

#### 4. EL OTDR y LA FIBRA ÓPTICA

La demanda de fibra óptica en el mundo esta creciendo considerablemente, las redes cada vez son mayores, más confiables y más potentes, lo que aumenta el número de operadores, instaladores y contratistas de mantenimiento, con el fin de seguir haciendo más eficientes las redes. Un artefacto que ha ayudado mucho a este desarrollo es el OTDR: Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo [13].

El OTDR es el instrumento más adecuado para la caracterización de fibras ópticas en el dominio del tiempo. Es un aparato que puede evaluar las propiedades de una fibra o de un enlace completo. En particular, puede detectar de forma muy rápida pérdidas, fallas y la distancia entre sucesos. El OTDR usa las propiedades de dispersión de una fibra para determinar la atenuación total [13]. Un pulso de luz de duración muy corta es lanzado a través de la fibra, y una porción de ese pulso que viaja en dirección a la salida de la fibra se dispersa y es capturado por la fibra en la dirección inversa. El pulso incidente se atenúa mientras viaja en dirección al final de la fibra. De la misma manera, el pulso viajando en la dirección opuesta, se atenúa en igual magnitud. El pulso resultante se atenúa el doble sobre cualquier distancia de fibra, ya que ha viajado ida y vuelta [4].

La traza del OTDR es única para la fibra y los conectores ya que muestra la atenuación en cada punto a lo largo de la fibra. La diferencia básica entre el OTDR y una medición espectral de 2 puntos, es que el OTDR da una medida de la pérdida en cada punto de la fibra para una longitud de onda elegida. Las mediciones espectrales para pérdidas dan precisamente la pérdida en una estructura compuesta, sin información de distancia. Estos dos métodos se complementan mutuamente [4] y el sentido de esta Tesis es que a

partir del OTDR podamos tener resultados que normalmente haría un analizador de espectros o un OFDR (Reflectómetro Óptico en el Dominio de la Frecuencia). Una gran ventaja del OTDR es que la medición se realiza de un solo extremo de la fibra, es decir no requerimos desbaratar toda una conexión o red.

El desarrollo de OTDRs para fibras mono-modo ha crecido muy rápido. Los primeros reportes de investigaciones aparecieron en 1980 y a partir de esa fecha se ha mejorado mucho el alcance en distancia de medición [4]. Ahora es posible medir cientos de kilómetros, obviamente dependiendo de la calidad del OTDR, esta tesis se basó en un mini- OTDR E6000C de Agilent Technologies. Del cuál hablaremos más adelante.

#### **4.1 Sucesos en el OTDR**

El OTDR muestra diferentes gráficas para los eventos que suceden en una fibra. Las gráficas que se mostrarán en esta sección, son trazas del OTDR con los posibles eventos que ocurren en una fibra. La importancia del OTDR al mostrarnos sucesos, es que podemos ver qué es y dónde está.

Una fibra única genera la siguiente traza (Figura 4.1). Se puede apreciar el nivel de potencia ligeramente decreciente (atenuación) y las fuertes reflexiones al principio y final de la fibra

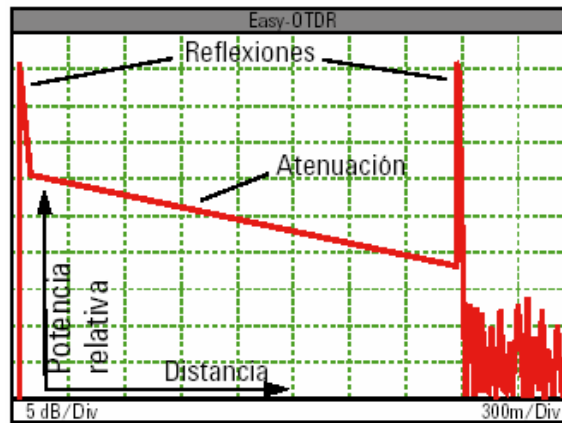


Figura 4.1 Traza del OTDR con solo una reflexión de inicio y otra de fin.

La siguiente traza (Figura 4.2) muestra un enlace completo, por ejemplo, el que se puede dar entre dos ciudades. Se puede apreciar la atenuación y el ruido al final de la fibra.

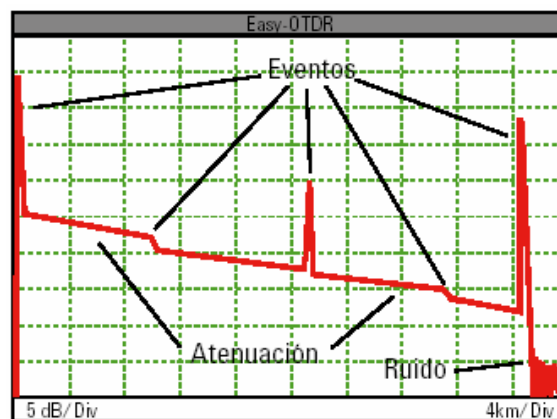


Figura 4.2 Traza con eventos sucesos entre 2 puntos.

La siguiente traza (Figura 4.3) es sumamente importante para el desarrollo de esta tesis, ya que nos muestra la reflexión que hay ante un conector o principio de la fibra, el cual llamaremos “pulso de entrada”.

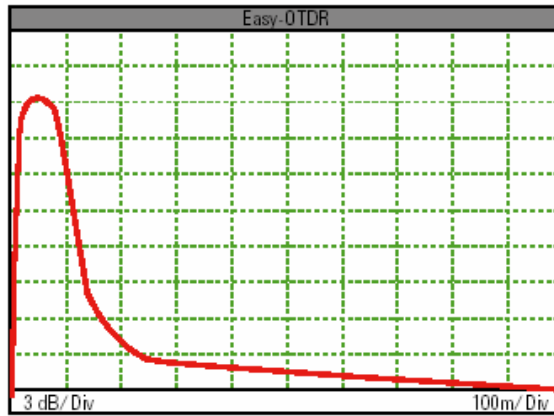


Figura 4.3 Reflexión por inserción (pulso de entrada).

Para complementar la figura anterior, la siguiente traza (Figura 4.4) nos muestra lo que es el final de una fibra, es una reflexión muy similar a la de inicio, esta reflexión le llamaremos “pulso de salida”.

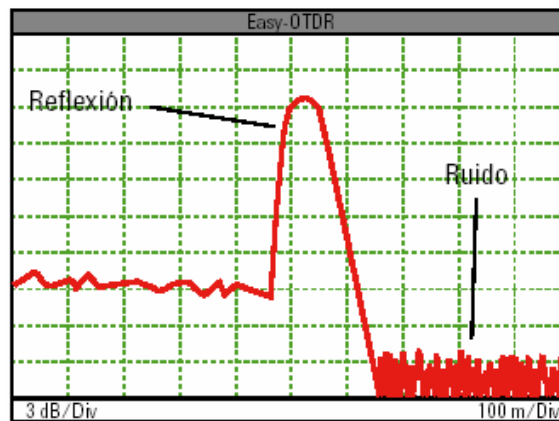


Figura 4.4 Reflexión por fin de fibra (pulso de salida).

También es importante mostrar cuando sucede una ruptura, la siguiente traza ejemplifica lo que pasa (Figura 4.5)

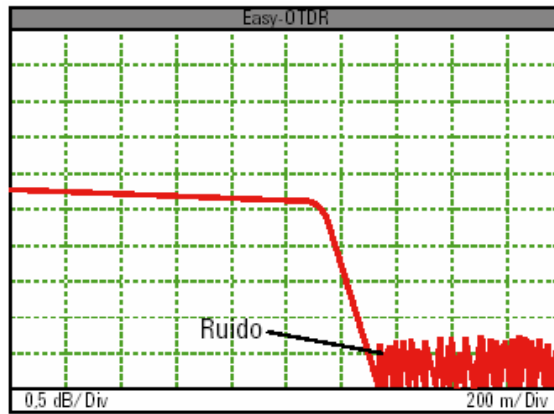


Figura 4.5 Ruptura de una fibra.

Se puede ver como prácticamente ya no hay nada más a partir de la pendiente, tiene una pérdida total hasta la zona de ruido.

Hay otros sucesos como empalmes, pliegues, conectores y fisuras, pero en sí, de las mediciones que se realizaron, únicamente nos interesan el pulso de entrada y el de salida, a expensas de que hubiera un suceso adicional en la fibra. Las siguientes gráficas muestran trazas con diferentes tipos de sucesos. En la primera gráfica (Figura 4.6), el pulso que se aprecia es la reflexión causada por un conector y las líneas punteadas muestran la atenuación. En la segunda gráfica (Figura 4.7) vemos la pérdida o atenuación que hay en un empalme por fusión. Hoy en día las fusiones son tan eficientes que no se alcanzan a ver [3]. En la tercera gráfica (Figura 4.8) se aprecia un empalme por fusión, sin embargo, el cambio de características de la segunda fibra favorece en una ganancia de energía. En la cuarta gráfica (Figura 4.9), el pulso que se aprecia es una pequeña reflexión causada por una fisura y por consiguiente viene una gran pérdida de energía. Finalmente en la Figura 4.10, apreciamos otra forma de medir el inicio de una fibra, conectando un cable intermediario del OTDR al comienzo de la fibra, de forma que podamos apreciar mejor las primeras muestras del comienzo de una fibra [13].

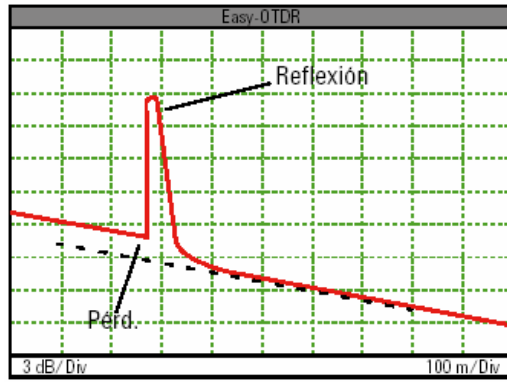


Figura 4.6 Reflexión por conexión.

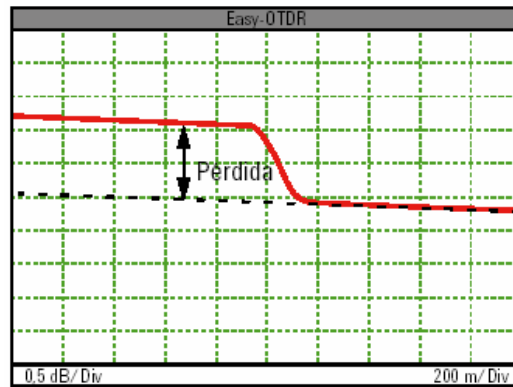


Figura 4.7 Pérdida por empalme por fusión.

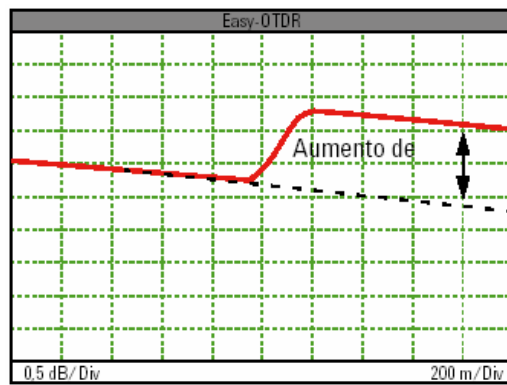


Figura 4.8 Ganancia por empalme por fusión.

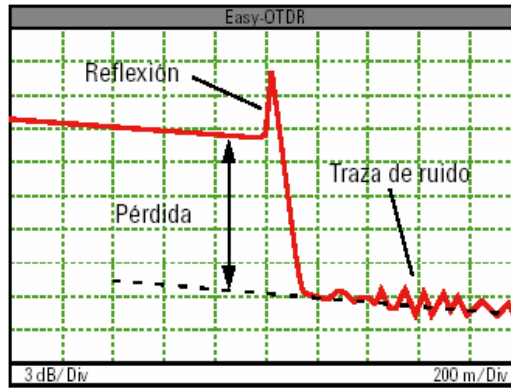


Figura 4.9 Fisura en una fibra

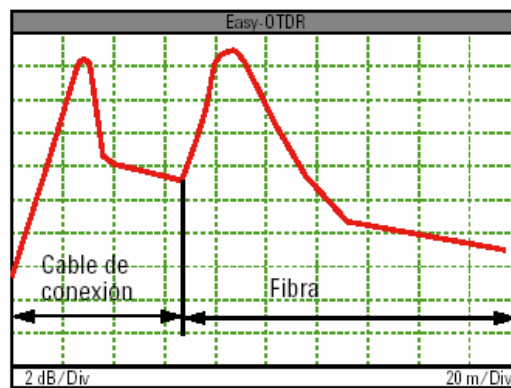


Figura. 4.10 Medición de inicio de fibra con un cable auxiliar.

#### 4.2 Índice de refracción y coeficiente de dispersión de una fibra

Principalmente el OTDR requiere dos parámetros: el índice de refracción y el coeficiente de dispersión. La forma en que mide las distancias el OTDR es muy sencilla, mide el tiempo que transcurre entre la emisión de la luz y su reflexión. La distancia que indique y el tiempo medido están relacionados por el índice de refracción o índice de grupo. Por consiguiente cualquier cambio que presente el índice de refracción afectará directamente a la distancia calculada. Este índice depende del material de la fibra y de las necesidades estipuladas por el fabricante. Es muy importante conocer el índice de la fibra que se está midiendo, de otra forma el error en los cálculos puede afectar los

resultados deseados. Un valor típico es de 1.4580 [13] (usaremos el que nos proporciona el fabricante en nuestro caso: 1.4677 [14]).

El OTDR no solamente recibe señales de los sucesos sino que también de la fibra en sí. Mientras que la luz viaja a través de la fibra, sufre una atenuación por la dispersión de Rayleigh [2], la cual es causada por pequeños cambios en el índice de refracción del vidrio [13]. Parte de la luz que viaja se regresa para atrás, a esto se le llama retrodifusión. El coeficiente de dispersión es una medida que sirve para saber cuanta luz se dispersa hacia atrás de la fibra, afecta tanto al valor de la pérdida de retorno, como a las mediciones de reflectancia. El coeficiente de dispersión se calcula como la relación entre la potencia del pulso de salida del OTDR y la potencia de retrodifusión en el extremo próximo de la fibra. Esta relación se expresa en dB y es inversamente proporcional al ancho del pulso. Como valor típico se proponen 50dB para un ancho de pulso de 1 $\mu$ s [13], sin embargo, el valor que usaremos es 48,5 dB [14].

### **4.3 Ancho de pulso y resolución**

Como se dijo antes el OTDR funciona emitiendo pulsos de luz repetidos, con una duración igual cada pulso. La elección del ancho de pulso adecuado es básica para obtener los mejores resultados de una medición. El hecho de escoger mal un pulso para determinada distancia puede hacer que perdamos de vista sucesos en la traza [13].

Un pulso corto, nos puede brindar una mayor resolución, sin embargo al realizar una medición dinámica (mayor alcance) con un pulso corto, corremos el riesgo de tener mucho ruido en la medición. En contra parte, si lo que queremos es hacer una medición de gran distancia, un pulso largo es lo que nos vendría bien, pero hay que tomar en



cuenta que al promediar las mediciones, pasará más tiempo y por consiguiente la resolución será menor. Dependiendo de la medición que se quiera realizar, ya sea alcance dinámico o resolución, usaremos un pulso largo o uno corto, respectivamente. Si queremos medir el final (la distancia) de una fibra, no nos importa lo que suceda en el camino, usamos un pulso largo; pero, si lo que queremos es ver que pasa en el empalme de una fibra que hay entre un servidor y un ruteador por ejemplo, usaremos un pulso corto, para ver detalle exacto a cortas distancias. Las siguientes gráficas muestran 2 mediciones, pulso corto y pulso largo respectivamente:

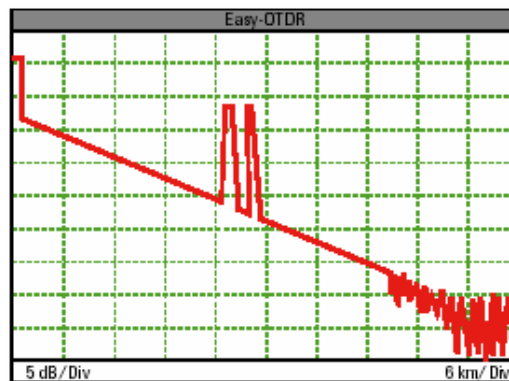


Figura 4.11 Traza con pulsos cortos.

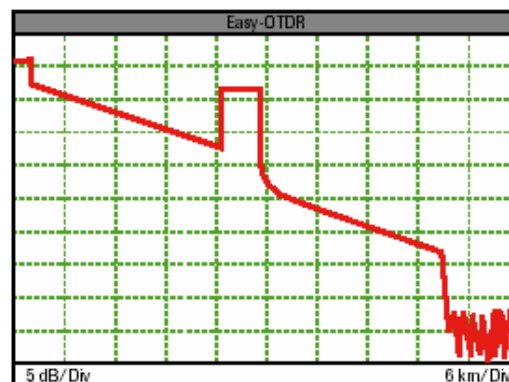


Figura 4.12 Traza con pulsos largos.

Valores típicos para enlaces cortos: 10 ns., 30 ns., 100 ns., 300 ns., 1  $\mu$ s. [13]

Valores típicos para enlaces largos: 100 ns., 300 ns., 1  $\mu$ s, 3  $\mu$ s., 10  $\mu$ s. [13]

La definición de las trazas como hemos visto depende en gran parte del ancho del pulso que escojamos. Sin embargo, la definición máxima que el OTDR nos puede brindar no excede las 15,710 muestras, es decir que por más corto que elijamos el pulso, el número máximo de muestras será el mismo. La Tabla (4.1) nos muestra una relación entre resolución y distancia de la medición [13]:

<b>Duración de la medición</b>	<b>Resolución de muestreo</b>
Hasta 1.2 km.	0.080 m.
Hasta 2.5 km.	0.159 m.
Hasta 5 km.	0.318 m.
Hasta 10 km.	0.613 m.
Hasta 20 km.	1.27 m.
Hasta 40 km.	2.56 m.
Hasta 80 km.	5.09 m.
Hasta 120 km.	7.64 m.
Hasta 160 km.	10.18 m.
Hasta 200 km.	12.73 m.
Hasta 240 km.	15.36 m.

Tabla 4.1 Relación distancia-resolución de muestreo.

#### **4.4 Pantalla del OTDR**

La Figura (4.13) muestra la cara delantera del OTDR, los botones a la derecha, uno grande y otro más pequeño con la misma forma de cuadrado inclinado, son el cursor y botón de aceptar del OTDR respectivamente. Mediante solo dos botones, se programa y se pone a funcionar el artefacto, lo cual hace muy simple su uso. Se puede ver una traza de ruido, es decir no tiene nada conectado y en la esquina superior de la traza hay dos marcadores, etiquetados A y B, estos nos sirven para realizar mediciones de algún evento desde un punto a otro deseado. Por debajo de la traza, se alcanzan a ver ciertas cifras y parámetros, estos valores nos indican el índice de refracción que se está usando, la longitud del pulso, la longitud de onda, el modo, el rango de la medición, la

resolución y a la derecha de estos valores, se pueden ver otros que cambian dependiendo lo que haya entre los marcadores A y B. En realidad esto es lo más importante que hay que saber de la pantalla del OTDR para este proyecto, junto con las trazas que se mostraron anteriormente.

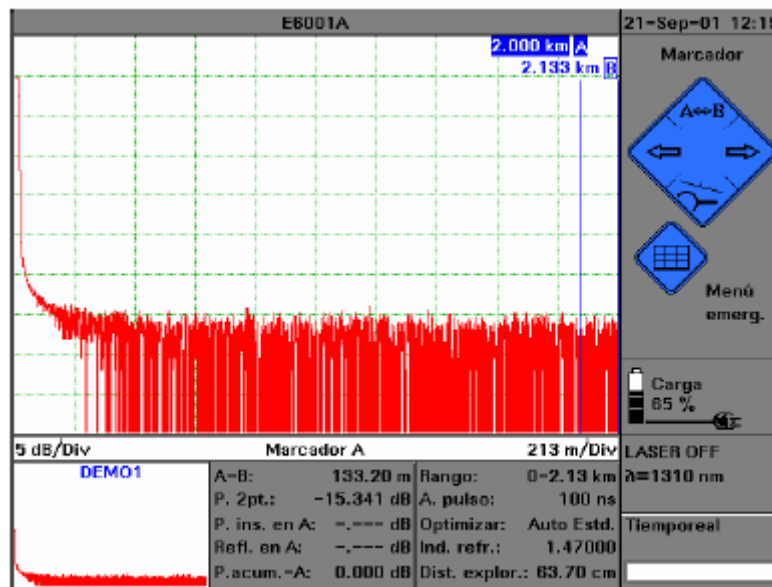


Figura 4.13 Pantalla del OTDR.

#### 4.5 La Fibra Óptica

Las fibras ópticas son estructuras dieléctricas que funcionan como guías de onda para la luz. Están compuestas de un material dieléctrico interno llamado *núcleo*, el cual está rodeado a su vez por otro dieléctrico llamado *revestimiento*, con índice de refracción más pequeño. Un forro de plástico más holgado circunda la fibra, esto con el motivo de evitar interferencias con otras guías y para proteger la fibra contra agentes químicos abrasivos [5].

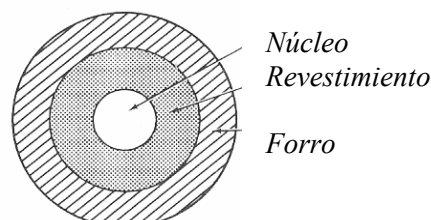


Figura 4.14 Corte transversal de una fibra.

#### 4.5.1 Ancho de Banda de una Fibra

El ancho de banda determina la capacidad de transmisión de la información. Los sistemas de gran capacidad codifican la información de forma binaria, unos y ceros. El número de pulsos (o bits) por segundo posible es inversamente proporcional al ancho de la duración del pulso. Esto se puede demostrar mediante el análisis de Fourier, donde el ancho de banda de un pulso es inversamente proporcional a su duración. Las propiedades de ancho de banda de una fibra se pueden entender de manera más sencilla como el mínimo ancho de pulso que puede ser usado [5].

##### 4.5.1.1 Dispersión

Si no hay un tiempo pertinente entre pulso y pulso, esto puede hacer que se encime la información y provocar errores en la transmisión. La Dispersión, es un fenómeno que puede hacer que la información se traslape. Este fenómeno es la elongación de un pulso a lo largo de la línea óptica y se debe a que la luz está compuesta de fotones y no todos se propagan a la misma velocidad, debido a que el material por el cual viajan tiene impurezas [4]. Hay tres tipos de dispersión: intermodal, material y de guía de onda. La *intermodal* se debe a que hay fibras que usan varios modos (multi-modo), es decir varios haces de luz. Esto provoca que haya luz que rebote y llegue a destiempo, ya que cada haz tiene una velocidad diferente, la forma de reducirlo es usando fibras multi-modo graduadas, las fibras mono-modo no sufren este fenómeno. La *material* se debe al cambio de velocidad con la longitud de onda. Ocasiona que un pulso se expanda, aunque toda la luz siga el mismo camino. El valor de la longitud de onda con menor dispersión modal (casi cero) se encuentra cerca de los 1300 nm. y aún menor en los

1550 nm. Finalmente la dispersión de *guía de onda* ocurre desde la estructura de la guía y es muy importante en fibras mono-modo. La energía está dividida entre el núcleo y el revestimiento. La velocidad de propagación del revestimiento es mayor que la del núcleo. Es decir que depende del modo que usemos, así que afecta directamente a la longitud de onda y al índice de refracción [5].

#### 4.5.2 Clasificación de las fibras

Las fibras se clasifican según su índice de refracción. En las fibras multi-modo encontramos dos tipos, las que tienen un índice de refracción graduado y las que lo tienen por escalón. Las fibras que usan un solo modo, se llaman mono-modo. La figura 4.15 muestra la diferencia entre las tres [5].

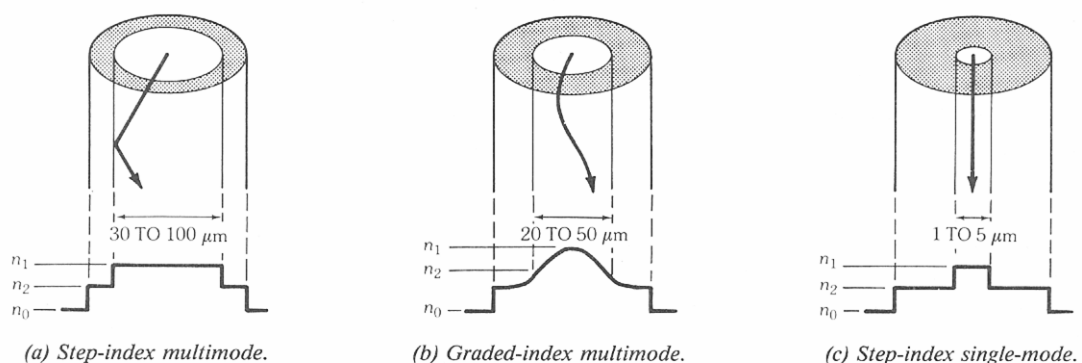


Figura 4.15 (a) Fibra multi-modo de índice por escalón, (b) Fibra multi-modo de índice graduado, (c) Fibra mono-modo.

La ventaja de la fibra multi-modo frente la mono-modo es que puede ser acoplada más eficientemente ya sea a lasers multi-modales y fuentes incoherentes, así como a lasers mono-modales. Tiene mucho más tolerancia hacia la alineación del acoplamiento, ya que son muchos los modos, es decir requieren menor precisión. La ventaja que ofrece la fibra mono-modo frente la multi-modo es muy evidente, soporta largas distancias sin

repetidoras y con gran ancho de banda debido a la poca atenuación que sufre, lo que las hace ideales para aplicaciones de gran cantidad de datos. La Figura (4.16) nos muestra la relación entre la atenuación y la longitud de onda. Podemos ver tres ventanas, es decir tres longitudes que se usan con mayor frecuencia, la primera no tanto como la 2 y la 3, correspondientes a 1300 nm. y 1550 nm. [1]

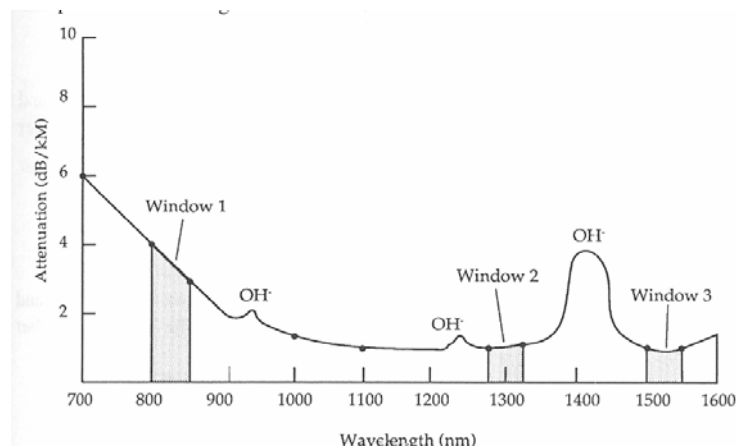


Figura 4.16 Atenuación contra Longitud de onda. 3 ventanas comunes.

### 4.5.3 Cómo elegir la fibra y ventana correctas

Si existen tres tipos de fibra es porque cada una tiene un uso específico, habrá veces que lo que queramos será gran ancho de banda y otras que nuestro interés principal será no tener problemas al hacer empalmes. Pues también la longitud de onda tiene que ver con el fin de la aplicación. La primera ventana (800nm) es buena para líneas con poco trabajo, limitadas a 2 km. y anchos de banda menores a los 20Mb/seg., por lo general fibras multi-modo de índice por escalón. Tanto la segunda como la tercera ventana nos permiten operar a mayores distancias, destacando con un mayor rango la tercera ventana (1550nm). La ventana de 1300nm trabaja de manera óptima con fibras comunes (multi-modo de índice graduado y mono-modo), mientras que la de 1550nm tiene un máximo rendimiento en fibras mono-modo [1].

Es importante aclarar que no se tomaron en cuenta las fibras de plástico, ya que son para usarse a unos cuantos metros y para obtener medidas útiles del OTDR es necesario contar con fibras mayores a un kilómetro. Las mediciones que se hicieron fueron con una fibra multi-modo graduada de 100m y dos fibras mono-modo de 1km cada una.