

# COMUNICACION POR FIBRA OPTICA

Las telecomunicaciones modernas utilizan cada vez mas la fotónica, tecnología que emplea los fotones en vez de los electrones para transmitir información de una forma controlada. El Reino Unido es el líder mundial en esta tecnología y tanto la British Telecom como la Mercury Telecommunications disponen ya de sustanciales longitudes de cable de fibra óptica en utilización actualmente.

## Introducción.-

Los principios básicos para el empleo de los fotones en las comunicaciones por cables de fibra óptica fueron establecidos por Hockam y Kao, investigadores de los laboratorios "Standard Telecommunication Laboratories" de Harlow ( Essex ), en 1966.

Para entrar en materia, diremos que un fotón es un partícula elemental de luz situada en el margen de frecuencias comprendidas entre  $3 \times 10^8$  MHz y  $6 \times 10^{10}$  MHz, correspondiéndose con longitudes de onda de 1000 nm (límite superior de la región de infra-ro-

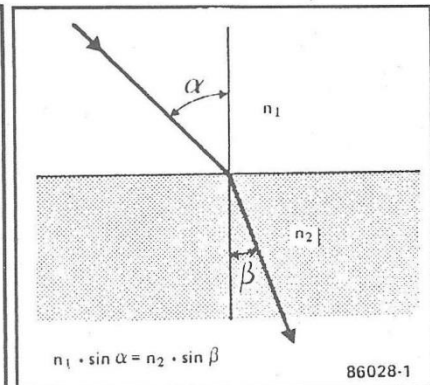


Figura 2 Ilustración de la ley de Snell.

jos) y de 5 nm (límite superior de la región de los ultravioletas). La fotónica (basada en la fibra óptica) no debe confundirse con la optoelectrónica, en la cual interaccionan fotones y electrones, o con la electro-óptica, que es el estudio

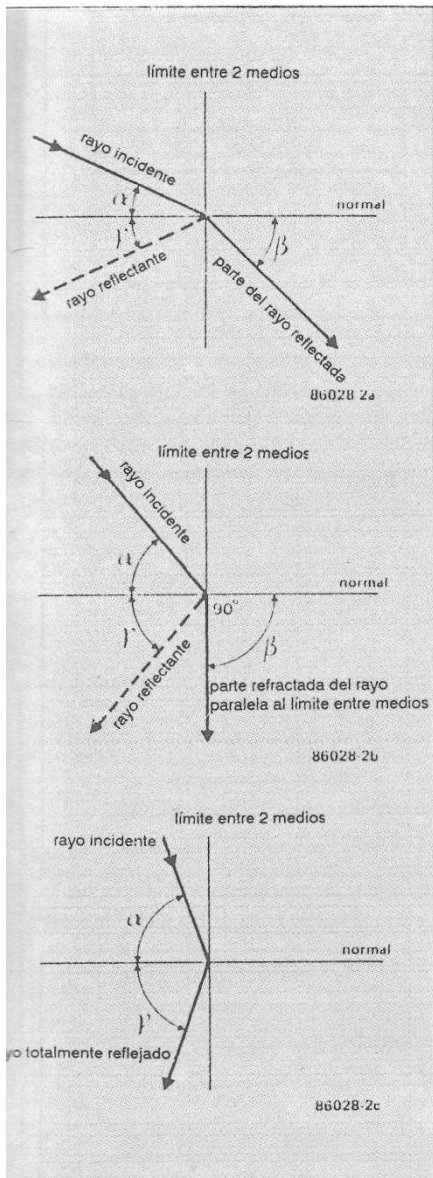


Figura 1 Dependiendo del ángulo de incidencia del rayo de luz, el medio de transmisión, denomina modo de orden superior o modo de orden inferior. Cuanto mas grande sea el ángulo,

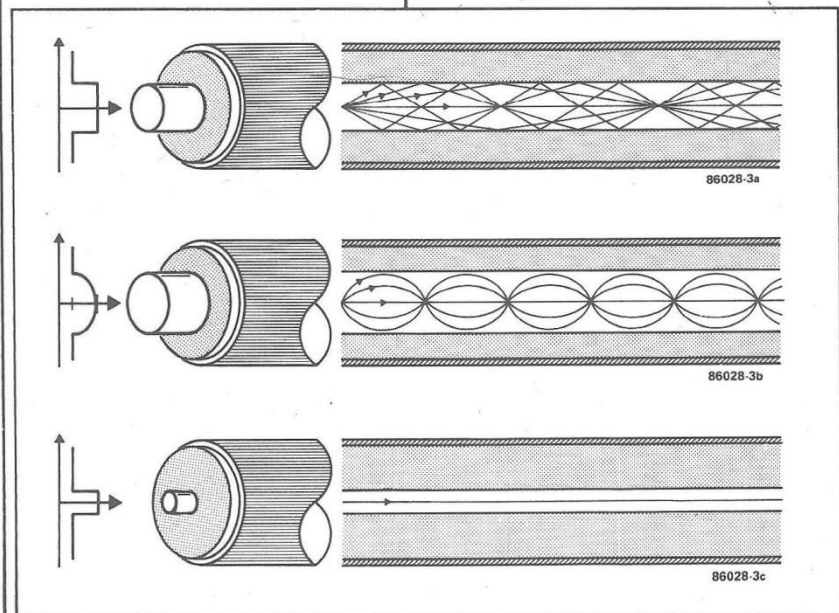


Figura 3 Arriba: cable multi modo de índice escalonado; centro: cable multi modo de índice gradual; abajo: cable mono modo. A la izquierda de los dibujos se muestran los

entre el índice de refracción de algunos dieléctricos y el campo eléctrico en el cual están inmersos. Por otra parte, podemos establecer que un rayo de luz es la dirección a lo largo de la cual viajan los fotones, esto es, la energía luminosa, considerando un haz de luz como una colección de rayos.

Según el principio de reversibilidad de la luz, si se invierte un rayo de luz, éste siempre viaja a lo largo de su camino original pero en sentido contrario. Las ondas de luz se pue-

den reflejar o refractar.

En la reflexión, prácticamente toda la luz se refleja en el medio original, cuando el rayo de luz incide sobre una superficie que limita dos medios de distintas características. Por ejemplo, los metales altamente pulidos reflejan la mayoría de la luz que incide sobre ellos, mientras que las superficies plásticas tan sólo reflejan del orden del cinco por ciento de la luz incidente.

Asimismo, en la reflexión el rayo incidente, la normal (línea perpendicular a la separación entre medios) y el rayo reflejado permanecen en el mismo plano, cumpliéndose que el ángulo que forma el rayo incidente con la normal es igual al ángulo que forma el rayo reflejado con la normal ( ver figura 1 ).

Se entiende por refracción el cambio de dirección que sufre un rayo de luz cuando entra en otro medio transparente. En la refracción, el rayo incidente, la normal y el rayo

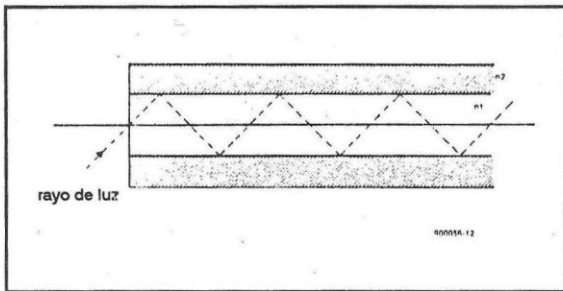


Figura 4 Sección longitudinal de un cable de fibra óptica. El índice de refracción del núcleo es ligeramente mayor que el del revestimiento.

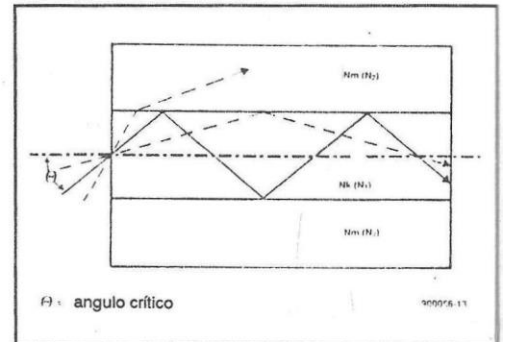


Figura 5 Si el rayo de luz se introduce con un ángulo mayor que el ángulo crítico, éste no se refleja internamente sino que se absorbe en el revestimiento.

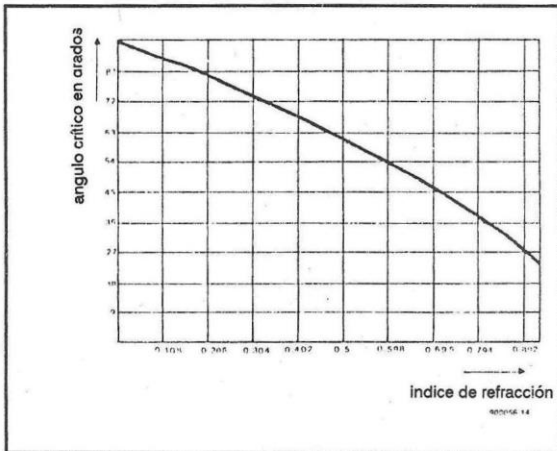


Figura 6 Relación entre el ángulo crítico y el índice de refracción  $n_2$  con  $n_1$  igual a 1.

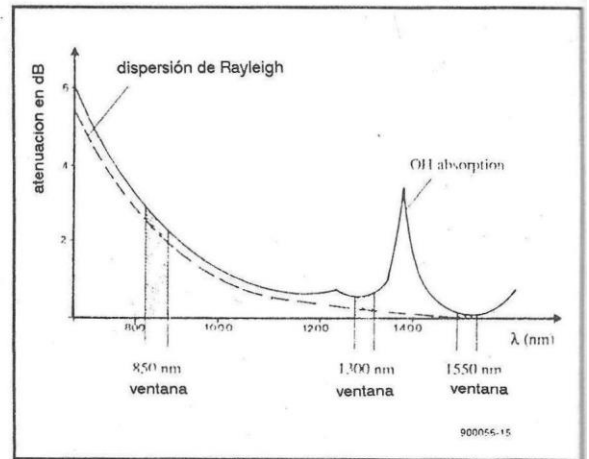


Figura 7 Relación entre la atenuación presentada por un cable de fibra óptica y la longitud de onda de la señal luminosa.

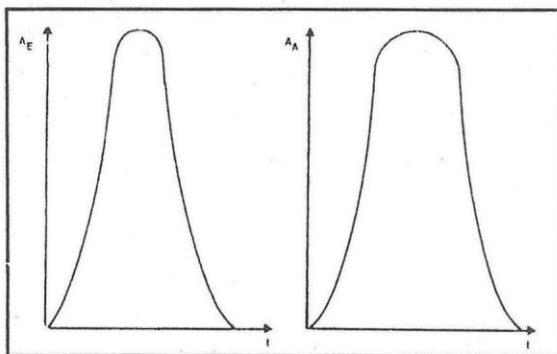


Figura 8 La dispersión provoca que la anchura de los pulsos luminosos se incremente.

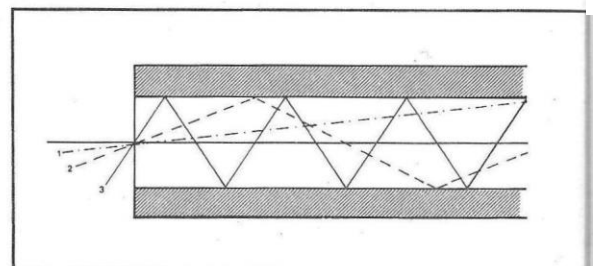


Figura 9 Dependiendo del ángulo de entrada, los diferentes rayos de luz recorren diferentes distancias, provocando que los correspondientes tiempos de transmisión tengan diferentes duraciones.



refractado permanecen en el mismo plano. Snell, un científico alemán, descubrió en 1620 que la relación  $\sin \alpha : \sin \beta$  es una constante, siendo  $\alpha$  el ángulo de incidencia y  $\beta$  el ángulo de refracción. La ley de Snell se expresa usualmente de la siguiente forma :

$$\sin \alpha / \sin \beta = n_r / n_i = \mu \quad [1]$$

donde  $n_r$  y  $n_i$  son los índices de refracción de los dos medios y es una constante.

La luz se refracta debido a que tiene distinta velocidad de propagación según los diferentes me-

dios. La teoría de las ondas de luz muestra que el índice de refracción  $n^2$  para dos medios dados 1 y 2 viene dado por la expresión :

$$n_1^2 = c_1 / c_2 [2]$$

donde  $c_1$  y  $c_2$  son las velocidades de la luz en los medios 1 y 2 respectivamente.

Si el medio 1 en la expresión [2] es el vacío, el valor se corresponde con el denominado índice de refracción absoluto. Los valores para cualquier otro medio son por tanto índices de refracción relativos. El índice de refracción abso-

luto,  $n$ , de un medio viene expresado por  $n = c/v$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  es la velocidad de la luz en el medio. Como el índice de refracción absoluto del aire es 1.00029, en la práctica la velocidad de la luz en el aire se puede sustituir por la de ésta en el vacío.

Por supuesto, existen situaciones donde se producen una reflexión parcial junto con una refracción parcial. Por ejemplo, en la figura 1a el ángulo de incidencia es tan pequeño que gran parte de la luz incidente se refracta. En teoría de

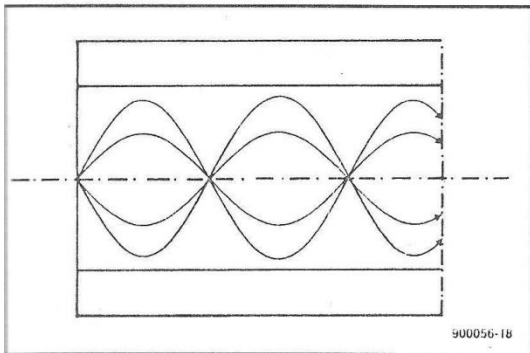


Figura 10 Debido a la variación continua del índice de refracción en los cables de fibra óptica con índice gradual, los rayos de luz en este tipo de cable recorren trayectorias helicoidales en lugar de lineales.

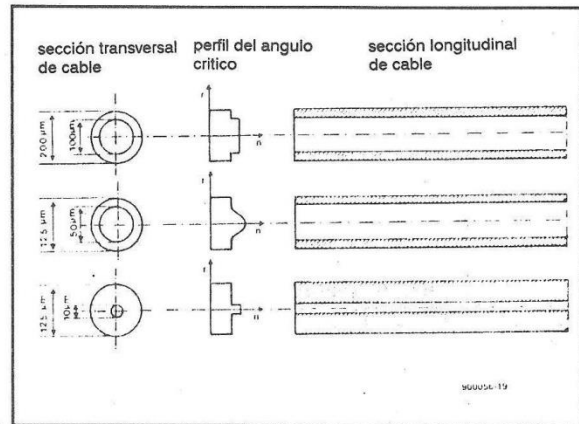


Figura 11 Representación esquemática de los tres tipos de cable de fibra óptica. El modelo de la parte superior, modelo de índice escalonado, actualmente está fuera de fabricación.

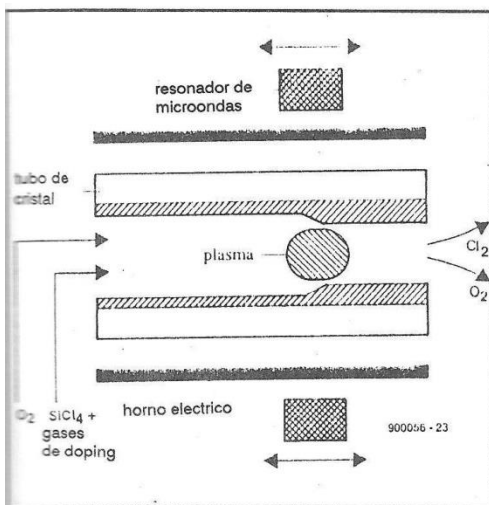


Figura 12 Diagrama simplificado del proceso fabricación de un cable de fibra óptica.

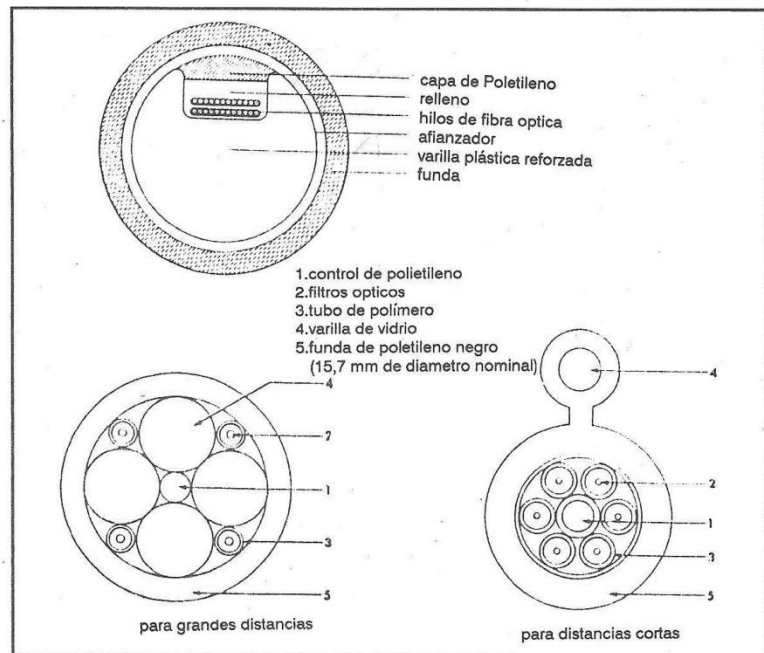


Figura 13 Algunos de los cables de fibra óptica multi núcleo : arriba el Fibrespan ( fabricado por STC) y abajo el Translite ( fabricado por TCL, una subsidiaria de General Electric).

fibra óptica, esto significaría que una gran parte de luz se pierde ( por refracción ) a través de las paredes del cable de fibra óptica. Asimismo, la figura 1b muestra el ángulo crítico de incidencia: el rayo refractado forma un ángulo recto (  $90^\circ$  ) con la normal. En el ángulo crítico, la luz refractada puede provocar interferencias por lo que es esencial que el ángulo de incidencia sea mucho mayor que el ángulo crítico ( ver figura 1c ) cuando tiene lugar una reflexión total. Obsérvese que el ángulo de incidencia, es igual al ángulo de reflexión,  $\gamma$ . La condición para la reflexión total es que el rayo de luz se transmita desde un medio ópticamente denso, es decir con un índice de refracción relativamente grande, a uno menos denso, con un índice de refracción más pequeño.

Los rayos de luz que inciden sobre la superficie que limita los dos medios con un ángulo inferior al ángulo crítico se denominan modos de orden superior: emplean relativamente más tiempo en alcanzar el final del cable. Los rayos de luz que se transmiten casi paralelos a los ejes ópticos, esto es, a un ángulo superior al ángulo crítico, se denominan modos de orden inferior. Los modos de orden inferior se transmiten más rápidos dado que se reflejan menos a menudo que los de orden superior. Asimismo, los modos de orden inferior son mucho menos propensos a las pérdidas que los de orden superior. El seno del ángulo de incidencia de un rayo de luz se denomina apertura numérica: este es el factor decisivo para definir dónde se deben unir dos cables de fibra óptica. Asimismo, la apertura numérica también es una indicación de la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y del revestimiento: cuanto más pequeña sea, mayor será el ancho de banda de la señal óptica.

En cables de fibra óptica mono modo ( también denominados de modo único ), el diámetro del nú-

cleo es comparable a la longitud de onda de la luz, de tal forma que sólo puede existir un modo electromagnético de propagación y se elimina la dispersión del pulso, denominada dispersión por multi trayectoria.

En los cables de fibra óptica multi modo ( ver figura 3 ) las trayectorias de los rayos de los diferentes modos son de longitud diferente y disponen por tanto de diferentes tiempos de transmisión. Dado que los modos se diferencian en un pul-

orden del 1% mas pequeño que el del núcleo,  $n_1$ . Esto hace posible una refracción interna total, en el límite entre el núcleo y el revestimiento, de todos los rayos de luz que entran en el cable con un ángulo inferior al ángulo crítico ( ver figura 5 ). El ángulo crítico, viene dado por :

$$\theta = \arcsin \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

y por tanto depende tan sólo de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ . Si  $n_2 = 1$  ( vacío ), se aplica la curva

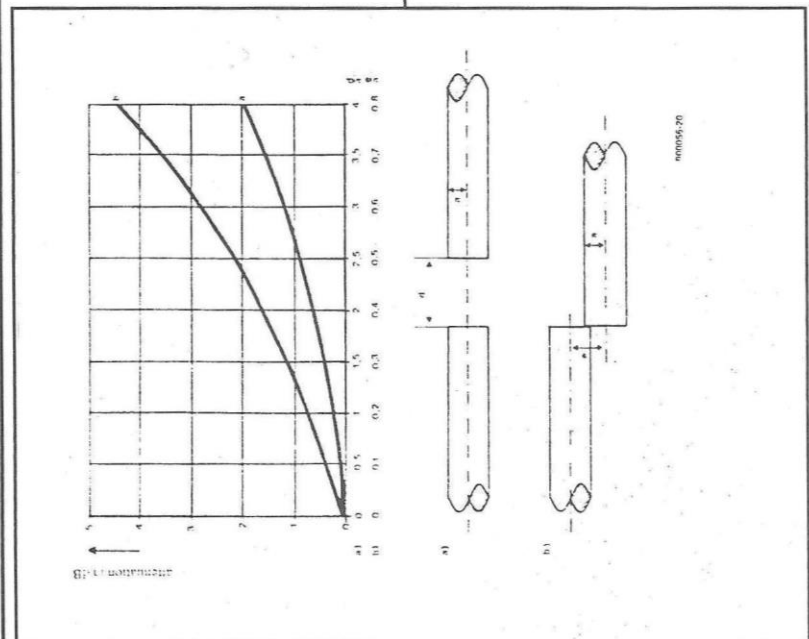


Figura 14 Nivel de atenuación en función de la distancia entre los extremos del cable (a), y del desplazamiento radial entre los núcleos (b).

so, éstos están sujetos a una dispersión progresiva según recorren la fibra óptica, provocando a su vez una interferencia con los pulsos adyacentes.

La utilización de fibras ópticas mono modo conlleva más dificultad debido a su pequeño tamaño del núcleo, pero disponen de una atenuación mas pequeña que los cables de fibra óptica multi modo.

Un cable de fibra óptica desde el punto de vista de utilización práctica consta de un núcleo cilíndrico conductor de la luz, formado por silicio dopado sobre silicio puro ( ver figura 4 ). El índice de refracción,  $n_2$ , del revestimiento es del

característica representada en la figura 6. A menudo, se suele disponer de la apertura numérica, NA, en lugar del ángulo crítico:

$$NA = \sin\theta = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}$$

### Características del cable.-

La respuesta transitoria de un cable de fibra óptica depende, a parte de las características geométricas correspondientes al núcleo y al revestimiento, de su atenuación y dispersión óptica. A su vez, la atenuación depende principalmente de las longitudes de onda de la señal luminosa y consta de dos



componentes: una generada por la absorción y otra por la dispersión. La componente debida a la absorción viene especificada con respecto a fibras de vidrio y se puede mantener en un valor mínimo durante el proceso de fabricación del cable, cuando, por ejemplo, se pueden incorporar iones de oxígeno e hidrógeno (OH) en el material. Estos iones o impurezas absorben la luz a un elevado número de longitudes de onda según se puede observar en la figura 7. Obsérvese que la atenuación de las longitudes de onda situadas entre

trínseca del vidrio y no se puede eliminar, originada en parte por las propias fibras del vidrio y en parte por las propiedades de la señal luminosa utilizada.

El resultado de la dispersión es un incremento de la anchura del pulso de la señal luminosa durante el recorrido de ésta a lo largo del cable (ver figura 8). El incremento es proporcional a la distancia existente entre el emisor y el receptor, es decir, la longitud del cable. Normalmente, este incremento viene expresado en picosegundos por ki-

óptica, mayor será el ancho de banda de transmisión. En la práctica, el ancho de banda, B, viene dado por  $B = 0.44/T$ , con T determinado a una amplitud de pulso de -3 dB.

## Modelos de cables prácticos.-

Un cable multi modo es aquel que dispone de un diámetro del núcleo más grande que la longitud de onda de la señal luminosa, permitiendo así la propagación de la energía lumínica en un gran número de

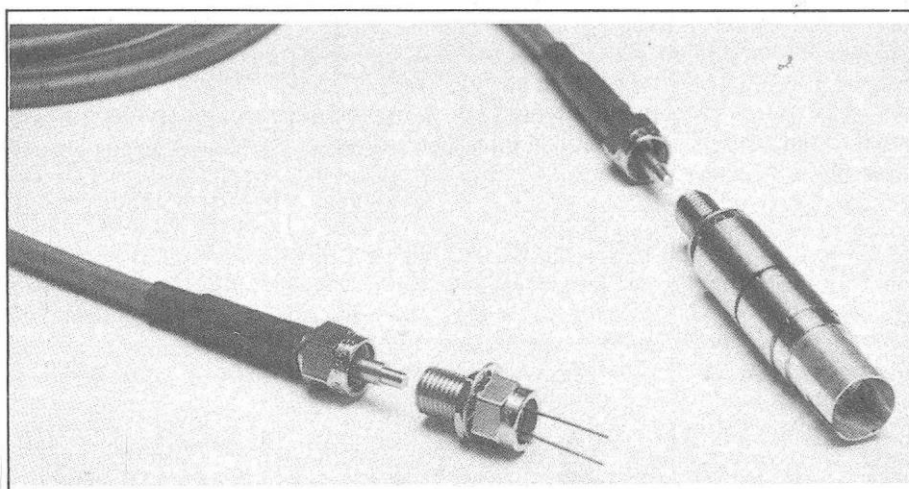


Figura 15 Algunos de los acopladores disponibles en el comercio para su utilización con los cables de fibra óptica.

1300 nm y 1150 nm es muy pequeña.

Por otra parte, la componente debida a la dispersión depende de las propiedades del cable. Estas se manifiestan como una variación del índice de refracción con respecto a la longitud de onda de la señal luminosa.

En el vidrio siempre existen algunas partículas espúreas que se incorporan durante el proceso de fusión. La dispersión que provocan estas partículas, que son más pequeñas comparadas con la longitud de onda de la señal luminosa empleada, se denomina dispersión Rayleigh, la cual se reduce según se incrementa la longitud de onda (ver figura 7). Cabe decir que la dispersión es una propiedad in-

lómetro (ps/km).

La dispersión de modo viene generada por los distintos rayos de luz que entran en el cable con ángulos ligeramente diferentes (ver figura 9). Parece obvio que los diferentes rayos recorren diferentes distancias a lo largo del cable, lo cual provoca la atenuación de la señal de entrada. La diferencia entre los tiempos de transmisión más corto y más largo,  $\Delta t$ , viene dada por:

$$\Delta t = n_k (n_k n_m) / c n_m$$

donde  $n_k$  es el índice de refracción del material del núcleo,  $n_m$  el índice de refracción del revestimiento y  $c$  la velocidad de la luz.

Cuanto menor sea la atenuación por dispersión del cable de fibra

modos diferentes. Los cables multi modo engloban tanto los del tipo de índice escalonado (o de salto de índice) como los de índice gradual. Los modelos de índice escalonado disponen de un núcleo cuyo índice de refracción es mayor que el del revestimiento, es decir, el índice cambia de forma abrupta en el límite entre el núcleo y el revestimiento. Debido a la dispersión de modo, el ancho de banda disponible para este tipo de cable está limitado a aproximadamente 100 MHz/km.

El índice de refracción del núcleo de los cables de índice gradual disminuye de forma parabólica el 1% desde el centro del núcleo al centro del revestimiento. Este hecho provoca que los rayos de luz recorran a lo largo del cable una trayec-

toria helicoidal en lugar de un camino recto o lineal (ver figura 10), lo cual tiene como consecuencia una notable reducción del tiempo de transmisión y de la atenuación por dispersión. Con este tipo de cables se puede disponer de valores de atenuación por dispersión del orden de 0.2 ns/km, que se corresponde con anchos de banda del orden de 1 GHz/km.

Por otra parte, los cables con índices graduales se han convertido en estándar internacional ( CCITT ) y disponen de un diámetro del núcleo de 50  $\mu$ m, un diámetro del revestimiento de 125  $\mu$ m y una apertura numérica del 0.2 (ver figura 11). Finalmente, un cable mono modo es un cable del tipo de índice escalonado cuyo diámetro del núcleo interior ( de mayor índice de refracción ) es comparable con la longitud de onda de la señal luminosa, dando como resultado la propagación de tan sólo un modo electromagnético de luz y por tanto eliminándose la distorsión de modo.

Los cables mono modo no generan retardos de transmisión, lo cual garantiza el empleo de grandes anchos de banda del orden de 10 GHz/km. Puesto que la atenuación de estos cables también es demasiado pequeña, este modelo de cable es especialmente adecuado para su utilización en comunicaciones a grandes distancias y en banda ancha.

Las representaciones esquemáticas de estos tres tipos de cables también se ofrecen en la figura 11. El modelo empleado habitualmente es el de índice gradual. La capacidad de transferencia de este tipo de cable habitualmente es mayor que la que realmente se necesita. Además, con este modelo de cable el acoplamiento de la señal luminosa, tanto a la entrada como a la salida del cable, es más fácil que con el modelo mono modo. La atenuación de los cables de

índice gradual disponibles comercialmente es del orden de 5 a 10 dB/km, que no es mucho peor que la de los cables mono modo. Por otra parte, la dispersión en los cables mono modo es mucho más pequeña que en los cables multi modo. Los cables multi modo de índice escalonado actualmente no se fabrican debido a su alto valor de atenuación ( del orden de 10 a 30 dB/km ) y a su pequeña capacidad de transferencia.

### Fabricación del cable.-

Las fibras de vidrio normalmente se fabrican por medio de la denominada tecnología de deposición del vapor químicamente activado sobre plasma. En este tipo de tecnología, se hace pasar sobre un tubo de cuarzo muy puro una mezcla de cloruro de silicio, cloruro de germanio y oxígeno. Esta mezcla de gases genera una zona de reacción en el plasma dentro del campo creado por el generador o resonador de microondas, obteniéndose una deposición de una capa de cuarzo dopado (  $\text{SiO}_2$  ) sobre la superficie interna del tubo ( ver figura 12 ). Incluso, si se efectúa un desplazamiento axial del generador de microondas a lo largo del tubo, se deposita una fina capa. El núcleo de una fibra óptica está constituido por algunos centímetros de este tipo de capas. Si variamos el dopado de germanio de las capas individuales, podemos obtener un perfil del índice de refracción muy exacto, que es el requisito inicial para obtener grandes anchos de banda en la transmisión.

Después de este proceso inicial, el tubo de cuarzo se calienta a una temperatura tal que se convierte en un barra sólida de vidrio de 1.5 m de longitud. Seguidamente, esta barra de vidrio se vuelve a calentar a una temperatura próxima a su punto de fusión, convirtiéndose en una fibra de unos 15 km de longitud y un diámetro de 125  $\mu$ m. Para

evitar posibles daños sobre esta fibra tan frágil, ésta inmediatamente se cubre con un revestimiento preliminar, y más tarde se somete la fibra a un segundo revestimiento para dotarla de la flexibilidad y rigidez mecánica necesarias para su adaptación dentro del cable. La funda de protección del cable no afecta a las propiedades de la fibra óptica.

Finalmente, debemos mencionar que hasta hace tan sólo unos pocos años no han estado disponibles los cables de fibra óptica multi núcleo ( ver figura 13 ), los cuales han abierto un gran abanico de posibilidades para mejorar y ampliar los sistemas de comunicación.

### Técnicas de acoplamiento.-

Para conectar los cables de fibra óptica a los transmisores, receptores o repetidores se necesitan emplear los correspondientes acopladores, aunque los cables también se pueden alargar por medio de empalmes. Si se emplea un acoplador o un terminal de empalme, se obtiene una atenuación adicional, la cual depende de la distancia existente entre los extremos del cable y del desplazamiento tanto radial como angular entre los dos núcleos. En un terminal de empalme los extremos del cable se fusionan, ofreciendo este tipo de acoplamiento un nivel inferior de atenuación, tal y como se puede observar en la curva de la figura 14. Sin embargo, en muchos casos se necesitan emplear conexiones fáciles de quitar, motivo por el cual se comercializan un gran número de acopladores ópticos, como los mostrados en la figura 15.