

CAPITULO 1

LAS COMUNICACIONES OPTICAS

1.1. ANTECEDENTES

La idea de transmitir información por medio de la luz tiene siglos de antigüedad. De hecho, los clásicos heliógrafos y la transmisión de señales por antorchas responde a esta idea.

Hacia 1880, Bell construyó un aparato -el fotófono- que enviaba señales vocales a corta distancia por medio de la luz. El equipo disponía de un sistema de lentes que enfocaban un rayo de luz solar, modulándolo y lanzándolo después al espacio libre hacia un receptor. Conceptualmente, era correcto; sin embargo, su aplicación no fué posible, tanto por la falta de fuentes de luz adecuadas como de un medio de propagación de bajas pérdidas, y la idea se abandonó.

En 1958 apareció un método para la producción de radiaciones electromagnéticas en las longitudes de onda del espectro visible, utilizando los estados energéticos de los átomos para producir, mediante cambios simultáneos de sus niveles, radiaciones electromagnéticas controladas.

El aparato utilizado se llamó LÁSER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation); las fuentes luminosas habituales (tungsteno, lámparas fluorescentes, etc.) producen un espectro compuesto por una banda ancha de señales con distintas frecuencias y fases, así como diferentes amplitudes y polarizaciones (luz no coherente). El láser se caracteriza por ser un generador de luz monocromática -ondas de la misma frecuencia y en fase -, constituyendo su salida un haz de luz coherente. Además, las trayectorias de los rayos emergentes del láser resultan paralelas, lo que permite concentrar una alta cantidad de energía en superficies reducidas, como es el caso de las fibras de vidrio.

Con la invención del láser como fuente de luz coherente, volvió a considerarse la idea de utilizar aquella como soporte de comunicaciones y sistema alternativo o sustitutivo de los existentes, formulando al mismo tiempo los primeros conceptos sobre transmisión por guía de ondas de vidrio. Particularmente atractiva resultaba su utilización para comunicaciones digitales, ya que con una fuente láser disparada a alta velocidad se pueden transmitir los unos y los ceros de una comunicación digital hacia un detector.

Poco después, en 1975, aparecían los primeros proyectos experimentales, instalándose de modo creciente a partir de 1980.

En este momento constituye el medio terrestre de comunicaciones de mayores prestaciones y más alta potencialidad.

1.2. JUSTIFICACION DE LAS COMUNICACIONES OPTICAS

La necesidad de nuevos planteamientos en las comunicaciones surgió en países telefónicamente avanzados, en los que su red pedía soluciones a problemas de saturación, y cuya única solución estaba en conseguir medios de mayor capacidad que los existentes.

Hasta entonces, cuando se necesitaba un medio de transmisión de gran capacidad de tráfico se acudía a la instalación de cables coaxiales o de radioenlaces de mayor capacidad. Al aumentar el número de enlaces necesarios por demanda de tráfico, se precisaba un mayor ancho de banda del portador, lo que, a su vez, exigía el empleo de frecuencias cada vez más altas y, en consecuencia, más repetidores en las rutas de cables coaxiales, a causa de la mayor atenuación de las señales.

En el caso de los radioenlaces, el aumento de la capacidad también se traducían en el empleo de frecuencias más altas y mayor número de repetidores, pero esta vez con el agravante de la saturación del espectro electromagnético.

En resumen, la explotación de las redes telefónicas se iba haciendo más onerosa y aumentaban las dificultades de orden técnico, lo que exigía nuevos planteamientos para esos problemas. Las investigaciones realizadas en la década de los años sesenta en torno a la fibra óptica y sus posibles aplicaciones como guía de ondas sirvieron de base para el nuevo camino que se pretendía emprender.

Antes de seguir adelante, conviene recalcar por qué se ha dado en utilizar la luz como soporte de información y por qué no nos servimos de la atmósfera como medio de propagación.

1.2.1. La luz como soporte de información

Todos los cuerpos que no se hallan en equilibrio con su entorno radian o absorben energía. Podemos admitir desde un punto de vista conceptual que una comunicación implica un intercambio de energía; ahora bien, esa energía puesta en juego se puede clasificar de muchos modos, y uno de ellos es el espectral, en el que dos parámetros relacionados entre sí ordenan espacial y temporalmente dicha energía.

El parámetro espacial **-longitud de onda-** indica que la propagación es espacialmente periódica; el segundo es temporal y se le denomina frecuencia. Una representación del espectro de frecuencias la tenemos en la figura 1-1.

Hablando en términos de frecuencia, en el caso de utilización de portadores metálicos, las energías transmitidas se situaban en zonas de frecuencia del orden de decenas de MHz (hasta 100 MHz en teoría y en la práctica no más de 60 MHz en el caso de los cables coaxiales), y de decenas de GHz (hasta 10^{11} Hz en teoría y no más de 20 GHz) cuando se trataba de radioenlaces. Estas señales, en técnicas de modulación de frecuencia (MDF), constituyen las portadoras que, empleadas sobre canales telefónicos de un ancho de banda típico de 4 KHz proporcionan un índice teórico del número de circuitos telefónicos que dichos portadores admiten.

Conceptualmente, un sistema de transmisión por fibra óptica es similar a un sistema de microondas en muchos aspectos; las diferencias estriban en que en un caso el medio de transmisión es el espacio libre, y en el otro, una guía de ondas de vidrio, y en que la transmisión tiene lugar a frecuencias ópticas, varios órdenes de magnitud superiores a las de microondas. En la tecnología de las fibras ópticas se habla en términos de longitud de onda, en lugar de hacerlo en frecuencias, encontrándose ambas magnitudes ligadas por la relación:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

donde λ , es la longitud de onda del haz de luz en el medio considerado, c la velocidad de la luz en el mismo medio y f la frecuencia de la onda luminosa. Si ahora consideramos la zona espectral óptica, cuya frecuencia se sitúa en torno a los 10^{14} Hz, y suponiendo que se utilizasen las técnicas MDF, la capacidad potencial de este medio de transmisión sería 10^7 veces la de un cable coaxial y 10^4 veces la de un radioenlace de microondas.

Esta posibilidad, por sí sola, ya justifica el empleo del espectro óptico en las comunicaciones. Pero es evidente que la utilización de la luz como portadora de información exige disponer de una fuente de determinadas características y, de hecho, fue la disponibilidad del láser como fuente de luz coherente y monocromática lo que estimuló la exploración de comunicaciones ópticas como soporte de altos flujos de información, debido a la alta frecuencia de la portadora.

También en la década de los años sesenta comenzaron los estudios básicos sobre los procesos de modulación y detección de la luz, que eran necesarios para llevar a cabo las conversiones electro-ópticas imprescindibles en la transmisión de señales por medio de la luz.

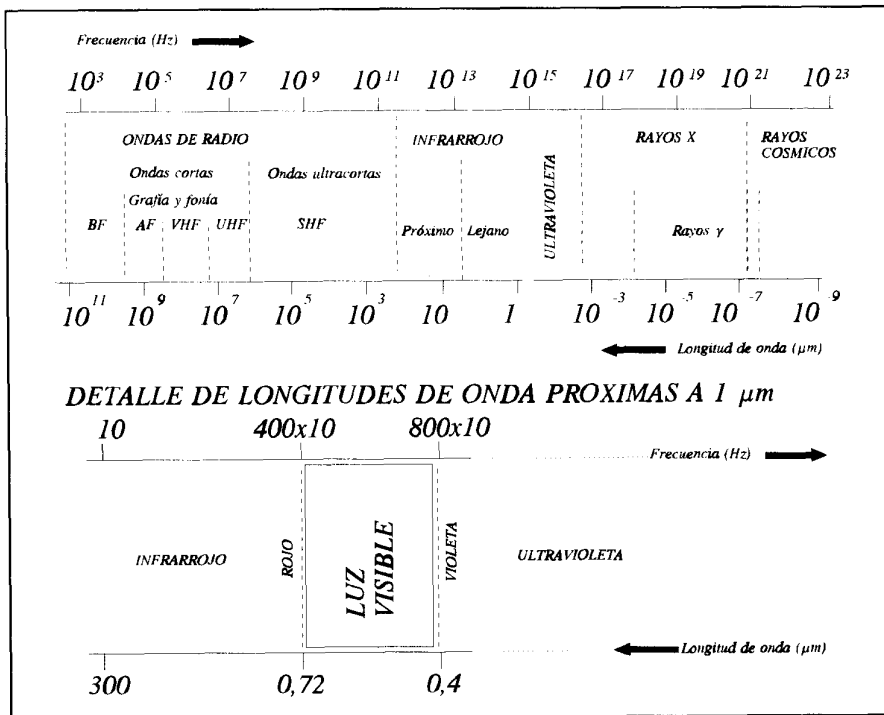


Figura 1.1. Frecuencias y longitudes de onda

1.2.2. El medio de propagación

Una vez vista la posibilidad de utilizar estos generadores y detectores para transmisión de un haz de luz, quedaba por resolver el problema del medio de transmisión a emplear. Los primeros experimentos sobre transmisión por la atmósfera a estas frecuencias pusieron de manifiesto diversos obstáculos: escasa fiabilidad de la transmisión debido a las precipitaciones atmosféricas, contaminación, turbulencias, etc. Así, los valores de atenuación de las señales en atmósfera húmeda oscilan entre 1 y 100 dB/Km, dependiendo de la frecuencia de las señales y de la intensidad de la precipitación. Del mismo modo, los túneles de propagación causados por estratificación atmosférica son particularmente sensibles a la frecuencia. Era evidente, por tanto, que en estas condiciones debía prescindirse de la atmósfera como medio de propagación.

Las experiencias de años anteriores sobre transmisión a grandes distancias mediante guías de onda (elípticas, circulares o rectangulares) no prosperaron, debido, entre otras razones, a la gran distorsión de fase que producían y que obligaba a la inserción periódica de igualadores del tiempo de propagación de grupo. La atenuación, sin embargo, se mantenía en límites razonables (unos 4 o 5 dB/Km.), al menos para frecuencias de unos pocos GHz, aumentando luego de modo casi exponencial. En definitiva, no aportaban un gran salto sobre la situación existente con los medios de transmisión en explotación hasta entonces. La aplicación de estas guías de onda quedó reducida a uniones rígidas entre los equipos transmisores o receptores y las antenas de los radioenlaces, con longitudes de algunas decenas de metros.

Las dificultades que presentaban los medios clásicos para conseguir un aumento de la cantidad de información a transmitir llevó a los científicos a pensar nuevamente en la luz como el portador de información de más alta capacidad del universo. Pero concurrían tres problemas en la materialización de la idea:

- 1) Tendrían que desarrollarse dispositivos o procedimientos que transportasen la información sobre la luz como soporte.

- 2) Suponiendo que lo anterior se lograra, tendrían que desarrollarse dispositivos que, por un extremo, pudiesen inyectar luz en el guías de onda cilíndrico, y por otro, fuesen capaces de hacer en el extremo opuesto el efecto contrario, extrayendo de la luz la información original.
- 3) Tendrían que perfeccionarse los guías de onda de vidrio, que por entonces presentaban una atenuación increíblemente grande (~ 1000 dB/Km).

En 1966, los doctores Kao y Hoffmann presentaron un artículo, Dielectric fibre surface waveguide for optical frequencies, en el que proponían utilizar la luz para transmitir información a través de fibra de sílice.

Poco a poco se redujo la atenuación de las fibras de vidrio, llegando la Coming Glass a obtener en 1970 fibras con valores de atenuación del orden de los 20 dB/Km y en 1980 se había alcanzado prácticamente el límite teórico inferior de atenuación, causado por la dispersión Rayleigh.

A partir de este momento, el desarrollo se aceleró, obteniendo con los actuales materiales (sílice dopada) fibras con atenuación de 0.23 dB/Km. Con estas cifras parece haberse llegado al límite mínimo de atenuación en las fibras constituidas por este material, por lo que últimamente se ensayan otros compuestos a base de vidrios haluros, generalmente fluoruros y calcogenuros, en zonas del infrarrojo medio (longitudes de onda superiores a 2 μ m) con los que, al menos en laboratorio, se obtienen atenuaciones del orden de 10^{-3} o 10^{-4} dB/Km. También se han ensayado con éxito fibras dopadas con erbio que, atacadas por longitudes de onda de 1480 nm (1 nanometro = 10^{-9} m) actúan como amplificadores ópticos.

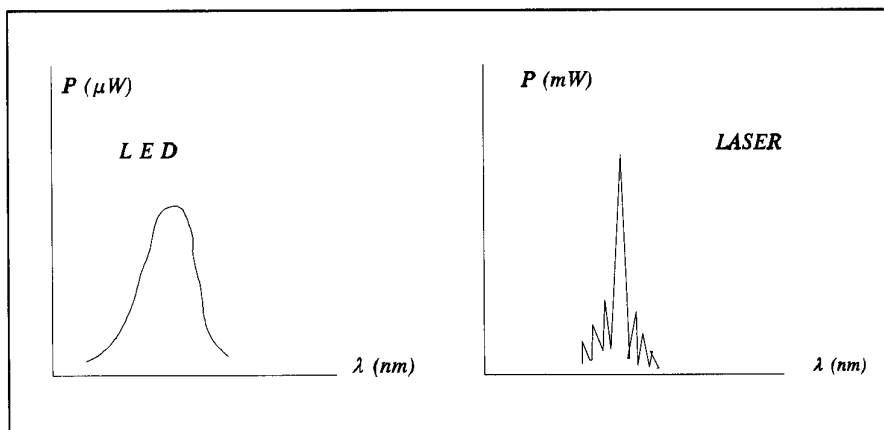


Figura 1.2. Espectros de un diodo LED y uno LASER

En las mismas fechas en que el Dr. Kao trabajaba sobre las fibras de sílice, Telefunken editó una patente sobre utilización de un láser semiconductor, acoplado a una fibra de vidrio y un fotodiodo para transmitir señales MIC. El diodo láser (LASER DIODE o LD), realizando la misma función que el LED, presentaba como ventaja un diagrama de radiación (espectro) más aceptable para las comunicaciones por ser más estrecho. El diodo LED -diodo electroluminiscente- es capaz de generar impulsos luminosos que podrían servir de onda portadora de una información eléctrica, analógica o digital. Pero lo hace de forma poco interesante en telecomunicación, fundamentalmente porque genera una luz que presenta un espectro de radiación muy amplio, cuando lo que se necesita, en teoría al menos, como onda portadora para ser modulada por una señal es una frecuencia pura.

Los láseres de semiconductores presentaban problemas de funcionamiento por el calor generado a causa de la alta densidad de corriente que soportaban. Su vida inicial era corta y su precio alto, mientras que actualmente se han logrado descensos impresionantes en los segundos y la vida media supera las 108 horas.

Paralelamente a estos dispositivos emisores de luz, se desarrolló un dispositivo receptor capaz de realizar la operación inversa: convertir la energía luminosa en señales eléctricas aptas

para ser procesadas. Tal dispositivo era un fotodiodo, del que el tipo más extendido en los primeros años fue el llamado PIN (PIN: P = semiconductor P; I = semiconductor intrínseco (sin impurezas); N = semiconductor N). Aun cuando la fibra óptica es capaz de transmitir cualquier tipo de señal, se utiliza especialmente en el terreno de la transmisión digital. Es decir, la señal original que se quiere transmitir por la fibra es información procedente de un equipo multiplex digital de 8, 34, 140, etc. Mb/s (Mbps).

A partir de 1975, la tecnología de las fibras ópticas ha avanzado a un ritmo vertiginoso desde todos los puntos de vista, evolucionando a medida que los laboratorios perseveraban en su empeño de conseguir sistemas capaces de transmitir más cantidad de información, a velocidades más elevadas, hasta mayores distancias y reduciendo costes.

La fibra óptica se empezó a utilizar en los enlaces telefónicos de comunicaciones, ampliando después su radio de acción a las redes de abonado, donde se espera su futuro más prometedor. Precisamente su gran anchura de banda, del orden de los 140 THz en la banda de 900 a 1600 nm, permitirá su empleo masivo en las redes de área local de abonado (RAL o LAN), redes metropolitanas (MAN) y redes de zona amplia (WAN).

1.3. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES POR FIBRA

De lo expuesto en el apartado 1.2, se deduce que un sistema de comunicaciones por fibra óptica se compone de una o varias fibras para cada dirección de transmisión, terminadas en sus extremos por un emisor y un detector.

El primero constituye un convertidor electro-óptico (E/O): su misión, bien se trate de un LED o de un diodo láser, es suministrar la onda portadora luminosa que ha de transportar la información básica *-analógica o digital-* a través de la fibra hacia el detector. La elección de uno u otro tipo de emisor es función de la potencia de salida necesaria y de la velocidad binaria requerida: el láser tiene una mayor potencia de salida que el LED y presenta mejores posibilidades de acoplamiento a la fibra. Sin embargo, es más caro que el diodo LED y su vida es menor, aunque últimamente esto no sea rigurosamente cierto.

El emisor contiene, pues, básicamente los sistemas codificadores de la señal incidente, el LD como generador de la onda portadora y un modulador. Dispone de un rabillo de fibra (pigtail) al que se acoplará un conector de unión con la sección primera de la fibra. Los primeros transmisores eran diodos que producían radiaciones infrarrojas en una longitud de onda de 870 nm; los diodos respondían a los cambios que experimenta la señal eléctrica emitiendo luz con diferentes intensidades (modulación).

Los tramos de fibra - hasta de 2 o 3 Km - se empalman sucesivamente. La disposición habitual es la de unión de varias fibras independientes configurando un cable con cubierta protectora.

Cada fibra consta de una parte central, llamada núcleo, y otra exterior, revestimiento, que actúa como guía de la luz que se propaga a lo largo del primero. Las señales, en su progresión a lo largo de la fibra, se van ensanchando y debilitando. La dispersión de la señal se debe, en parte, a las diferentes velocidades a que se propagan por el núcleo las radiaciones de distinta frecuencia; en cuanto a la atenuación de la señal, viene provocada, en gran medida, por la absorción en las impurezas del vidrio.

Antes de que la atenuación y la dispersión de la señal inyectada la hagan irreconocible para el receptor, es preciso regenerarla. Esta función corresponde a los regeneradores, que no son propiamente amplificadores, ya que no sólo restituyen el nivel de la señal, sino que la conforman. Para regenerar la señal procedente de la fibra es preciso proceder previamente a una conversión optoelectrónica (O/E) mediante un detector PIN o APD; la señal eléctrica obtenida se trata en el regenerador y se pasa después por otro convertidor electro-óptico (E/O), lanzándola nuevamente al medio de transmisión. También veremos que los sistemas actuales tien-

den a los sistemas ópticos integrados, donde no es preciso recurrir a estas conversiones intermedias.

Al final del sistema se encuentra el receptor, compuesto por un detector - convertidor optoelectrónico - y una sección de amplificación, que lleva la señal al nivel adecuado para su ataque al equipo final.

La adecuación de la señal al medio de transmisión exige darle, determinada forma, lo que se consigue mediante los llamados códigos de línea. En los sistemas de transmisión por fibra se incluyen, además de las señales de tráfico propiamente dichas, otras de control de la tasa de errores (BER), sincronización, supervisión y telealimentación.

1.4. PROPIEDADES DE LA FIBRA OPTICA

1. La fibra óptica presenta un **gran ancho de banda**, lo que supone más información por conductor que con los medios convencionales. Se manejan valores desde cientos de MHz hasta decenas de GHz.

2. La **atenuación** que presenta la fibra es **independiente** de la velocidad de transmisión a la que se esté explotando, lo cual no ocurre en cables convencionales, ya que en ellos es tanto mayor la atenuación cuanto mayor es el régimen binario, o velocidad de transmisión (Mb/s). La fibra óptica es totalmente adecuada en virtud de esta característica para transmitir las más altas jerarquías digitales. Sin embargo, presenta cierta atenuación, función de sus características físicas, que, además, es variable con la longitud de onda de la señal que la atraviesa. Esta atenuación pasa por unos mínimos en determinadas longitudes de onda, llamadas ventanas de transmisión, situadas en las zonas de 800-900 nm, 1200-1300 nm y 1500-1600 nm.

Los primeros sistemas comerciales (1977) trabajaban en la zona de 850 nm, en gran parte a causa de la no disponibilidad de láseres y detectores para mayores longitudes de onda, la velocidad binaria era de 45 Mb/s y los regeneradores intermedios distaban entre sí unos 6 Km. A medida que se fue disponiendo de esos elementos, se comenzaron a implantar los primeros sistemas a 1300 nm, longitud de onda que proporcionaba más bajas cifras de atenuación, llegándose actualmente a los 1550 nm, con velocidades comerciales de 565 Mb/s, (5a jerarquía digital) y ya se empiezan a explotar los primeros sistemas a 1200 Mb/s. Los sistemas de la 5a jerarquía pueden transmitir por cada fibra 7680 canales de comunicación simultánea con una distancia entre regeneradores superior a los 50 Km.

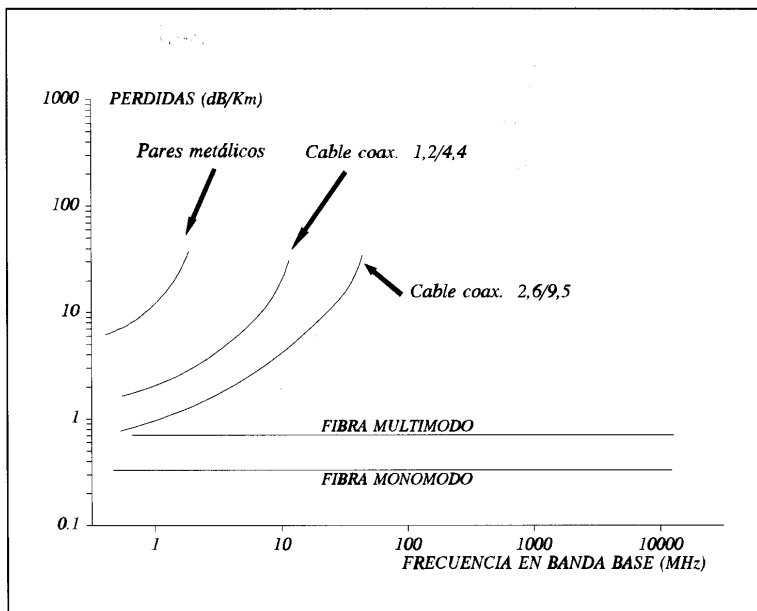


Figura 1.3. Atenuaciones

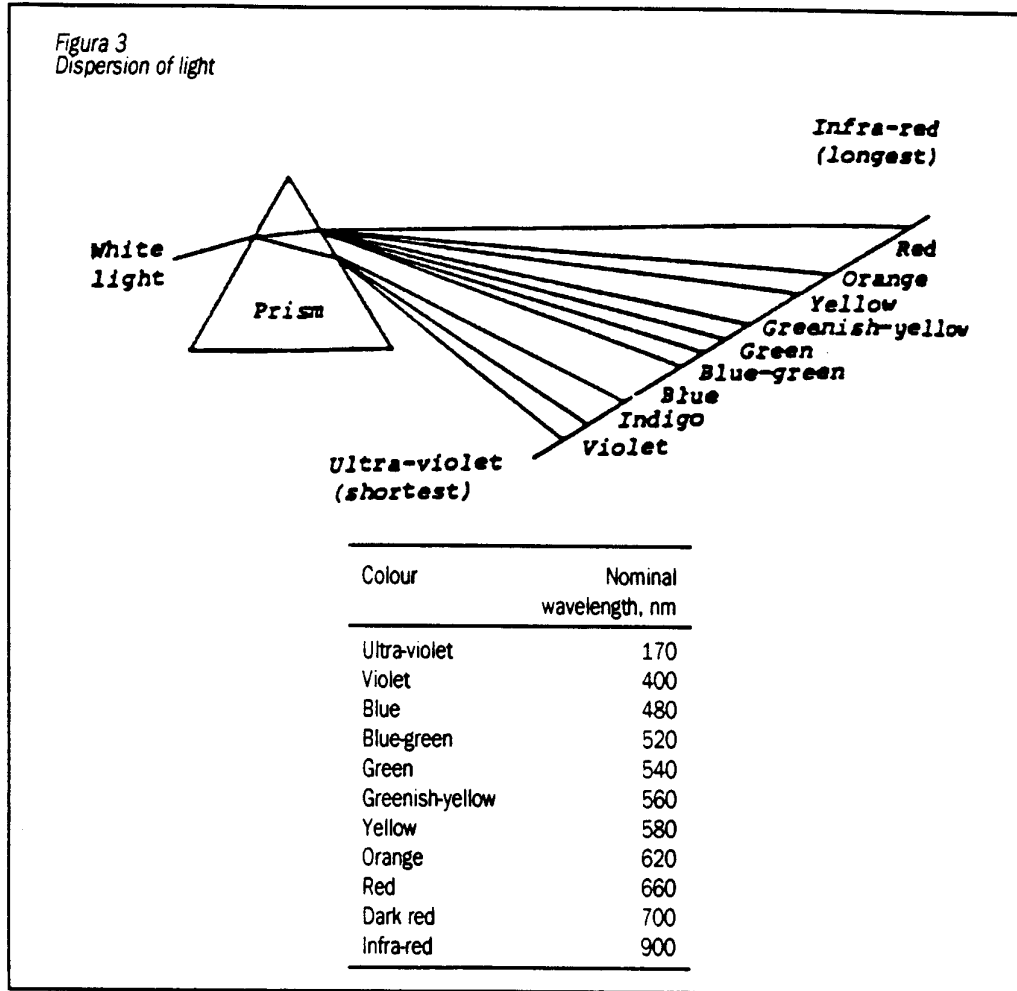
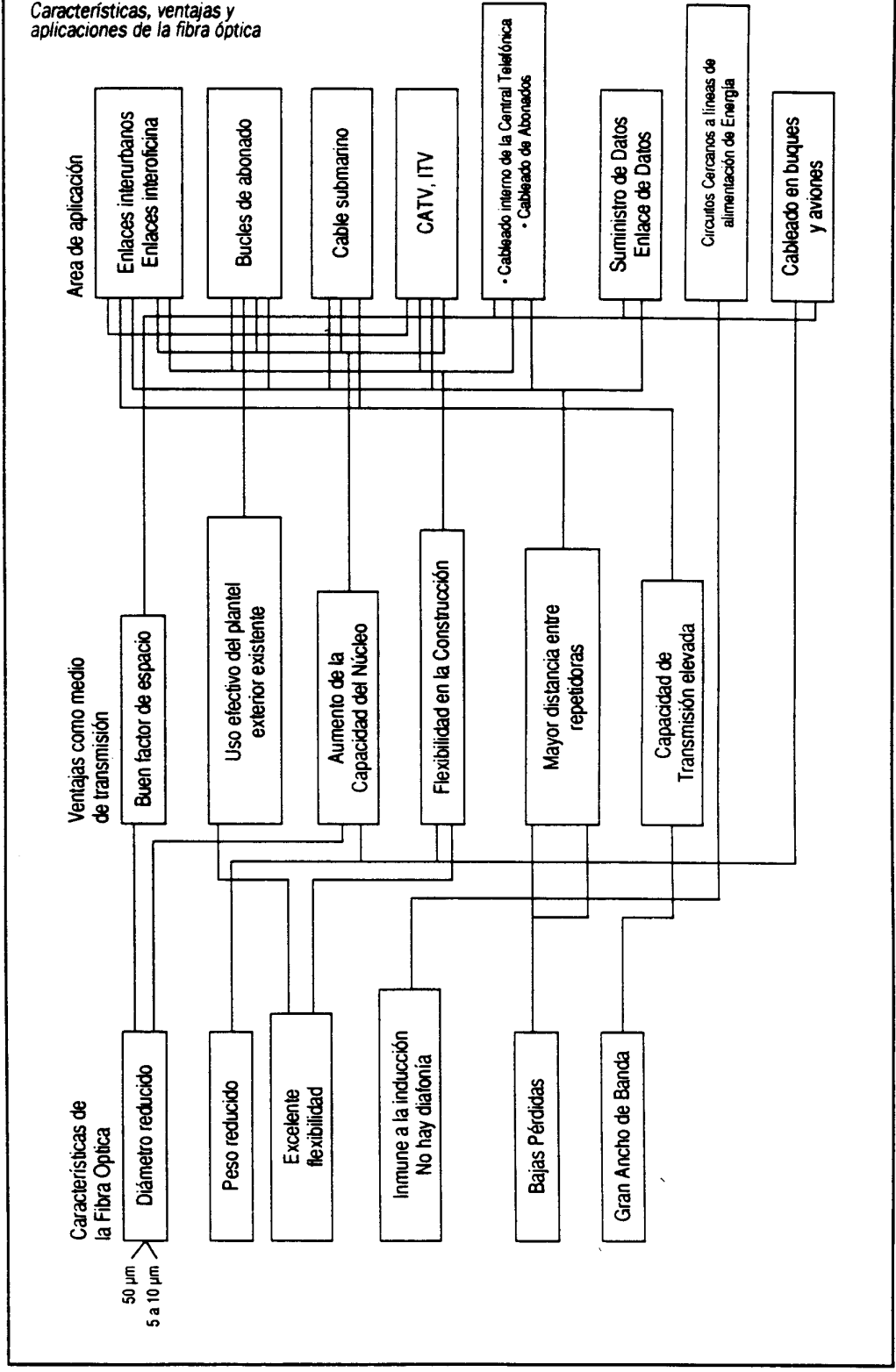
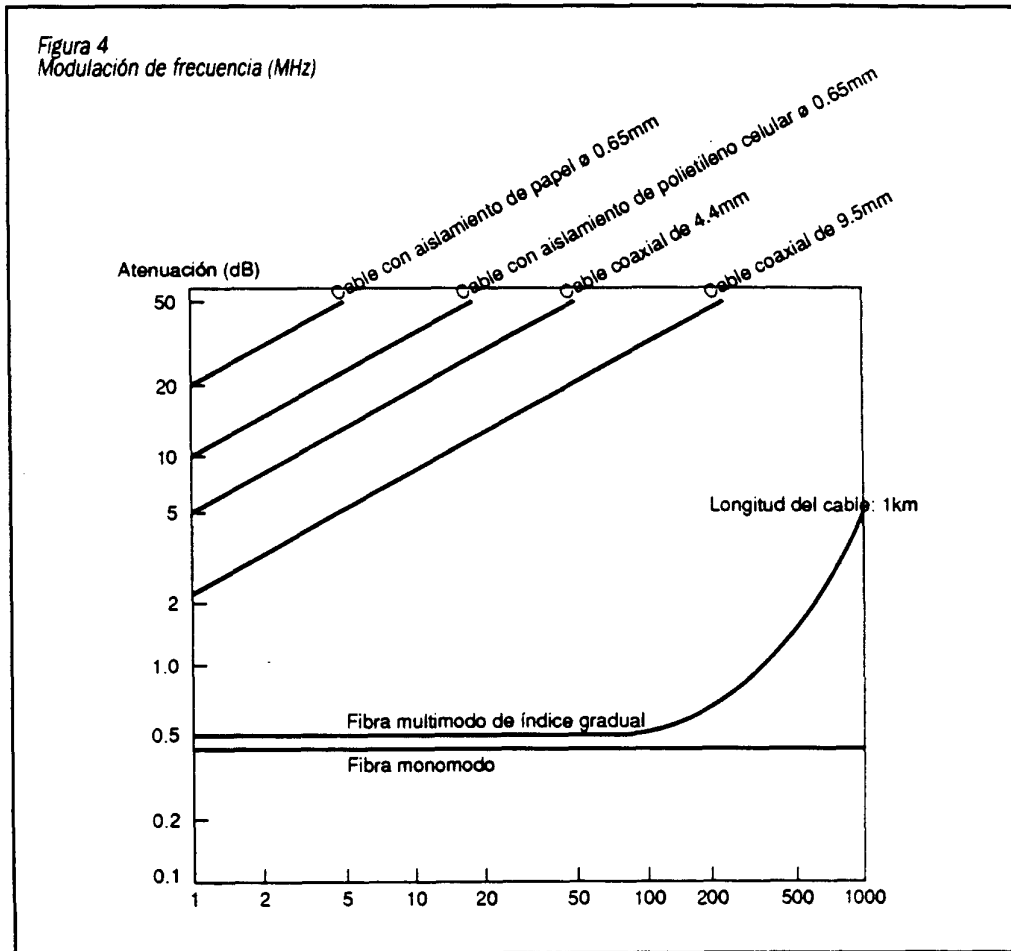


Figura 1.4. Efecto prisma

Cuadro 1
Características, ventajas y
aplicaciones de la fibra óptica





3. La fibra es **inmune al ruido y las interferencias** por ser un medio dieléctrico, característica muy positiva en muchas aplicaciones, sobre todo cuando el cable debe pasar por zonas donde hay instalaciones de alta tensión.

4. La información que viaja por la fibra **no se puede detectar**, aunque sí interceptar, porque la luz no es sensible a ningún fenómeno de tipo inductivo por la especial configuración de su campo electromagnético. Esto explica que cerca del 10% de la producción mundial de fibra se destine a instalaciones militares.

5. La fibra presenta unas **dimensiones más reducidas** que los medios preexistentes, lo que se traduce en economía de transporte. Un cable de 10 fibras tiene un diámetro aproximado de 8 o 10 mm y proporciona la misma o más información que un coaxial de 10 tubos. Resulta, por tanto, que el número de enlaces o circuitos por unidad de volumen ocupado es muy superior en la fibra que en un coaxial.

6. El **peso** del cable de fibras ópticas es **muy inferior** al de los cables metálicos, redundando en facilidad de instalación (aproximadamente 50 a 200 Kg por km, y las bobinas pueden ser de una longitud que va de 2 a 6 Km, mientras que en el cable coaxial son de unos 300 m).

7. La sílice tiene un amplio margen de funcionamiento en lo referente a temperatura, pues funde a 600 °C. La fibra óptica presenta un **funcionamiento uniforme** desde -55 °C a +125 °C sin degradación de sus características, al contrario de lo que ocurre en muchos cables metálicos, cuya atenuación depende de su resistencia, y ésta, de la temperatura.

8. **La materia prima para fabricarla es muy abundante en la naturaleza** (es el 30% de la superficie terrestre), lo cual lleva los costes sistemáticamente a la baja según mejoran los pro-

cesos tecnológicos, al contrario de lo que ocurre con el cobre, cuyo precio depende fundamentalmente de las reservas. De hecho, el precio de los cables de fibra ha ido disminuyendo progresivamente desde su nacimiento, ya que su coste es casi inversamente proporcional al volumen de producción.

En la tabla siguiente se recogen datos comparativos de un cable de 16 fibras y un coaxial de 8 tubos, donde se aprecian las ventajas de este nuevo medio de transmisión.

Tabla 1.1 Comparación entre un cable de 16 fibras y un cable coaxial D.N. de 8 tubos.

Características	Fibra óptica	Cable coaxial
Precio (Mptas/km)	0,9	6,6
Longitud de la bobina (m)	3.000,0	300,0
Peso (kg/km)	190,0	7.900,0
Diámetro (mm)	14,0	58,0
Atenuación (dB/km) para un sistema a 565 Mb/seg	0,4	40,0
Distancia entre repetidores (km)	40,0	1,5

CAPITULO 2

PROPAGACION

2.1. PROPAGACION DE LA LUZ EN LA FIBRA OPTICA

La fibra óptica es un medio de transmisión de información analógica o digital en la cual los principios básicos de funcionamiento se justifican de forma clara, aunque poco rigurosa, aplicándole las leyes de la óptica geométrica. Si se quiere entender rigurosamente el mecanismo de propagación en el interior de la fibra, hay que recurrir a la resolución de las ecuaciones del campo electromagnético; es decir, las ecuaciones de Maxwell.

Básicamente, la fibra óptica está compuesta por una región cilíndrica, por la cual se efectúa la propagación, denominada núcleo, y de una zona externa al núcleo y coaxial con él, totalmente necesaria para que se produzca el mecanismo de propagación, y que se denomina envoltura o revestimiento.

La capacidad de transmisión de información que tiene una fibra óptica depende de tres características fundamentales:

- Del diseño geométrico de la fibra.
- De las propiedades de los materiales empleados en su elaboración (diseño óptico).
- De la anchura espectral de la fuente de luz utilizada. Cuanto mayor sea esa anchura, menor será la capacidad de transmisión de información de esa fibra.

2.2. REFLEXION Y REFRACCION EN UN INTERFAZ DIELECTRICO

2.2.1. Índice de refracción

Se define el índice de refracción de un material como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en dicho material.

La velocidad de la luz en un medio es tanto menor cuanto más denso sea éste. Por tanto, el índice de refracción de cualquier material será siempre mayor que la unidad:

$$n = c/v ; n > 1$$

2.2.2. Reflexión total

Cuando una onda plana incide en el plano de separación (interfaz) de dos medios dieléctricos con distinto índice de refracción, experimenta dos fenómenos:

1. Sufre una desviación o reflexión hacia el medio del que procede. A la onda resultante se le llama **onda reflejada**.
2. Experimenta una variación en la trayectoria original, pero de modo que atraviesa el interfaz y se convierte en una **onda refractada**.

Las leyes que ligam a estas tres ondas son:

1).-**Ley de la reflexión** : Los ángulos que forman el rayo incidente y el reflejado con la normal a la superficie de separación de los dos medios son iguales.

$$\alpha_1 = \alpha_R$$

2a.- **Ley de la refracción** (o de Snell): Los índices de refracción de los dos medios están en razón inversa de los senos de los ángulos que forma la normal a la superficie de separación con las respectivas ondas.

$$n_1/n_2 = \text{sen } \alpha_2/\text{sen } \alpha_1$$

(2-1)

$$n_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = n_2 \cdot \text{sen } \alpha_2$$

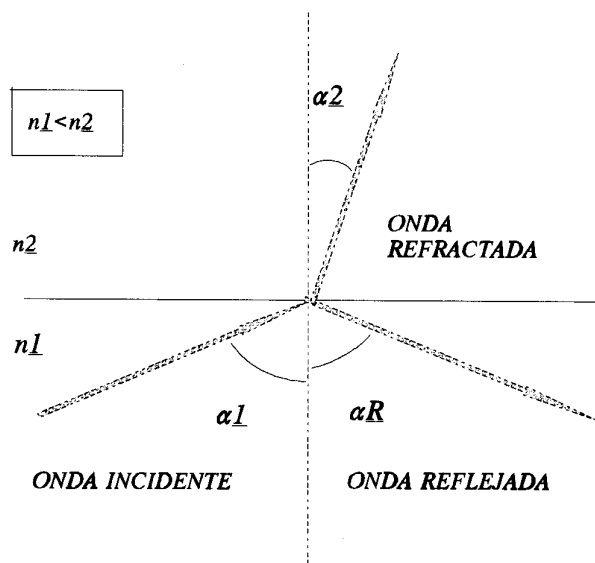


Figura 2.1. Reflexión y refracción.

Los casos a considerar, dependiendo de las magnitudes relativas de los índices de refracción son:

a) $n_1 < n_2$. Entonces será $\alpha_2 < \alpha_1$, y el rayo refractado se acerca a la normal al plano de separación de los dos medios, alejándose de dicho plano.

b) $n_1 > n_2$. Será $\alpha_2 > \alpha_1$ y el rayo refractado se acerca al plano de separación.

Supongamos que es $n_1 > n_2$. Si aumenta gradualmente α_1 pasando a posiciones sucesivas α_1' , etc., también aumentará α_2 a valores α_2' , α_2'' , ..., llegando hasta un valor de α_1 , tal que la onda refractada esté contenida en el plano de separación de ambos medios.

A este ángulo se le denomina límite, y se define como el ángulo de incidencia para el que la onda refractada se propaga por el plano de separación de ambos medios.

Cualquier rayo que incida sobre dicho plano con un ángulo superior a este valor límite, se reflejará en su totalidad. A este fenómeno se le conoce como principio de reflexión total, y posibilita la propagación de la luz por el interior de la fibra (núcleo).

Por tanto, la primera condición para que se produzca el mecanismo de propagación es que siempre se cumpla que $n_1 > n_2$, siendo n_1 y n_2 los índices de refracción respectivos del núcleo y del revestimiento. La segunda condición es que el ángulo de incidencia sea superior al ángulo límite.

2.2.3. Cálculo del ángulo límite

El ángulo límite α_L será tal que α_2 valdrá $\pi/2$. Por tanto, llevando estos valores a (2-1) resulta:

$$n_1 \cdot \text{sen } \alpha_{IL} = n_2$$

$$\alpha_{IL} = \text{arcsen}(n_2/n_1)$$

Siendo $n_1 > n_2$, será $\text{arc sen}(n_2/n_1) < 1$ y, por tanto, en estas condiciones siempre existirá un ángulo límite.

Llamando ángulo de entrada α_0 al ángulo que forma el rayo que proviene del exterior con el eje de la fibra, resulta que:

$$N_0 \cdot \text{sen } \alpha_0 = n_1 \text{sen } \alpha_E$$

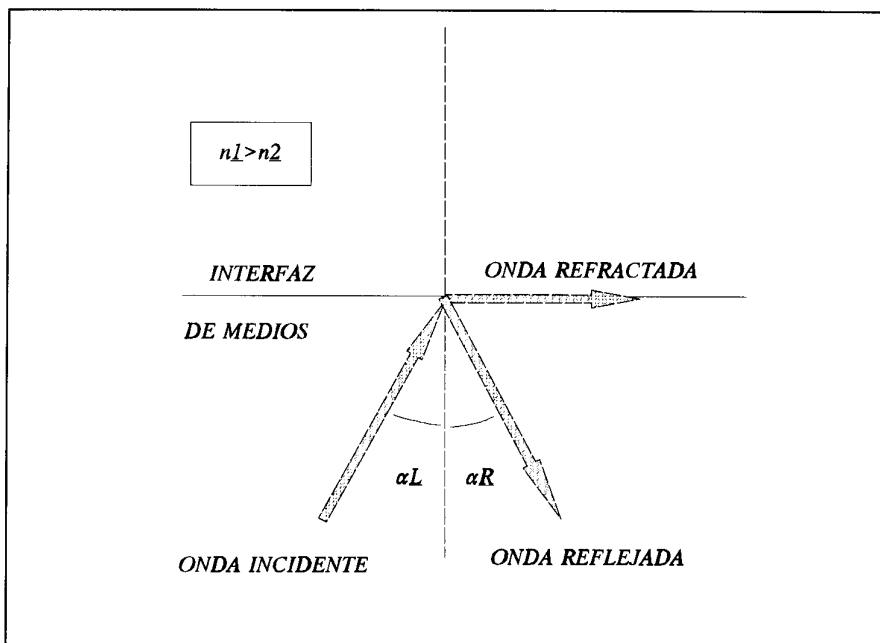


Figura 2.2. Reflexión total.

siendo α_E , el ángulo del rayo luminoso con el eje del núcleo en su interior.

$$\alpha_0 = \text{arcsen}\left[\frac{n_1}{n_0} \text{sen } \alpha_E\right] = \text{arcsen}\left[\frac{n_1}{n_0} \cos \alpha_1\right]$$

y el ángulo límite de entrada α_{0L} , será el que permita que todo rayo que incida desde el exterior con valor menor o igual que él sufra una reflexión total y, por tanto, sea transmitido (Fig. 2.3):

$$\alpha_{0L} = \text{arcsen}\left[\frac{n_1}{n_0} \cos \alpha_{1L}\right] \quad (2-2)$$

Si incide en el núcleo de la fibra un rayo con un ángulo superior al ángulo límite α_{1L} , en la superficie cilíndrica que delimita el núcleo y el revestimiento ocurrirá que no existe rayo refractado y toda la señal se reflejará con un ángulo α_2 igual al incidente α_1 .