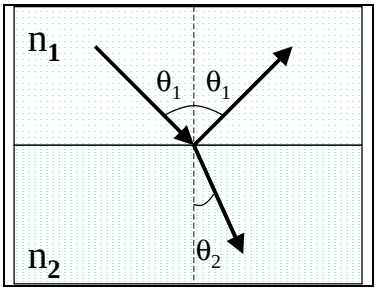
PRÁCTICA DE FIBRA ÓPTICA

Introducción teórica

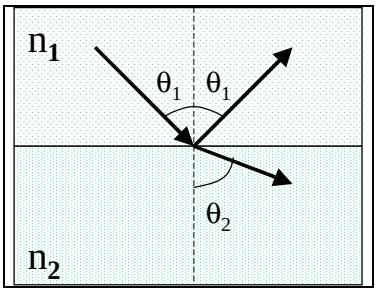
Guiado de la luz (Ley de Snell. Una visión sencilla).

Para tener una visión sencilla del guiado de luz en guiaondas dieléctricas, hacemos uso de la ley de Snell de la Reflexión y Refracción de la luz.



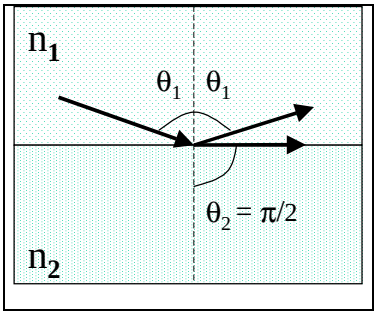
Trazado de rayos en dos medios de índices de refracción n_1 y n_2 , de modo que $n_1 < n_2$. En este caso se cumple:

$$n_1 \text{ Sen } (\theta_1) = n_2 \text{ Sen } (\theta_2), \text{ y} \qquad \theta_2 < \theta_1$$



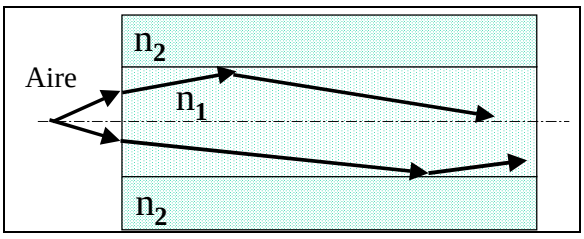
Trazado de rayos en dos medios de índices de refracción n_1 y n_2 , de modo que $n_1 > n_2$. En este caso se cumple:

$$n_1 \text{ Sen } (\theta_1) = n_2 \text{ Sen } (\theta_2), \text{ y} \qquad \theta_2 > \theta_1$$



Al ir aumentando el ángulo de incidencia θ_1 , llega un momento en que θ_2 se hace igual a $\pi/2$, no produciéndose refracción. A partir de este ángulo de incidencia se produce reflexión total, y ocurre para ángulos de incidencia $\theta \geq \theta_1$, siendo θ_1:

$$\text{Sen } (\theta_1) = n_2 / n_1 \text{ Sen } (\pi/2) = n_2 / n_1$$

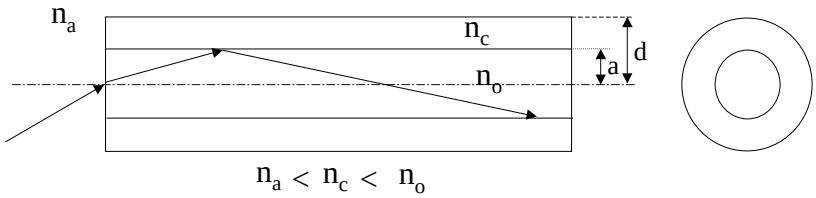


El fenómeno de la reflexión total se puede utilizar para realizar el guiado de rayos (ondas electromagnéticas) en un dieléctrico, con tal que $n_1 > n_2$.

Guíaonda dieléctrica cilíndrica: Fibra Optica

La fibra óptica es una guíaonda dieléctrica cilíndrica que consta de un núcleo central (guía) y un revestimiento, con índices de refracción $\mathbf{n_0}$ y $\mathbf{n_C}$ respectivamente. El índice de refracción del núcleo es ligeramente mayor que el del revestimiento ($\mathbf{n_0} > \mathbf{n_C}$).

Existen varios tipos de fibras, dependiendo del material con que se han fabricado y del tamaño del núcleo y recubrimiento. En este apartado se considerarán solamente las fibras ópticas utilizadas en sistemas de telecomunicación, cuyas características se exponen a continuación:



Material : Cristal SiO_2 tanto en el núcleo como en el revestimiento. Para variar el índice de refracción del material se utilizan dopantes tales como el Fósforo (P), Germanio (Ge) y Boro (B), aumentando el índice de refracción del núcleo del orden de milésimas (~ 0.005). Para una longitud de onda en el Infrarrojo próximo (~ 1 micra) $\mathbf{n_C} \sim 1{,}455$ y $\mathbf{n_0} = \mathbf{n_C} + 0.005$

Dimensiones: El diámetro exterior de la fibra es del orden 125 micras, y el del núcleo puede variar desde 9 micras a 60 micras. La longitud de la fibra óptica es de varios Km (4 Km). La longitudes superiores se obtienen por empalme entre fibras.

Longitud de Onda de Trabajo: La onda electromagnética que se propaga en estas guías pertenece al Infrarrojo próximo, estando comprendida entre 0,8 y 1,6 micras.

Tipos de Fibras: Existen muchos tipos dependiendo del perfil del índice de refracción. Los tres tipos más significativos son los siguientes (ver Fig.1):

- Fibra multimodo de salto de índice. En esta fibra el índice de refracción $\mathbf{n_0}$ es constante en el núcleo. Esta fibra se diseña de modo que propaguen varios modos.

- Fibra multimodo de índice gradual. En esta fibra el índice de refracción varía gradualmente. Esta fibra está diseñada para que propaguen varios modos.

- Fibra monomodo. En esta fibra el índice de refracción del nucleo puede ser constante o variar gradualmente. La fibra está diseñada para propagar un solo modo.

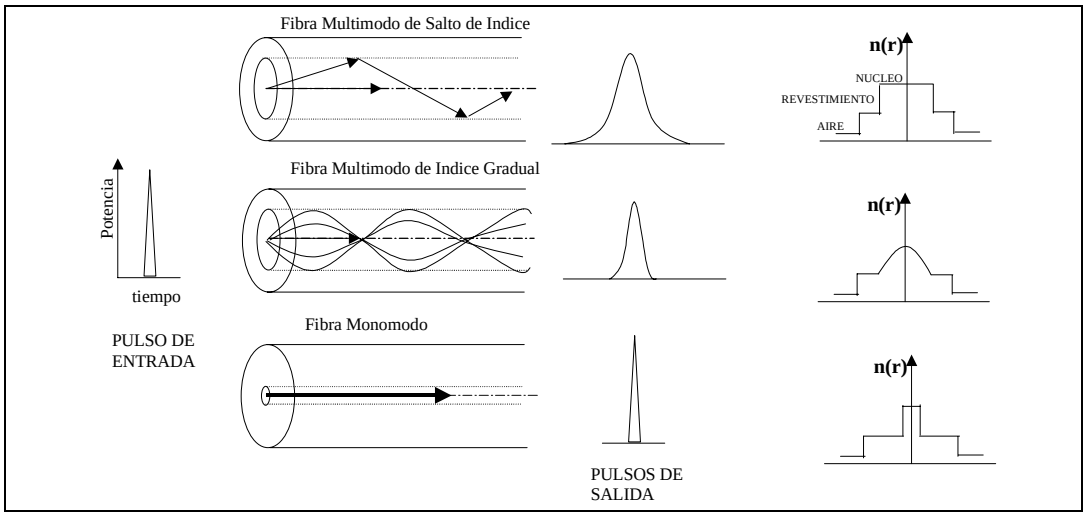


Figura1

Los modos de propagación (ondas electromagnéticas que se propagan en la fibra) se obtienen resolviendo la siguiente ecuaciones de ondas (condicionada por las condiciones de contorno de la fibra):

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \qquad \nabla^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}$$

Teniendo en cuenta la simetría cilíndrica de la guía, usamos este tipo de coordenadas, obteniéndose para cada componente del campo (= Ψ):

$$\left[\nabla^2 + \mathrm{K}_0^2 n^2(r)\right]\Psi = 0$$

donde

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{d r^2} + \frac{1}{r}\frac{d}{d r} + \frac{1}{r^2}\frac{d^2}{d\theta^2} + \frac{d^2}{d z^2}$$

La solución de la ecuación (5 - 15) es de la forma:

$$\Psi = \Psi(r) e^{i\left(l\theta + \beta z\right)}$$

Las soluciones obtenidas son los llamados modos TE_{lm} ,TM_{lm} ,HE_{lm} y EH_{lm} .

> Modos TM_{lm} : El campo magnético no tiene componente axial (H_z = 0).
> Modos TE_{lm} : El campo eléctrico no tiene componente axial (E_z = 0).
> Modos HE_{lm} y EH_{lm}: En estos modos E_z y H_z son distintos de cero, y se diferencian en que la contribución en el eje z sea mayor del campo magnético o eléctrico respectivamente.

Es decir, una onda electromagnética en una fibra óptica puede propagarse con varias configuraciones de campo eléctrico y magnético.

El número de modos que pueden propagarse en una fibra óptica depende del tamaño del núcleo, de la longitud de onda y de los valores de los índices de refracción del revestimiento y del núcleo.

La figura 2 muestra los vectores del campo eléctrico de algunos modos para una fibra de salto de índice, y la figura 3 muestra algunos diagramas de radiación (Irradiancia) de algunos modos (y combinaciones de estos) en la fibra.

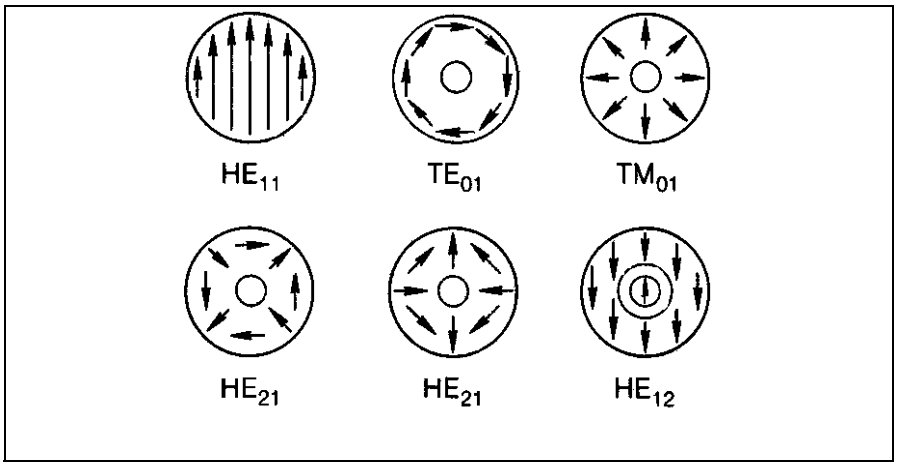
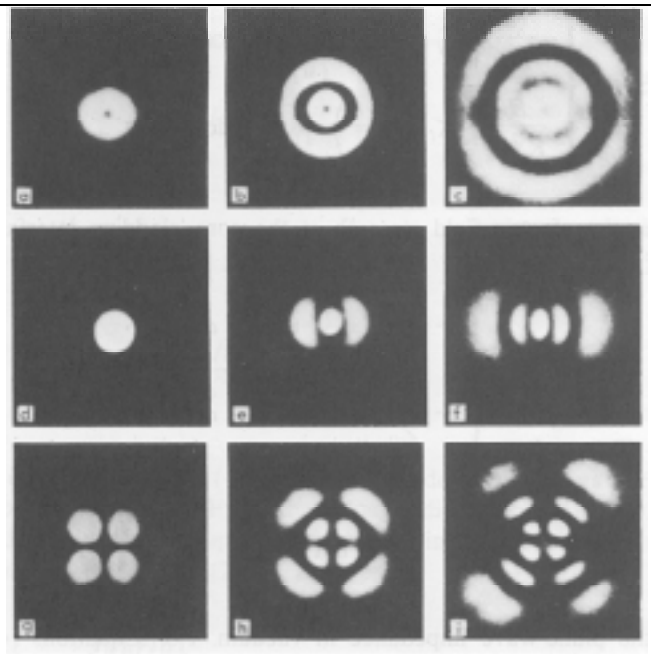


Figura 2



Images of several lower-order modes: (a), (b), and (c) are either TE_{0m}, TM_{0m}, or HE_{2m} ($m = 1,2,3$); (d) is the HE_{11} mode; (e) is a linear combination of HE_{12} with either HE_{31} or EH_{11}; (f) is a linear combination of HE_{13} with either HE_{32} or EH_{12}; (g), (h), and (i) are either EH_{1m} or HE_{3m} ($m = 1,2,3$). (Courtesy of Dr. Elias Snitzer, United Technologies Research Center.)

Figura 3

Diámetro de Campo Modal

En las fibras ópticas trabajando en régimen monomodo no tiene sentido hablar de diámetro del núcleo, sino del diámetro de campo modal W_0 , puesto que el confinamiento de la energía se produce con un perfil próximo al gaussiano en el centro de la guía, abarcando el núcleo y parte del revestimiento.

Una de las definiciones más utilizadas de este parámetro es la anchura entre los puntos en los cuales la distribución gaussiana de la amplitud de campo dada es 1/e de su valor máximo, o $(1/e^2)$ del máximo de la distribución de potencia óptica del modo.

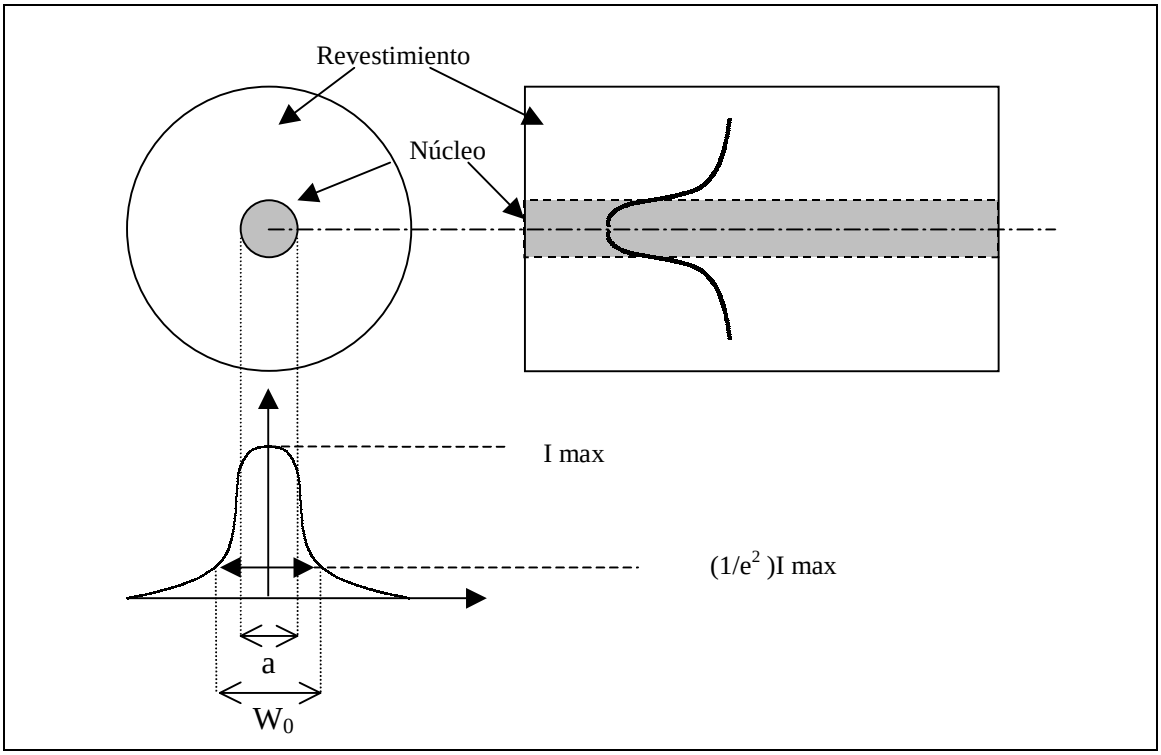


Fig. 4

En las fibras ópticas que trabajan en régimen monomodo en 1,3 micras de longitud de onda, el valor de W_0 es aproximadamente un 10% mayor que el diámetro del núcleo.

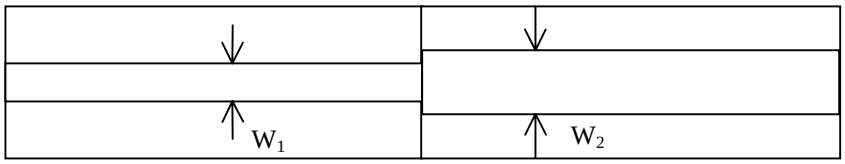
Pérdidas en un empalme mecánico (fibra monomodo)

Causa de las pérdidas:

- Naturaleza Intrínseca de la fibra.
- Desalinemiento de núcleos.
- Ángulo de corte
- Suciedad
- Pérdidas de Fresnel

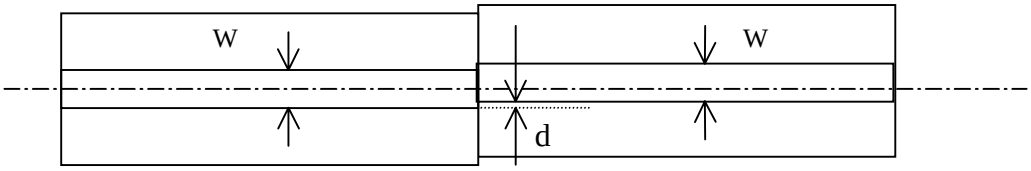
Naturaleza intrínseca de las fibras

Estas pérdidas se producen fundamentalmente cuando se empalman dos fibras de distinta tecnología (distintas características físicas). El parámetro que más influye es la diferencia existente entre los diámetros de campo modal “W” de cada fibra.



Valor de la pérdida $A(dB) = 10\log\left(\frac{2W_1W_2}{W_1^2 + W_2^2}\right)^2$

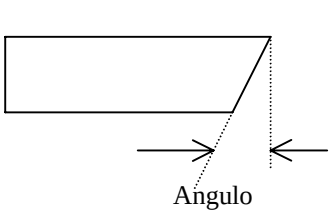
Desalineamiento de núcleos

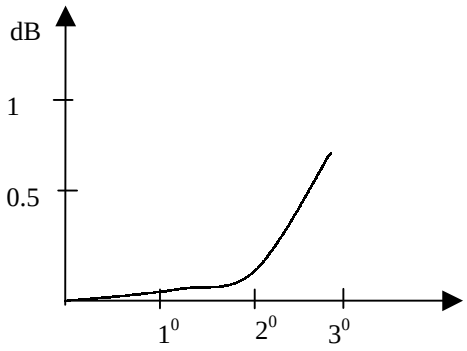


Valor de la pérdida $A(dB) = 4{,}343\left(\frac{d}{W}\right)^2$

Ángulo de corte

En la figura se observa la variación de la atenuación en función del ángulo de corte. Las cortadoras de fibra óptica deberán garantizar un ángulo de corte inferior a 1^0.





Pérdidas de Fresnel

Se producen debido al coeficiente de transmisión de la interfaz Fibra-Aire cuando existe un espacio pequeño (micras) entre las fibras a empalmar. Se evitan rellenando este espacio con un líquido con un índice de refracción de valor comprendido entre el del aire y el de la fibra.

Atenuación de una fibra óptica con la longitud de onda.

En la gráfica de la Fig. 5 se observa como varía la atenuación que presenta una fibra con la longitud de onda en el Infrarrojo próximo (0,8 – 2 micras).

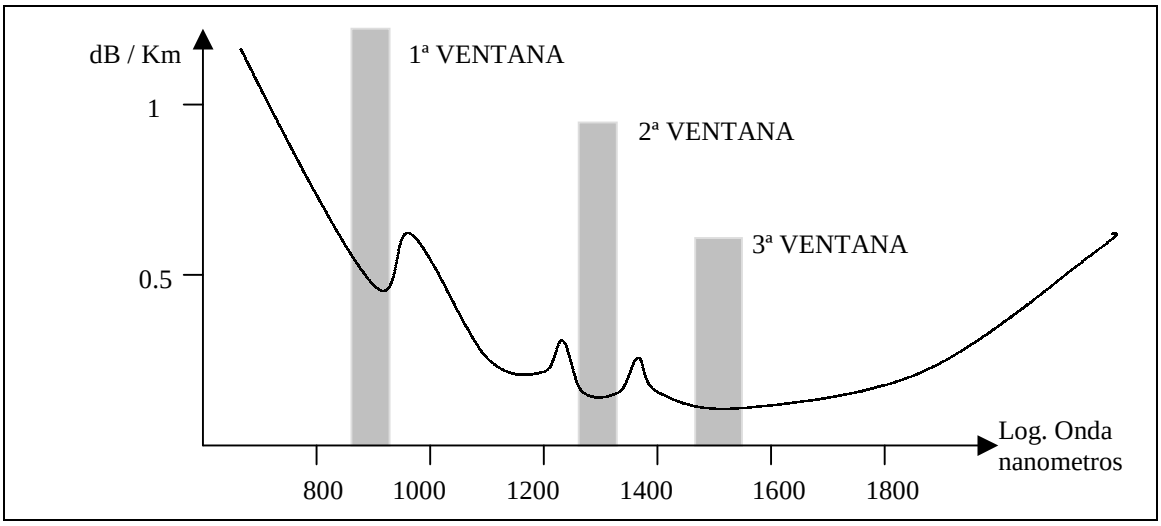


Fig. 5

En Telecomunicaciones, se han definido tres “ventanas” de transmisión de radiación, centradas en 850 nm, 1300 nm y 1500 nm. Estas ventanas están condicionadas por las características de atenuación de la fibra y por la tecnología de fabricación de los emisores y detectores.

Otras causas que producen atenuación en la fibra óptica son:

Pérdidas por dispersión debido a mala fabricación de la fibra (inhomogeneidad del núcleo y revestimiento, impurezas).

Microcurvaturas producidas en la fibra al cablearlas.

Pérdidas producidas por macrocurvaturas.

Introducción en la red cristalina de la fibra iones OH^- o átomos de Hidrogeno, debido al contacto con agua u otros productos químicos.

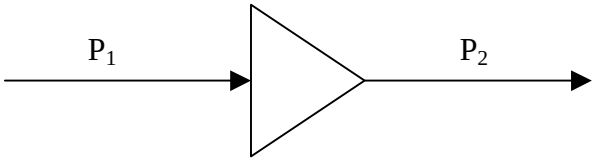
El Decibelio

Equivale a la décima parte de un “bel”, una unidad de referencia para medir la potencia de una señal o la intensidad de un sonido. El nombre “bel” viene del físico norteamericano Alexander Graham Bell (1847-1922).

El decibelio es una unidad relativa de una señal, tal como la potencia, voltaje, etc.

Ganancia de Potencia en Decibelios

La ganancia de Potencia G de un amplificador es la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada.



$G = P_2 / P_1$

Si la potencia de salida (P_2) es de 15 W y la de entrada (P_1) de 0.5 W,

G = 15 W / 0.5 W = 30

Lo que significa que la potencia de salida es 30 veces mayor que la de entrada. por lo tanto la *ganancia de potencia en decibelios* se define como:

$$\mathbf{G'(dB) = 10*\log_{10}(G)}$$

donde G' = ganancia de potencia en decibelios
G = ganancia de potencia (sin unidades)

Si un circuito determinado tiene una ganancia de potencia de 100, su ganancia en decibelios es:

$$\mathbf{G' = 10*\log_{10}(100) = 20\ dB}$$

La ganancia G' es adimensional, pero para estar seguros de no confundirla con la ganancia normal de potencia G, se añade la palabra decibelio (dB). Cada vez que una respuesta se expresa en decibelios automáticamente se sabrá que se trata de la ganancia en decibelios de potencia y no de la ganancia normal de potencia.

Para transformar de decibelios a unidades absolutas :

$\mathbf{P = 10^{x/10}}$ *donde x esta dado en decibelios*

3 dB por cada factor de 2

Supóngase que la ganancia de potencia es 2, la ganancia en decibelios de potencia es:

G' = 10 log 2 = ***3.01*** dB
Si G = 4
G' = 10 log 4 = ***6.02*** dB
Si G= 8
G' = 10 log 8 = ***9.01*** dB

Por lo general, se redondean estos valores tomando 3 dB, 6 dB y 9 dB. Se observa que cada vez que la potencia se aumenta al doble, la ganancia expresada en decibelios se incrementa 3 dB.

Decibelios negativos

Si la ganancia de potencia es menor que la unidad, existe una pérdida de potencia (atenuación) y la ganancia de potencia en decibelios es negativa. Por ejemplo, si la potencia de salida es 1.5 W para una potencia de entrada de 3 W, se tiene:

G = 1.5 W / 3 W = 0.5

y la ganancia de potencia en decibelios será:

G' = 10 log 0.5 = -3.01 dB

Cuando la ganancia de potencia es de 0.25

G' = 10 log 0.25 = -6.02 dB

Y la ganancia de potencia es de 0.125, entonces

G' = 10 log 0.125 = -9.03 dB

También en este caso se redondean estas cantidades a -3 dB, -6 dB y 9 dB. Cada vez que la ganancia disminuye en un factor de 2, la ganancia de potencia en decibelios disminuye en aproximadamente 3 dB.

10 dB corresponden a un factor de 10

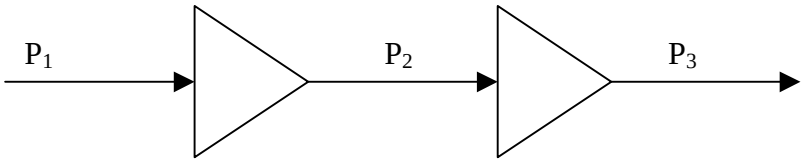
Supóngase que la ganancia de potencia es 10, la ganancia de potencia en decibelios será
G' = 10 log 10 = 10 dB
Si la ganancia de potencia fuera 100, entonces
G' = 10 log 100 = 20 dB
Si la ganancia de potencia fuera de 1000

G' = 10 log 1000 = 30 dB

En este caso se observa es que la potencia en decibelios aumenta en 10 dB cada vez que la ganancia de potencia se incrementa por un factor de 10.

Las ganancias normales se multiplican entre sí

En la siguiente figura se muestran dos etapas de un amplificador.



A la primera etapa se le aplica una potencia de entrada de P_1 y sale de ella una potencia P_2, lo que significa una ganancia de potencia.

$$G_1 = P_2 / P_1$$

La segunda etapa tiene una entrada de potencia P_2 y sale una potencia P_3, lo que equivale a una ganancia de

$$G_2 = P_3 / P_2$$

La ganancia total de potencia de ambas etapas es

$$G = (P_2/P_1)*(P_3/P_2)= P_3/P_1$$

Es decir, que

$$G = G_1 G_2$$

Esto demuestra que la ganancia total de potencia de etapas amplificadas en cascada es igual al producto de las ganancias de las etapas. No importa cuantas etapas sean, siempre puede determinarse la ganancia total de potencia multiplicando todas las ganancias individuales entre sí.

Las ganancias en decibelios se suman

Puesto que la ganancia total de potencia de dos etapas en cascada es de

$$G = G_1G_2$$

pueden tomarse logaritmos en ambos lados para obtener

$$\log G = \log G_1G_2 = \log G_1 + \log G_2$$

y, al multiplicar ambos miembros por 10, se tiene

$$10 \log G = 10 \log G_1 + 10 \log G_2$$

lo que también puede escribirse como

$$G' = G'_1 + G'_2$$

donde G' = ganancia de potencia total en decibelios

G'_1 = ganancia de potencia en decibelios de la primera etapa
G'_2 = ganancia de potencia en decibelios de la segunda etapa

La ecuación nos dice que la ganancia de potencia total en decibelios de dos etapas en cascada es igual a la suma de las ganancias en decibelios de cada etapa. La misma idea es valida para n etapas.

Referencia de 1 mW

Aunque los decibelios se usan generalmente con la ganancia de potencia, a veces se emplean para indicar el nivel de potencia respecto a *1 mW*. En este caso, se usa el símbolo *dBm*, donde la m significa que la referencia es a un *miliwatt*.

$$P' = 10 \log(P/1mW)$$

donde P' = potencia en dBm P = potencia en watts

Por ejemplo, si la potencia es de 0.5 W, entonces

$$P' = 10 \log (0.5\ W / 1\ mW) = 10 \log 500 = 27\ dBm$$

Referencias

.- Alonso, M. , Finn E.J.Vol II "Campos y Ondas". Ed. Fondo Educativo Interamericano .

.- E.Hecht, A. Zajac ; "Optica", Ed. Fondo Educativo Interamericano

.- A. Yariv; "Quantum Electronics" John Wiley & Sons

.- Peter K. Cheo; "Fiber Optics. Devices and Systems" Prentice Hall Series in Solid State Physical Electronics .

Desarrollo de la Práctica

Objetivos de la Práctica

- Manipulación de las fibras ópticas, aprendiendo la técnica de preparación de los extremos de las mismas.
- Observación de los modos de propagación en las fibras.
- Medida de la atenuación producida por un conector, un empalme y por la fibra. Utilización del decibelio como unidad de atenuación.

Recomendaciones antes de realizar la Práctica

Se detallan algunas recomendaciones que se deben seguir escrupulosamente:

- Nunca se mirará frontalmente el Haz de los Laseres.
- Al realizar conexiones de fibras ópticas utilizando microscopios no deberá existir radiación en las fibras mientras se realice la conexión.
- Al cortar las fibras ópticas, los restos de fibras se introducirán en un recipiente de deshecho. Un retal de fibra óptica de varios mm puede clavarse en la piel, siendo dificil su extracción debido a que éstas son frágiles y transparentes.
- Los conectores de los cordones siempre deberán estar tapados con sus protectores, evitando de este modo el polvo y la suciedad.
- No se curvarán de forma excesiva los cordones ni las fibras, podrían romperse éstas (radio de curvatura mayor de 2 cm).

Preparación de los extremos de las fibras

Las fibras ópticas vienen protegidas con una capa de acrilato u otro material análogo de 250 micras de diámetro. Los pasos para preparar los extremos de la fibra óptica son :

1.- Retirar de 4 a 5 cm de la protección anteriormente citada con la ayuda de la peladora metálica.

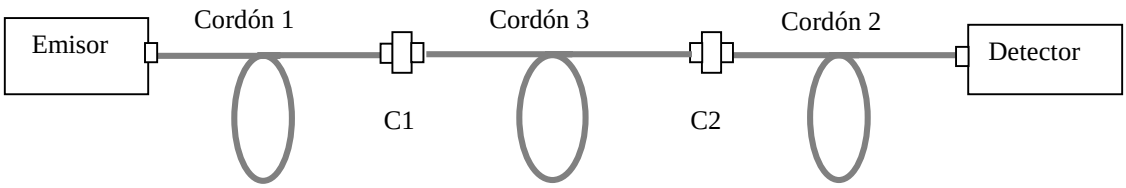
2.- Limpiar la parte pelada con una gasa empapada el alcohol.

3.- Cortar la FO con la cortadora de fibra. Para ello, abrir la cortadora e introducir la FO en el canal de la misma, separando este canal la parte pelada de la desnuda, cerrar la cortadora reteniendo el extremo de fibra desnuda con el tope de goma, accionar la cortadora de modo que la cuchilla de la misma “marque” la cubierta de la fibra, y finalmente, curvar la lengüeta de goma con la fibra, creándose una tensión que hace que corte por la “marca”. La fibra se corta igual que los cristales, marcando primero con un diamante, y forzando el corte (propagación de la grieta marcada) por una cizalladura.

1.- Medida de Atenuación de una Conexión Optica con Conectores

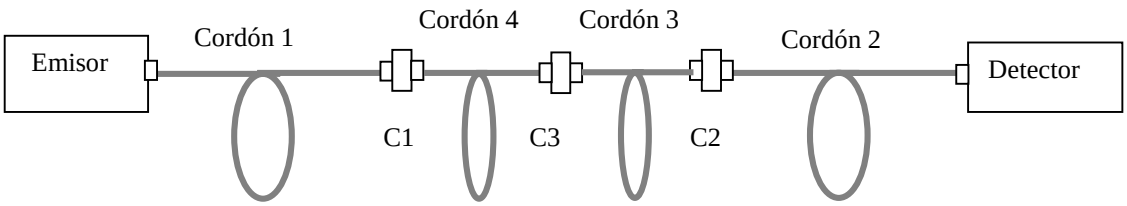
1.- Realizar la conexión de la figura y encender el equipo emisor (laser) y detector. Mantenerlos encendidos durante 5 minutos antes de proceder a realizar medidas.

Equipos y materiales : Emisor Laser IR (Infrarrojo), Medidor de Potencia IR, 4 cordones y 3 conectores.



Anotar la medida en el Detector = X_0 dBm

2.- A continuación se insertará entre los conectores C1 y C2 el conector C3 objeto de la medida:



Anotar la medida obtenida en el detector = X_1 dBm

La Atenuación Introducida por el conector C3 será :

$$X_C \text{ (dB)} = X_1 \text{ (dBm)} - X_0 \text{ (dBm)}$$

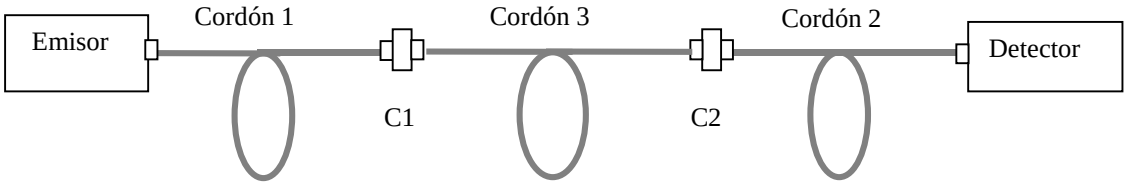
3.- Realizar 6 veces los pasos 1 y 2 , pero intercambiando los cordones 3 y 4 cada vez que se realice una medida en el paso 1. Calcular el valor medio de X_C (dB) con los errores correspondientes.

2.- Medida de Atenuación de un Empalme Óptico

En esta parte de la práctica se medirán las pérdidas producidas por un empalme entre dos fibras ópticas.

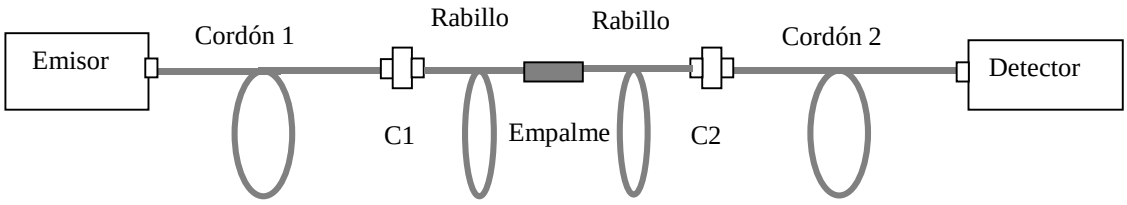
Equipos y materiales : Emisor Laser IR, Medidor de Potencia IR, 3 cordones , 3 conectores, 2 rabillos de FO conectados mediante un empalme.

1.- Realizar la conexión de la figura y encender el equipo emisor (laser) y detector. Mantenerlos encendidos durante 5 minutos antes de proceder a realizar medidas (en caso de que no estuviesen ya encendidos).



Anotar la medida en el Detector = X_0 dBm

2.- A continuación se insertará entre los conectores C1 y C2 el Empalme objeto de la medida:



Anotar la medida obtenida en el detector = X_1 dBm

La Atenuación Introducida por el empalme será :

$$X_E \text{ (dB)} = X_1 \text{ (dBm)} - X_0 \text{ (dBm)}$$

3.- Realizar 6 veces los pasos 1 y 2 . Calcular el valor medio de X_E (dB) con los errores correspondientes.

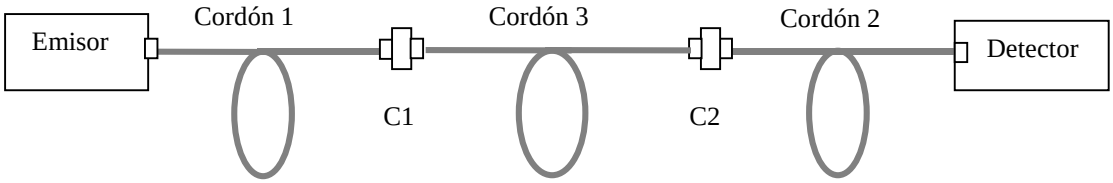
NOTA: La atenuación introducida por un retal de FO de pocos metros es despreciable.

3.- Medida de Atenuación de la Fibra Optica

En esta parte de la práctica se medirán las pérdidas producidas por una bobina de Fibra Óptica.

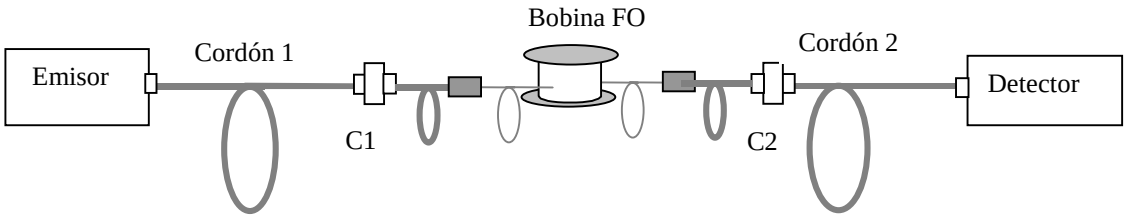
Equipos y materiales : Emisor Laser IR, Medidor de Potencia IR, 2 conectores, 3 cordones ,1 Bobina de F.O. con 2 empalmes a 2 rabillos de FO.

1.- Realizar la conexión de la figura y encender el equipo emisor (laser) y detector. Mantenerlos encendidos durante 5 minutos antes de proceder a realizar medidas (en caso de que no estuviesen ya encendidos).



Anotar la medida en el Detector $= X_0$ dBm

2.- A continuación se insertará entre los conectores C1 y C2 la Bobina de FO objeto de la medida (también se incluyen 2 empalmes):



Anotar la medida obtenida en el detector = X_1 dBm

La Atenuación introducida por el conjunto Bobina + 2 Empalmes será :

$$X_{BE} \text{ (dB)} = X_1 \text{ (dBm)} – X_0 \text{ (dBm)}$$

Atenuación de la Fibra Optica de la Bobina:

$$X_{FO} \text{ (dB)} = X_{BE} \text{ (dB)} – 2X_E \text{ (dB)}$$

3.- Realizar 6 veces los pasos 1 y 2 . Calcular el valor medio de X_{FO} (dB) con los errores correspondientes.

Cuestiones

1.- Teniendo en cuenta que en el empalme la mayor contribución a las pérdidas es el dasalinemiento de los núcleos, estimar el valor “d” de dicho desalineamiento, suponiendo un diámetro de campo modal de 10 micras.

2.- Estimar, con los valores utilizados en esta práctica, la densidad de potencia (Watios / m^2) en el interior de una fibra óptica monomodo (diámetro de campo modal d = 10 micras).