

PRACTICA 2

ESTUDIO DE LA ATENUACIÓN EN LA FIBRA ÓPTICA

2.1 Introducción

La atenuación o pérdidas de transmisión de las fibras ópticas es uno de los factores más importantes del impacto de las fibras en las telecomunicaciones. La atenuación del canal, si consideramos el medio como un canal ideal, determina la máxima distancia que se puede transmitir una señal sin necesidad de regeneración. Las comunicaciones por fibra óptica son especialmente atractivas cuando las pérdidas de la fibras están por debajo de los conductores metálicos (menor que 5 dB/km.).

La realidad nos indica que la atenuación es uno de los factores más importantes que limitan las prestaciones de la fibra óptica como canal para la transmisión de la información.

La estructura del texto de las prácticas será:

- Objetivo de la práctica: Apartado 2.2
- Explicación de los aspectos teóricos relacionados con la práctica: Apartado 2.3
- Material necesario para la realización de la práctica: Apartado 2.4
- Instrucciones para la realización de la práctica: Apartado 2.5

- Detalles del funcionamiento de algunos de los instrumentos necesarios para la realización de la práctica: Apartado 2.5.6

2.2 Objetivo de la práctica

Esta práctica tiene como objetivo la medida de la atenuación por unidad de longitud en una fibra óptica multimodo.

Otro objetivo es la familiarización, una vez más, con los problemas de acoplamiento de la luz emitida por un láser a la fibra óptica.

También se utilizará en esta práctica un elemento nuevo en el laboratorio que es un *mode scrambler* que actúa sobre la distribución modal del campo en la fibra y veremos su influencia sobre la medida de la atenuación.

Para la estimación de este parámetro utilizaremos el método de corte (cutback¹).

El método de corte presenta la desventaja de ser destructivo y por tanto, utilizable sólo en la caracterización de la fibra óptica en el laboratorio. Otro método utilizado para realizar medidas de atenuación y que puede ser utilizado en el campo es el uso de un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo. Para la correcta realización de las medidas es necesario que las pérdidas de la fibra sean apreciables. En nuestro caso, como las medidas las vamos a realizar fuera de las ventanas típicas de transmisión en las comunicaciones ópticas² es suficiente una longitud aproximada de 500 m para realizar una buena medida.

Por otra parte, la principal ventaja del método es su simplicidad, ya que, básicamente, sólo requiere de un emisor y un detector.

¹Este es el método de medida de referencia (RTM) para la atenuación en fibras ópticas tanto del CCITT como de la EIA (Asociación de Industrias de Electrónica de los EE.UU.).

²La longitud de onda de nuestro láser de He-Ne es de 633 nm.

2.3 La atenuación en las fibras ópticas

2.3.1 Introducción

La atenuación de una señal óptica, al igual que todas, se expresa normalmente en decibelios (dB). El decibelio es una unidad logarítmica y sirve para comparar dos niveles de potencia de una determinada señal. Si queremos saber la atenuación de una señal óptica transmitida a una determinada longitud de onda bastará realizar la siguiente operación

$$\text{Atenuación (dB)} = 10 \log \frac{P_i}{P_o} \quad (2.1)$$

donde P_i es la potencia transmitida y P_o la potencia recibida.

En los sistemas de comunicaciones la atenuación se suele expresar en decibelios por unidad de longitud, es decir si llamamos α a la atenuación por unidad de longitud podemos escribir

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_i}{P_o} \quad (2.2)$$

donde L es la longitud de la fibra.

2.3.2 Caracterización

Cabría hablar de atenuación en el mismo sentido con que se habla en un cable metálico, previa una doble matización:

- En las fibras la potencia se distribuye en diversos modos, cada uno con una atenuación distinta. Ya sabemos que el campo eléctrico de un modo guiado se puede expresar como

$$E(x, y, z, t) = E_m(x, y) \exp j(\omega t - \beta_m z) \quad (2.3)$$

donde $E_m(x, y)$ representa el perfil del campo modal y β_m la constante de propagación de cada modo que, como ya hemos visto, se puede expresar en

función del índice efectivo (n_e) del modo como

$$\beta_m = \frac{2\pi}{\lambda} n_e \quad (2.4)$$

Nosotros, por facilidad hemos considerado el índice de refracción como un número real. Esto no es cierto, el índice de refracción es un número complejo. Así podemos escribir el índice efectivo del modo como

$$n_e = n_{er} - j n_{ei} \quad (2.5)$$

por tanto la expresión 2.3 se puede escribir como

$$E(x, y, z, t) = E_m(x, y) \exp j \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} (n_{er} - j n_{ei}) z \right] \quad (2.6)$$

y operando se obtiene

$$E(x, y, z, t) = E_m(x, y) \exp -\frac{2\pi}{\lambda} n_{ei} z \exp j \left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} n_{er} z \right] \quad (2.7)$$

Formalmente podemos decir que tenemos la misma situación que antes pero ahora la distribución del campo se va atenuando a medida que se propaga. Este es el origen de la atenuación de las señales.

- Las fibras no presentan distorsión de amplitud, por lo que todas las componentes espectrales de la señal de información se atenúan por igual y según la atenuación de la longitud de onda de trabajo. Sobre esta afirmación volveremos más adelante.

Antes de continuar conviene reflexionar sobre la primera matización que hemos realizado. Parece que está claro que cada modo se atenuará de una forma distinta según consideremos un modo u otro. Así en primer lugar podemos hablar de pérdidas modales que son aquéllas que caracterizan como se atenúa un determinado modo. Al hablar de atenuación en una fibra óptica habría que calcular los modos que se propagan y conocer la constante de atenuación de cada modo. Otro método es considerar las pérdidas como la relación de la potencia de entrada total y la

transmitida por la fibra óptica, en este caso podemos hablar de pérdidas totales, que es justamente lo más habitual en el mundo de las comunicaciones ópticas. Estas pérdidas se calculan de acuerdo con la expresión 2.1 si hablamos de atenuación total o con la expresión 2.2 si nos interesa la atenuación por unidad de longitud.

Evidentemente nos interesa hablar más de atenuación total que de atenuación modal ya que en realidad en los sistemas de comunicaciones ópticas nos interesa la potencia emitida y transmitida y no como se distribuye esta energía en los distintos modos. En el caso de una fibra monomodo la relación entre una y otra es una expresión sencilla ya que la atenuación modal evalúa la atenuación de la amplitud del campo mientras que la atenuación total relaciona la disminución de la potencia transmitida.

2.3.3 *Mecanismos*

En líneas generales, las pérdidas de luz en la fibra óptica pueden dividirse en dos grandes categorías:

- **Intrínsecas:** dependen de la composición del vidrio y no pueden eliminarse; representan el límite teórico.
- **Extrínsecas:** son ajenas a la fibra idealmente considerada, y se originan por causa de impurezas, defectos en la geometría de la fibra, defectos de cableado, curvaturas.

En este apartado se mostrarán los fenómenos físicos que determinan el tope inferior de la atenuación a las distintas longitudes de onda, y se dará una idea de los aspectos que interesa cuidar con mayor atención durante la fabricación e instalación.

La Figura 2.1 representa el peso de cada una de las contribuciones anteriormente citadas. Cabe resaltar el acusado avance de las técnicas de fabricación y, consecuentemente, la rápida tendencia hacia los valores intrínsecos, que representan el límite teórico de la atenuación. Este hecho se ve confirmado por los valores representados en la Tabla 2.1.

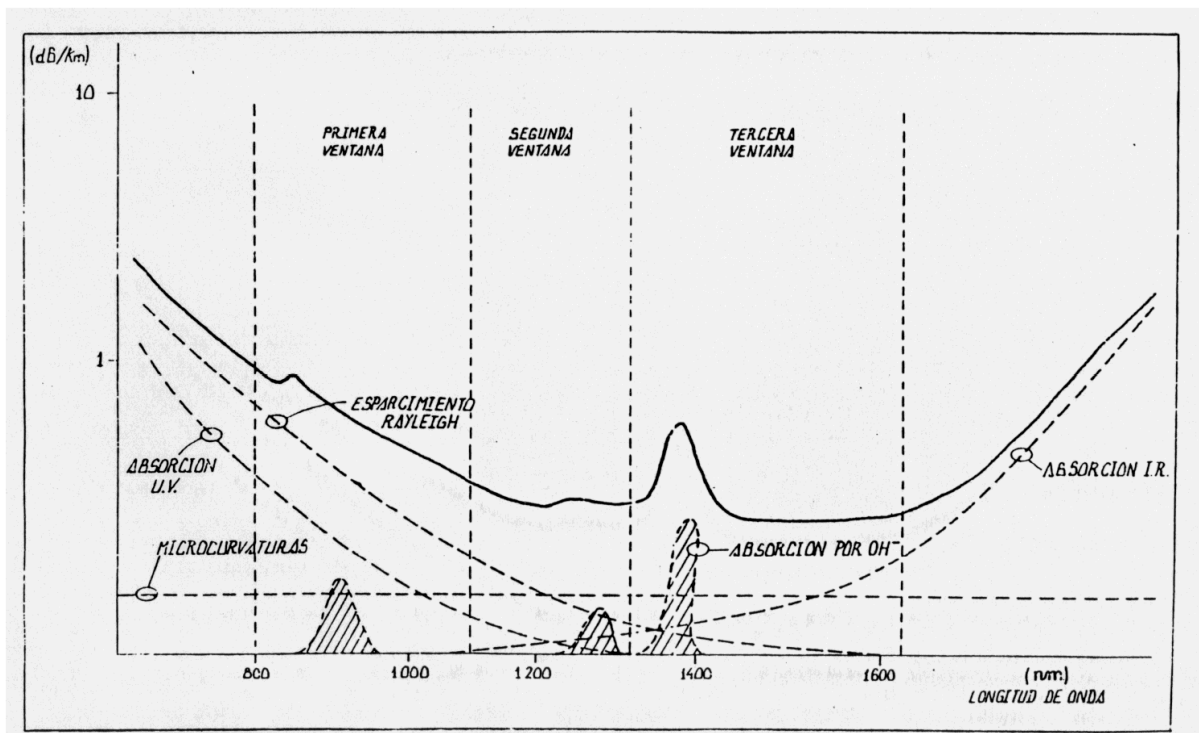


FIGURA 2.1. Representación de la atenuación total y la contribución a la atenuación total debida a diversas causas.

Longitud de onda (nm)	Límite teórico	Mejor resultado obtenido
850	2,5	2,12
1.300	0,34	0,42
1.550	0,18	0,20

TABLA 2.1. Valores de atenuación de una fibra óptica en las tres ventanas y su comparación con el límite teórico

2.3.4 Factores intrínsecos

2.3.4.1 Pérdidas por absorción intrínseca

La absorción intrínseca es un mecanismo por el cual parte de la potencia óptica se disipa en la fibra en forma de calor. Se debe a la interacción entre fotones y partículas produciéndose vibraciones moleculares que originan picos de absorción centrados en varias longitudes de onda.

Esta absorción es importante por debajo de $0,8 \mu\text{m}$ (ultravioleta) y por encima de $1,1 \mu\text{m}$ (infrarrojo), tal como se muestra en la Figura 2.1.

2.3.4.1.1 Absorción ultravioleta

Como ya se ha dicho es un fenómeno de absorción intrínseca en la fibra que origina un incremento de la atenuación cuyo valor decrece exponencialmente a medida que crece la longitud de onda

$$\alpha_{UV} = A_{UV} \exp \frac{\lambda_{UV}}{\lambda} \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (2.8)$$

y resulta prácticamente despreciable para longitudes de onda superiores a $1 \mu\text{m}$ (atenuación inferior a 10^{-8} dB/km para una fibra de SiO_2). Esta ecuación se conoce como Ley de Urbach. Resulta difícil modelar los coeficientes A_{UV} y λ_{UV} ya que presenta una disminución muy brusca. Una forma de resolver el problema es realizar más medidas en el margen de longitudes de onda de $0,15$ a $0,25 \mu\text{m}$ y extrapolar los resultados para longitudes de onda mayores. Una fórmula empírica para las fibras de SiO_2 dopadas con GeO_2 es la siguiente:

$$\alpha_{UV}(\lambda, W) = 8,510^{-4} W \exp \frac{4,626}{\lambda} \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (2.9)$$

siendo W una constante que depende de la concentración de GeO_2 y longitud de onda expresada en micras. Esta expresión sigue siendo válida para obtener una magnitud del valor de la atenuación para la absorción en el ultravioleta.

Otra expresión habitualmente utilizada para cuantificar estas pérdidas es:

$$\alpha_{UV}(\lambda, W) = \left(\frac{1,542W}{46,6W + 60} \right) \exp \frac{4,626}{\lambda} \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (2.10)$$

siendo W una variable, al igual que en el caso anterior y longitud de onda expresada en micras. Para valores típicos de dopaje de Germanio toma el valor de $0,02^3$.

2.3.4.1.2 Absorción infrarroja

Al igual que la anterior obedece a un mecanismo intrínseco del vidrio. Tiene su origen en el fenómeno de vibración por interacción entre átomos de Silicio y Oxígeno. Para el SiO_2 presenta tres picos fundamentales de absorción en 9,1, 12,5 y 21 μm con una atenuación de 10^{10} dB/km.

Estos picos de absorción presentan colas que decrecen exponencialmente con la longitud de onda, no obstante, este fenómeno de absorción es de tener en cuenta en el margen de longitudes de onda de 1,3 a 1,6 μm .

A su vez esta absorción se ve más acentuada en función del óxido que se une para modelar el perfil del índice de la fibra. Para el GeO_2 , el pico fundamental más bajo se desplaza entre 11 y 11,4 μm , debido a la mayor masa del Ge frente al Si; para el caso del P_2O_5 el primer fundamental se desplaza a 8 μm y para el B_2O_3 a 7,3 μm siendo de esperar una fuerte contribución de absorción infrarroja a las pérdidas totales.

Esta absorción en el infrarrojo también se puede modelar con una expresión similar a la absorción en el ultravioleta

$$\alpha_{IR} = A_{IR} \exp\left(\frac{\lambda_{IR}}{\lambda}\right) \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (2.11)$$

La verificación en este caso también es difícil por la acusada dependencia con la longitud de onda y porque si, como es frecuente, la fibra está enrollada en una bobina durante el experimento, las pérdidas por microcurvaturas enmascaran en cierta medida los resultados.

Miya y colaboradores⁴ han modelado cuantitativamente la absorción infrarroja para fibras de núcleo de SiO_2 - GeO_2 por la siguiente expresión:

³ S. R. Nagel, J. B. MacChesney y K. L. Walker: An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance, IEEE Journal of Quantum Electronics QE-18 (4), pp: 459-476, 1982.

⁴ T. Miya et al.: Trans. IECE (Japón), E63, 1980, pp: 514-519.

$$\alpha_{IR}(\lambda) = 7,8110^{11} \exp\left(-\frac{48,48}{\lambda}\right) \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad (2.12)$$

en la que se supone que la absorción es independiente de la concentración de Ge. En esta expresión la longitud de onda hay que expresarla en micras.

2.3.4.2 Pérdidas por dispersión intrínseca

También se las conoce pérdidas por dispersión⁵ Rayleigh –Rayleigh scattering–. Este tipo de pérdidas intrínsecas, tienen una clara diferencia con las vistas anteriormente. En los mecanismos de absorción en el ultravioleta e infrarrojo la energía perdida se transfiere al medio constitutivo de la fibra óptica. En este caso se producen reflexiones que hacen que no se pueda propagar. Están originadas por fluctuaciones aleatorias en el índice de refracción, de tamaño menor que la longitud de onda. Estas irregularidades hacen que una parte de la señal óptica sufra pequeñas reflexiones, originándose de este modo una atenuación que es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda (ver Figura 2.1).

Las fluctuaciones del índice que motivan la dispersión de Rayleigh se producen por irregularidades del material, pequeñas burbujas, etc.

A tenor de los trabajos de Pinnow y Olshansky⁶ la atenuación de Rayleigh puede formularse, en función de la longitud de onda expresada en micras, por

$$\alpha_{Ray} = \frac{A}{\lambda^4} (1 + B\Delta) \quad (2.13)$$

siendo A del orden de 0,8 y estando B comprendido entre 40 y 100 para fibras de SiO_2 dopadas con P_2O_5 y GeO_2 respectivamente y siendo Δ la diferencia relativa entre el máximo valor del índice del núcleo y el valor medio del índice de refracción del recubrimiento.

⁵No hay que confundir con el término de dispersión que ya se ha visto al hablar de la deformación que sufren los pulsos al propagarse por la fibra óptica.

⁶D. A. Pinow et al., Appl.Phys. Lett. **22** pp.: 526-529, 1973.

R. Olshansky, Rev. Mod. Phys. **51** pp.: 341-367, 1979.

El mecanismo de dispersión de Rayleigh es un mecanismo de dispersión lineal, ésto quiere decir que la longitud de onda de la señal reflejada no cambia. También existen otros mecanismos de dispersión no lineales que conllevan un cambio en la longitud de onda de la señal reflejada.

2.3.5 Factores extrínsecos

Son motivadas, por defectos de fabricación. Podemos distinguir tres tipos:

- Por contaminación del vidrio
- Por curvado de la fibra
- Por irregularidades periódicas en la geometría de la fibra

2.3.5.1 Pérdidas por contaminación del vidrio

La presencia de iones metálicos y de grupos OH^- en el vidrio base origina una absorción de potencia óptica.

En lo que se refiere a iones metálicos, las exigencias de pureza son análogas a las exigidas en la fabricación de semiconductores. Por ejemplo, un porcentaje de una parte por millón de iones de cobre ó cromo, origina una atenuación de 1 dB/km. Estas pérdidas son prácticamente independientes de la longitud de onda.

Más importantes y difíciles de erradicar son las pérdidas debidas a la presencia de grupos OH^- . Este agente causa pérdidas por absorción motivada por la resonancia de su estructura atómica en una banda comprendida entre 2.720 y 4.000 nm, dependiendo de la posición del grupo OH^- en la red cristalina. Esta resonancia causa armónicos, y en consecuencia picos de atenuación a 1.380, 1.250, 950 nm, tal y como se puede ver en la Figura 2.2. Típicamente, puede cuantificarse el incremento neto de atenuación debido a la contaminación de iones hidroxilo para una cantidad de iones de una parte por millón de acuerdo con la Tabla 2.2.

La Figura 2.2 muestra el resultado de los esfuerzos, a lo largo de los años, por reducir la contaminación en fibras fabricadas por la técnica VAD. También en esta

Longitud de onda (nm)	Atenuación (dB)
880	0,1
950	1
1.250	1,7
1.380	3,5

TABLA 2.2. Valores de atenuación debido a la contribución de los iones hidroxilo para distintas longitudes de onda para una concentración de iones de una parte por millón.

figura se puede observar perfectamente la presencia de las longitudes de resonancia a 950, 1250 y 1380 nm.

La presencia de radicales OH^- en la actualidad, debido al grado de perfección que ha alcanzado la fabricación de las fibras, se puede reducir a niveles de 0,01 partes por millón.

Otro elemento a tener en cuenta es la presencia de Hidrógeno que puede ocasionar mecanismos de atenuación adicionales. Esto se puede evitar con el empleo de revestimientos que le impidan el paso.

2.3.5.2 Pérdidas por curvado de la fibra

Siempre que la fibra se ve sometida a una curvatura o pandeo (al bobinarla, al tender el cable, etc.) se origina una atenuación adicional al producirse una radiación de modos que en condiciones normales permanecerían sin salirse del núcleo.

No obstante, como esta atenuación adicional varía exponencialmente con el radio de curvatura (ver Figura 2.3), estas pérdidas son inapreciables hasta que se sobrepasa la curvatura que llamaremos crítica. Como regla práctica, puede considerarse un radio de curvatura mínimo de valor igual a diez veces el diámetro exterior de la fibra con protección plástica.

2.3.5.3 Pérdidas por irregularidades geométricas de tipo periódico

Estas pérdidas son originadas por defectos espaciados cuasi periódicamente como, por ejemplo, irregularidades entre el núcleo y el revestimiento, fluctuaciones de

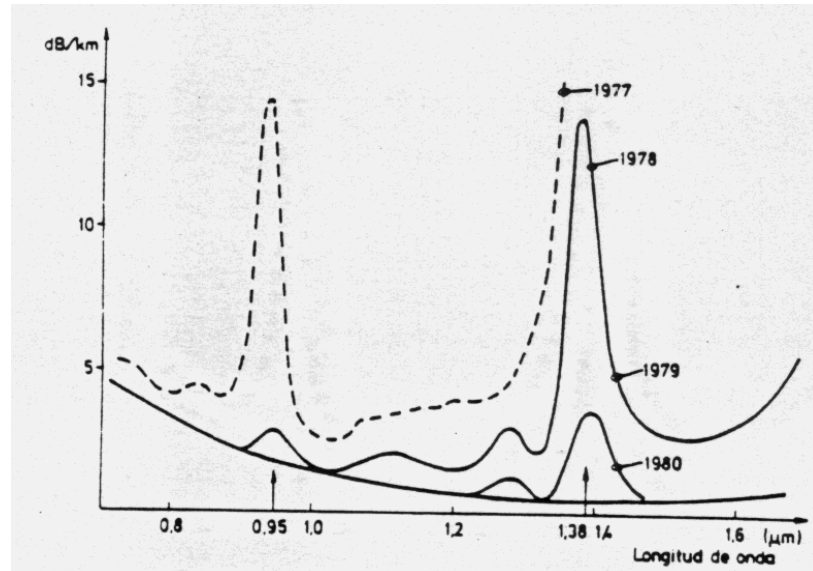


FIGURA 2.2. Atenuación por la contaminación del vidrio en una fibra fabricada por la técnica (VAD) En esta Figura se puede observar la evolución de esta atenuación a lo largo de los años.

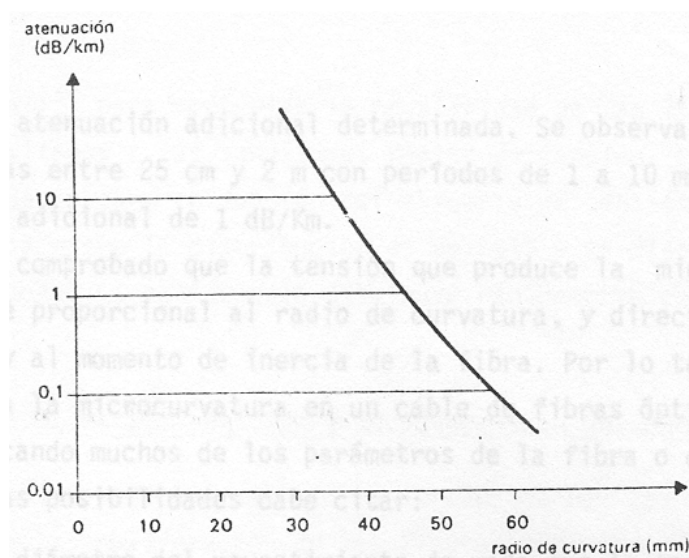


FIGURA 2.3. Atenuación debida a la curvatura de la fibra.

diámetro y variaciones del eje de la fibra (en este caso, llamadas pérdidas por microcurvatura –microbending losses–).

Presentan dos características importantes:

- Son prácticamente independientes de la longitud de onda.
- Únicamente merecen consideración cuanto más pequeña sea la longitud de onda crítica definida λ_c , definida como

$$\lambda_c = 4a + \sqrt{\Delta} \quad (2.14)$$

donde a es el radio del núcleo y Δ la diferencia relativa de índices.

En las fibras, las irregularidades periódicas motivan trasvases de potencia de unos modos a otros modos y, cuando el espaciado de las irregularidades es menor que λ_c , parte de la potencia guiada se acopla a modos que escapan del núcleo, motivándose así la atenuación.

En general, el efecto de las microcurvaturas puede ser muy importante y para evitarlo suelen tomarse una o varias medidas:

- Aumentar la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento.
- Aumentar la sección de la fibra
- Embutir la fibra en un plástico blando (bajo módulo de Young) y recubrirla posteriormente con algún elemento con módulo de Young elevado.

En este último caso las pérdidas por irregularidades periódicas se reducen en un factor de

$$F = \frac{1}{\left(1 + \pi \Delta^2 R^4 \frac{E_f}{E_r}\right)^2}$$

siendo E_f el módulo de Young de la fibra y E_r el módulo de Young del segundo recubrimiento incluyendo el primer revestimiento plástico –bajo módulo de Young–. R representa el cociente entre el radio del recubrimiento y del núcleo, y Δ es la diferencia relativa de índices.

2.3.6 Ventanas de transmisión

Se conoce por **ventanas** aquellas zonas del espectro donde la atenuación alcanza valores sensiblemente pequeños. Actualmente se trabaja en tres ventanas: la primera centrada en $0,85 \mu\text{m}$; la segunda, en torno a $1,33 \mu\text{m}$; y la tercera, que corresponde a una longitud de onda de $1,55 \mu\text{m}$. A la vista de la Figura 2.1 se observa como la 1ª ventana no es una ventana propiamente dicha, sin embargo, fue la primera zona que se empleó en comunicaciones ópticas y aún se sigue utilizando por lo económico que son sus componentes. De ahí que también se denomine ventana.

La fuerte reducción de las pérdidas, debidas a la dispersión de Rayleigh, con la longitud de onda de trabajo, según λ^4 , es una de las causas que motivan la aparición de la segunda y tercera ventana en torno a $1,33$ y a $1,55 \mu\text{m}$, respectivamente.

2.3.7 Dependencia de la atenuación con la frecuencia.

Al comienzo de este apartado hemos comentado la igual atenuación de todas las componentes espectrales transmitidas. Y a continuación hemos visto como la atenuación de diversos mecanismos tenía una dependencia funcional con la longitud de onda. Aparentemente existe una contradicción. Evidentemente al hablar de las componentes espectrales hay que considerarlas como el resultado de la modulación de la portadora óptica con la información que queremos transmitir. Como ya se ha visto, la información se sitúa alrededor de la frecuencia óptica, portadora de la información, siendo la anchura espectral del conjunto muy inferior al valor de la portadora (por el alto valor de esta del orden de los THz). Si se transmite un ancho de banda de 20 GHz a una longitud de onda de $1,55 \mu\text{m}$, este ancho de banda supone en unidades de longitud de onda $0,16 \text{ nm}$, es decir, que la diferencia de atenuación

entre 1549,84 nm y 1550,16 nm es inapreciable. O sea que la atenuación en la banda en que nos vamos a mover se puede suponer constante sin cometer prácticamente ningún error.

2.4 Material necesario para la práctica

Gran parte del material necesario para la realización de esta Práctica se ha utilizado en la Práctica 1, por lo que en caso de duda remitimos al lector al texto de dicha Práctica. Para el desarrollo de esta práctica es necesario el siguiente material:

- F-MLD-500: Fibra 100/140MM (500 metros)
- XSN-22
- U-1301P
- ULM
- 340RC
- 41
- 1815-C
- 818-SL
- F-CL1
- F-BK2
- FK-BLX
- Destornillador
- SK-25: Concretamente hacen falta 2 tornillos M6x20, 2 tornillos M6x16
- SK-08:



FIGURA 2.4. Fotografía del acoplador F-916 de Newport.



FIGURA 2.5. Fotografía del Mode Scrambler modelo FM-1 de Newport.

- F-916: Acoplador de fibra. Para esta práctica vamos a utilizar un método distinto para acoplar la luz del láser a la fibra. En este caso utilizaremos el F-916 cuya fotografía se puede ver en la Figura 2.4 donde se observa el objetivo del microscopio M-20X.
- M-20X: Objetivo de microscopio de 20 aumentos.
- FM-1: Mode scrambler. Este elemento nos va a permitir distribuir uniformemente la energía que se propaga por la fibra en los distintos modos. Una fotografía se puede ver en la Figura 2.5.
- VPH-2
- VPH-4
- B-2

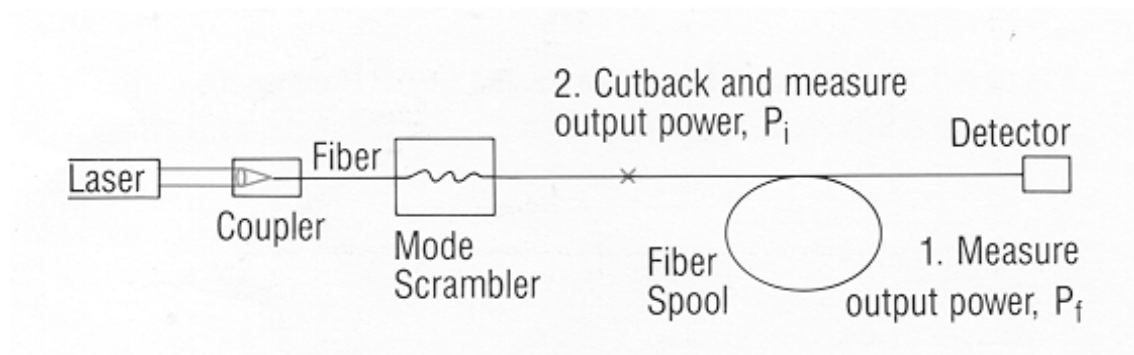


FIGURA 2.6. Representación esquemática del montaje de laboratorio para la medida de la atenuación utilizando el método de corte.

- SP-2
- SP-4
- FP-1

2.5 Instrucciones para la realización de la práctica

2.5.1 Introducción

En la Figura 2.6 se representa esquemáticamente el montaje de laboratorio para la realización de la práctica. La radiación del láser se acopla en la fibra multimodo mediante un objetivo de microscopio, a continuación se introduce el elemento *mode scrambler*, la luz de nuestro láser recorre una distancia aproximada de 500 m de fibra multimodo midiéndose a continuación la potencia óptica de salida (P_f). La potencia de entrada se mide a continuación del *mode scrambler* (P_i). Para ello es necesario cortar una longitud de fibra entre uno y dos metros. De esta manera conseguimos que las condiciones de iluminación en la realización de las medidas de la potencia de entrada y de salida sean idénticas.

En la Figura 2.7 se observa una fotografía del montaje.

Tal y como comentamos en el apartado 2.3 la atenuación dependerá de las características concretas del campo que se propaga en la fibra. Para que las medidas

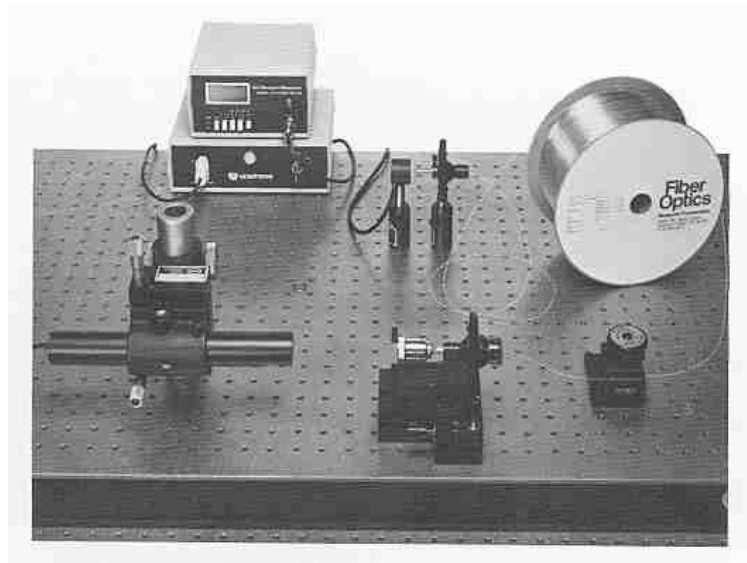


FIGURA 2.7. Fotografía del montaje del laboratorio usado para la medida de la atenuación utilizando el método del corte. En el primer plano de la fotografía se observa el láser, a continuación el acoplamiento de la luz a la fibra utilizando el F-916 junto con un objetivo de microscopio y seguidamente el mode scrambler (FM-1). En segundo plano se observa el carrete de fibra y a continuación el posicionador final de la fibra (FP-1) y el detector.

sean significativas es necesario que se hagan bajo determinadas condiciones: nos interesa que la energía transmitida por la fibra esté distribuida uniformemente entre los distintos modos. Esta situación se produce en los enlaces de fibra óptica tras recorrer una distancia de propagación de 1 km ya que se produce el acoplamiento entre los distintos modos. Para llegar a esta distribución uniforme de la energía del láser entre los distintos modos utilizamos el *mode scrambler*. Este componente mediante la aplicación de una tensión mecánica sobre la fibra, introduce una serie de perturbaciones que hacen que la potencia óptica se distribuya entre los distintos modos de forma uniforme. De esta forma resolvemos el problema sin tener que introducir una carrete de fibra de excesiva longitud. Para ver con detalle el funcionamiento del *mode scrambler* consulte el apartado 2.5.6.

2.5.2 Montaje de la práctica

Los pasos a seguir para la realización del montaje son⁷:

1. Monte el láser, para ello siga los pasos dados en la Práctica 1.
2. Coja la etapa de alineamiento F-916 y quite los dos tornillos que fijan el la parte de la etapa que tiene el objetivo y el posicionador de la fibra a la base. Una vez que tiene simplemente la base con dos tornillos M6x20 fíjela a la base. Asegúrese que está enfrente del láser.
3. Fije el resto de la etapa de alineamiento a la base.
4. Rosque el objetivo en la etapa de alineamiento.
5. Con ayuda de dos tornillos M6x16 fije el *mode scrambler* al tablero
6. Sitúe el posicionador FP-1 que servirá para situar el final de la fibra enfrente del detector como ya se explicó en la Práctica 1.
7. Sitúe el detector de acuerdo a los pasos marcados en la Práctica 1.

⁷ Como el montaje ya está realizado haga una lectura rápida de este apartado.

2.5.3 Consejos para la realización del montaje

Una vez que haya preparado la fibra de acuerdo con lo explicado en la sección siguiente siga los siguientes consejos:

- Encienda el láser de He-Ne y sitúe el elemento de acoplo a la misma altura que el haz del láser. Para conseguir un buen acoplo, hay que asegurarse que el haz que sale del objetivo del microscopio es paralelo a la mesa de trabajo y perpendicular a la lente. Esto quiere decir que la lente del objetivo no variará la trayectoria del láser, sólo concentrará la luz en el foco de la lente. Para conseguir esto, ajuste la altura y el ángulo del láser de forma que el haz incida sobre el objetivo y no se observen reflejos, esto es, el haz del láser al incidir sobre la lente será parcialmente reflejado. Lo que debe hacer es buscar dicho reflejo en la salida del láser y llevar dicho reflejo hasta el orificio por el que el láser es proyectado. Una vez realizado un ajuste grueso del haz del láser manipulando la abrazadera 340C, haga un ajuste fino manipulando los mandos del ajustes del acoplo.
- Sitúe el extremo que ha preparado en el lugar correspondiente del acoplador, tras el objetivo del microscopio empleado para enfocar el haz del láser.
- Coloque en un posicionador de fibra el extremo opuesto y ponga la pantalla de papel de manera que pueda visualizar la salida.
- Una vez conseguido, desplace horizontal y verticalmente el extremo de la fibra hasta que lo haga coincidir sobre el haz incidente. Realice este ajuste de forma aproximada utilizando como elemento de referencia la intensidad que se observa en la pantalla de papel.
- Optimize el acoplamiento del láser a la fibra, para ello deberá situar el extremo de la fibra en el foco de la lente. Sitúe una lámina de material semitransparente entre el láser y el objetivo del microscopio, de manera que pueda observar la reflexión de Fresnel que se produce en el extremo (observe la Figura 2.8).

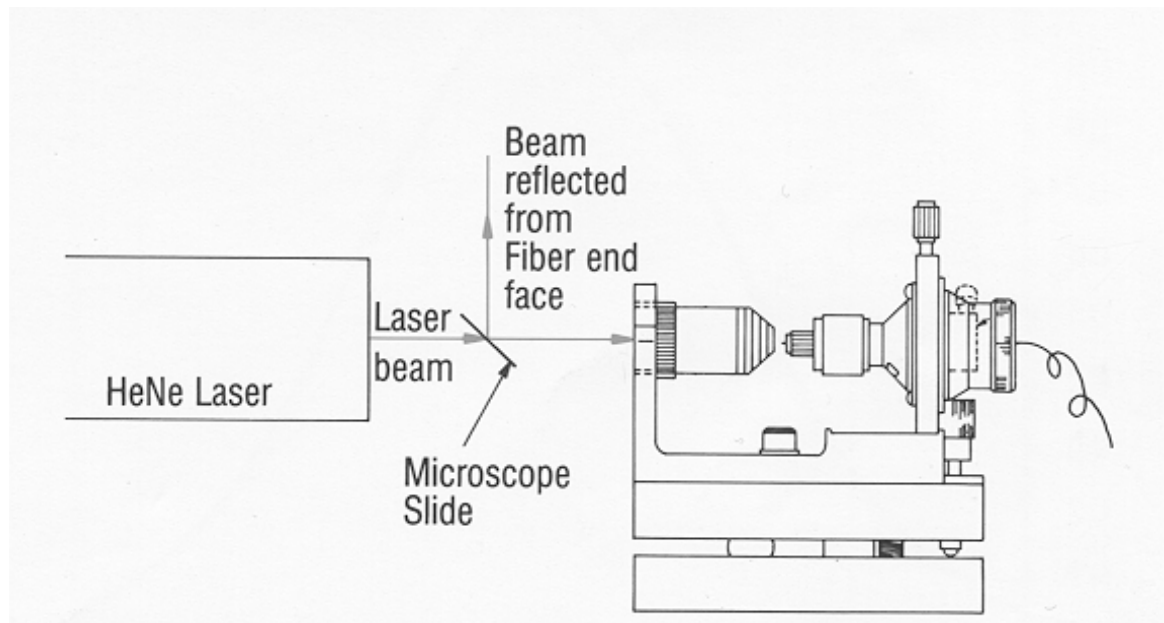


FIGURA 2.8. Representación esquemática del método para acoplar la luz del láser de He-Ne a la fibra óptica.

Desplace la posición de la fibra a lo largo de su eje hasta que este haz reflejado esté enfocado. En este momento tendrá el extremo de entrada de la fibra en el foco de la lente **¿por qué?**

- Otra forma de optimizar el acoplo de la luz sin utilizar la lámina de material semitransparente es la siguiente. Manteniendo fija la posición z de la fibra de entrada, maximice la potencia de salida, con ayuda del medidor de potencia óptico, moviendo la posición x e y de la fibra de entrada, realice el ajuste en x e y tantas veces como sea necesario para maximizar la potencia de salida. Modifique ligeramente la posición en z y optimice la posición en x e y . Si la potencia ha aumentado se está moviendo hacia el foco de la lente si no es así se está alejando. Repita el movimiento en z hacia el foco de la lente y optimice la posición en x e y . Conforme nos acerquemos al foco de la lente la optimización en x e y es más crítica.

2.5.4 Preparación de la fibra

Observe en primer lugar que el carrete de fibra tiene dos extremos marcados con unas pegatinas de color azul y amarillo. Concretamente el principio del carrete, que será la entrada, de color azul y el final del carrete, que será la salida, de color amarillo. En primer lugar prepare el extremo de la fibra correspondiente al punto de entrada, que será el comienzo del carrete de 500 metros de fibra óptica (marcado en un extremo con una pegatina azul), para ello siga los pasos indicados en la Práctica 1. Como extremo final utilizará el marcado con una pegatina amarilla, en principio utilizará el mismo que sus anteriores compañeros. Comprobará la calidad del corte acoplando la luz y observando el patrón del campo en la pantalla, en el caso que compruebe que el corte realizado es malo realizará un corte nuevo.

En el caso de que tenga que hacer un nuevo corte en el extremo de salida tenga cuidado al soltar la fibra del final del carrete.

2.5.5 Medida de la atenuación de la fibra

Coloque el medidor de potencia óptica a la salida de la fibra y ajuste la posición x , y y z de la fibra en el acoplador hasta que la potencia recibida sea máxima. Tome nota del valor de la potencia medida.

Reemplace nuevamente el medidor de potencia óptica por la pantalla de papel en la salida de la fibra. Separe las dos superficies del *mode scrambler* e introduzca la fibra entre ellas. A continuación apriete la fibra en el interior del *mode scrambler* y observe qué sucede a la salida de la fibra. En cuanto la distribución de intensidad en el interior del círculo determinado por la apertura numérica de la fibra sea homogénea deje de actuar sobre el *mode scrambler* (esto no quiere decir que desaparece el granulado, sino que todo el círculo de luz tiene la misma intensidad). En estas condiciones tendremos una buena aproximación para una distribución homogénea del campo. Mida nuevamente la potencia óptica a la salida de la fibra.

Con Mode Scrambler		Sin Mode Scrambler		Longitud inicial del carrete (m)	Longitud de fi- bra cortada (m)
P_i (μ W)	P_f (μ W)	P_i (μ W)	P_f (μ W)		

TABLA 2.3. Medidas realizadas en la práctica 2

Corte un trozo de fibra aproximadamente de un metro de longitud a la entrada, teniendo mucho cuidado de no alterar las condiciones de iluminación (láser, acoplador y *mode scrambler*). Prepare el extremo y mida la potencia. A continuación, libere a la fibra del *mode scrambler* y vuelva a medir la potencia.

Una vez realizadas las medidas complete la Tabla 2.3 y entréguela en la memoria.

Es muy importante que mida todos los trozos de fibra cortados en la realización de esta práctica y complete la hoja que tiene en su puesto. La realización de esta parte es muy importante ya que de la exactitud de los datos medidos de fibra depende el dato sobre la longitud final del carrete.

Utilizando los datos de potencia obtenidos y la longitud de la fibra, es decir la longitud indicada por el fabricante menos los cortes que se hayan ido realizando (que están escritos en la hoja que se encuentra en su puesto) determine la atenuación en la fibra con y sin el *mode scrambler*.

Compare la atenuación que ha medido con los datos dados por el fabricante para la primera y segunda ventana de transmisión. Explique los resultados.

¿Qué mecanismo es el predominante en la medida realizada?, ¿por qué?

2.5.6 Funcionamiento del mode scrambler

Como ya se ha comentado la misión del *mode scrambler* es distribuir la energía del láser de forma uniforme entre los distintos modos. Esta situación se puede conseguir cuando la luz recorre una distancia de 1000 m por la fibra ya que debido a diversas causas se consigue el acoplamiento entre los distintos modos de una manera uniforme. En la Figura 2.9 se observa como funciona este elemento. En primer lugar hay que

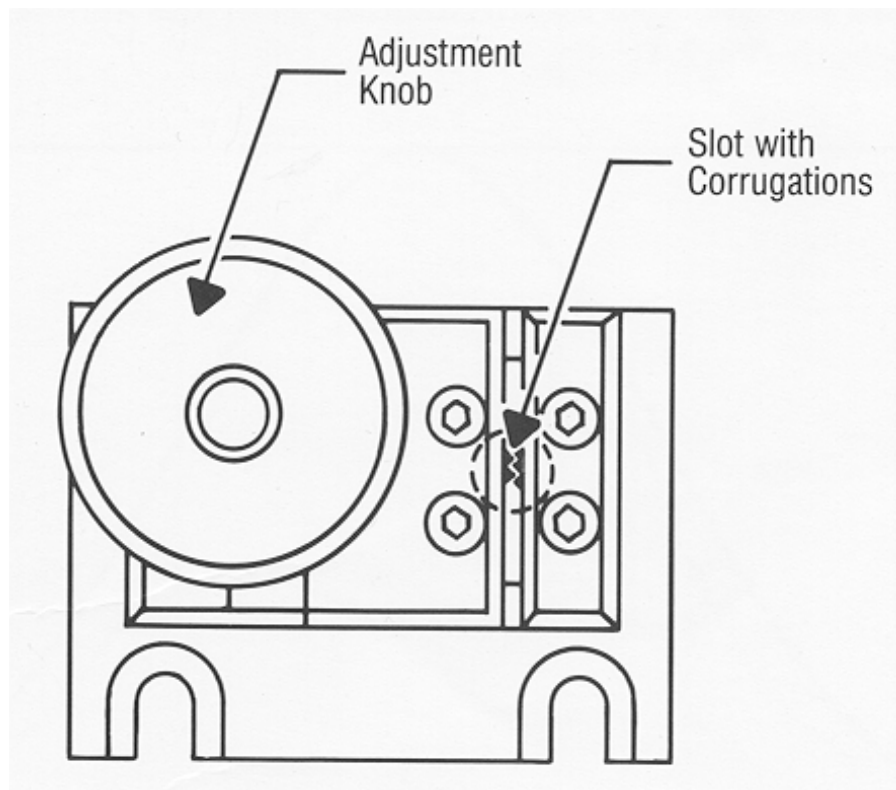


FIGURA 2.9. Representación esquemática del mode scrambler. En esta Figura se observa perfectamente el mando para ejercer una presión sobre la fibra y la zona donde hay que introducir la fibra para que se pueda ejercer sobre ella la presión. También en esta Figura se aprecia como la zona donde hay que introducir la fibra tiene una protección para no dañarla.

girar en el sentido contrario a las agujas del reloj el mando de ajuste y se observa como en la ranura para introducir la fibra hay una zona con unas rugosidades. Esta zona tiene un material para no dañar a la fibra. Girando el mando y sometiendo a una presión a la fibra se consigue la distribución uniforme.

La explicación del funcionamiento es que la tensión mecánica aplicada a la fibra, introduce una serie de perturbaciones que hacen que la luz acoplada a los modos no confinados, que se propagarían con unas altas pérdidas, se radien, mientras que la energía de los modos restantes se distribuya de forma uniforme. Así se puede obtener una distribución de campo estacionaria, similar a la que aparecería de forma

espontánea tras una elevada distancia de propagación sin tener que recurrir a grandes longitudes de fibra.