $\nu$  es la frecuencia de la luz incidente y  $q$  es la carga del electrón.

En un fotodiodo práctico, los fotones crearán entre 30 y 95 pares electrón-hueco, de esta manera el detector proporciona un rango de eficiencia cuántica de 30 a 95 %. Para lograr una alta eficiencia cuántica, la capa de agotamiento debe ser lo suficientemente gruesa para permitir que una gran fracción de luz incidente sea absorbida, "sin embargo, entre más gruesa sea esta región, más tiempo tardarán los portadores fotogenerados en cruzar la juntura inversamente polarizada. Puesto que el tiempo que tardan los portadores en cruzar esta unión determina el tiempo de respuesta del fotodiodo, deberá establecerse un compromiso entre el tiempo de respuesta y la eficiencia cuántica"<sup>1</sup>.

El funcionamiento de un fotodiodo es frecuentemente caracterizado por la responsividad  $R$ . Esta es relacionada a la eficiencia cuántica por

$$R = \frac{I_p}{P_o} = \frac{\eta q}{h\nu} \quad (4-4)$$

Este parámetro es bastante útil ya que especifica la fotocorriente generada por unidad óptica de potencia. En el fotodiodo pin las responsividades típicas como una función de la longitud de onda son mostradas en la figura 4-4.

---

<sup>1</sup> Introducción a la telecomunicación por fibra óptica" Fernando Navarrete Montes de Oca Editado por el IPN, 1991, CAP. 5, PAG. 130.

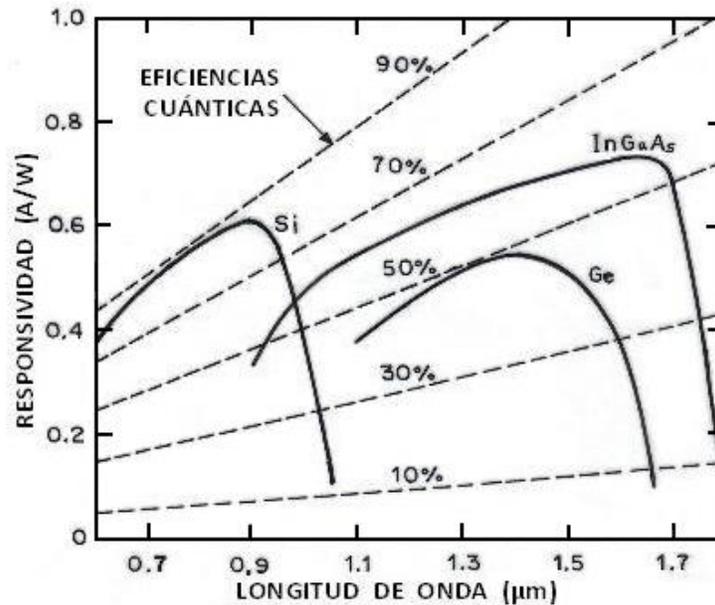


Figura 4-4. Comparación de la responsividad y eficiencias cuánticas como una función de la longitud de onda para fotodiodos PIN construidos de diferentes materiales.

“El tiempo de respuesta se describe como el tiempo que la potencia a la salida del fotodetector tarda en alcanzar del 10 % al 90 % de su potencia total, cuando el detector es iluminado por un pulso de entrada con radiación óptica. En fotodiodos que trabajan completamente en la región de agotamiento, también se considera el tiempo de respuesta como el necesario para que la señal de salida reduzca su potencia del 90 % al 10 % de su total”<sup>2</sup>. Esto es ilustrado en la figura 4-5.

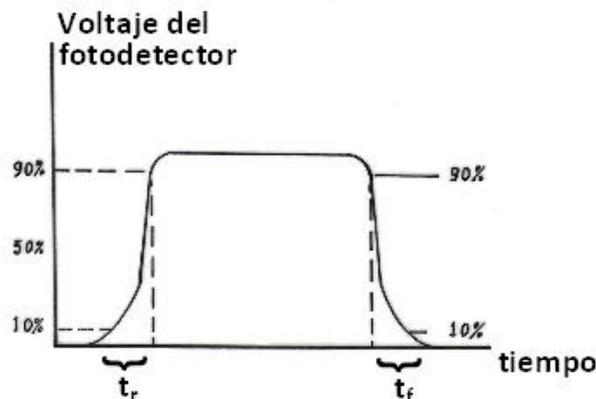


Figura 4-5. Respuesta de un fotodiodo a un pulso óptico de entrada mostrando del 10 % al 90 % del tiempo de elevación y del 90 % al 10 % del tiempo de caída.

<sup>2</sup> Introducción a la telecomunicación por fibra óptica” Fernando Navarrete Montes de Oca Editado por el IPN, 1991, CAP. 5, PAG. 132.

El tiempo de respuesta de un fotodiodo junto con su circuito de salida (figura 4-6) depende principalmente de los siguientes tres factores:

1. El tiempo transitorio de los fotoportadores en la región de agotamiento.
2. El tiempo de difusión de los fotoportadores generados fuera de la región de agotamiento.
3. La constante RC del fotodiodo y el circuito asociado.

“Los parámetros responsables del fotodiodo, para estos tres factores son:

$\alpha_s$ : el coeficiente de absorción.

$w$ : el ancho de la región de agotamiento.

$c_d$ : la capacitancia total en las uniones del fotodiodo.

$c_a$ : la capacitancia de entrada del amplificador.

$R_a$ : la resistencia de entrada del amplificador.

$R_s$ : la resistencia serie del fotodiodo.

$R_L$ : la resistencia de carga”<sup>3</sup>.

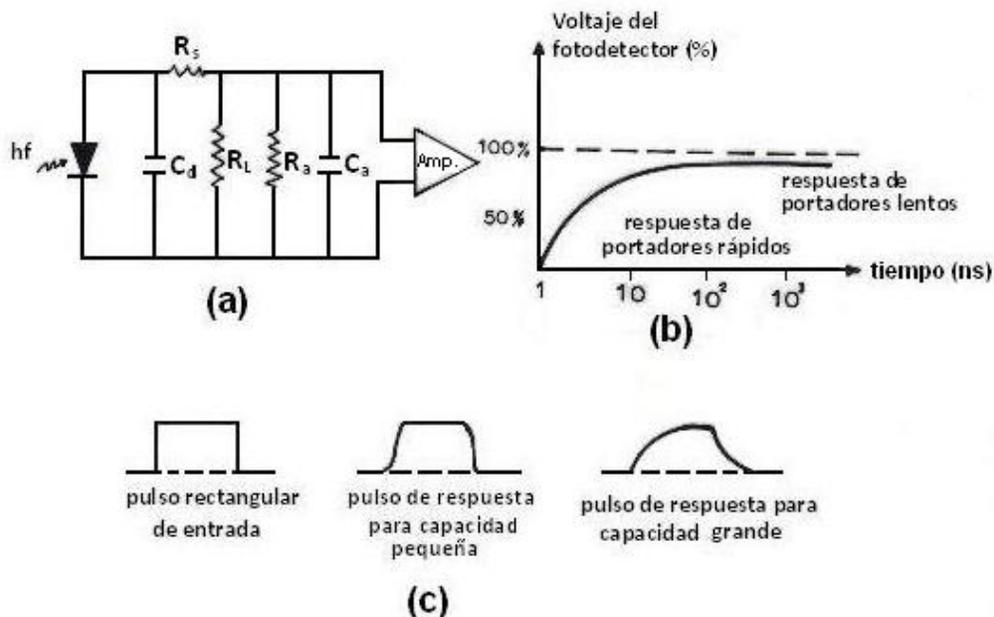


Figura 4-6. (a) Circuito equivalente de un receptor con fotodetector.  
(b) Típico tiempo de respuesta de un fotodetector que no es completamente agotado.  
(c) Pulso rectangular de entrada, pulso de respuesta para capacidad pequeña y pulso de respuesta para capacidad grande.

<sup>3</sup> Introducción a la telecomunicación por fibra óptica” Fernando Navarrete Montes de Oca Editado por el IPN, 1991, CAP. 5, PAG. 133.

En la figura 4-6(b) se muestra el tiempo de respuesta típico de un fotodetector y en la figura 4-6(c) su respuesta a un pulso rectangular de entrada cuando la capacitancia  $C_d$  adquiere valores grandes y pequeños.

“Si la capacitancia del diodo es muy grande, el tiempo de respuesta se ve limitado por la constante de tiempo  $RC$ , esto es, la resistencia de carga  $R_L$  y la capacitancia mencionada. Entonces la respuesta del fotodetector sería como la mostrada en la figura 4-6(c) en el pulso más deformado. El tiempo de elevación  $t_r$  a partir del circuito equivalente del diodo está dado por”<sup>4</sup>:

$$T_r = 2.19 R_T C_T \quad (4-5)$$

“El tiempo de respuesta de un fotodetector es un factor muy importante pues está directamente relacionado con la respuesta en frecuencias altas. Un compromiso razonable entre la respuesta en alta frecuencia y una alta eficiencia cuántica se encuentra cuando el grosor de la región de absorción está entre  $1/\alpha_s$  y  $2/\alpha_s$ ”<sup>5</sup>.

## 4.2 El fotodiodo de Avalancha APD.

El fotodiodo de avalancha (APD) es una unión de semiconductor que tiene una ganancia interna, lo cual incrementa su responsividad sobre los dispositivos PN y PIN. Las ganancias que son disponibles hacen a los APD's mucho más sensibles que los diodos PIN. La ganancia interna produce mucho mejor relación señal a ruido que la que puede ser obtenida con amplificación externa.

La multiplicación de la corriente de avalancha viene con respecto al siguiente método. Un fotón es absorbido en la región de deflexión, creando un electrón libre y un hueco libre. Las grandes fuerzas eléctricas en la región de deflexión causan aceleración a estas cargas, ganando energía cinética. Cuando las cargas rápidas chocan con átomos neutrales, ellos crean adicionales pares electrón-hueco utilizando parte de su energía cinética para elevar electrones a través de las bandas de energía. La aceleración de una carga puede generar varias nuevas cargas secundarias. Las mismas cargas secundarias pueden acelerar y crear más niveles de pares electrón-hueco. Esto es el proceso de multiplicación de avalancha.

---

<sup>4, 5</sup> Introducción a la telecomunicación por fibra óptica” Fernando Navarrete Montes de Oca Editado por el IPN, 1991, CAP. 5, PAG. 133 y 134.

Las fuerzas deben ser fuertes para impartir alta energía cinética. Esto es logrado con polarizaciones inversas grandes, varios cientos de volts en algunos instantes. La ganancia se incrementa con polarización inversa  $v_d$  de acuerdo a la aproximación:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{v_d}{v_{BR}}\right)^n} \quad (4-6)$$

donde  $V_{BR}$  es el voltaje inverso de ruptura del diodo y  $n$  es un parámetro empíricamente determinado que es mayor que la unidad. Los voltajes de ruptura ocurren de 20 a 500 V.

La corriente generada por un APD con ganancia  $M$  es

$$i = \frac{M\eta eP}{hf} = \frac{M\eta e\lambda P}{hc} \quad (4-7)$$

donde  $\eta$  es la eficiencia cuántica cuando la ganancia es unitaria.

La responsividad es

$$R_{APD} = \frac{\eta q}{hf} M = R_0 M \quad (4-8)$$

donde  $R_0$  es la ganancia unitaria de responsividad.

El rango típico de responsividad de avalancha es desde 20 a 80 A/w.

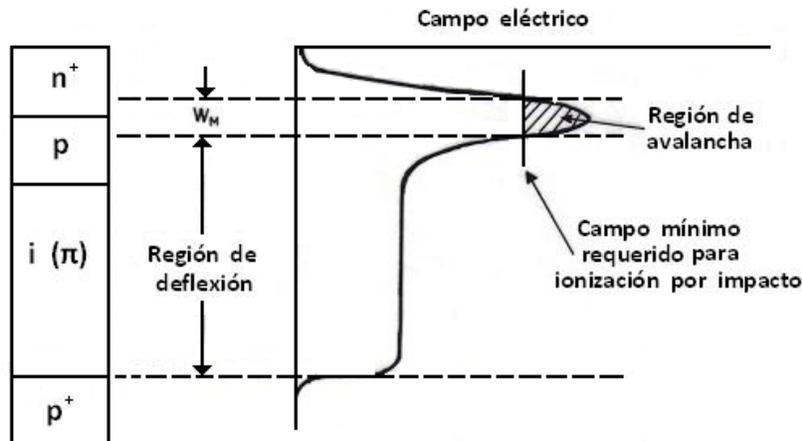


Figura 4-7. Estructura de un fotodiodo de avalancha y los campos eléctricos en las regiones de deflexión y multiplicación.

Los fotodiodos de avalancha son usualmente variaciones de los fotodiodos PIN. El material utilizado, y de esta manera los rangos espectrales, son los mismos. La estructura de APD más común utilizada para causar el efecto avalancha es mostrada en la figura 4-7. Las capas  $p^+$  y  $n^+$  son altamente dopadas, regiones de baja resistencia teniendo una muy pequeña caída de voltaje. La región  $n$  es ligeramente dopada, casi intrínseca. La mayoría de los fotones son absorbidos en esta capa, creando pares electrón-hueco. Como es indicado en la figura 4-7, los fotoelectrones se mueven a la región  $p$ , la cual ha sido agotada de carga libre por el gran voltaje inverso. La caída de voltaje es en su mayor parte a través de la unión  $p-n^+$ , donde las grandes fuerzas eléctricas resultantes provocan la multiplicación de avalancha.

Como el fotodiodo no multiplicador PIN, la velocidad de respuesta del APD es limitada por el tiempo transitorio de portadores de carga, y la constante de tiempo RC.

Los fotodiodos de avalancha tienen excelente linealidad sobre un rango de niveles de potencia óptica desde una fracción de un nanowatt a varios microwatts.

La ganancia de un fotodiodo de avalancha es dependiente de la temperatura, generalmente decreciente con la elevación de temperatura.

### 4.3 Comparación de los fotodiodos PIN y APD.

A modo de resumen, el detector de un sistema de comunicaciones por fibra será cualquiera de los dos: uno de avalancha o un fotodiodo PIN. El fotodiodo PIN es más barato, menos sensible a la temperatura, y requieren menor voltaje inverso de polarización que el APD. Las velocidades de los dos dispositivos son comparables. El fotodiodo PIN es preferible en más sistemas. La ganancia APD es necesaria cuando el sistema está limitado por pérdidas; como ocurre en largas distancias de enlace.

Tabla 4-1. Características típicas de fotodetectores de unión.

Material	Estructura	Tiempo de longitud de onda de respuesta		Responsividad		Ganancia Corriente
		(ns)	(nm)	(A/W)	(na)	
Silicio	PIN	0.5	300-1100	0.5	1	1
Germanio	PIN	0.1	500-1800	0.7	200	1
InGaAs	PIN	0.3	1000-1800	0.6	10	1
Silicio	APD	0.5	400-1000	77	15	150
Germanio	APD	1	1000-1600	30	700	50

Aunque una extensa variedad de detectores y características de detector existe, es útil considerar los valores típicos de los parámetros importantes del diodo, como es mostrado en la tabla 4-1.

Algo de la información que se ha reunido sobre fuentes, fibras y detectores es resumida en la figura 4-8. Esta figura ilustra muchas decisiones que el diseñador de sistemas debe tomar. Esto incluye: longitud de onda de operación (visible, primera ventana, segunda ventana); la fuente de luz (LED o diodo LASER); material de la fibra óptica (cristal, PCS, ó Plástico) y fotodetector (PIN o APD).

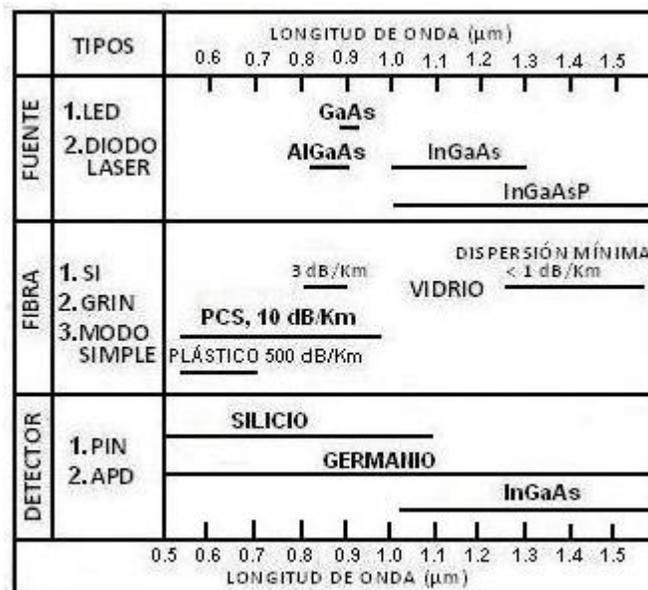


Figura 4-8. La mayoría de componentes de un sistema de fibra óptica.

#### 4.4 EL RECEPTOR OPTICO.

“Los receptores ópticos actuales se basan en uno de los dos tipos de detectores: el fotodiodo de avalancha APD y el fotodiodo PIN, seguido de uno de los tres tipos de preamplificadores siguientes: FET (transistor de efecto de campo), TBJ (transistor bipolar de juntura) y transimpedancia. Para señales binarias, el caso más común, basta con 22 dB de la relación señal/ruido. Un APD de calidad (de bajo ruido) podría dar una sensibilidad superior”<sup>6</sup>.

“La capacidad de un receptor óptico para detectar señales de luz débiles, depende de su sensibilidad y en particular del ruido

<sup>6</sup> “Introducción a la telecomunicación por fibra óptica” Fernando Navarrete Montes de Oca Editado por el IPN, 1991, CAP. 5, PAG. 142.

propio. Los agentes causantes del ruido son: la señal óptica, el diodo en sí y el circuito eléctrico que le sigue. El límite en cuanto a detección se da cuando la suma de todas las corrientes de ruido (cuántico, de la corriente de oscuridad, disparo térmico) iguala a la corriente de la señal a la salida del receptor. Esta potencia equivalente al ruido suele ser, sin embargo, menos importante que la potencia óptica (mínima) requerida para garantizar la deseada señal /ruido ó tasa de error"<sup>7</sup>.

"Pueden presentarse alguna o todas las fuentes de ruido siguientes:

- Ruido de disparo en la corriente media de la señal.
- Exceso de ruido de disparo en la corriente media de la señal, debido al ruido en la multiplicación de avalancha.
- Ruido creado por la corriente de oscuridad del detector.
- Ruido procedente del amplificador"<sup>8</sup>.

"Incluso con un APD perfecto, hay un límite fundamental en el cual el rendimiento sólo depende del ruido de disparo, en la corriente media de la señal. Comúnmente se le denomina límite cuántico, ya que los electrones de la corriente de la señal están relacionados directamente con los fotones"<sup>9</sup>.

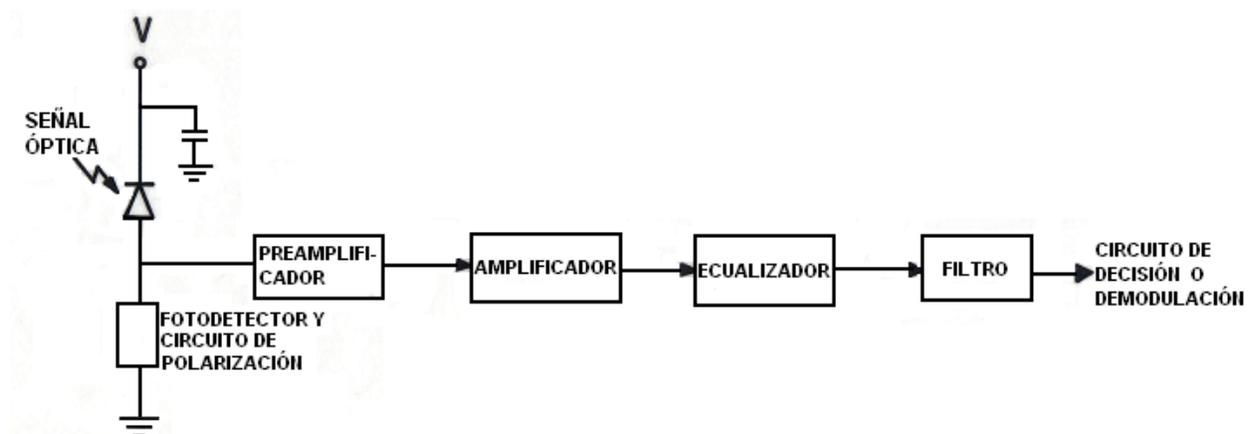


Figura 4-9. Diagrama a bloque de un receptor óptico.

"En la figura 4-9 se muestra un esquema a bloques de las distintas partes que integran un receptor óptico. A continuación se explica brevemente cada etapa de la figura 4-9"<sup>10</sup>.

<sup>7, 8, 9, 10</sup> "Introducción a la telecomunicación por fibra óptica" Fernando Navarrete Montes de Oca Editado por el IPN, 1991, CAP. 5, PAG.143.

“El fotodetector es la primera etapa del receptor por la que pasa la señal óptica. Su circuito equivalente es el siguiente”<sup>11</sup>.

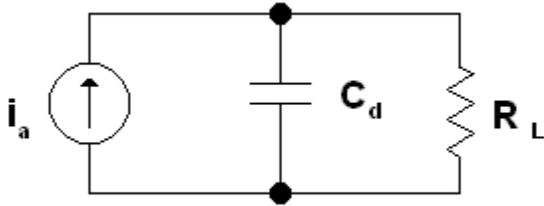


Figura 4-10. Fotodetector.

“El preamplificador es el dispositivo electrónico que nos permite elevar el nivel de la señal que proviene del fotodetector. La corriente de salida del fotodetector es muy pequeña, y al amplificarla producen ruidos que afectan la calidad de ella”<sup>12</sup>.

“El amplificador es la etapa donde se eleva la señal a los niveles requeridos para entregarla al decodificador. Los amplificadores y preamplificadores de un receptor óptico son similares”<sup>13</sup>.

Los tres tipos básicos de preamplificadores son:

#### 1.-Preamplificadore FET.

“Es utilizado para operación en baja frecuencia pues sus fuentes internas de ruido aparecen en altas frecuencias. Su circuito equivalente se muestra en la siguiente figura”<sup>14</sup>.

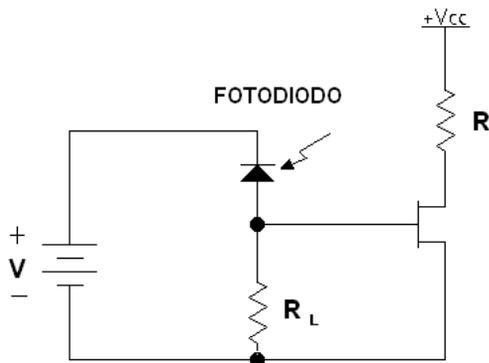


Figura 4-11. Preamplificador FET.

<sup>11, 12, 13, 14</sup> “Introducción a la telecomunicación por fibra óptica” Fernando Navarrete Montes de Oca Editado por el IPN, 1991, CAP. 5, PAG. 144 y 145.

## 2.- El preamplificador TBJ.

“Este tipo de preamplificador se utiliza en altas frecuencias, debido a que sus fuentes internas de ruido aparecen en bajas frecuencias. Su circuito equivalente es el siguiente”<sup>15</sup>.

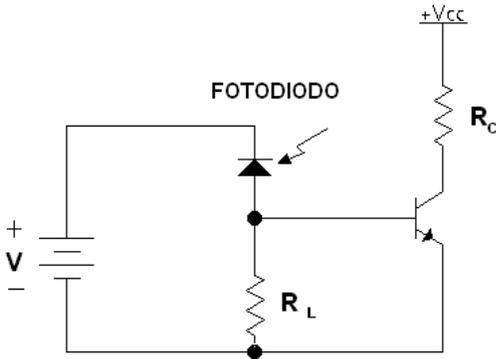


Figura 4-12. Preamplificador TBJ.

## 3.- El preamplificador de transimpedancia.

“Cuando se requiere un rango dinámico amplio se utiliza este tipo de amplificador. En este caso, existe una pérdida de sensibilidad; pues la fuente de ruido es el elemento de retroalimentación. Su circuito es mostrado en la siguiente figura”<sup>16</sup>.

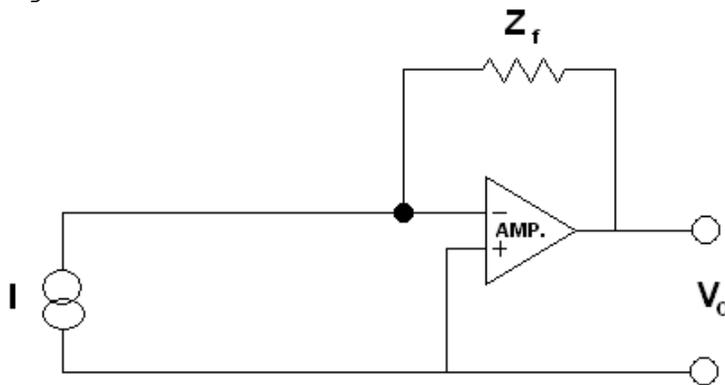


Figura 4-13. Preamplificador de transimpedancia.

“El ecualizador es un filtro paso-altas, cuya función principal es compensar la atenuación en altas frecuencias, ocasionadas por el efecto de integración del circuito RC del fotodetector”<sup>17</sup>.

<sup>15, 16, 17</sup> “Introducción a la telecomunicación por fibra óptica” Fernando Navarrete Montes de Oca Editado por el IPN, 1991, cap. 5, pags. 145.y 146

## CAPITULO 5

### MODULACION Y DEMODULACION (DIGITAL)

En el presente capítulo se trata el estudio de la comunicación digital. En esta introducción se inicia, en forma breve, el estudio de la modulación y demodulación digital. En las primeras secciones, antes de entrar en el estudio de la modulación digital, se definen algunos conceptos básicos para poder comprender la modulación. También se estudiará, más brevemente, la demodulación digital. Después, en las siguientes secciones, se desarrollan los formatos de modulación digital compatibles con las redes de fibra óptica. También se describen técnicas específicas de circuito para modulación de LD's y LED's.

En fibras ópticas la modulación es el proceso por el cual la información es mezclada sobre una portadora óptica. Y la demodulación es el proceso por el cual se obtiene la información transportada por la portadora, en el receptor.

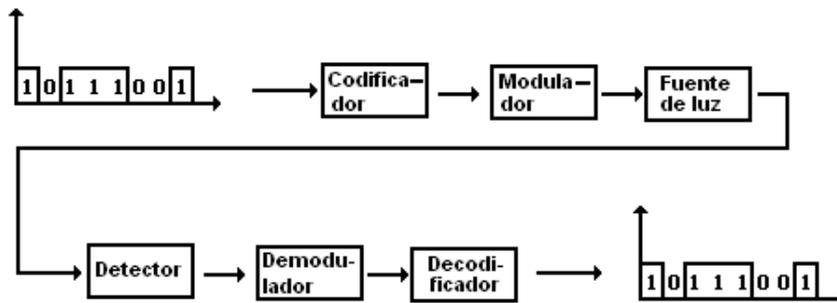


Figura 5-1.- Sistema de comunicación digital por fibra óptica.

En la figura 5-1 se muestra un sistema de comunicación digital por fibra óptica. En esta figura se pueden apreciar las etapas moduladora y demoduladora.

#### 5.1 El teorema del muestreo

“Una señal de banda limitada a B hertz (es decir, una señal cuya transformada de Fourier es igual a cero para todo  $|\omega| > 2\pi B$ ) queda determinada unívocamente por sus valores a intervalos uniformes con separación menor a  $1/2B$  segundos”<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> “Sistemas de comunicación” B.P. Lathi, Ed. Interamericana, 1986, cap. 2, pag. 62.

“El teorema establece que una señal de banda limitada a B hertz puede reconstruirse a partir de sus muestras tomadas uniformemente a razón no menor a B muestras por segundo”<sup>2</sup>.

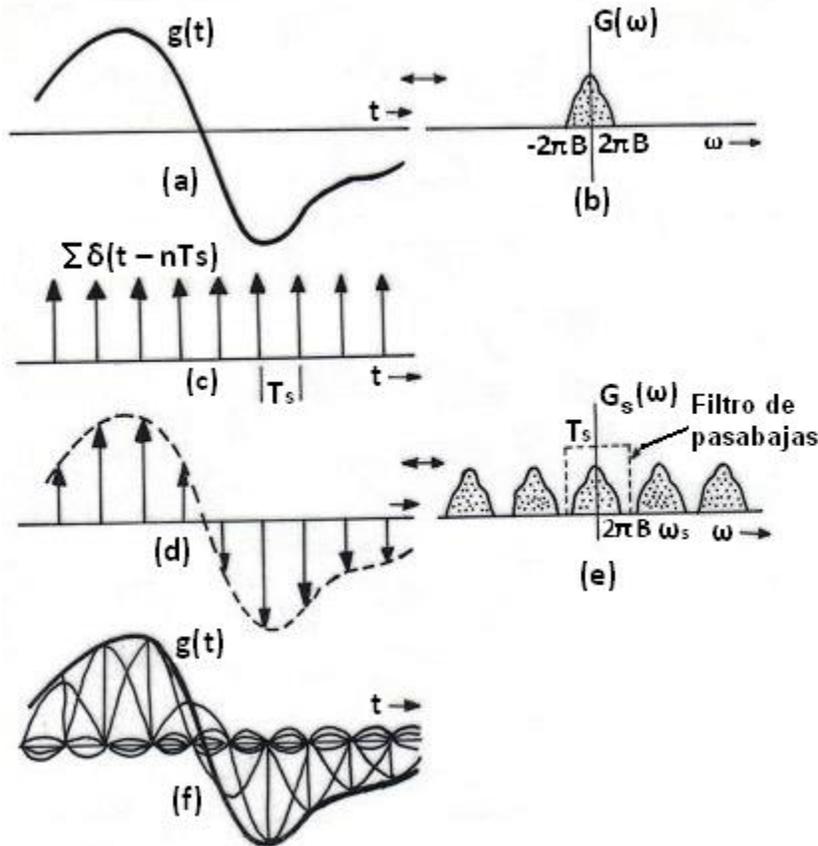


Figura 5-2. Muestreo de la señal.

“Para demostrar el teorema del muestreo, se considera una señal  $g(t)$  de banda limitada a B (figuras 5-2a y b). La multiplicación de  $g(t)$  por un tren de impulsos unitarios (fig. 5.2c) produce la señal muestreada  $g_s(t)$  (fig. 5-2d)”<sup>3</sup>.

$$g_s(t) = g(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (5-1)$$

“Utilizando la serie de Fourier para el tren de impulsos se tiene”<sup>4</sup>

<sup>2, 3, 4</sup> “Sistemas de comunicación” B.P. Lathi, Ed. Interamericana, 1986, cap. 2, pags. 62 y 63.

$$\begin{aligned}
 g_s(t) &= \frac{1}{T_s} g(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\omega_s t} \\
 &= \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t) e^{jn\omega_s t}
 \end{aligned} \tag{5-2}$$

"Se toman las transformadas de Fourier de ambos miembros y se tiene"<sup>5</sup>

$$G_s(\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{-\infty}^{\infty} G(\omega - n\omega_s) \quad \omega_s = \frac{2\pi}{T_s} \tag{5-3}$$

"La transformada de Fourier de la señal muestreada  $g_s(t)$  consta de  $G(\omega)$  repitiéndose a sí misma indefinidamente a cada  $\pm n\omega_s$ , para  $n=0,1,2,3\dots$  (fig.5-2e). No habrá traslapes entre ciclos sucesivos de  $G(\omega)$ , siempre que  $\omega_s \geq 2(2\pi B)$  o sea"<sup>6</sup>

$$\frac{2\pi}{T_s} \geq 4\pi B \tag{5-4}$$

Esto es,

$$T_s \leq \frac{1}{2B}$$

"En consecuencia, mientras el intervalo de muestreo  $T_s \leq 1/2B$  o la razón de muestreo sea mayor que  $2B$  muestras por segundo,  $G_s(\omega)$  constará de repetidores que no se traslapan de  $H(\omega)$  y, en consecuencia,  $g(t)$  se podrá recuperar de  $g_s(t)$  simplemente al hacerla pasar a través de un filtro pasabajas con una función de transferencia cuya característica de magnitud  $|H(\omega)|$  aparece con línea punteada en la figura 5-2e. Esto demuestra el teorema del muestreo. El máximo intervalo de muestreo permisible,  $T_s=1/2B$ , se conoce como intervalo de Nyquist, y el correspondiente índice de razón o muestreo ( $B$  muestras por segundo) se conoce como el índice de muestreo de Nyquist"<sup>7</sup>.

"Es evidente, de las ecs. (5-3) [y de la figura 5-2] que  $g(t)$  puede reconstruirse a partir de la señal muestreada  $g_s(t)$  haciendo pasar esta última a través de un filtro pasabajas de ganancia  $T_s$  y

<sup>5, 6, 7</sup> "Sistemas de comunicación" B.P. Lathi, Ed. Interamericana, 1986, cap. 2, pags. 63 y 64.

ancho de banda B. La función de transferencia  $H(\omega)$  de tal filtro es"<sup>8</sup>

$$H(\omega) = T_s \Pi(\omega/4\pi B) \quad (5-5a)$$

"La respuesta correspondiente al impulso unitario  $h(t)$  correspondiente es"<sup>9</sup>

$$h(t) = 2T_s B \text{ sinc}(2Bt) \quad (5-5b)$$

Se toma  $T_s$  como el intervalo de Nyquist ( $T_s=1/2B$ ) y se tiene

$$h(t) = \text{sinc}(2Bt) \quad (5-6)$$

"La entrada de este filtro es una sucesión de impulsos uniformemente separados por el filtro  $T_s$ . El n-ésimo impulso, que se localiza en  $t=nT_s$  tiene la intensidad  $g(nT_s)$ . La salida del filtro a partir de este impulso es  $g(nT_s) h(t-nT_s)=g(nT_s) \text{ sinc } 2B(t-nT_s)$ . La salida  $g(t)$  del filtro es la suma de las salidas de todos los impulsos de la sucesión de entrada. En consecuencia"<sup>10</sup>,

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s) \text{ sinc } 2B(t - nT_s) \quad (5-7a)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s) \text{ sinc}(2Bt - n) \quad (5-7b)$$

"Por lo tanto,  $g(t)$  se puede reconstruir a partir de sus muestras  $g(nT_s)$  conforme a la ec. (5-7). El proceso de reconstrucción se muestra en forma gráfica en la figura 5-2f"<sup>11</sup>.

## 5.2 Muestreo práctico.

"El muestreo de una señal  $g(t)$  por impulsos [que se conoce como muestreo instantáneo] es de interés solamente teórico. En la práctica, el muestreo se hace mediante pulsos angostos de anchura finita (fig. 5-3a). Se puede demostrar que  $g(t)$  se puede reconstruir a partir de las muestras de anchura finita de la figura 5-3b, mientras el muestreo se haga a un índice cuando menos igual al índice de Nyquist [es decir  $T_s \leq 1/2B$ ]"<sup>12</sup>

---

<sup>8, 9, 10, 11, 12</sup> "Sistemas de comunicación" B.P. Lathi, Ed. Interamericana, 1986, cap. 2, pag. 64 y 68.

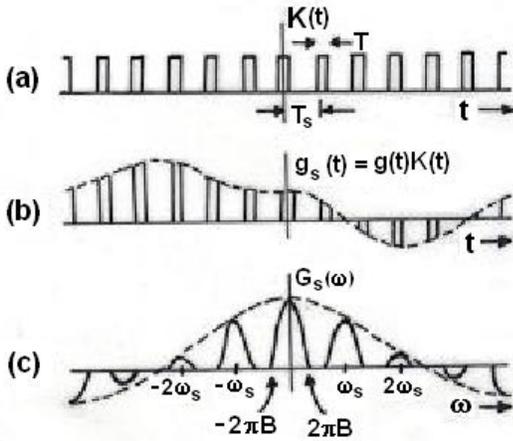


Figura 5-3. Muestreo práctico.

“La señal muestreada  $g_s(t)$  de la figura 5-3b es igual a  $g(t)$  multiplicada por un tren de pulsos rectangulares  $k(t)$  (fig. 5-3a), cuya serie de Fourier es”<sup>13</sup>:

$$k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} k_n e^{-jn\omega_s t} \quad \omega_s = \frac{2\pi}{T_s} \quad (5-8)$$

donde

$$\begin{aligned} k_n &= \frac{1}{T_o} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} A e^{-jn\omega_o t} dt \\ &= \frac{A}{\pi n} \operatorname{sen} \frac{n\omega_o \tau}{2} \\ &= \frac{A}{\pi n} \operatorname{sen} \frac{n\pi\tau}{T_s} \end{aligned} \quad (5-9)$$

Con  $A=1$

$$k_n = \frac{1}{\pi n} \operatorname{sen} \left[ \frac{n\pi\tau}{T_s} \right]$$

“La señal muestreada  $g_s(t)$  es el producto de  $g(t)$  y  $k(t)$ ”<sup>14</sup>

$$g_s(t) = g(t) k(t) \quad (5-10a)$$

<sup>13, 14</sup> “Sistemas de comunicación” B.P. Lathi, Ed. Interamericana, 1986, cap. 2, pag. 68.

$$\begin{aligned} &= g(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} k_n e^{jn\omega_s t} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} k_n g(t) e^{jn\omega_s t} \end{aligned} \quad (5-10b)$$

En consecuencia

$$G_s(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} k_n G(\omega - n\omega_s) \quad (5-10c)$$

"El espectro  $G_s(\omega)$  consta del espectro  $G(\omega)$  que se repite a sí mismo en forma indefinida cada  $\omega_s$  (fig. 5-3c). La  $n$ -ésima repetición (en  $\omega = n\omega_s$ ) se multiplica por  $K_n$ . En la figura 5-3c es evidente que  $g(t)$  se puede reconstruir a partir de  $g_s(t)$ , haciendo pasar ésta última a través de un filtro pasabajas de ancho de banda  $B$ "<sup>15</sup>.

"La deducción aquí es muy general, se podría haber utilizado cualquier otra señal periódica en lugar de  $k(t)$  para muestrear a  $g(t)$ . Esto solamente cambiará los valores de  $k_n$  (los coeficientes de la serie exponencial de Fourier de la señal periódica)"<sup>16</sup>.

### 5.3 El teorema del muestreo y sistemas de comunicación por pulsos.

"El teorema del muestreo abre una forma de establecer comunicación de señales analógicas mediante pulsos. La señal analógica se muestrea, y los valores de las muestras se utilizan para modificar ciertos parámetros de un tren de pulsos periódicos. Se pueden variar las amplitudes, anchuras o posiciones de los pulsos en proporción a los valores de las muestras. De acuerdo con esto, se tiene modulación por amplitud de pulso [MAP], modulación por anchura de pulso [MWP] o modulación por posición de pulso [MPP]. Aún existe otra forma que es la modulación por código de pulso [MCP]. La figura 5-4 muestra la señal analógica  $g(t)$  y sus correspondientes formas de onda moduladas"<sup>17</sup>.

---

<sup>15, 16, 17</sup> "Sistemas de comunicación" B.P. Lathi, Ed. Interamericana, 1986, cap. 2, pag. 69 y 70.

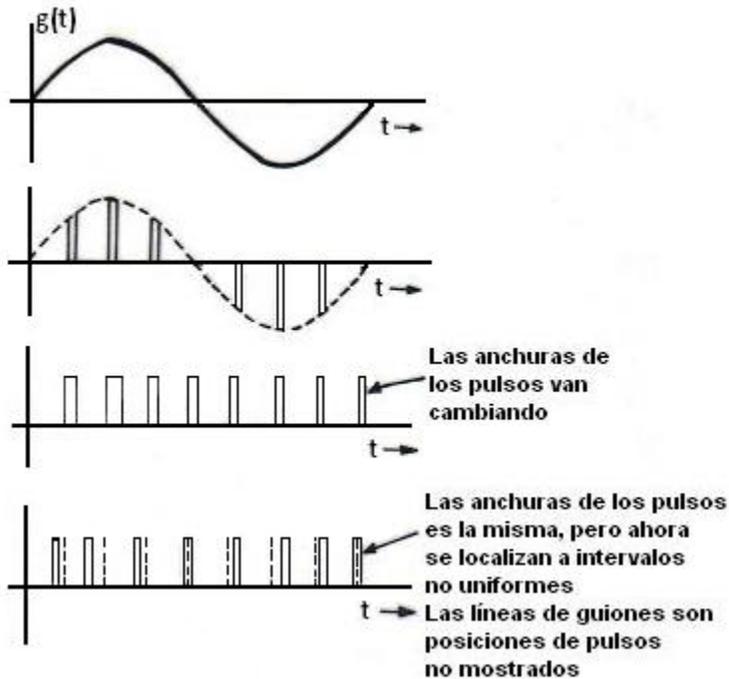


Figura 5-4. Señales moduladas en pulso. MAP, MWP, MPP.

#### 5.4 Modulación por codificación de pulso.

“En la moderna tecnología de las comunicaciones, las señales analógicas muestreadas se digitalizan antes de ser transmitidas. Entonces, las señales digitales resultantes pueden ser modificadas en cualquier forma equivalente deseada. Los sistemas que implican la transmisión de señales digitalizadas y codificadas se denominan comúnmente sistemas de modulación por codificación de pulsos [MCP]. Los sistemas digitales binarios constituyen la clase más común de sistemas MCP que se encuentran”<sup>18</sup>.

“Algunas de las ventajas en la utilización de los sistemas de este tipo son:

1. Las señales pueden regenerarse o rearmarse periódicamente durante la transmisión, puesto que la información ya no se encuentra contenida en la amplitud continuamente variable de los pulsos, sino que consiste de símbolos discretos.
2. Las señales se pueden procesar según convenga.

<sup>18</sup> “Transmisión de información, modulación y ruido” Mischa Shwarz, Ed. Mc Graw Hill, 1990 cap. 3, pag. 115.

3. Mediante códigos, el ruido y la interferencia pueden ser minimizados apropiadamente<sup>19</sup>.

“El proceso de digitalización de las señales originalmente analógicas se conoce como proceso de cuantización; el cual consiste en la subdivisión de las amplitudes de las señales en un predeterminado número de niveles discretos de amplitud. La cuantización produce una pérdida irreparable de información, debido a que es imposible reconstruir la señal analógica original a partir de su versión cuantizada. A causa del ruido que se introduce durante la transmisión y en el receptor, el circuito demodulador o detector no es capaz de distinguir entre las variaciones muy finas de la amplitud de una señal. Además, el último receptor de la información [los oídos en el caso de sonidos o música, los ojos en el caso de imágenes] presenta limitaciones en cuanto a la más fina graduación que puede distinguir. Esta última limitación, que se refiere a la imposibilidad de distinguir entre todas las amplitudes posibles, hace que sea aplicable el proceso de cuantización<sup>20</sup>.”

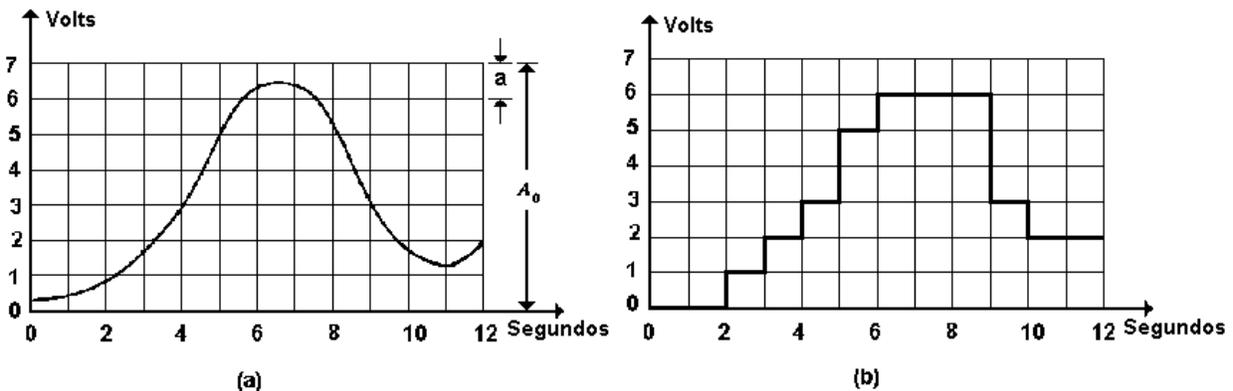


Figura 5-5. Cuantización y muestreo. (a) Señal original. (b) Versión cuantizada muestreada.

En un sistema específico, los pulsos muestreados deben cuantizarse, o bien, los procesos de cuantización y muestreo pueden realizarse simultáneamente; éste último procedimiento se representa en la figura 5-5.

“La variación total de amplitud de  $A_0 = 7$  se divide en los niveles de amplitud igualmente espaciados  $a = 1$  V de separación. Existen así  $M = A_0/a + 1$  posibles niveles de amplitud, incluyendo el nivel cero. Las muestras de la figura 5-5 se muestran tomadas

<sup>19, 20</sup> “Transmisión de información, modulación y ruido” Mischa Shwarz, Ed. Mc Graw Hill, 1990 cap. 3, pag. 115 y 116.

cada segundo y se selecciona para ser transmitido el nivel discreto de amplitud que se encuentra más próximo"<sup>21</sup>.

### **5.5 Sistemas de portadora digital.**

Hasta este punto se han estudiado los sistemas digitales de banda base, donde las señales se transmiten directamente sin corrimiento alguno en las frecuencias de la señal.

Las señales de banda base producidas por diferentes fuentes de información no son siempre adecuadas para la transmisión directa a través de un canal dado. Estas señales son en ocasiones fuertemente modificadas para facilitar su transmisión. Este proceso de conversión se conoce como modulación. En este proceso se utiliza una señal de banda base para modificar algún parámetro de una señal portadora de alta frecuencia.

"Es oportuno aquí hacer el comentario acerca de las señales moduladas en pulso MAP, MWP, MPP, MCP y MD. A pesar del término modulación estas señales son de banda base. El término modulación se usa aquí en otro sentido. Los esquemas de modulación en pulso son en realidad esquemas de codificación de banda base y dan por resultado señales de banda base. Estas señales deben aún modular a una portadora con el fin de trasladar sus espectros"<sup>22</sup>.

Una portadora es una señal senoidal de alta frecuencia y uno de sus parámetros (tal como la amplitud, la frecuencia o la fase) se varía en proporción a la señal de banda base. De acuerdo a esto se obtiene la modulación en amplitud (AM), la modulación en frecuencia (FM), o la modulación en fase (PM).

### **5.6 Manipulación por encendido y apagado.**

En la manipulación por encendido y apagado [On-Off keyed OOK] se conmuta la amplitud de la portadora óptica entre dos niveles: nivel cero (apagado) y nivel uno (encendido). Esto se puede ver en la figura 5-6.

---

<sup>21</sup> "Transmisión de información, modulación y ruido" Mischa Shwarstz, Ed. Mc Graw Hill, 1990 cap. 3, pag. 115 y 116.

<sup>22</sup> "Sistemas de comunicación" B.P. Lathi, Ed. Interamericana, 1986, cap. 4, pag. 213.

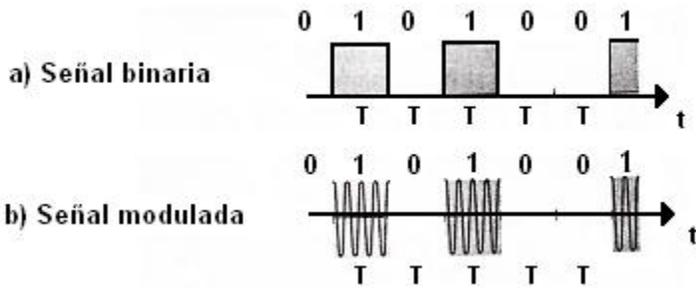


Figura 5-6. Señal de manipulación por encendido y apagado.

El espectro de la señal OOK puede ser obtenido empleando el teorema de la transformada de Fourier. "La transformada de Fourier de una señal multiplicada por una función exponencial es la transformada de Fourier de la señal original transformada en frecuencia". Esto es, si la función  $f(t)$  tiene una transformada de Fourier  $F(\omega)$ , entonces la transformada de Fourier de  $e^{j\omega_a t} f(t)$  es  $F(\omega - \omega_a)$ ; donde  $j$  es  $\sqrt{-1}$ ,  $t$  es el tiempo,  $\omega_a$  es una frecuencia constante, y  $\omega$  es la señal de frecuencia en radianes por segundo.

El espectro de la señal OOK dependerá de la secuencia particular que se transmita. Considerando a  $f(t)$  una secuencia particular de unos y ceros, entonces la señal OOK es:

$$f_c(t) = A f(t) \cos \omega_c t \quad (5-11)$$

donde  $f(t) = 1$  o  $0$ , sobre intervalos de  $T$  segundos,  $\omega_c$  es la frecuencia de la portadora. Si  $\cos(\omega_c t)$  es escrito en la forma exponencial y los teoremas de las transformadas de Fourier es empleando la transformada de Fourier para  $f_c(t)$ , ésta puede ser escrita:

$$f_c(\omega) = \frac{A}{2} [F(\omega - \omega_c) + F(\omega + \omega_c)] \quad (5-12)$$

El efecto de la multiplicación de  $\cos \omega_c t$  es el corrimiento de la señal de banda base hasta la frecuencia  $\omega_c$  (ver fig. 5-7). Esta es la forma general de una señal de A.M.; contiene bandas laterales simétricamente distribuidas alrededor de la frecuencia de la portadora  $\omega_c$ ; el ancho de banda requerido para transmitir la portadora de modulación en amplitud  $f_c(t)$  es dos veces el ancho de banda de la señal de modulación  $f(t)$ .

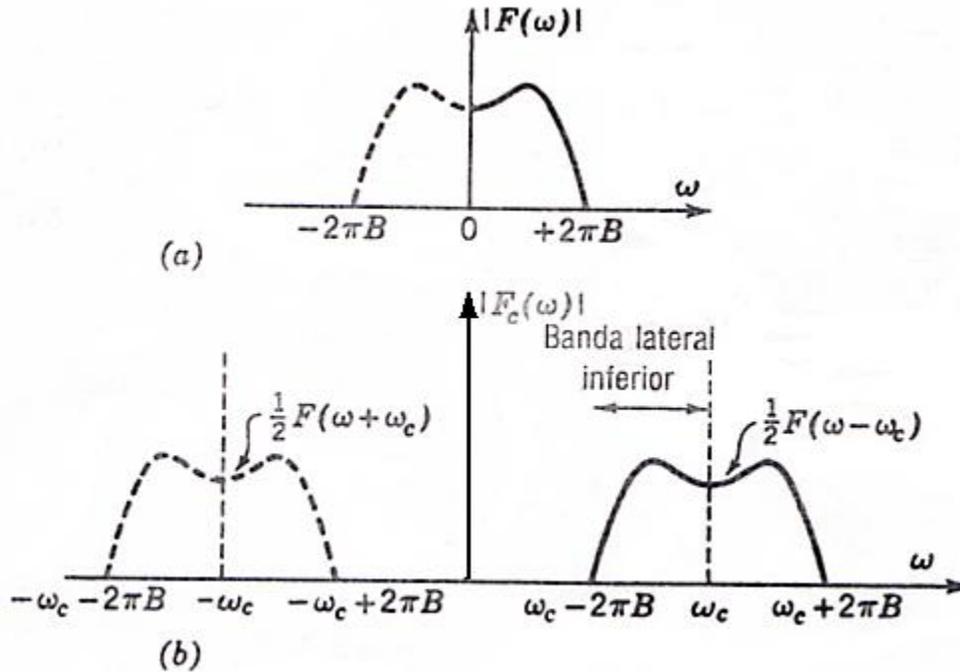


Figura 5-7. de amplitud de la onda modulada en amplitud. a) Espectro de la señal moduladora. b) Espectro de la onda modulada en amplitud.

### 5.7 Manipulación por corrimiento de frecuencia (FSK)

En este caso, se considera primero una forma rectangular (para simplificar):

$$\text{ó } \left. \begin{aligned} f_{c1}(t) &= A \cos \omega_1 t \\ f_{c2}(t) &= A \cos \omega_2 t \end{aligned} \right\} -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (5-13)$$

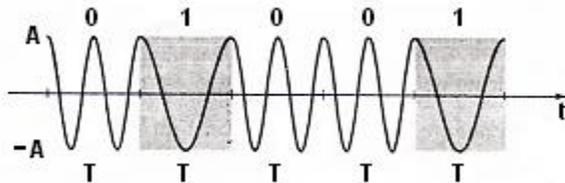


Figura 5-8. Onda de FSK.

En la figura 5-8, el 1 corresponde a la frecuencia de  $f_1$  y el 0 a la frecuencia  $f_2$ . Una representación alternativa de la señal de FSK consiste en hacer  $f_1 = f_c - \Delta f$ , y  $f_2 = f_c + \Delta f$ . Las dos frecuencias difieren en  $2\Delta f$  hertz. Por lo tanto.

$$f_c(t) = A \cos(\omega_c + \Delta\omega)t \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (5-13a)$$

Entonces la frecuencia se desvía  $\pm \Delta f$  alrededor de  $f_c$ ;  $\Delta f$  se denomina desviación de frecuencia. En general, el espectro de frecuencia de la señal FSK  $f_c(t)$  es difícil de obtener

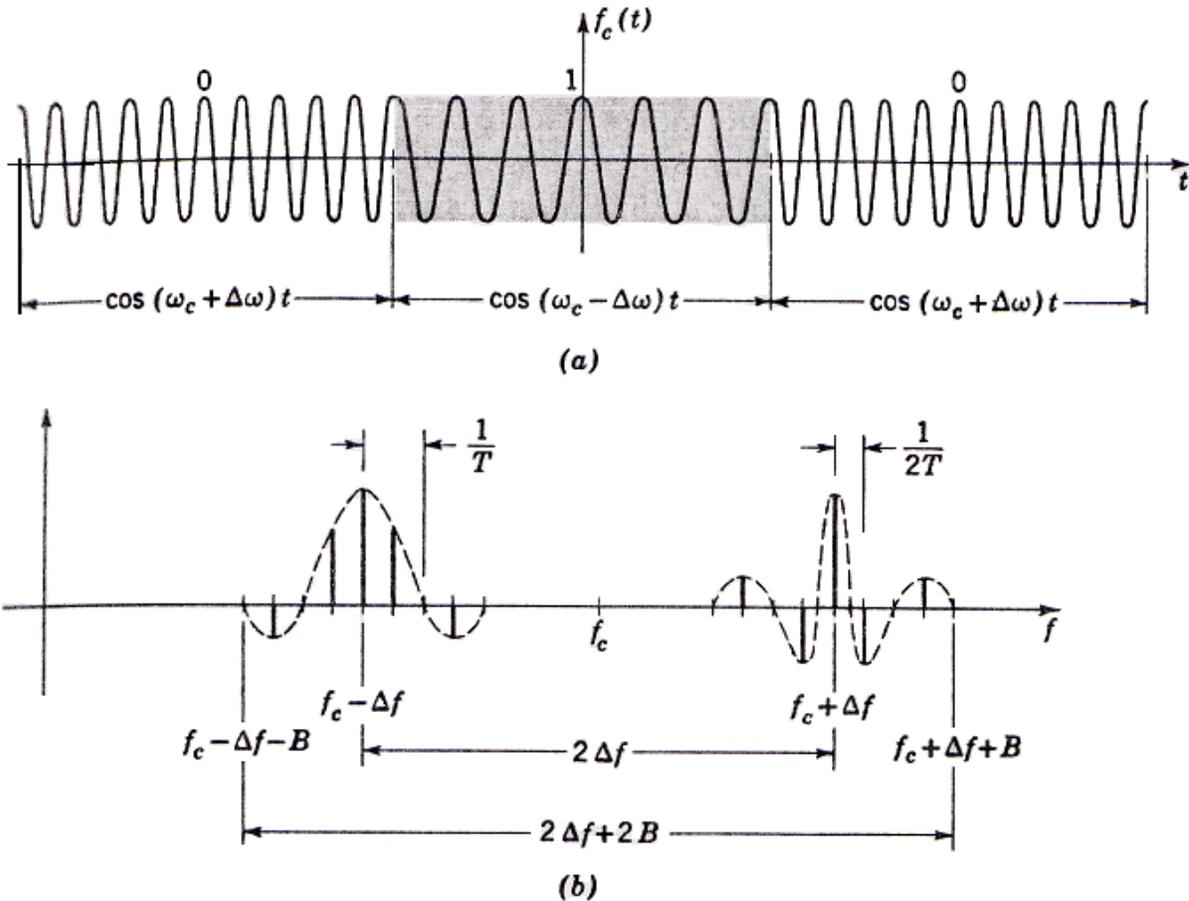


Figura 5-9. Espectro de la onda periódica de FSK. a) Señal periódica de FSK. b) Espectro (sólo de las frecuencias positivas).

"Suponiendo que el mensaje binario consiste de una secuencia alternada de unos y ceros. Si ambas frecuencias son múltiplos del recíproco de período binario  $T$  (es decir  $f_1 = m/T$ ,  $f_2 = n/T$ ,  $m$  y  $n$  son enteros) y están sincronizadas en fase, la señal FSK es la función de la figura 5-9. También puede visualizarse como la superposición lineal de dos señales periódicas de OOK"<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> "Transmisión de información, modulación y ruido" Mischa Shwarstz, Ed. Mc Graw Hill, 1990 cap. 3, pags. 231.

### 5.8 Manipulación por corrimiento de fase (PSK)

“En este caso se tiene que la señal manipulada por corrimiento de fase está dada por”<sup>24</sup>

$$f_c(t) = \pm \cos \omega_c t \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (5-14)$$

“Si se ha supuesto una forma rectangular para los pulsos. Aquí un 1 en la hilera binaria de la banda base corresponde a la polaridad positiva, y el 0 corresponde a la negativa. La señal PSK corresponde entonces esencialmente a una hilera binaria polar NRZ, trasladada hacia arriba en frecuencia, un ejemplo de ello se muestra en la figura 5-10. Las transiciones discontinuas de fase al comienzo y al final de cada intervalo de bit, cada vez que tiene lugar una transición entre 1 y 0 ó entre 0 y 1, se suavizan durante la transmisión gracias a la forma que se ha usado. La información, independientemente de la polaridad, es retenida en el centro de cada intervalo, de manera que la decodificación en el receptor se lleva a cabo en las proximidades del centro de los pulsos”<sup>25</sup>.

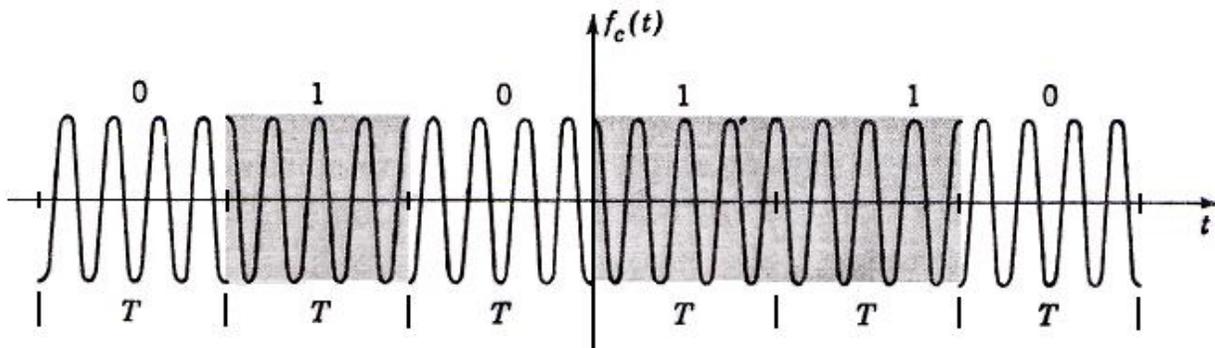


Figura 5-10. Señal de PSK.

### 5.9 Detección de señales binarias.

El proceso de separar una señal de banda base ó moduladora de una portadora modulada se denomina demodulación o detección.

Existen esencialmente dos métodos comunes de demodulación:

- a) Detección síncrona o coherente

<sup>24, 25</sup> “Transmisión de información, modulación y ruido” Mischa Shwarz, Ed. Mc Graw Hill, 1990 cap. 3, pags. 233 y 234.

b) Detección de envolvente.

La detección síncrona consiste en la multiplicación de la señal que llega por la frecuencia de la portadora, la que se genera en el receptor y después, la señal multiplicada resultante se hace pasar por un filtro pasabajas. El método de detección síncrona se esquematiza en la figura 5-11.

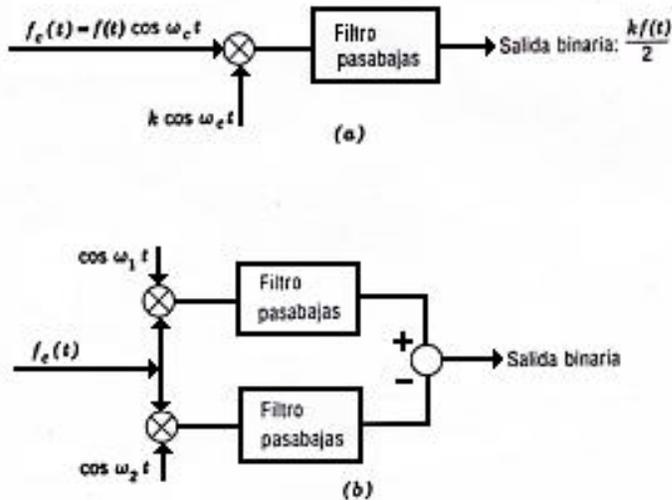


Figura 5-11. Detección síncrona. a) Señales de OOK o de PSK. b) Señales de FSK.

En la detección síncrona se requiere que se genere localmente una portadora de la misma frecuencia y que esté también sincronizada en fase. Aunque el sincronismo en fase es muy difícil de obtener.

La detección de envolvente evita los problemas de tiempo y de fase de la detección síncrona. En este caso la frecuencia que llega se hace pasar a través de un dispositivo no lineal y un filtro pasabajas.

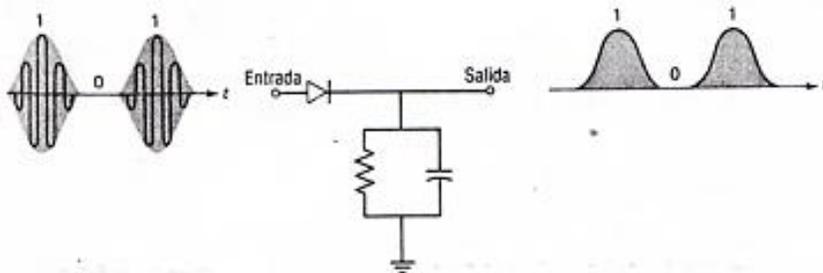


Figura 5-12. Detector de envolvente

Una forma común del detector de envolvente es un diodo rectificador de media onda (el dispositivo no lineal) seguido por un filtro pasabajas (ver fig. 5-12). Tal como su nombre lo indica, la salida del receptor representa la envolvente de la onda de alta frecuencia que llega. La constante RC es lo suficientemente grande como para retener la amplitud de la entrada durante muchos ciclos de la portadora, aunque esto es lo bastante pequeña en comparación con un período binario, como para descargarse cuando la señal binaria cambia.

Sin embargo existe una dificultad; la señal PSK tiene una envolvente constante (fig. 5-10) de manera que no puede emplearse un detector de envolvente. El sistema PSK requiere forzosamente la detección sincrónica. Puede evitarse el uso de la detección sincrónica adoptando la detección de envolvente, pero el precio de requerir el uso de sistemas de transmisión FSK u OOK, en lugar del óptimo sistema PSK.

### **5.10 Codificación de línea.**

En el diseño de un enlace por fibra óptica, una consideración importante es el formato de la señal óptica transmitida. Esto es de suma importancia, puesto que en cualquier enlace digital de datos por fibra óptica, el circuito de decisión en el receptor debe ser capaz de extraer en tiempo preciso información de la señal óptica entrante. Los tres principales objetivos de temporización son para permitir a la señal ser muestreada por el receptor en el tiempo en que la relación señal-a-ruido es un máximo, para mantener la apropiada separación de pulso, y para indicar el principio y final de cada intervalo de tiempo. En la codificación de la señal se usa un grupo de reglas para ordenar los símbolos de la señal en un patrón particular, este proceso es llamado codificación de canal o de línea. Una de las principales funciones de un código de línea es introducir redundancia dentro de la serie de datos para el propósito de minimizar errores que resultan de efectos de interferencia de canal. Algunos de los esquemas más comunes de comunicación se muestran en la figura 5-13.

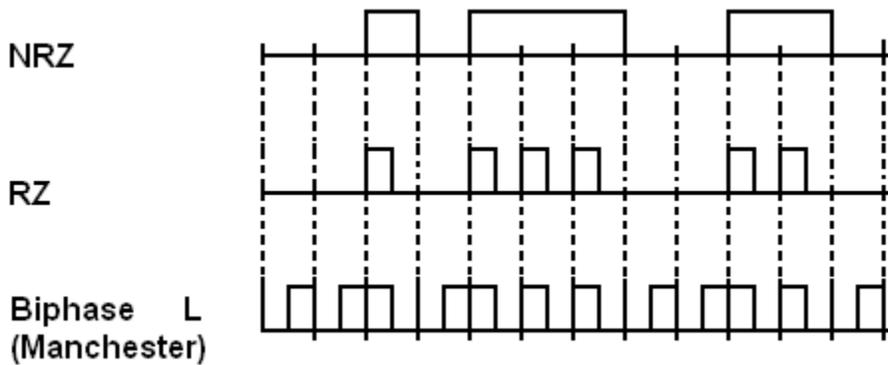


Figura 5-13. Esquemas comunes de codificación.

Una descripción breve de los códigos NRZ, RZ, biphase y Miller será dada a continuación.

### 5.10.1 Códigos NRZ.

Un número de diferentes códigos NRZ son extensamente usados y sus anchos de banda sirven como referencias para todos los otros grupos de códigos. El código NRZ más simple es el NRZ - al nivel cero (ó NRZ-L) común 1, que es representado por un voltaje de nivel alto, y el cero que representa un voltaje de nivel bajo.

"Algunos códigos de no regreso a cero, como marca de no regreso a cero (NRZ-M); y el espacio de no regreso a cero (NRZ-S), son conocidos como códigos diferenciales. La presencia de un 1 ó cero está determinada con respecto al valor del voltaje de alto nivel durante el intervalo de tiempo previo"<sup>26</sup>.

Los códigos NRZ son simples para generar y decodificar, pero no poseen un monitoreo inherente de error ó capacidad de corrección. Además presentan la desventaja de tener una componente de C.D. y ello disminuye las oportunidades de obtener la señal de reloj. En suma, una larga serie de unos o ceros no contienen información de temporización debido a que no hay niveles de transición.

### 5.10.2 Código RZ.

<sup>26</sup> Tesis "Principios de la comunicación electrónica por medio de fibras ópticas, empleando Laser" Torres merino Juan Manuel, Hernández Vargas Rubén, cap. 3, pag. 95.

El código RZ emplea sólo una mitad de la duración del intervalo de bit, si una serie de 1's está siendo enviada, la representación del código RZ es una serie de pulsos, en donde cada uno tiene una duración igual a la mitad del rango de bit. Una larga serie de ceros puede causar pérdida de sincronización de tiempo. Los formatos RZ tienen los mismos problemas con los niveles de C.D. y sincronía que los códigos NRZ.

### 5.10.3 Código bifase

Los códigos bifásicos tienen a lo menos una transición en el intervalo del bit. Los códigos bifásicos son: bifase-L (Manchester), bifase-S (S = Espacio) y bifase-M (M = Marca). Estos códigos son atractivos en sistemas de fibra óptica.

En el código Manchester hay una transición en el centro de cada intervalo de bit. Un 1 es representado por un nivel alto de voltaje y un 0 está representado por un bajo nivel de voltaje. Una transición del nivel alto al nivel bajo en la mitad del intervalo de bit representa un 1, y una transición del bajo al alto indica un 0.

Los códigos bifásicos tienen las siguientes ventajas:

1. Fácil sintonía.
2. Se elimina fácilmente la componente de C.D.
3. Algunas facilidades inherentes para la detección de errores.

Los códigos bifásicos son ampliamente usados en sistemas de fibras ópticas. El código Manchester ha sido registrado por el Instituto de Ingenieros Electricistas y en Electrónica (IEEE) Standard 802.3 para banda base de cable coaxial.

### 5.10.4 Código Miller.

"El código Miller incorpora a por lo menos una transición (pero no más de dos transiciones) por cada dos bits. Esto da las propiedades de autorreloj, pero no incrementa los rangos de modulación arriba del rango de bits [el máximo rango para NRZ]. Un 1 es representado por una transición en la mitad del intervalo de bit. Un 0 está representado por una no transición en la mitad del

intervalo de bit. Si el bit siguiente es cero, una transición se añade al final del intervalo de bit representando un 0<sup>27</sup>.

### 5.11 Modulando LED's.

La luz es producida en los LED's por una recombinación de electrones y huecos en la juntura. La longitud de onda pico  $\lambda$  emitida por una transición directa LED está relacionada por los espacios de energía  $E_g$  del material semiconductor por

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (5-15)$$

“donde h es la constante de Planck ( $6.62 \times 10^{-34}$  J-s) y c es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s). La longitud de onda pico emitida por una transición indirecta, el LED varía con el nivel de impurezas presentadas. Las longitudes de onda de algunos tipos de LED's se muestran en la tabla 5-1<sup>28</sup>.

Tabla 5-1. Longitudes de onda de algunos tipos de LED's.

TIPO DE LED	Longitud de onda (nm)	Transición
GE	1880	Indirecta
Si	1140	Indirecta
GaAs	910	Directa
GaP	560	Indirecta
GaAs <sub>60</sub> P <sub>40</sub>	650	Directa

Las hojas de datos de LED's, que dá el fabricante, normalmente incluyen información tal como : la longitud pico  $\lambda_p$ , una gráfica de la longitud de onda contra la intensidad relativa, la capacitancia del diodo medida en una frecuencia correspondiente entre el ánodo y el cátodo con la polarización de la corriente correspondiente, la respuesta a la potencia óptica relativa contra la frecuencia, la intensidad de radiación relativa contra el eje subtendido del diodo, la potencia óptica relativa de salida contra

<sup>27</sup> Tesis “Principios de la comunicación electrónica por medio de fibras ópticas, empleando Laser” Torres merino Juan Manuel, Hernández Vargas Rubén, cap. 3, pag. 97.

<sup>28</sup> Tesis “Principios de la comunicación electrónica por medio de fibras ópticas, empleando Laser” Torres merino Juan Manuel, Hernández Vargas Rubén, cap. 3, pag. 100.

la corriente promedio y la dependencia de la temperatura de una potencia óptica de salida.

### 5.12 Modulación digital de un LED

Los moduladores digitales sólo realizan el encendido o apagado de un LED. Es recomendable que en el estado encendido del LED, la corriente sea independiente de la señal de entrada, de esta manera la potencia de salida será la misma para cada pulso, en el cual las entradas sucesivas de las señales varían un poco. En el estado apagado, la emisión del LED sería baja, creando una gran razón de potencia entre los niveles encendido-apagado.

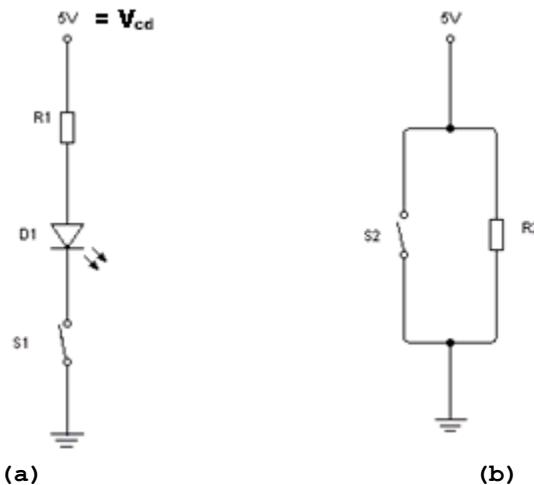


Figura 5-14. Esquemas de moduladores digitales. a) Interrupción en serie. b) Interrupción en paralelo.

Los circuitos de la figura 5-14 ilustran dos conceptos que satisfacen los requisitos mencionados. Para la figura 5-14a ((interrupción serie), un interruptor no permite el paso de la corriente (LED apagado), cerrando el interruptor se da paso a la corriente

$$I = \frac{V_{cd} - V_d}{R_1} \quad (5-16)$$

donde  $V_d$  es la caída de voltaje en polarización directa del LED, la resistencia  $R_1$  y la fuente de voltaje  $V_{cd}$  determinan la corriente para un diodo dado. La resistencia  $R_1$  limita la corriente para proteger al LED de corrientes excesivas. El circuito de la figura 5-14b trabaja de forma similar al circuito serie. Cuando el interruptor se cierra la corriente circula por éste a tierra y el

LED se apaga. Abriendo el interruptor la corriente circula a través del LED y lo enciende.

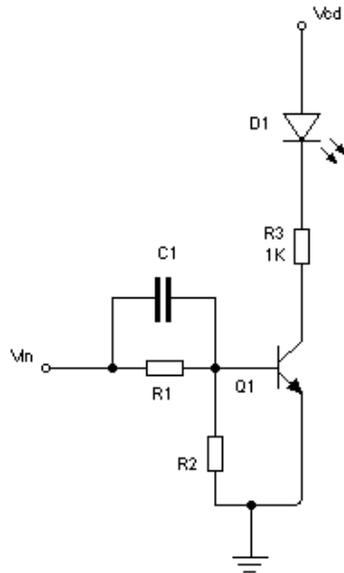


Figura 5-15. Modulador digital de un LED empleando un transistor como interruptor.

Los transistores, en circuitos prácticos, frecuentemente proporcionan el mecanismo de interrupción. En la figura 5-15 se ilustra el modulador transistorizado (interrupción en serie). Las características del transistor de la figura 5-15 muestran que es pequeña la corriente de colector cuando la corriente de base es cero (esta es la condición de interruptor abierto); y el voltaje de colector -emisor es pequeño, cuando la corriente de base es grande (esta es la condición de interruptor cerrado). La corriente en la condición de encendido es

$$I_c = \frac{V_{cd} - V_d - 0.3}{R} \quad (5-17)$$

El transistor no sólo produce interrupción, sino también entrega una amplificación. Una pequeña entrada de corriente (~ 1 ma) controla las corrientes (50 a 100 ma) requeridas por el LED. El capacitor a la entrada incrementa la velocidad del circuito, si es necesario. Este modulador trabaja arriba de 30 Mhz.

### 5.13 Modulación digital de LD's.

Los LD's presentan más problemas al diseñador de circuitos que los LED's. Estos problemas son a partir de:

1. Debe tener una corriente de umbral.
2. La corriente de umbral depende de la edad del LD.
3. La corriente de umbral depende de la temperatura.
4. La emisión de la longitud de onda depende de la temperatura.

Los sistemas digitales normalmente operan exactamente debajo del umbral en el estado apagado. La corriente de C.D. es  $I_{dc} \approx I_{th}$ , como se ilustra en la figura 5-16. La operación cercana al umbral minimiza el retardo de encendido.

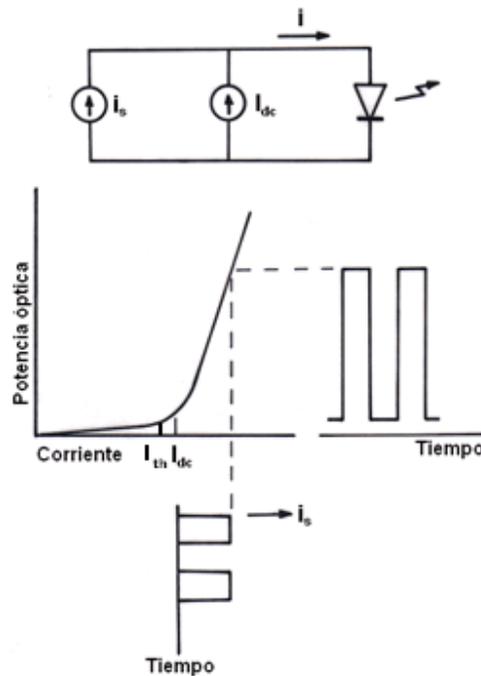


Figura 5-16. Modulación digital de un diodo laser.

La longitud de onda portadora cambia sobre el orden de  $0.2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . Esto corresponde a una frecuencia de cambio de  $69 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$  a  $82 \text{ }\mu\text{m}$ . Para algunas aplicaciones los cambios son insignificantes, mientras que para otras, éste pudiera ser importante. Para operaciones de lazo cercano al mínimo de longitud de onda de dispersión, un cambio en el camino de la longitud de onda óptima, contribuye a un decrecimiento en el ancho de banda del sistema. Sistemas con longitudes de onda multiplexadas también requieren un alto grado de estabilidad en la longitud de onda portadora que minimice un cruce de mensajes entre los canales adyacentes.

La dependencia de la temperatura puede ser superada por enfriamiento del LD. Las estrategias incluyen un adecuado control

de calor y enfriamiento termoeléctrico, las variaciones del umbral pueden ser corregidas por incremento (ó decremento) de la corriente de C.D. para compensar la temperatura o cambios inducidos en la edad de las características del LD.

El circuito de la figura 5-17 emplea un MOSFET canal n de GaAs, que es conveniente para moduladores digitales de alta velocidad. Pueden ser obtenidos Rangos mayores a 1 Gbps.

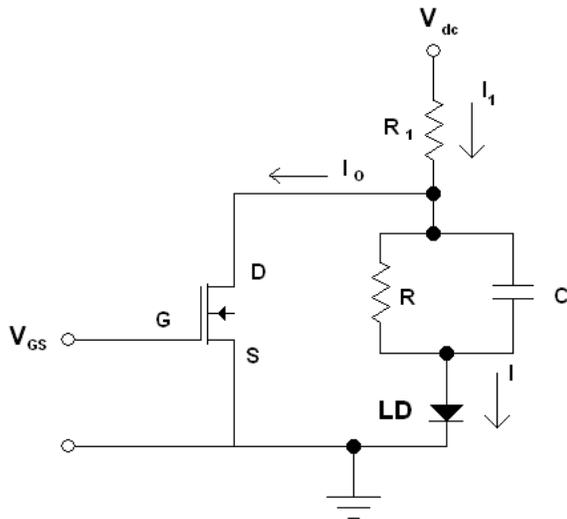


Figura 5-17. Modulador digital de un diodo laser.

El circuito mostrado es un ejemplo de un modulador de interrupción paralelo. El voltaje de compuerta  $V_{GS}$  controla el flujo de corriente en el circuito. Cuando  $V_{GS}$  es pequeño la resistencia es baja del transistor del drenador al canal de la fuente, mientras que un voltaje negativo grande produce una alta resistencia del canal. El modulador en el estado apagado, el voltaje de la compuerta es bajo, y permite que una fracción de la corriente en la resistencia  $R_1$  un "bypass" en la rama que contiene el LD y fluya a través del transistor. El voltaje de la compuerta  $V_{GS}$  es ajustado tal que la corriente del LD esté en el valor del umbral. Un incremento (más negativo) del voltaje  $V_{GS}$  enciende el LD. Ahora mucha de la corriente suministrada pasa a través del LD por la alta resistencia que presenta el MOSFET.

El voltaje del LD (típicamente menor a 2V) es más pequeño que el voltaje del drenador - fuente  $V_{DS}$  requerido para la operación del MOSFET. La resistencia  $R$ , en serie con el LD, asegura que  $V_{DS}$  sea lo suficientemente grande en los dos estados, de apagado y encendido. El capacitor  $C$  mejora la velocidad de la interrupción del circuito.

## CAPITULO 6

### LINEAS MULTIPLEXADAS (MULTICANALIZACION) .

En los sistemas de comunicaciones se analiza la transmisión de información entre dos puntos, por ejemplo: la emisión de radio y televisión, las comunicaciones vía satélite, la comunicación a través de líneas telefónicas, etc. Las señales que se transmiten de un punto a otro utilizan un canal, esto es, un medio de transmisión, por el cual se propagan. Este medio de transmisión puede ser una línea telefónica (como fibra óptica o cable coaxial), o el espacio abierto (esto en transmisión de radio y TV). Frecuentemente se define como canal o medio de transmisión, aunque en algunas ocasiones se define como canal no solamente al medio sino también parte del equipo de transmisión y recepción, pero para no entrar en detalles y plantear que es la multicanalización (que es parte del objetivo de este capítulo), consideramos que canal es el medio por donde se propaga, o transmite, una señal. De acuerdo a esto, podemos decir que no es entonces posible transmitir directamente por un canal dos o más señales simultáneamente sin que tengamos interferencia en el punto receptor. Sin embargo, la transmisión de varias señales por un mismo canal es posible, sin que exista interferencia, utilizando las técnicas de multicanalización de tiempo, multicanalización por división de frecuencia o multicanalización por división de longitud de onda.

De lo anterior podemos decir que se entiende por multicanalización a la transmisión de varias señales por un mismo canal.

Ahora que hemos planteado que es lo que entendemos por multicanalización, podemos estudiar los métodos más comunes de esta técnica. Empezaremos con multicanalización por división de frecuencia, después con multicanalización por división de tiempo, haciendo una comparación de estos dos métodos de multicanalización. Y por último se examinará la multicanalización por división de longitud de onda.

#### 6.1 Multicanalización por división de frecuencia.

En la multicanalización por división de frecuencia se traslada el espectro en frecuencia de las diferentes señales (a multicanalizar) a un rango adecuado de frecuencia para que no se

traslapan. Sabemos que para trasladar el espectro en frecuencia de una señal a otra frecuencia debemos utilizar la modulación: de esta manera se puede transmitir simultáneamente por un canal un gran número de señales moduladas con portadoras de diferente frecuencia (suficientemente espaciadas para evitar el traslape o interferencia).

"En el extremo receptor, se separan las diferentes señales mediante filtros apropiados; sin embargo, los espectros individuales así separados, no representan la señal original ya que han sufrido una traslación. Así, para obtener la señal original, se debe trasladar cada espectro en la cantidad adecuada, de modo que recupere su forma original"<sup>1</sup>.

"Como ejemplo, supongamos que se desea enviar  $n$  señales simultáneamente por un medio de transmisión cada una de las cuales está limitada en banda a  $w_m$  radianes por segundo. Las  $n$  señales modulan a las portadoras  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , de manera tal que cada portadora queda separada de la adyacente en por lo menos  $2w_m$  radianes por segundo. Cada una de las señales moduladas tiene un ancho de banda de  $2w_m$  y está centrada en las frecuencias  $w_1, w_2, \dots, w_n$ . (Existe un espectro similar para frecuencias negativas). Esto se indica en las figuras 6-1a y b. La figura 6-1a nos muestra el espectro de cada una de las señales y la figura 6-1b el espectro total de las señales moduladas en el transmisor. En el receptor, se separan los diferentes espectros con filtros de paso de banda adecuados. Después se demodulan las señales para obtener las originales (figura 6-1c)"<sup>2</sup>.

---

<sup>1, 2</sup> "Introducción a la teoría y sistemas de comunicación" B.P.Lathi, 1986, Ed. Limusa, cap. 3, pags. 154, 200 y 201.

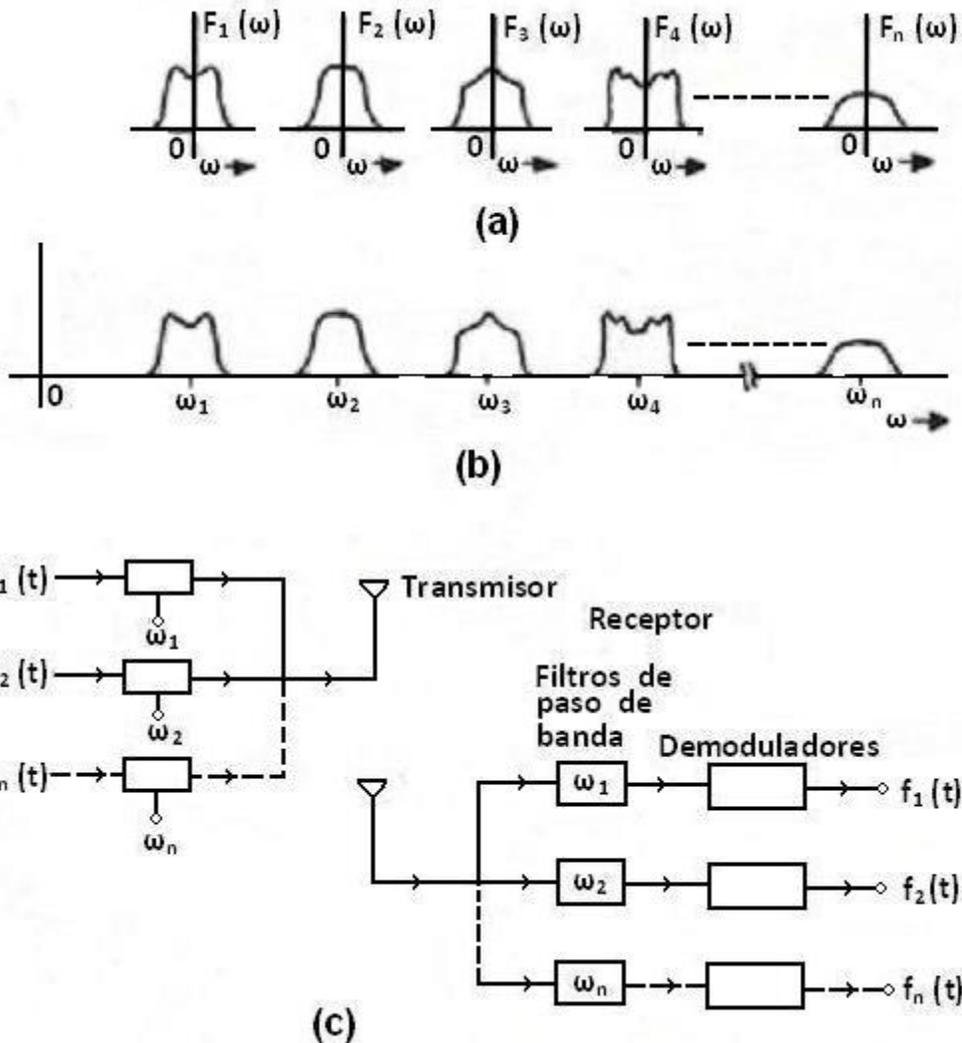


Figura 6-1. (a) Espectro individual de cada señal  $F(\omega)$ . (b) Espectro total de las señales moduladas. (c) Transmisor y receptor.

La difusión de radio y televisión es un ejemplo conocido de la multicanalización por división de frecuencia.

## 6.2 Multicanalización por división de tiempo.

Este tipo de multicanalización es usado para multicanalizar varias señales que tengan forma de trenes de pulso, como se muestra en la siguiente figura.

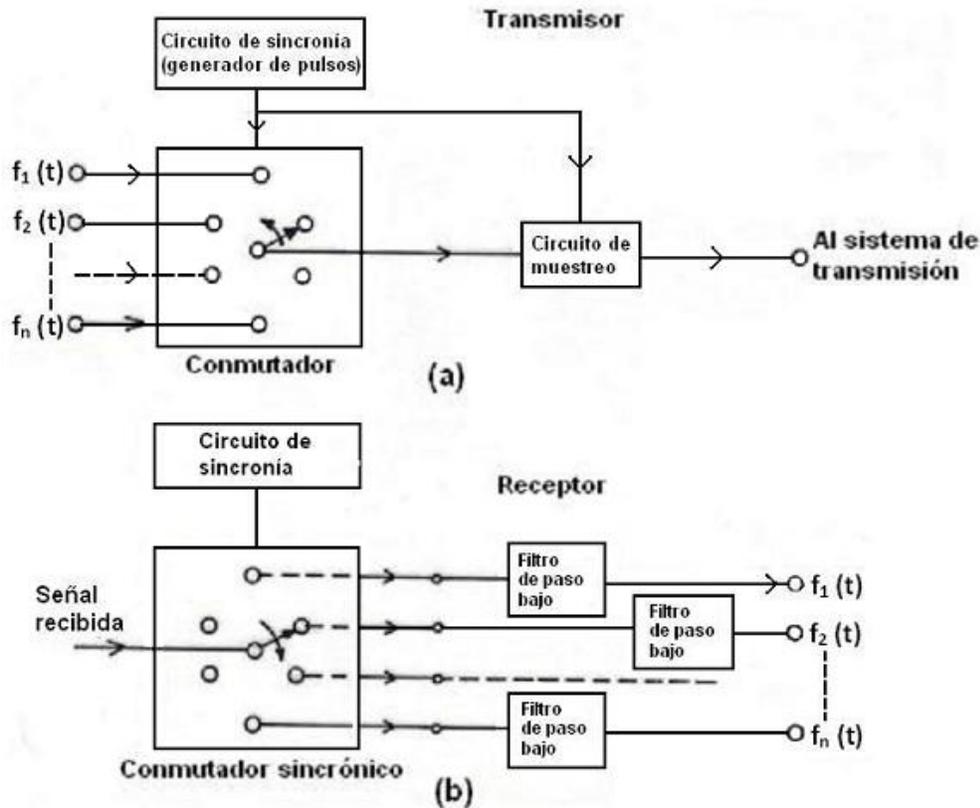


Figura 6-2. Multicanalización por división de tiempo de n canales.

La figura 6-3 nos indica un ejemplo ilustrativo. Supongamos que la velocidad de cada entrada  $f(t)$  es de un bit/s; entonces, para que se puedan multicanalizar, la velocidad del conmutador debe ser de 4 bits/s. Esto nos da la idea de que lo que está haciendo el conmutador electrónico es sensar una cuarta parte de los pulsos de las señales de entrada; sin embargo el ciclo de las señales de entrada no cambia a la salida, sólo velocidad del conmutador es, para este ejemplo, cuatro veces la velocidad de  $f(t)$ .

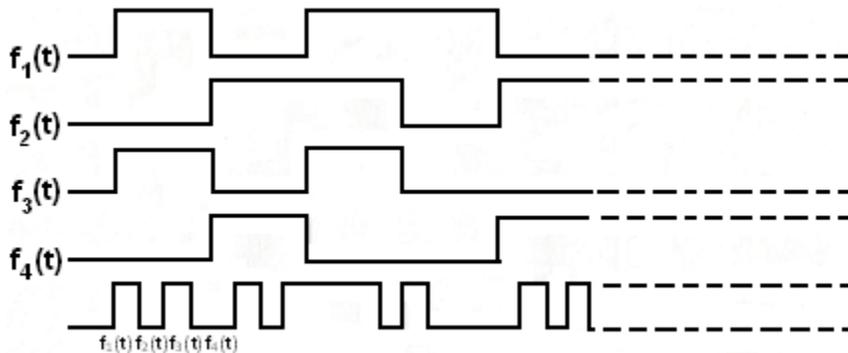


Figura 6-3. Multicanalización por división de tiempo de 4 canales.

De lo anterior podemos inducir que el sistema lo podemos ilustrar con velocidades más reales; por ejemplo, la transmisión de datos es mucho mayor a la considerada en el ejemplo anterior. Los sistemas de transmisión telefónica (manejan 64 Kbits/s) y los de transmisión de datos, manejan velocidades de 1,600 bits/s, 2,400 bits/s, 3,600 bits/s, etc., esto para sistemas de baja velocidad. La multicanalización de baja velocidad es hasta 9,600 bits/s. La multicanalización de alta velocidad es medida en Mbits/s.

Hasta aquí se ha entendido el concepto de multicanalización por división de tiempo de varias señales, pero existe un problema; la temperatura del medio de transmisión puede provocar que las señales tengan mayor o menor velocidad, es por esto que se utilizan señales de control. Además, la velocidad del circuito de muestreo debe ser mayor a la suma de las velocidades nominales de todas las señales.

Independientemente de cómo puede llevarse a cabo la multicanalización, los siguientes puntos pueden establecerse.

1. Pueden incorporarse varias formas de estructuras de bits cada una de las cuales representa la mínima unidad de tiempo en la que todas las señales multicanalizadas se transmiten al menos una vez.
2. La estructura se divide en localidades de tiempo, que se asignan en forma única a cada fuente de datos que se conecte. Un procedimiento temporal, comparable con el muestreo simple y periódico de los canales debe ser desarrollado para muestrear cada fuente de datos en el momento adecuado de la estructura.
3. Deben agregarse palabras de bits para la estructura y la sincronía para permitir que el sistema receptor se sincronice en el tiempo con el inicio de cada estructura con cada espacio de ella y con cada bit contenido en estos espacios. Estos bits pueden denominarse, en forma colectiva, bits de control.
4. Deben tomarse precauciones que permitan manejar pequeñas variaciones de las velocidades de bits de las señales digitales multicanalizadas que llegan al receptor.

### 6.3 Comparación entre sistemas de multicanalización por división de frecuencia y por división de tiempo.

"En sistemas multicanal por división de frecuencia todas las señales que se desean transmitir son continuas y se mezclan en el dominio del tiempo. Sin embargo los espectros de las señales moduladas ocupan diferentes bandas en el dominio de la frecuencia, que pueden separarse con filtros apropiados. Así pues, las señales se mezclan en el dominio del tiempo, pero sin perder su identidad en el dominio de la frecuencia"<sup>3</sup>.

"En sistemas de multicanalización por división de tiempo, las muestras de cada señal permanecen independientes y pueden identificarse y separarse en el dominio del tiempo. Sin embargo, los espectros de las señales se mezclan y ocupan la misma región de frecuencias, por lo que se vuelve imposible identificarlas. Así, la identidad del espectro se mantiene en señales multicanal por división de frecuencia; mientras que, en señales multicanal por división de tiempo, se mantiene la identidad de la forma de onda. Puesto que una señal queda especificada completamente o bien en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia, las señales multicanal pueden separarse en el receptor con las técnicas apropiadas en los dominios respectivos"<sup>4</sup>.

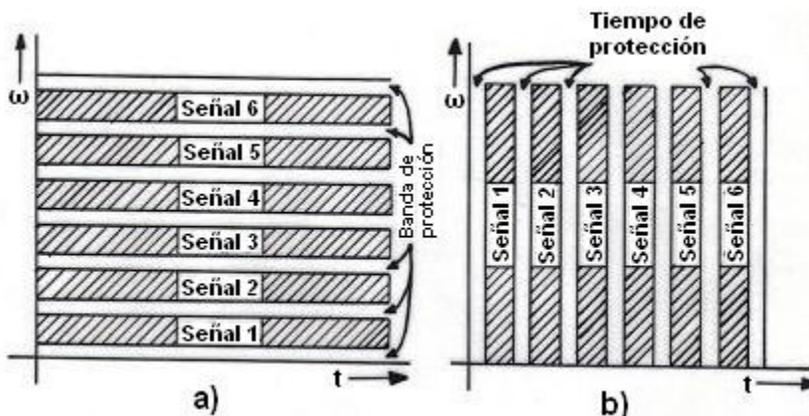


Figura 6-4. Representación en un espacio de comunicación de la multicanalización por división de frecuencia y de tiempo.

"La distinción entre los dos sistemas se representa convenientemente en forma gráfica mediante un espacio de comunicación, para ilustrar la forma en que se transmite la

<sup>3, 4</sup> "Introducción a la teoría y sistemas de comunicación" B.P.Lathi, 1986, Ed. Limusa, cap. 3, pags. 252 y 253.

información. En la figura 6-4 se muestra el espacio de comunicación tiempo-frecuencia de ambos sistemas de multicanalización. En el sistema por división de frecuencia cada señal está presente todo el tiempo en el canal y todas ellas se mezclan para ocupar cada una un intervalo de frecuencias finito y distinto (que no ocupa ninguna otra señal); esto se ilustra en la figura 6-4a. Por otro lado, en el sistema por división de tiempo, cada señal ocupa un intervalo de tiempo distinto (que no ocupa ninguna otra señal), pero los espectros de todas las señales tienen componentes en el mismo intervalo de frecuencias, como se puede ver en la figura 6-4b"<sup>5</sup>.

En un canal dado, el número de señales de banda limitada que puede transmitirse simultáneamente con distribución en el tiempo o en la frecuencia, es el mismo.

"Desde el punto de vista práctico, el sistema por división de tiempo se manifiesta como superior al de división de frecuencia. La primera ventaja son los circuitos relativamente sencillos que se utilizan en el primero; en el segundo caso es necesario generar una portadora diferente para cada canal, además cada canal ocupa una banda diferente de frecuencias, por lo tanto se precisa diseñar filtros para bandas diferentes. En sistemas por división de tiempo, se tienen circuitos idénticos para cada canal, que consisten en interruptores síncronos ó circuitos-compuerta relativamente simples. Los filtros utilizados en el proceso de detección son de paso-bajo e idénticos en cada canal. Este tipo de circuitos es mucho más simple si se compara con los moduladores, demoduladores, generadores de portadora y filtros de paso de banda que intervienen en los sistemas de multicanalización por división de frecuencia"<sup>6</sup>.

"La segunda ventaja de los sistemas por división de tiempo es la relativa inmunidad a la interferencia entre canales (diafonía) que se presenta en los sistemas por división de frecuencia debido a la falta de linealidad de los amplificadores en la trayectoria de transmisión"<sup>7</sup>.

---

<sup>5, 6, 7</sup> "Introducción a la teoría y sistemas de comunicación" B.P.Lathi, 1986, Ed. Limusa, cap. 3, pags. 253 y 254.

#### 6.4 Multiplexión por división de longitud de onda. [Wavelength Division Multiplexing (WDM)]

En esta sección se examinan sistemas más complicados, los cuales hacen uso de una más completa utilización de la capacidad de transmisión de una fibra óptica. En enlaces estándar punto-a-punto, como el mostrado en la figura 6-5, una sola línea de fibra tiene una fuente óptica en su extremo receptor. Las señales desde diferentes fuentes de luz se requerirán separar y asignar a distintas fibras ópticas para su transmisión.



Figura 6-5. Enlace de punto-a-punto por fibra óptica.

Desde que una fuente óptica tiene un ancho espectral relativamente estrecho este tipo de transmisión hace uso de sólo una muy estrecha porción de la capacidad del ancho de banda de transmisión de una fibra, como es mostrado en la figura 6-6 para un típico diodo laser operando a 850 nm.

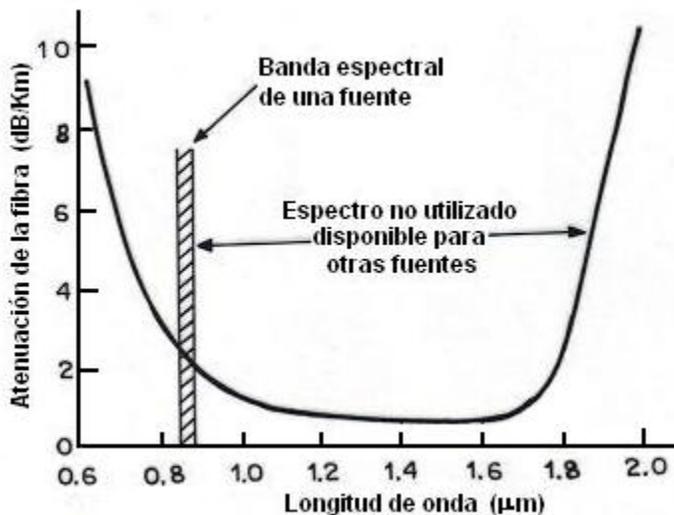


Figura 6-6. Una sola fuente óptica utiliza una pequeña parte de la banda de transmisión espectral disponible de una fibra. La multicanalización por división de longitud de onda hace uso simultáneo de muchos canales espectrales.

De la figura 6-6 vemos que muchas regiones adicionales espectrales operando son posibles. Idealmente un incremento dramático en la capacidad de información de una fibra puede ser

lograda por la transmisión simultánea de señales ópticas sobre la misma fibra desde varias diferentes fuentes de luz, que estén apropiadamente espaciadas sus emisiones de longitud de onda pico, la integridad de los mensajes independientes desde cada fuente es mantenido por conversión subsecuentes a señales eléctricas en el extremo receptor. Esta es la base de la multicanalización por división de longitud de onda. Conceptualmente la WDM tiene el mismo esquema que la multicanalización por división de frecuencia (FDM) usada en radio de microondas y sistemas de satélite.

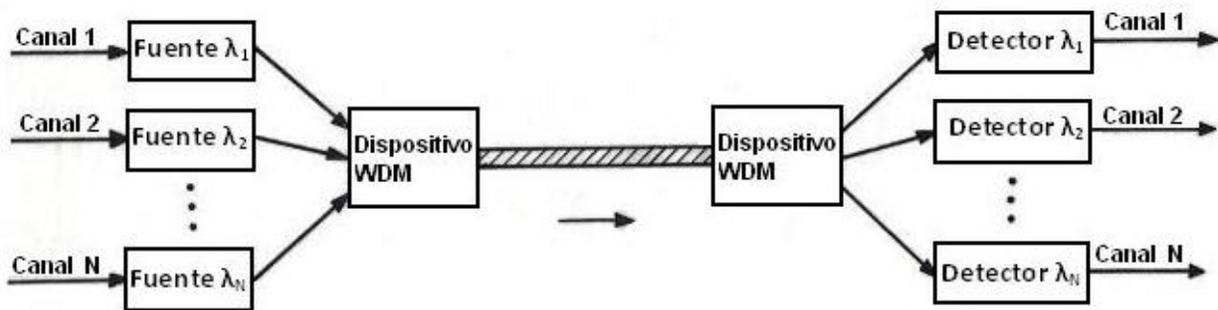


Figura 6-7. Un sistema unidireccional WDM que combina N señales de entrada independiente para transmisión sobre una misma fibra.

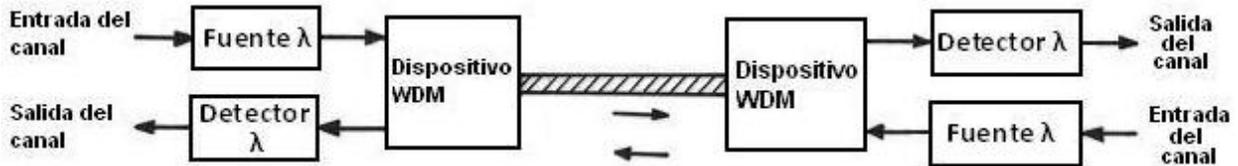


Figura 6-8. Representación esquemática de un sistema bidireccional WDM en el cual dos o más longitudes de onda son transmitidas simultáneamente en direcciones opuestas sobre la misma fibra.

Dos diferentes organizaciones WDM son mostradas en las figuras 6-7 y 6-8. En la figura 6-7 un dispositivo unidireccional WDM es utilizado para combinar señales portadoras de diferentes longitudes de onda sobre una sola fibra en un extremo y para separarlas dentro de sus detectores correspondientes en el otro extremo. Un esquema bidireccional WDM es mostrado en la figura 6-8. Esto involucra enviar información en una dirección a una longitud de onda  $\lambda_1$ , y simultáneamente transmitir datos en la dirección opuesta a una longitud de onda  $\lambda_2$ .

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C**

Los tres criterios básicos de funcionamiento de la técnica WDM son: inserción de pérdida, ancho del canal y cruce de conversación.

La inserción de pérdida define la cantidad de pérdida de potencia que aumenta en la línea de fibra óptica desde la adición de un dispositivo de acoplamiento WDM.

El ancho de canal es el rango de longitud de onda que es permitido para una particular fuente óptica. Si los diodos laser son usados, anchos de canal de varias décimas de nanómetros son requeridos para garantizar que ninguna interferencia de intercanal resulte de inestabilidad de la fuente. Para fuentes LED's, anchos de canal que son 10 a 20 veces más grandes son requeridos a causa de la salida espectral ancha, más extensa de estas fuentes.

El cruce de conversación se refiere a la cantidad de señal acoplada desde un canal a otro. Los niveles tolerables de cruce de conversación intercanal pueden variar extensamente dependiendo sobre la aplicación.

Para implementar un sistema WDM unidireccional, es necesario un multicanalizador en el extremo transmisor para combinar señales ópticas de varias fuentes de luz sobre una sola fibra. En el extremo receptor, un demulticanalizador es requerido para separar las señales dentro de los canales apropiados de detección. El problema básico de diseño aquí es que el multicanalizador debe proporcionar un camino de baja pérdida de cada fuente óptica a la salida del multicanalizador. Un requerimiento diferente existe para el demulticanalizador, desde que los fotodetectores son usualmente sensibles sobre un extenso rango de longitudes de onda, las cuales pueden incluir todos los canales WDM.

Los multicanalizadores de división de longitud de onda que son más extensamente usados caen dentro de dos clases. Estos son: dispositivos angularmente dispersivos, tal como prismas o discordantes, y dispositivos basados en filtros, tal como filtros de interferencia multicapa de película delgada o dispositivos monomodo de óptica integrada.

En resumen, la multicanalización en longitud de onda es la transmisión de dos o más flujos de información (en el mismo sentido o sentidos opuestos) sobre una misma fibra óptica, y usando una longitud de onda distinta para cada uno de los canales que comparten la misma fibra. Por cada canal a multicanalizar se deben realizar las siguientes funciones:

- a) Lado de transmisión: Una conversión electroóptica (E/O) a una longitud de onda  $\lambda_i$ , y un acoplamiento de la señal óptica a la fibra.
- b) Lado de recepción: Una conversión optoeléctrica (O/E) para la longitud de onda  $\lambda_i$ , y el acoplamiento de la señal procedente de la fibra al detector óptico correspondiente.

En el futuro estas dos funciones podrán llevarse a cabo mediante circuitos de óptica integrada; por el momento sólo hay dos alternativas viables:

- 1) Un transductor para todos los canales;
- 2) Un transductor para cada canal, junto a los correspondientes multicanalizadores y demulticanalizadores ópticos.

“La primera solución presenta serios problemas tecnológicos. Se han realizado ELED y LED tipo Burrus que generan varias longitudes de onda, separadas entre 200 y 300 nm; también se han fabricado LD's de InGaAsP/InP, con dos o más longitudes de onda, separadas unos 100 nm. Se han obtenido resultados con fotodiodos que trabajan en varias longitudes de onda”<sup>8</sup>.

Por el momento las aplicaciones reales de multicanalización en longitud de onda acuden a la solución 2 y todo el trabajo se ha concentrado en los multicanalizadores y demulticanalizadores ópticos.

- Ventajas y desventajas

“Los primeros resultados de la multicanalización en longitud de onda datan de 1977. Desde entonces, se han venido manejando los siguientes argumentos en favor de ésta multicanalización”<sup>9</sup>:

- a) Al acudir a una multicanalización por N longitudes de onda se incrementa en ese mismo número el volumen de información soportado por la fibra.
- b) La capacidad de una ruta puede aumentarse posteriormente si las necesidades de tráfico así lo demandan.
- c) Puede enviarse al mismo tiempo, y sobre la misma fibra, señales con distinto formato de modulación a nivel eléctrico.

---

<sup>8, 9</sup> “Comunicación por fibra óptica” Díaz de la Iglesia Raymundo, Ed. Marcombo, 1985, cap. 1, pags. 31, 32 y 22

- d) En oposición de lo que ocurre en la multicanalización eléctrica, la multicanalización óptica no divide la potencia entre los canales a multicanalizar, esto repercute en una mejor relación señal a ruido.
- e) Los multicanalizadores en longitud de onda (WDM) son más pequeños, fiables y baratos que las unidades eléctricas equivalentes.

Entre los inconvenientes de la WDM podrían citarse:

- 1) Los multicanalizadores y demulticanalizadores introducen ciertas pérdidas de inserción que redundan en una menor distancia entre los puntos de transmisión y recepción.
- 2) La fabricación de componentes y equipos de transmisión se encarece al tener que incorporar LD o LED con longitudes de onda relativamente próxima.
- 3) Se precisan distintos fotodiodos para los posibles márgenes de longitud de onda.
- 4) Técnicamente es difícil obtener bajas diafonías ópticas, cuando además se pretende obtener bajas pérdidas de inserción y poca separación entre canales (separación en términos de longitud de onda).
- 5) El ahorro producido en fibras y equipos electrónicos es insuficiente para justificar el costo adicional de la multicanalización en longitud de onda.

A continuación veremos algunas alternativas para la multicanalización en longitud de onda.

"En la tabla 6-1 se listan las principales opciones para la multicanalización en longitud de onda. Se distingue entre componentes activos y pasivos, así como entre componentes para enlaces en un sentido o en los dos sentidos. Las abreviaturas MUX, DEMUX, Y MULDEX se refieren a los multicanalizadores, demulticanalizadores y a los dispositivos que reúnen las funciones de multicanalización + demulticanalización. Las letras M y S hacen referencia a la idoneidad de los componentes para aplicaciones con fibra multimodo o monomodo, respectivamente. Las casillas con una "X" indican que esa solución no es viable técnicamente, al menos por ahora"<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> "Comunicación por fibra óptica" Díaz de la Iglesia Raymundo, Ed. Marcombo, 1985, cap. 1, pag. 32.

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

		MUX		DEMUX		MULDEX	
Pasivos	Dispositivos	M	S	M	S	M	S
	Prismas		X	3			
	Filtros interferenciales	4	2	6	2	2+2	2-2
	Redes de difracción	10	X	20	20		X
	Filtros + redes de difracción		X	13		2+2	2-2
	Acopladores direccionales		2		2		
	Óptica integrada		2		2		
Activos	LED multilongitud de onda	2	X	X	X		
	LD multilongitud de onda	6		X	X		
	Fotodiodo multilongitud de onda	X	X	3	3		

Tabla 6-1. Número de canales que pueden multiplexarse en longitud de onda, según los dispositivos de multicanalización. La letra "M" se refiere a fibras multimodo, y la "S" a las monomodo.

Según se desprende de la tabla 6-1, los dispositivos más capaces o interesantes son, por ahora, los filtros interferenciales y las redes de difracción.

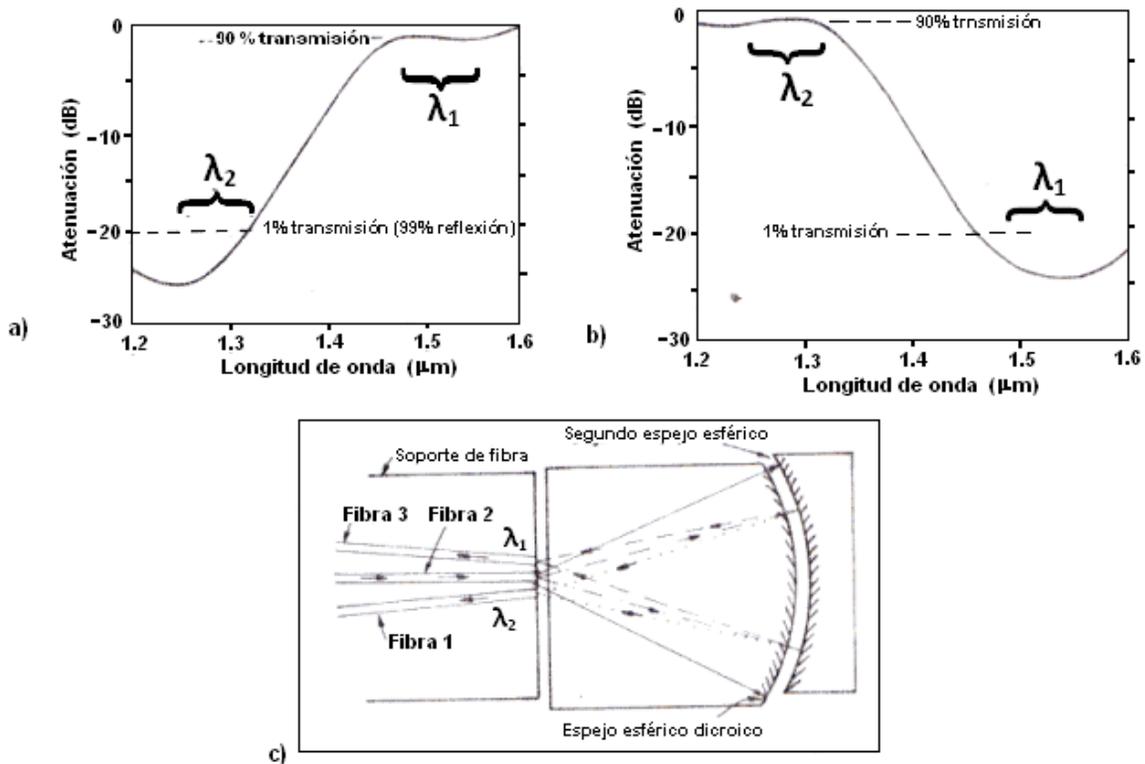


Figura 6-9. Demultiplexador de filtros interferenciales basado en espejos esféricos; a) respuesta típica de un filtro de paso alto; b) respuesta de un filtro de paso bajo; c) configuración mecánica del demultiplexador.

“Los filtros interferenciales (la figura 6-9 muestra un multicanalizador de dos canales) se caracterizan porque un filtro combina o separa dos canales o dos grupos de canales. Por cada canal o grupo de canales adicionales debe añadirse un nuevo filtro. En la tabla 1-2 se reflejan las pérdidas típicas para multicanalizadores + demulticanalizadores de 2,3 y 4 canales, mediante filtros interferenciales”<sup>11</sup>.

Tabla 6-2. Pérdidas (dB) de una pareja MUX + DEMUX en longitud de onda a base de filtros interferenciales. Se han empleado fibras multimodo, con núcleos de 50-60  $\mu\text{m}$  de diámetro y emisores LED;  $\Delta\lambda$  es la distancia entre las longitudes de onda de las señales multicanalizadas.

Número de canales	1ª ventana	2ª Ventana	Ambas
	$\Delta\lambda \approx 50 - 80 \text{ nm}$	$\Delta\lambda \approx 100 \text{ nm}$	$\Delta\lambda \approx 150 - 450 \text{ nm}$
2	2.5 - 6.9		2 - 3
3		3.9	4.0 - 5.5
4	10 - 11		3.7 7.3

Desde un punto de vista optimista puede considerarse que para cada pareja de dispositivos con filtros interferenciales de N canales, las pérdidas de inserción son de N dB (a estos decibelios debe añadirse las pérdidas de los conectores o empalmes).

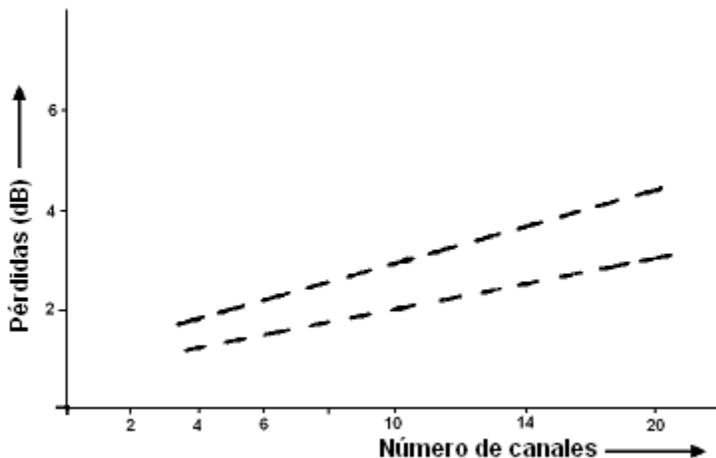


Figura 6-10. Ejemplos sobre las pérdidas de inserción de un conjunto MUX+DEMUX con redes de difracción ( $\Delta\lambda = 17-50 \text{ nm}$ ) en función del número de canales.

<sup>11</sup> “Comunicación por fibra óptica” Díaz de la Iglesia Raymundo, Ed. Marcombo, 1985, cap. 1, pag. 33.

"Por lo que respecta a las redes de difracción, la figura 6-10 indica las pérdidas de inserción de algunos dispositivos de este tipo. Las pérdidas de inserción no son exactamente iguales a ambos lados de la longitud de onda central, por eso cada MULDEX viene caracterizado por una barra. La mayoría de los dispositivos se construye ubicando a la salida fibras con núcleos de mayor tamaño que la entrada"<sup>12</sup>.

## **6.5 MULTIPLEXIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA DENSA [Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)]**

**DWDM** es el acrónimo, en inglés, de Dense wavelength Division Multiplexing, que significa Multiplexión por división en longitudes de onda densas. DWDM es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C (1550 nm).

La primera tecnología WDM, que empleaba un bajo número de longitudes de onda con un gran ancho y espaciado de canal, se denominó WDM simple {course} (CWDM).

La diferencia entre WDM y Multiplexión por división en longitudes de onda densas (DWDM) es fundamentalmente sólo en grado. DWDM espacia la longitud de onda más estrechamente que la WDM, y por lo tanto se consigue mayor número de canales ópticos; reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o mediante el uso de módulos DCM "Dispersion Compensation Modules". De esta manera es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos. Actualmente se pueden conseguir 40, 80 o 160 canales ópticos separados entre si 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz respectivamente.

La tecnología DWDM fue posible debido a la fabricación y comercialización de componentes que en la época de CWDM eran únicamente ideas o experimentos.

---

<sup>12</sup> "Comunicación por fibra óptica" Díaz de la Iglesia Raymundo, Ed. Marcombo, 1985, cap. 1, pag. 33.

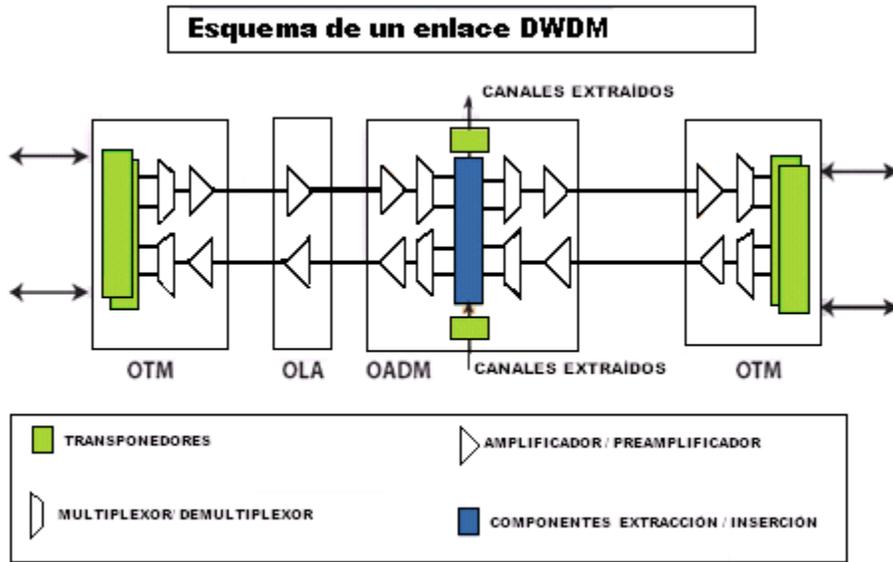


Figura 6-11. Conmutadores telefónicos. Teléfonos multilínea Digitales IP, voz y datos cableados.

Las redes DWDM de larga distancia suelen basarse en enlaces punto a punto, y, por lo general, no suelen utilizar ningún tipo de protección. Se pueden distinguir cuatro tipos de sistemas: amplificador óptico de línea u **OLA** (Optical Line Amplifier), terminal multiplexor y demultiplexor óptico u **OTM** (Optical Terminal Multiplexer), terminal de inserción y extracción óptico u **OADM** (Optical Add and Drop Multiplexers) y cross-connect óptico u **OXC** (Optical Cross Connects).

La misión de un **OLA** es amplificar la señal multiplexada en longitud de onda, es decir, sin ningún tipo de conversión electroóptica. El OTM se encarga de multiplexar (en transmisión) y demultiplexar (en recepción) los canales ópticos. La misión de un **OADM** es extraer información de un determinado canal óptico e insertar nueva información reutilizando o no dicho canal, sin alterar el resto de canales multiplexados en longitud de onda y sin ningún tipo de conversión electroóptica. Finalmente, el OXC es un conmutador de canales entre fibras de entrada y fibras de salida; es, por lo tanto, el elemento que proporciona mayor flexibilidad en la red y por limitaciones actuales en la tecnología óptica la mayoría de los dispositivos comercialmente disponibles realizan conversión electroóptica limitando su transparencia.

La misión del transponedor de transmisión es adaptar la longitud de onda recibida del equipo cliente a una longitud de onda muy estable estandarizada y con una potencia óptica bien determinada, que será la entrada al multiplexor. El transponedor de recepción debe recibir el canal óptico correspondiente procedente del demultiplexor, eliminar el ruido óptico, reducir la diafonía entre canales y enviarlo al equipo cliente con una potencia óptica bien determinada y dentro del rango de longitudes de onda susceptibles de ser recibidas por los detectores ópticos del equipo cliente.

### **6.5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MULTIPLANSIÓN POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA DENSA.**

A continuación se marcan las características principales se ha desarrollado la multiplexión por división de longitud de onda densa.

- La fabricación a gran escala de fibra óptica ha posibilitado una disminución de los costos y una mejora en las características de transmisión de la fibra.
- Amplificadores ópticos de ganancia plana para un rango determinado de longitudes de onda que acoplados en línea con la fibra actúan como repetidores eliminando la necesidad de regeneradores.
- Filtros integrados de estado sólido de menor tamaño y con posibilidad de ser integrados en el mismo sustrato junto con otros componentes ópticos.
- Nuevos foto detectores y fuentes láser que permiten integración produciendo diseños más compactos.
- Multiplexores y demultiplexores ópticos basados en difracción óptica pasiva.
- Filtros de longitud de onda seleccionable, que pueden ser empleados como multiplexores ópticos.
- Los multiplexores ópticos Add-Drop (OADM) han permitido que la tecnología DWDM pueda implantarse en redes de diversos tipos.
- Los componentes ópticos de conexión (OXC), que pueden implementarse con diferentes tecnologías de fabricación, y han hecho posible la conmutación puramente óptica.

### **6.5.2 Parámetros de la multiplexión de longitud de onda densa en enlaces de larga distancia.**

El primer sistema DWDM fue diseñado para aplicaciones de intercambio de una red long-haul. Por long-haul nos referimos a distancias arriba de los 100 Km.

Cuando se diseña una red DWDM de larga distancia se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Balance de potencia o diferencia entre la potencia emitida por el transmisor y la mínima capaz de recibir el receptor.
- Dispersión o ensanchamiento de las longitudes de onda con la distancia recorrida y que puede dar lugar a su solapamiento.
- No linealidades o espúreos que pueden aparecer debido a la transmisión de altas potencias a través de la fibra
- Ganancia óptima de los amplificadores ópticos o relación entre la potencia a su entrada y salida en el cual su curva de ganancia es más plana amplificando por igual a todos los canales.
- Ancho de banda de los amplificadores ópticos o rango de longitudes de onda susceptible de amplificar sin distorsión.

### **6.5.3 Espectativas de la multiplexión por división de longitud de onda densa.**

El medio de transmisión utilizado en DWDM es la fibra óptica, y en concreto, la fibra óptica monomodo. Este tipo de fibra, además de soportar mayores anchos de banda que el resto de medios de transmisión de señales, ofrece otras muchas ventajas: baja atenuación, fácil instalación, inmunidad a interferencias electromagnéticas, alta seguridad de la señal, posibilidad de integración, etc. La fibra óptima para trabajar con sistemas DWDM es la G.655 o NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fibre); aunque con canales de 2,5 Gbps, DWDM se adapta perfectamente a la fibra convencional G.652 o SMF (Standard Single Mode Fibre), mucho más barata y la utilizada en la mayor parte de las instalaciones hasta la actualidad.

La única tecnología hoy capaz de explotar todo el ancho de banda ofrecido por la fibra óptica es DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), que permite además una evolución flexible y

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

económica de las redes actuales que dé respuesta a la demanda de mayor ancho de banda por parte de los nuevos servicios multimedia. Pero como DWDM requiere componentes ópticos muy complejos y caros, desde su aparición se ha utilizado principalmente en enlaces punto a punto de larga distancia. No obstante, la enorme demanda de ancho de banda y su madurez tecnológica ha permitido su introducción en las redes metropolitanas.

## CAPITULO 7

### DISEÑO, CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFIA

En los capítulos anteriores se han examinado las características fundamentales de las fuentes, detectores y fibras utilizadas en un sistema de comunicación óptica. En este capítulo debemos examinar cómo interactúan los componentes individuales y cómo sus características determinan el diseño y funcionamiento de un enlace completo de fibra óptica.

Se emplean programas en "C" para graficar algunos parámetros importantes de las fuentes, detectores y fibras ópticas, y así poder determinar el óptimo funcionamiento del sistema.

Antes de comenzar con el diseño del sistema por fibra óptica, a continuación se da una breve introducción del lenguaje "C".

#### 7.1 Historia del lenguaje "C"

El "C" es un lenguaje de programación de propósito general. Sus características principales son:

- Programación estructurada.
- Economía en las expresiones.
- Abundancia en operadores y tipos de datos.
- Codificación en alto y bajo nivel simultáneamente.
- Reemplaza ventajosamente la programación en ensamblador.(se utilizan términos más comunes que en el lenguaje ensamblador).
- Utilización natural de las funciones primitivas del sistema.
- No está orientado a ningún área en especial.
- Producción de código objeto altamente optimizado.
- Facilidad de aprendizaje.

"El lenguaje C se creó en los laboratorios Bell Telephone y ha sido estrechamente asociado con el sistema operativo UNIX, ya que su desarrollo se realizó en este sistema y debido a que tanto UNIX como el propio compilador C y la casi totalidad de los programas y herramientas de UNIX, fueron escritos en C. Su eficiencia y

claridad han hecho que el lenguaje ensamblador apenas haya sido utilizado en UNIX"<sup>1</sup>.

"Este lenguaje está inspirado en el lenguaje B escrito por Ken Thompson en 1970 con intención de recodificar el UNIX, que en la fase de arranque estaba escrito en ensamblador, en vistas a su transportabilidad a otras máquinas. "B" era un lenguaje evolucionado e independiente de la máquina, inspirado en el lenguaje BCPL concebido por Martin Richard en 1967"<sup>2</sup>.

En 1972 Dennis Ritchie, toma el relevo y modifica el lenguaje B, creando el lenguaje C y reescribiendo el UNIX en dicho lenguaje. La novedad que proporcionó el lenguaje C sobre el B fue el diseño de tipos y estructuras de datos.

"Los tipos básicos de datos eran int (entero), char (carácter), float (reales en simple precisión) y double (reales de doble precisión). Posteriormente se añadieron los tipos long (enteros de 32 bits), short (enteros de 16 bits) y unsigned (enteros sin signo). Los tipos estructurados básicos de C son las estructuras, las uniones, y las enumeraciones. Estos permiten la definición y declaración de tipos derivados de mayor complejidad"<sup>3</sup>.

Las instrucciones de control de flujo de C son las habituales de la programación estructurada: if, for, while, switch - case todas incluidas en su predecesor BCPL.

"C" incluye también apuntadores y funciones. Los argumentos de las funciones que pasan por valor, esto es copiando su valor, lo cual hace que no se modifiquen los valores de los argumentos en la llamada. Cuando se desea modificar los argumentos en la llamada, estos se pasan por referencia, esto es se pasan las direcciones de los argumentos. Por otra parte, cualquier función puede ser llamada recursivamente"<sup>4</sup>.

Una de las peculiaridades de "C" es su riqueza de operadores. Puede decirse que prácticamente dispone de un operador para cada una de las posibles operaciones en código máquina.

---

<sup>1</sup> "Curso de programación con C" (Microsoft C) Fco. Javier Cevallos, Ed. Macrobit, pag. 3.

<sup>2, 3, 4</sup> "Curso de programación con C" (Microsoft C) Fco. Javier Cevallos, Ed. Macrobit, pags. 3 y 4.

"Hay toda una serie de operaciones que pueden hacerse con el lenguaje C que realmente no están incluidas en el compilador propiamente dicho, sino que las realiza un preprocesador justo antes de cada compilación. Las dos más importantes son #define (directriz de sustitución simbólica o de definición) e #include (directriz de inclusión en el fichero fuente)"<sup>5</sup>.

Este lenguaje ha evolucionado paralelamente a UNIX, que a su vez ha pasado por diversas versiones entre las que destaca XENIX. Esta versión fue desarrollada por Microsoft para los microprocesadores de 16 bits.

## 7.2 Diseño del sistema.

Aunque distintas opciones de componentes están disponibles en el diseño de sistemas de fibra óptica, la metodología del diseño de enlace es similar. La principal medida de funcionamiento de un sistema digital usualmente es la velocidad de error de bit (BER), la cual es la probabilidad que un error será hecho en detección de un bit recibido. El BER máximo tolerable obviamente depende sobre el funcionamiento deseado del sistema, pero en sistemas de comunicación óptica un  $BER \leq 10^{-9}$  es comúnmente especificado. Un parámetro importante al especificar un sistema de fibra óptica es el llamado producto ancho de banda - longitud (BL), donde B representa la velocidad de transmisión (bits/segundo) y L la distancia entre los repetidores o la longitud total de la línea entre la fuente y el detector.

En el análisis del enlace se consideran las características siguientes:

1. Distancia del enlace.
2. La tasa de datos o ancho de banda.
3. La tasa de bits erróneos (BER).

El procedimiento del diseño es iterativo, llegando a su fin cuando se satisfacen plenamente los requisitos técnicos de diseño. La longitud máxima del enlace tiene dos limitaciones que son atenuación y dispersión, por lo tanto, el diseño del enlace consiste básicamente del análisis de dos puntos a saber:

---

<sup>5</sup> "Curso de programación con C" (Microsoft C) Fco. Javier Cevallos, Ed. Macrobit, pag.4.

1. Presupuesto de potencia.
2. Análisis de ancho de banda (dispersión).

### 7.2.1 Especificaciones del enlace.

Las especificaciones del enlace, se muestran en la figura 7-1. Hay que notar que la longitud no es fijada a un valor dado, en la siguiente sección se especificarán los valores que tomará la longitud del enlace. La multiplexión es por división de tiempo.



Figura 7-1. Enlace por fibra óptica, de 64 Kbps.

El criterio general del diseño es que cuando la distancia del enlace sea corta, la  $\lambda$  empleada sea en la primer ventana de operación o sea de 800 a 900 nm. Si la distancia de transmisión es grande la atenuación y dispersión pueden ser grandes, por lo tanto, se sugiere la operación en la 2a. y 3a. ventana, es decir, en  $\lambda$  alrededor de 1.3 y 1.5  $\mu\text{m.}$ , que es donde se pueden optimizar las pérdidas y la dispersión.

### 7.2.2 Diseño de longitud y ancho de banda por tabla cuadrículada.

El siguiente paso consiste en interrelacionar los tres subsistemas (transmisor, fibra óptica y receptor), para la longitud de onda seleccionada. El diseño digital por tabla cuadrículada se muestra en la figura 7-2, donde la longitud (L) está dividida dentro de ocho secciones convenientes desde una distancia de 1 m. a más de 100 Km de manera similar, la tasa de transmisión ha sido dividida, cubriendo desde menos de los 10 Kbps a más de 1 Gbps.

B \ L		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>8</sub>
		1 - 10 m	10 - 100 m	100 - 1000m	1 - 3 Km	3 - 10 Km	10 - 50 Km	50 - 100Km	> 100Km
B <sub>1</sub>	10 Kb/s								
B <sub>2</sub>	10 - 100 Kb/s								
B <sub>3</sub>	100 - 1000 Kb/s			I					V
B <sub>4</sub>	1 - 10 Mb/s						V		
B <sub>5</sub>	10 - 50 Mb/s								
B <sub>6</sub>	50 - 500 Mb/s				II				
B <sub>7</sub>	500 - 1000 Mb/s			IV				VI	
B <sub>8</sub>	> 1 Gb/s	III							

Figura 7-2. El diseño del sistema BL a cuadros.  
 I SLED con fibra multimodo de índice de paso.  
 II LED o diodo laser con fibra multimodo de índice de paso o índice graduado.  
 III Diodo Laser ó ELED con fibra multimodo de índice de paso.  
 IV Diodo Laser ó ELED con fibra multimodo de índice graduado.  
 V Diodo Laser con fibra multimodo de índice graduado.  
 VI Diodo Laser con fibra de modo sencillo.  
 VII Diodo Laser con fibra multimodo de índice de paso.

Una vez que el producto BL es conocido, el diseñador puede identificar la región correspondiente sobre los cuadros y entonces proceder a estudiar el método que se describirá en la siguiente sección. Estudiando las diferentes opciones disponibles para cambiar la fuente, fibra, o el detector (y, por tanto, el diseño del receptor), el diseñador puede determinar un diseño óptimo. La figura 7-2 identifica siete regiones diferentes las cuales presentan una combinación por igual de la fuente y la fibra. La parte sombreada de la figura 7-2, corresponde a las especificaciones de nuestro enlace.

### 7.2.3 Procedimiento para el diseño del sistema digital.

Normalmente el procedimiento que se sigue es seleccionar el fotodetector en base a los requisitos de diseño. Posteriormente se escoge el fotoemisor y se calcula si con un tipo específico de fibra es posible realizar el enlace. De no ser así se hace una nueva selección de componentes y se calcula la posibilidad del

enlace, el proceso puede continuar hasta satisfacer las condiciones de diseño.

Los procedimientos para el diseño de sistemas digitales para diferentes configuraciones de fibra óptica son muy similares cuando se tienen muchas opciones y están disponibles para los tres componentes básicos. Los siguientes pasos se pueden aplicar en un sistema típico de diseño.

1.- Determinar el máximo rango tolerable de bits de error para el sistema, BER es la probabilidad que un error fuera hecho en la detección de un bit recibido. Esto dependerá del desarrollo deseado del sistema, pero un BER de  $10^{-8}$  es comúnmente usado en sistemas digitales por fibra óptica. Algunas computadoras requieren un  $BER \leq 10^{-12}$ .

2.- Determinar el producto BL del sistema. El objetivo del diseñador es transmitir los datos deseados B sobre la línea con longitud L y obtener las especificaciones del BER.

3.- Determinar la región apropiada para el sistema sobre los cuadros del producto BL.

4.- Identificar la fuente recomendada, en todo caso el diodo laser o LED, y determinar la potencia promedio  $P_s$  en dBm (nivel de potencia en decibeles referente a 1 mW). Valores típicos de potencia (figura 7-3) para los diodos Laser están en el rango de 0.1 a 5 mW (-10 a 7 dBm), mientras los valores típicos para los LED's son de -10 a -25 dBm.

5.- Determinar el rango de sensibilidad  $P_R$  para obtener un BER de  $10^{-8}$  en el rango requerido, también en dBm. La sensibilidad del receptor para el PIN FET (1.1 a 1.6  $\mu\text{m}$ ) y para receptores de silicio ( $\lambda \leq 1 \mu\text{m}$ ) es presentado en la figura 7-3 para un rango de bits entre los 10 a 100 Mb/s. (el cual cubre un mayor número de rango de datos). Los valores típicos para un rango de  $P_R$  es de -60 a -30 dBm.

6.- Determinar el máximo de pérdidas  $\alpha_{\text{max}}$  del sistema tomando la diferencia entre  $P_s$  y  $P_R$  ( $\alpha_{\text{max}} = P_s - P_R$ ). Si por alguna razón las pérdidas del sistema son más grandes que  $\alpha_{\text{max}}$ , el BER deberá exceder  $10^{-8}$  (ó considerar otra especificación).

7.- Determinar las pérdidas totales  $\alpha_s$  de todas las uniones en la línea, en decibeles.

8.- Determinar las pérdidas totales  $\alpha_c$  de todos los conectores en la línea.

9.- Determinar el margen de potencia  $\alpha_{mar}$  en decibeles para el sistema. Esto se incluye siempre como un factor de seguridad que permite que para incrementos imprevistos en las pérdidas totales de la línea y para parámetros de ruido.

10.- Determinar las pérdidas  $\alpha_f$  que pueden permitir a la fibra en la línea, realizando la siguiente diferencia.

$$\alpha_f = \alpha_{max} - (\alpha_s + \alpha_c + \alpha_{mar}) \text{ dB} \quad (7-1)$$

11.- Determinar las pérdidas típicas normalizadas ( $\alpha_n$  dB/Km) del cable de la fibra a ser usado en la operación de la longitud de onda de la fuente óptica seleccionada para el sistema.

12.- Determinar la máxima longitud  $L_{max}$  de la línea (ó la longitud entre repetidoras) por medio de la siguiente división:

$$L_{max} = \frac{\alpha_f}{\alpha_n} \quad (7-2)$$

13.- Si  $L_{max} \geq L$ , como se especifica en el paso 3 del diseño inicial, entonces el sistema diseñado es satisfactorio y otros factores como: costo, disponibilidad, confiabilidad, opción de crecimiento, etc., pudieran añadirse.

14.- Si  $L_{max} < L$ , entonces el diseño del sistema no es satisfactorio y el diseñador debe considerar las opciones para incrementar la potencia de la fuente en la transmisión, incrementar la sensibilidad del receptor y reducir la atenuación de la fibra normalizada ( $\alpha_n$  dBm/Km) y determinar de cualquier modo  $\alpha_s$ ,  $\alpha_c$  y  $\alpha_{max}$ , pueden reducirse también. Es mejor llevar a efecto este análisis de presupuesto - potencia que usar el peor caso de datos para los diferentes parámetros previamente discutidos y un razonable margen de potencia.

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

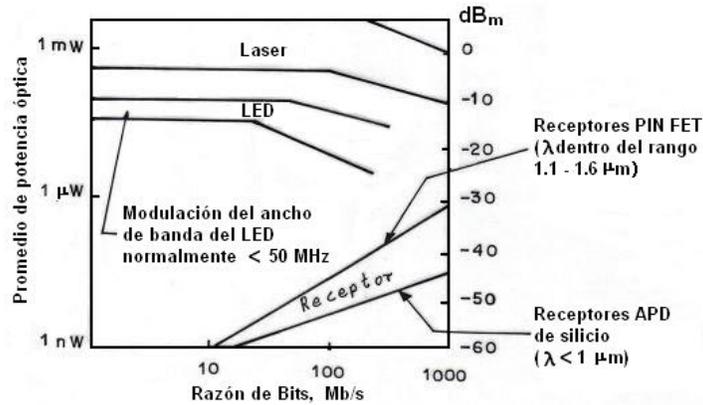
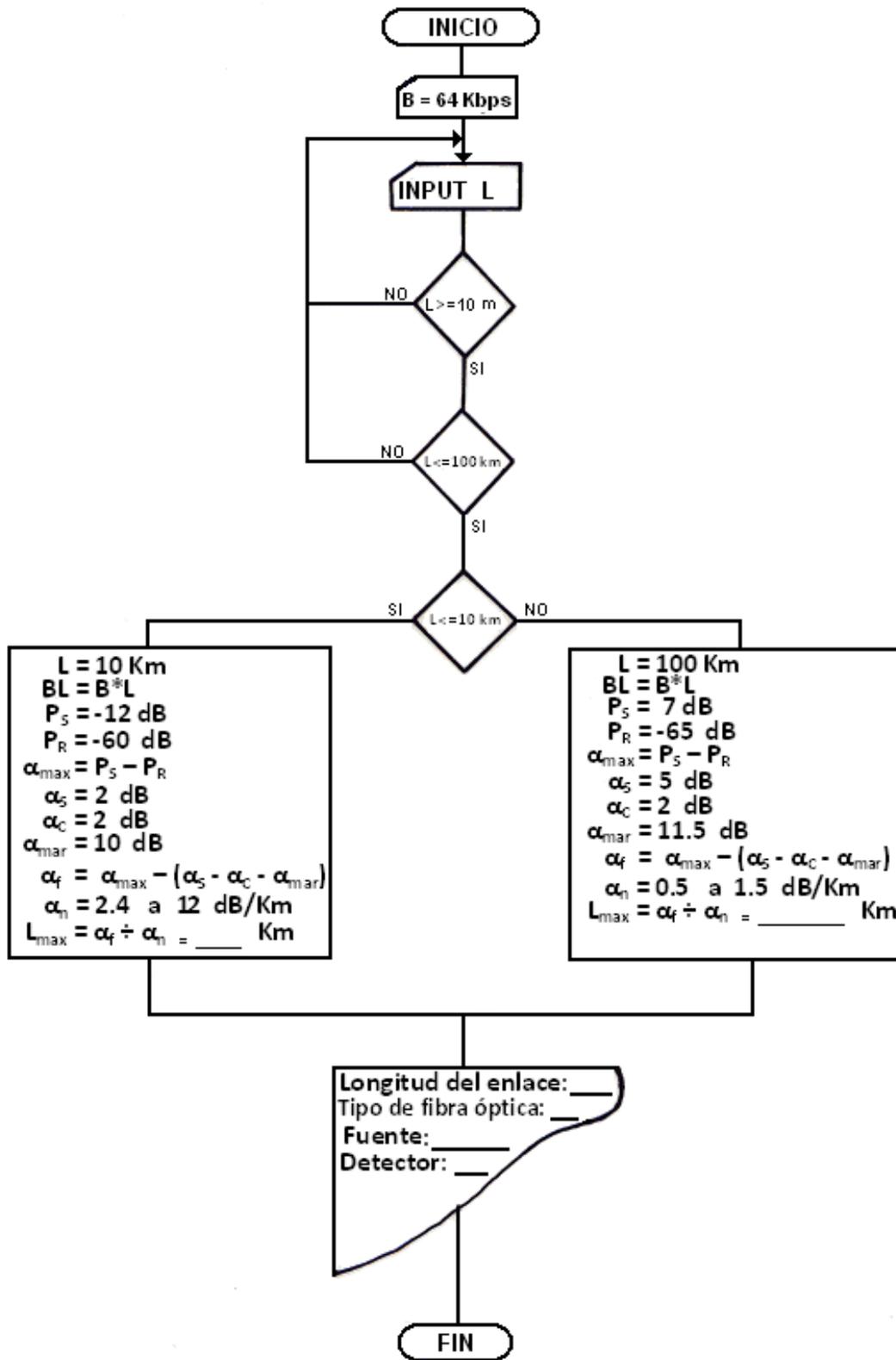


Figura 7-3. Margen de transmisión vs razón de bits para un sistema de comunicación digital por fibra óptica.

De acuerdo al procedimiento ahora podemos obtener el diagrama de flujo del enlace de fibra óptica, el cual es el siguiente:

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C



### 7.3 Diseño de una línea de transmisión digital multiplexada, de 64 Kbps, vía fibra óptica, empleando lenguaje C.

A continuación comenzamos el diseño del enlace, empleando el lenguaje C. Dentro del programa se hacen los comentarios necesarios sobre el enlace.

```
/*Diseño de una línea digital multiplexada de 64 Kbps, vía fibra
óptica, empleando lenguaje C */
```

```
/* Primero definimos las características principales de nuestro
enlace: */
```

```
/* - Velocidad requerida de datos B = 64 Kbps.*/
```

```
/*- Longitud requerida del enlace 10 m. <= L <= 100 Km.*/
```

```
/* A partir de estos datos observamos de la figura 7-2, que
estos requerimientos están en las regiones I y VII; por lo tanto
para cubrir la longitud de 10 m. hasta 100 Km. realizaremos dos
diseños de enlace. El primero será de 10 m a 10 Km y el segundo
será de 10 Km. a 100 Km.*/
```

```
/*Directrices para el preprocesador (#) */
```

```
#Include <stdio.h> /*Fichero estándar de C que se incluye en el
                    programa */
```

```
#include <conio.h>
```

```
/*Definición de constantes*/
```

```
#define INF 10 /*Límite inferior de la longitud de la fibra */
```

```
#define MED 10,000 /*Límite medio de la longitud de la fibra */
```

```
float SUP 100,0000 /*Límite superior de la longitud de la
                    fibra */
```

```
int B      /*Velocidad de transmisión de datos 64 Kbps */
```

```
/*Definición de variables globales */
```

```
float L;
```

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

```
/*Declaración de funciones (función prototipo o declaración
forward) */

float BL; /*Ancho de Banda*/

float PERMAX; /*Pérdida máxima permisible*/

float PERTOT; /*Pérdida total permisible */

float LONGMAX(float Af, float An) /*Longitud máxima del
enlace */
main () /*función principal-comienzo del programa */
{
/*Declaración de variables locales */

int PS, PR, As, Ac;

float Amar, An, Lmax;

clrscr(); /*Limpiar pantalla*/

Inicio:

printf (Lee Longitud = ");
scanf ("%d", & L);

if (L > = INF);

goto Continúa;

else

printf ("Selecciona una longitud mayor a 10 m.")

goto Inicio;

Continúa:

if (L < = SUP)

goto Sigue;

else
```

```
printf "Selecciona una longitud menor a 100,000 m.");

goto Inicio;

Segue:

if (L < = MED)

{

printf("\nPrimer diseño: \n");

printf("Velocidad requerida de datos B = 64 Kbps. \n");

printf("Longitud requerida del enlace 10 m. <= L <= 10Km. \n");
printf ("Tomamos la máxima longitud del enlace para garantizar
        el diseño");
        B = 64;
        L = 10;
        BL = B*L;
printf("El ancho de banda (Producto BL) es:");
printf("\n BL = %8.0f Kbps *Km", BL);
printf("\n Fibra: multimodo de índice escalón");
printf("\n Fuente: SLED, GaAlAs, longitud de onda= 850 nm.\n");
printf("\n Detector: PIN.\n");
printf("\nAnálisis del presupuesto de potencia");

        PS = -12 dB;
        PR = 60 dB; /*(de la figura 7-3)*/
printf("\n PS=%6d dB", PS);
printf("\n PR=%6d dB", PR);
printf("\n");
printf("\Pérdida máxima permisible: \n");

        PERMAX = PS - PR;
        float Amax = PERMAX;

printf("Amax=%6d - (%6d) dB=%8.2f dB", PS, PR, PERMAX);
printf("\n");
printf("\nPérdidas totales por empalme \n");

        As=2; /*para 15 empalmes*/

printf("As=%6d dB", As);
printf("\n");
getch();
```

```
Printf("\n Pérdida total por conector \n");

        Ac = 2;
printf("Ac=%6d dB \n", Ac);
printf("\nMargen de seguridad de potencia: \n");

        Amar = 10;

Printf(" Amar=%8.0f dB \n", Amar);

Printf("\n Pérdida total permisible para la fibra \n");

        PERTOT = Amax - (As + Ac + Amar);
        float Af = PERTOT;
printf("Af=%8.0f - (%6d + %6d + %8.0f) = %8.0f dB", Amax, As,
        Ac, Amar, PERTOT);
printf("\n");
printf("Típica atenuación de la fibra multimodo de índice
        escalón");
printf("\n a 1300 nm. An = 2.4 dB/Km a 12 dB/Km");
printf("\n");
        float An1 = 12;
        float An2 = 2.4;

printf("\n An1 = %8.2f dB", An1);
printf("\n An2 = %8.2f dB", An2);
printf("\n");
printf("\nLongitud del enlace: Lmax = Af/An");
printf("\n Para An1 tenemos Lmax1:");
        float Lmax1;
        Lmax1 =Af/An1;

printf("\n Lmax1 = %8.2f / 8.2f = %8.2f"; Af, An1, Lmax1);
printf("\n");
printf("\n Para An2 tenemos Lmax2:");
        float Lmax2;
        Lmax2 = Af/An2;
printf("\n Lmax2 = %8.2f / 8.2f = %8.2f"; Af, An2, Lmax2);
printf("\n");
printf("\nPor lo tanto el diseño con Lmax2 satisface todo el");
printf("rango de la longitud de 10 m. a 10 Km.");
getch();
goto Fin;
}
Else
{
```

```
printf("\nSegundo diseño: \n");

printf("Velocidad requerida de datos B = 64 Kbps. \n");

printf("Longitud requerida del enlace 10 Km.<= L<= 100Km. \n");
printf ("Tomamos la máxima longitud del enlace para garantizar
        el diseño\n");
        B = 64;
        L = 100;
        BL = B*L;
printf("El ancho de banda (Producto BL) es:\n");
printf("\n BL = %8.0f Kbps *Km", BL);
printf("\n Fibra: multimodo de índice - graduado");
printf("\n Fuente: Diodo Laser (a 1300 nm.)");
printf("\n Detector: PIN FET\n");
printf("\n Análisis del presupuesto de potencia \n");

        PS = 7 dB;
        PR = -65 dB; /*(de la figura 7-3)*/
printf("\n PS=%6d dB", PS);
printf("\n PR=%6d dB", PR);
printf("\n");
printf("\nPérdida máxima permisible: \n");

        PERMAX = PS - PR;
        float Amax = PERMAX;

printf("Amax=%6d - (%6d) dB=%8.0f dB", PS, PR, PERMAX);
printf("\n");
printf("\nPérdidas totales por empalme \n");

        int As=5;

printf("As=%6d dB", As);
printf("\n");
getch();
Printf("\n Pérdida total por conector \n");

        Ac = 2;
printf("Ac=%6d dB \n", Ac);
printf("\nMargen de seguridad de potencia: \n");

        float Amar = 11.5;

Printf(" Amar=%8.2f dB \n", Amar);
```

```
Printf("\n Pérdida total permisible para la fibra \n");

    PERTOT = Amax - (As + Ac + Amar);
    float Af = PERTOT;
printf("Af=%8.0f - (%6d + %6d + %8.0f) = %8.0f dB", Amax, As,
    Ac, Amar, PERTOT);
printf("\n");
printf("Típica atenuación de la fibra multimodo de índice
    graduado");
printf("\n a 1300 nm. An = 0.5 dB/Km a 1.5 dB/Km");
printf("\n");
    float An1 = 1.5;
    float An2 = 0.5;

printf("\n An1 = %8.2f dB", An1);
printf("\n An2 = %8.2f dB", An2);
printf("\n");
printf("\nLongitud del enlace: Lmax = Af/An");
printf("\n Para An1 tenemos Lmax1:");
    float Lmax1;
    Lmax1 =Af/An1;

printf("\n Lmax1 = %8.2f / 8.2f = %8.2f"; Af, An1, Lmax1);
printf("\n");
printf("\n Para An2 tenemos Lmax2:");
    float Lmax2;
    Lmax2 = Af/An2;
printf("\n Lmax2 = %8.2f / 8.2f = %8.2f"; Af, An2, Lmax2);
printf("\n");
printf("\nPor lo tanto el diseño con Lmax2 satisface todo el");
printf("rango de la longitud de 10 Km. a 100 Km.");
getch();
}
Fin:
Return0;
}
```

## CONCLUSIONES

Sabemos que la fibra óptica ha prometido un gran avance en el desarrollo de las comunicaciones, de la electrónica, de la mecánica; en fin del desarrollo de nuevas tecnologías. Esto me motivó a realizar un estudio de un sistema de comunicación, abordando el estudio del diodo de heterounión, el diodo laser, la fibra óptica multimodo y monomodo, los fotodetectores PIN y de Avalancha, la multicanalización por división de tiempo y la multicanalización por división de longitud de onda, el lenguaje de programación, que como ingeniero es parte de la formación profesional.

El estudio lo comencé con la historia de la comunicación, el cual nos indica su importancia tanto en el pasado como con mayor razón en el presente.

La importancia de la electrónica en el desarrollo de los dispositivos electrónicos, en el transmisor las fuentes de luz: el Led de heterounión y el diodo laser. El láser revoluciona las comunicaciones ópticas, permitiendo construir redes con mayores distancias. Es adecuado para la construcción de redes más eficientes. La capacidad de transmisión también se incrementa con la tecnología óptica.

Después estudiamos la fibra óptica, base fundamental de las comunicaciones ópticas. El interés en el uso de la fibra óptica, y en particular de la fibra óptica monomodo la cual tiene características de: baja atenuación, inmunidad a interferencias, alta seguridad en la señal, aislamiento eléctrico, alto ancho de banda y fácil instalación.

En la actualidad con la construcción de amplificadores de fibra óptica y láseres de múltiples longitudes de onda, hacen posible la multiplexión de longitud de ondas densas (DWDM). La DWDM es uno de los temas que mayor impacto tiene en las comunicaciones ópticas, pues con estos dispositivos se incrementa demasiado la capacidad de los sistemas de transmisión de datos y de voz, sin alterar las arquitecturas de las redes implantadas, respondiendo a la demanda de mayor ancho de banda. La tecnología DWDM viene a resolver el problema de la capacidad de transmisión en redes ópticas.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica cada día se presentan como una solución a la demanda de las comunicaciones, y

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN DIGITAL MULTIPLEXADO DE 64 KBPS, VIA FIBRA ÓPTICA,  
UTILIZANDO LENGUAJE C

por lo tanto es muy importante el diseño de sistemas de comunicación óptica. En el presente trabajo se muestra un diseño de comunicación óptica muy sencillo, el cual es la base para la comprensión de los sistemas más complejos que hoy en día se utilizan.

El estudio del diseño de un sistema digital multiplexado de 64 kbps, vía fibra óptica, utilizando lenguaje C, es un ejemplo básico del diseño de los sistemas de comunicación óptica, en donde interviene la tecnología que avanza de forma impresionante. Éste estudio también nos indica que el desarrollo de las comunicaciones ópticas aún continúa, sin conocer aún los límites de la capacidad para la transmisión por fibra óptica.

## Apéndice A

### Corrida del programa de Tesis

Lee Longitud =10000  
Primer diseño  
Velocidad requerida de datos B = 64 Kbps  
Longitud requerida del enlace  $10\text{m} \leq L \leq 10\text{ Km}$   
Tomamos la máxima longitud del enlace para garantizar el diseño  
El ancho de banda (producto BL) es:  
BL= 640 Kbps\*Km  
Fibra:multimodo de índice escalón  
Fuente: SLED, GaAlAs, longitud de onda=850nm  
Detector: PIN  
Análisis del presupuesto de potencia  
PS= -12 dB  
PR= -60 dB  
Pérdida máxima permisible:  
Amax=  $-12 - (-60)$  dB= 48.00 dB  
Pérdidas totales por empalme  
As= 2 dB  
Pérdida total por conector  
Ac= 2 dB  
Margen de seguridad de potencia:  
Amar= 10 dB  
Pérdida total permisible para la fibra:  
Af=  $48 - (2 + 2 + 10)$  = 34 dB  
Típica atenuación de la fibra multimodo de índice escalón  
a 1300nm An=2.4 dB/Km a 12 dB/Km  
An1= 12.00 dB  
An2= 2.40 dB  
  
Longitud del enlace:  $L_{\text{max}} = A_f/A_n$   
Para An1 tenemos  $L_{\text{max}1}$ :  
 $L_{\text{max}1} = 34.00 / 12.00 = 2.83$   
  
Para An2 tenemos  $L_{\text{max}2}$ :  
 $L_{\text{max}2} = 34.00 / 2.40 = 14.17$   
  
Por lo tanto el diseño con  $L_{\text{max}2}$  satisface todo el rango de la  
longitud de 10 m  
. a 10 Km.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] "Comunicación por fibra óptica",  
Díaz de la Iglesia Raymundo, Ed. Marcombo, 1985.
- [2] "Introducción a la telecomunicación por fibra óptica",  
Fernando Navarrete Montes de Oca, Editado por IPN, 1991.
- [3] "Optical fiber communications",  
John M. Senior, Ed. Prentice Hall, 1985.
- [4] "Optical fiber transmission",  
E. E. Bert Bash, Ed. Howard W. Sams & Co., 1988.
- [5] "Optical fiber Communications",  
Gerd Keiser, Ed. Mc Graw Hill, 1984.
- [6] "Fiber optic communications",  
Joseph C. Palais, Ed. Prentice Hall, 1988.
- [7] "Fiber optics handbook"  
Frederick C. Allard, Ed. Mc Graw Hill, 1990
- [8] "Semiconductor lasers and Heterojunction LED`s",  
Henry Kressel and J. K. Butler, Ed. Academic Press, 1977.
- [9] "Transmisión de información, modulación y ruido"  
Mischa Schwartz, Ed. Mc Graw Hill, 1990.
- [10] "Introducción a la teoría y sistemas de comunicación"  
B.P. Lathi, Ed. Limusa, 1983.
- [11] "sistemas de comunicación"  
B.P. Lathi Ed. Nueva Editorial Interamericana, 1986.
- [12] "Historia de la comunicación audiovisual"  
Moreno García R., López Ortiz Ma., Ed. Patria, 1962.
- [13] "Comunicación social y desarrollo"  
Antonio Menéndez, Editado por la UNAM FCPS, 1977.
- [14] "Ondas luminosas"  
Jca Chaimowicz, Ed. Paraninfo S.A., 1990.

## BIBLIOGRAFIA (Continuación)

- [15] "Optical Fiber Systems: Technology, Design, and Applications"  
Charles K. Kao, Ed. Mc Graw Hill, 1986.
- [16] "LASERS: Operación, equipo, uso y diseño"  
Preparado por el Grupo de Ingeniería de la compañía  
Coherent, Inc.,  
Ed. Limusa, 1985.
- [17] "High-Power Lasers:Improvements and applications"  
Judith Sigmund & Marten Terpstra, Ed. Elsevier Applied  
Science, 1988.
- [18] "Aplicaciones Industriales del Láser"  
L. Bachs, J. Cuesta, N.Carles, Ed. Marcombo, 1988.
- [19] "Introducción a la fibra óptica y el laser"  
Edward L. Safford, Ed. Paraninfo, 1988.
- [20] "Optoelectronics: Device Data"  
Motorola, 1993.
- [21] "Understanding Optical Communications"  
Dutton, Harry J. R., IBM Corporation, 1988
- [22] "Fiber Optic Reference Guide"  
Goff David R. 2a. ed. Boston: Focal press, 1999
- [23] "SONET"  
Goralski, Walter, 2<sup>a</sup> ed. New York, McGraw-Hill, 2000