



UNIVERSIDAD DE BELGRANO

# Las tesinas de Belgrano

Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática  
Ingeniería Industrial

Procesos de fabricación de fibras ópticas

Nº 34

Maximiliano Córdoba

Tutor: Eduardo Castellarin

Departamento de Investigación  
Marzo 2003



## Índice

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. ANTECEDENTES Y MARCO DE DESARROLLO .....	6
3. ESTRUCTURA .....	6
4. MODELO DE PROPAGACIÓN .....	7
5. DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL .....	9
Pérdida de potencia óptica (Atenuación) .....	9
Pérdidas por dispersión .....	14
6. CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS ÓPTICAS .....	19
Materiales que conforman el núcleo y el revestimiento .....	23
7. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE FIBRA ÓPTICA .....	28
MCVD (Deposición modificada de vapor químico) .....	34
PCVD (Deposición de vapor químico mediante plasma a baja presión) .....	39
OVPO (Deposición exterior de vapor mediante oxidación) .....	40
VAD (Deposición axial de vapor) .....	43
Comparación de las distintas técnicas descritas para la fabricación de preformas .....	47
Proceso Sol-Gel de fabricación de preformas .....	49
Recubrimiento .....	50
Estiramiento a partir de vidrio fundido .....	51
Fibras plásticas .....	53
8. COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS CONVENCIONALES DE TELECOMUNICACIONES ..	55
9. PRECAUCIONES DE SEGURIDAD .....	59
10. CONCLUSIÓN .....	60
11. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA .....	61



## 1. Introducción

Para solucionar el problema del intercambio de información, el hombre ha inventado diferentes formas de hacerlo, desde la comunicación con señas hasta la comunicación a distancia por medio de dispositivos de tecnología avanzada. Los avances logrados en el área de telecomunicaciones han permitido que el hombre se desempeñe de una manera más eficiente, y es esta eficiencia lo que, en gran medida, ha motivado a algunas empresas a exigirse mayores retos. De esta forma, se ha llegado a alternativas de gran impacto a través del tiempo como son:

El correo, tren, avión, cables de comunicación, microondas, etc. Las tecnologías suelen atravesar ciclos de promesa, exageración, desilusión, rechazo y renacimiento. Hoy en día se están tomando acciones concretas en el área de telecomunicaciones en respuesta de la oferta y la demanda, gracias a esto ha surgido la FIBRA ÓPTICA. Una nueva corriente tecnológica como opción para incrementar la densidad de las telecomunicaciones más rápidamente y con un mejor servicio.

Como portadora de información, en poco más de 10 años la fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas que se utilizan como medio de transmisión de información. Este novedoso material vino a revolucionar los procesos de las telecomunicaciones en todos los sentidos, desde lograr una mayor velocidad en la transmisión y disminuir casi en su totalidad los ruidos y las interferencias hasta multiplicar las formas de envío en comunicaciones y recepción por vía telefónica.

Las fibras ópticas son filamentos de vidrio de alta pureza extremadamente compactos. El grosor de una fibra es similar a la de un cabello humano. Fabricadas a alta temperatura con base en silicio, su proceso de elaboración es controlado por medio de computadoras, para permitir que el índice de refracción de su núcleo, que es la guía de la onda luminosa, sea uniforme y evite las desviaciones. Entre sus principales características se pueden mencionar que son compactas, ligeras, con bajas pérdidas de señal, amplia capacidad de transmisión y un alto grado de confiabilidad debido a que son inmunes a las interferencias electromagnéticas de radio-frecuencia. Las fibras ópticas no conducen señales eléctricas por lo tanto son ideales para incorporarse en cables eléctricos sin ningún componente conductor y pueden usarse en condiciones peligrosas de alta tensión. Tienen la capacidad de tolerar altas diferencias de potencial sin ningún circuito adicional de protección y no hay problemas debido a los cortos circuitos. Tienen un gran ancho de banda, que puede ser utilizado para incrementar la capacidad de transmisión con el fin de reducir el costo por canal. De esta forma es considerable el ahorro en volumen en relación con los cables de cobre.

Con un cable de seis fibras ópticas se puede transportar la señal de más de cinco mil canales o líneas principales, mientras que se requiere de 10,000 pares de cable de cobre convencional para brindar el mismo servicio, con la desventaja que este último medio ocupa un gran espacio en los ductos y requiere de grandes volúmenes de material, lo que también eleva los costos.

Comparado con el sistema convencional de cables de cobre donde la atenuación de sus señales, (decremento o reducción de la potencia) es de tal magnitud que requieren de repetidores cada dos kilómetros para regenerar la transmisión, en el sistema de fibra óptica se pueden instalar tramos de hasta 70 km. Sin que haya necesidad de recurrir a repetidores lo que también hace más económico y de fácil mantenimiento este material.

Originalmente, la fibra óptica fue propuesta como medio de transmisión debido a su enorme ancho de banda; sin embargo, con el tiempo se ha planteado para un amplio rango de aplicaciones: además de la telefonía, automatización industrial, computación, sistemas de televisión por cable y transmisión de información de imágenes astronómicas de alta resolución entre otros.

### Concepto de transmisión

En un sistema de transmisión por fibra óptica existe un transmisor que se encarga de transformar las ondas electromagnéticas en energía óptica o luminosa, por ello se la considera el componente activo de este proceso. Una vez que es transmitida la señal luminosa por las minúsculas fibras, en otro extremo del circuito se encuentra un tercer componente al que se le denomina detector óptico o receptor, cuya misión consiste en transformar la señal luminosa en energía electromagnética, similar a la señal original. El sistema básico de transmisión se compone en este orden, de señal de entrada, amplificador, fuente de luz, corrector óptico, línea de fibra óptica (primer tramo), empalme, línea de fibra óptica (segundo tramo), corrector óptico, receptor, amplificador y señal de salida.

En resumen, se puede decir que este proceso de comunicación, la fibra óptica funciona como medio de transportación de la señal luminosa, generado por el transmisor de LED'S (diodos emisores de luz) y láseres.

Los diodos emisores de luz y los diodos láseres son fuentes adecuadas para la transmisión mediante fibra óptica, debido a que su salida se puede controlar rápidamente por medio de una corriente de polariza-

ción. Además su pequeño tamaño, su luminosidad, longitud de onda y el bajo voltaje necesario para manejarlos son características atractivas.

En este trabajo, se estudiará únicamente la fibra óptica, dejando de lado los emisores, receptores y todos los demás componentes de un sistema de telecomunicaciones.

## 2. Antecedentes y marco de desarrollo

La historia de la comunicación por fibra óptica es relativamente corta. En 1977, se instaló un sistema de prueba en Inglaterra; dos años después, se producían ya cantidades importantes de pedidos de este material. Antes, en 1959, como derivación de los estudios en física enfocados a la óptica, se descubrió una nueva utilización de la luz, a la que se denominó rayo láser, que fue aplicado a las telecomunicaciones con el fin de que los mensajes se transmitieran a velocidades inusitadas y con amplia cobertura. Sin embargo, esta utilización del láser era muy limitada debido a que no existían los conductos y canales adecuados para hacer viajar las ondas electromagnéticas provocadas por la lluvia de fotones originados en dicha fuente.

Fue entonces cuando los científicos y técnicos especializados en óptica dirigieron sus esfuerzos a la producción de un ducto o canal, conocido hoy como la fibra óptica. En 1966 surgió la propuesta de utilizar una guía óptica para la comunicación. Esta forma de usar la luz como portadora de información se puede explicar de la siguiente manera: Se trata, en realidad, de una onda electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, con la única diferencia que la longitud de las ondas es del orden de micrómetros en lugar de metros o centímetros.

## 3. Estructura

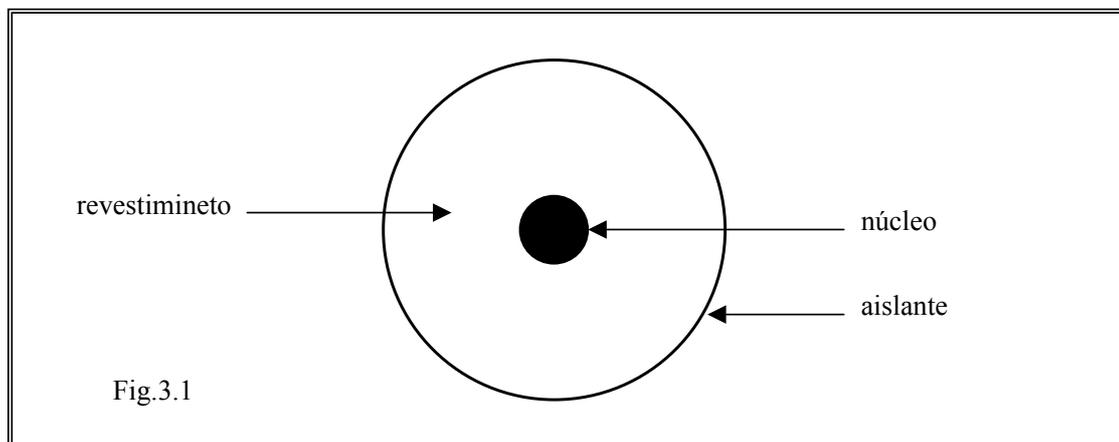
La fibra óptica es una hebra muy fina, de un vidrio muy especial, que puede ser de solamente 125 micras de diámetro. Esta hebra de vidrio tiene aproximadamente el mismo grosor que un cabello humano.

Se ha demostrado que las ondas electromagnéticas que conforman la luz tienden a viajar a través de una región que posea un índice de refracción alto. Por tanto, se hace el centro de la hebra de vidrio el núcleo (cristal de silicio) de esa clase de materiales. Algunas fibras de vidrio tienen un diámetro de núcleo de únicamente 50 micras, y tiene un índice de refracción de tipo gradual. La importancia de contar con un núcleo de este tipo es conseguir un núcleo que posea un ancho de banda algo mayor que el que tendría otro cuyo índice de refracción fuera idéntico en todas partes.

Ahora que ya tenemos el núcleo y con el fin de retener la luz dentro de él, necesitamos recubrirlo con alguna clase de material, de un índice de refracción diferente. Si no lo hacemos, no se obtendrían las reflexiones necesarias en la unión de ambos materiales. De este modo, se ha formado otro revestimiento en el núcleo que se denomina cubierta (silicona) y que tiene un índice de refracción menor que el del propio núcleo. Finalmente, para hacerlo más robusto y prevenir daños a la cubierta, se suele formar una «protección» o «envoltura» (poliuretano) sobre la cubierta que generalmente es de algún tipo de material plástico.

Hemos de tener en consideración la transmisión digital de impulsos de luz a velocidades muy altas, a través de esta fibra, y nos gustaría conocer de qué manera, por su conducto y simultáneamente, pueden enviarse a través de ella múltiples conversaciones, imágenes, etc.

En la **figura 3.1** se visualizan las tres partes que componen una fibra óptica.



## 4. Modelo de propagación

### Introducción

El canal de fibra óptica no permite que los rayos de luz deseados escapen de su interior. Es capaz de manejar transmisión de esos rayos de luz en dos sentidos de tal forma que uno puede (pero no necesariamente) mirar por un extremo y ver lo que está pasando en el otro extremo. Con estos rayos de luz existe la posibilidad de transmitir sonido, datos e imágenes. Estos sistemas de transmisión de fibra óptica abren un concepto completamente nuevo en sistemas de comunicaciones. Además, poseen ventajas únicas en cuanto a eliminación de ruidos e interferencias.

Esta es la esencia de la fibra óptica. La canalización de rayos de luz a través de «camino de fibra óptica» y la generación de frecuencias de luz apropiadas y de una forma también apropiada para permitir fácilmente el paso, cualquiera que sea el tipo de sustancia que se emplee para el canal. Esto implica que distintos tipos de sustancias (los cuales caen dentro de la categoría «óptica» o «de vidrio») poseen diferentes características que hacen la conductividad de ciertas frecuencias de luz más sencillas que de otras. En un concepto elemental, significa simplemente que algunos tipos de fibras ópticas conducen determinadas frecuencias de luz mejor que otras frecuencias. Se debe generar la frecuencia de luz apropiada que pase a través de un tipo de fibra dada.

### Conceptos modernos de luz y propagación

Se asocia la creación de luz con el paso de electricidad a través de un cable en una ampolla de vidrio. Se sabe también, que la luz es un componente del espectro electromagnético por James Clerk Maxwell. Demostró que los rayos de luz eran ondas de naturaleza electromagnética y demostró también que tales rayos u ondas tienen todos la misma velocidad en el espacio libre. Esa velocidad es  $3 \times 10^8$  m/seg. El margen de las radiaciones electromagnéticas va desde una frecuencia cero (Hertzios) hasta frecuencia infinita, y la luz varía en un margen de frecuencias cuyas longitudes de onda van desde  $10^2$  m a través de la región ultravioleta de  $10^9$  m subiendo en frecuencia a través de la región de los rayos gamma de longitud de onda  $10^{14}$  m.

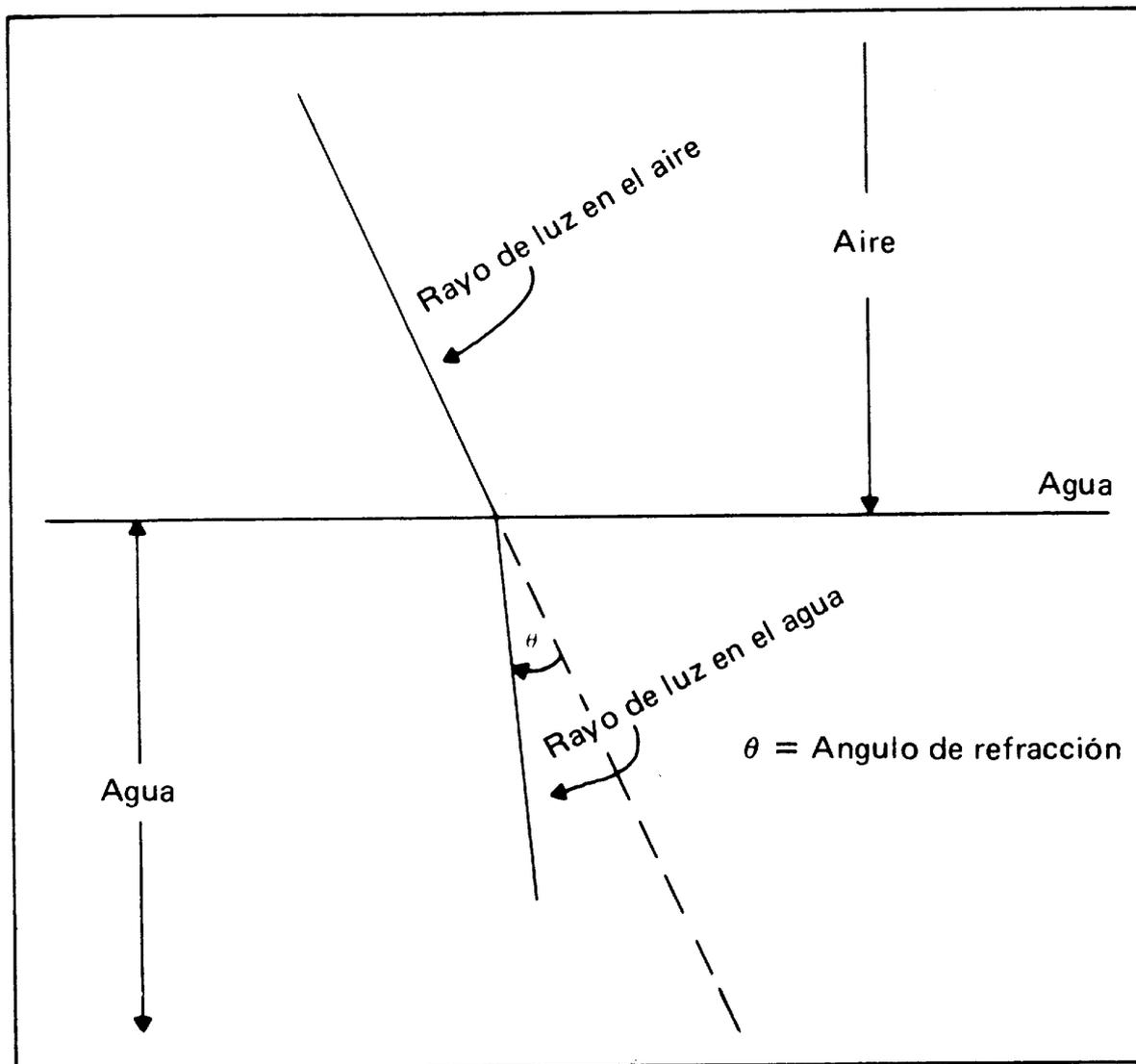
No debería sorprendernos considerar que si la velocidad de la luz es una constante en el espacio libre y que si la velocidad consiste en un valor promedio sobre una distancia infinita, que pudieran y debieran existir algunas «fluctuaciones» en esa velocidad en distancias finitas más pequeñas y a través de varios tipos de medios de conducción. Se piensa en la reducción de la velocidad de propagación de los rayos de luz al atravesar varias lentes. Mientras que la componente de velocidad total sobre una distancia infinita en el espacio libre permanezca constante, no se violará la ley de la cual partió Maxwell en sus teorías.

Los experimentos han demostrado que esas variaciones finitas de la velocidad son ciertas.

### Reflexión y refracción de la Luz

Si un rayo de luz viaja de un medio a otro, se curvará en el caso en que los dos materiales posean diferentes propiedades de conductividad de rayos luminosos. Un ejemplo típico es como un humano observando a un pez en el agua, le ve en un punto donde realmente no está situado. El motivo por el que se curvan los rayos de luz es debido a que nuestra visión se basa en los rayos que penetran en nuestros ojos, y los rayos que forman el pez son rayos de luz reflejados, que salen del pez (y del agua) y entran en otro medio con distinta conductividad.

La figura 4.1 muestra la refracción de un rayo de luz que cambia de medio y por lo tanto de índice de refracción.



Es importante considerar ahora la trayectoria que describe el rayo a medida que se aproxima a la superficie de un medio diferente. El ángulo, medido desde una perpendicular a esa superficie, se denomina ángulo de incidencia del rayo sobre esa superficie.

También podría existir un ángulo crítico de incidencia de forma que excederlo puede dar lugar a una situación de no-reflexión (propagación). En la transmisión de ondas de radio cuando las ondas que no son reflejadas «golpean» la capa de Heaviside unas son reflejadas y otras no. Las que no son reflejadas «golpean» la capa con un ángulo mayor que el crítico para la reflexión y de esta forma atraviesan la capa de Heaviside a lo largo de una línea refractada.

### Leyes de refracción y reflexión

Los rayos reflejados y refractados están situados en un plano que contiene el rayo incidente y la perpendicular (normal) a la superficie del material de reflexión o refracción, siendo el ángulo de incidencia igual al ángulo de reflexión.

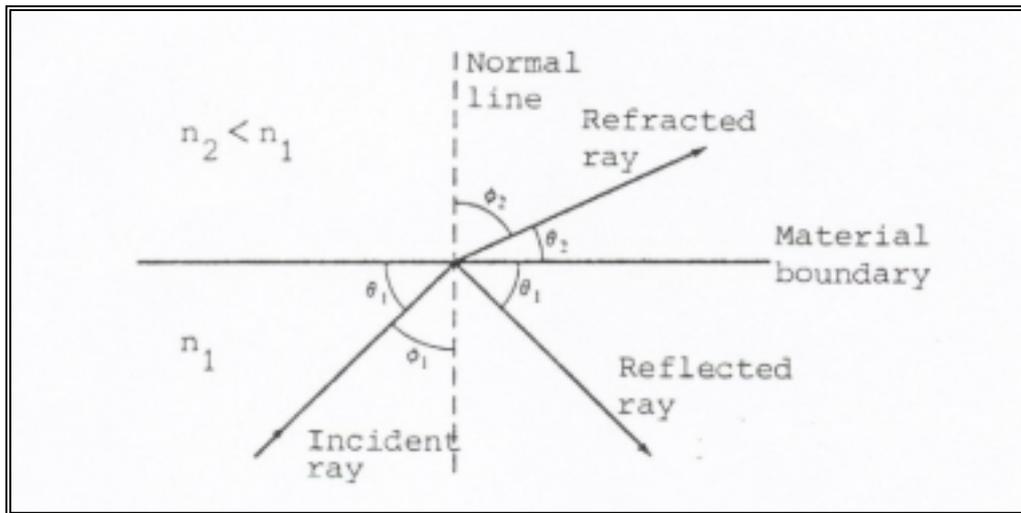
### Ley de Snell

Willebrod Snell fue la persona que descubrió la ley relacionada con estos fenómenos en el año 1621. Lo que él propuso es una ecuación que ha permanecido vigente durante varios cientos de años, que es importante para nuestro concepto de cómo viajan los rayos de luz a lo largo de nuestro «tubo luminoso». La expresión comúnmente utilizada de esta ley es:

Ley de Snell =  $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$ . **Fig. 4.2**

lo cual dice simplemente que la relación de los índices de refracción es igual a la relación de los senos del ángulo de incidencia y el ángulo de refracción.

Un rayo de luz que viaja a través de la cubierta y que penetra en el material del núcleo de la fibra, se curva un ángulo menor que el de incidencia. O por decirlo de otra manera, el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo de refracción



## 5. DEGRADACIÓN DE LA SEÑAL

### Pérdida de potencia óptica (Atenuación)

La atenuación de la señal, también conocida como pérdida de la fibra o pérdida de señal, es una de las propiedades más importantes de una fibra óptica, porque determina el máximo de separación entre repetidoras. Por lo tanto, determina el número de ellas entre la emisión de una señal y la recepción de la misma. Como las repetidoras son costosas de fabricar, instalar y mantener, el grado de atenuación en la fibra es un factor de gran influencia sobre el sistema de costos.

La luz que viaja en una fibra óptica pierde potencia con la distancia que recorre. Estas pérdidas son en función de la longitud de onda y de impurezas e imperfecciones del material por el cual se propaga. Para la sílice, las longitudes de onda más cortas son las que más se atenúan. Por lo tanto, las pérdidas más bajas se encuentran en longitudes de onda más largas (1550 nm), que se utiliza frecuentemente para transmisiones de larga distancia.

Las pérdidas de potencia de la luz en una fibra se miden en decibeles (dB/Km). Las especificaciones de un cable de fibra óptica se expresan como la atenuación en dB por un Km de longitud. Este valor se debe multiplicar por la longitud total de la fibra en kilómetros para determinar las pérdidas del cable.

**La atenuación de la señal se define como:**

$$a = 10 \log ( P_{in}/P_{out} ) / L$$

Donde:

$a$  = atenuación en decibeles por Kilómetro [dB/Km]

$P_{in}$  = **Potencia de entrada**

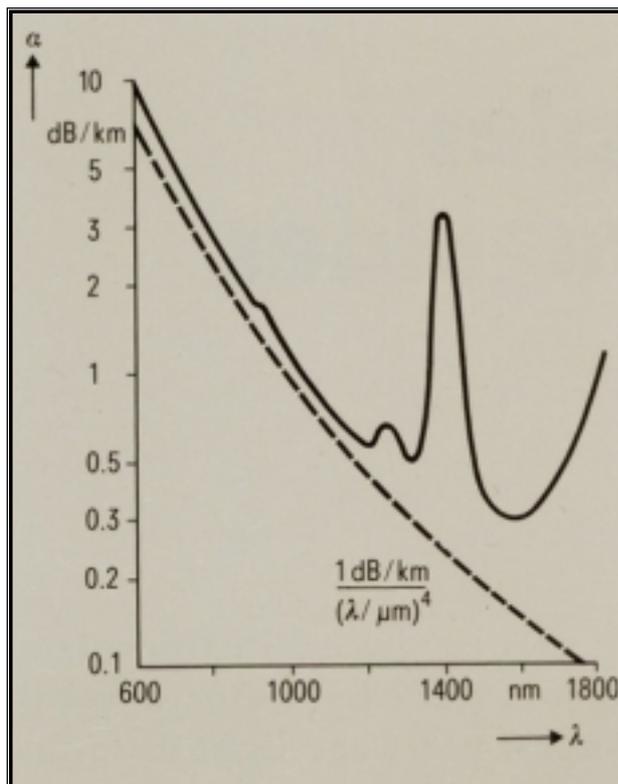
$P_{out}$  = **Potencia de salida**

$L$  = **longitud**

Por ejemplo, si una fibra tiene una atenuación de 3 dB/Km, lo que equivale a una pérdida del 50% de la potencia.

En la **figura 5.1** se grafica la relación entre la atenuación y la longitud de onda.

Las pérdidas por atenuación de la señal son causadas por diversos factores y pueden clasificarse en pérdidas intrínsecas y extrínsecas:

**Extrínsecas:**

- Pérdidas por curvatura (radiación)
- Pérdidas por conexión y empalme

**Intrínsecas:**

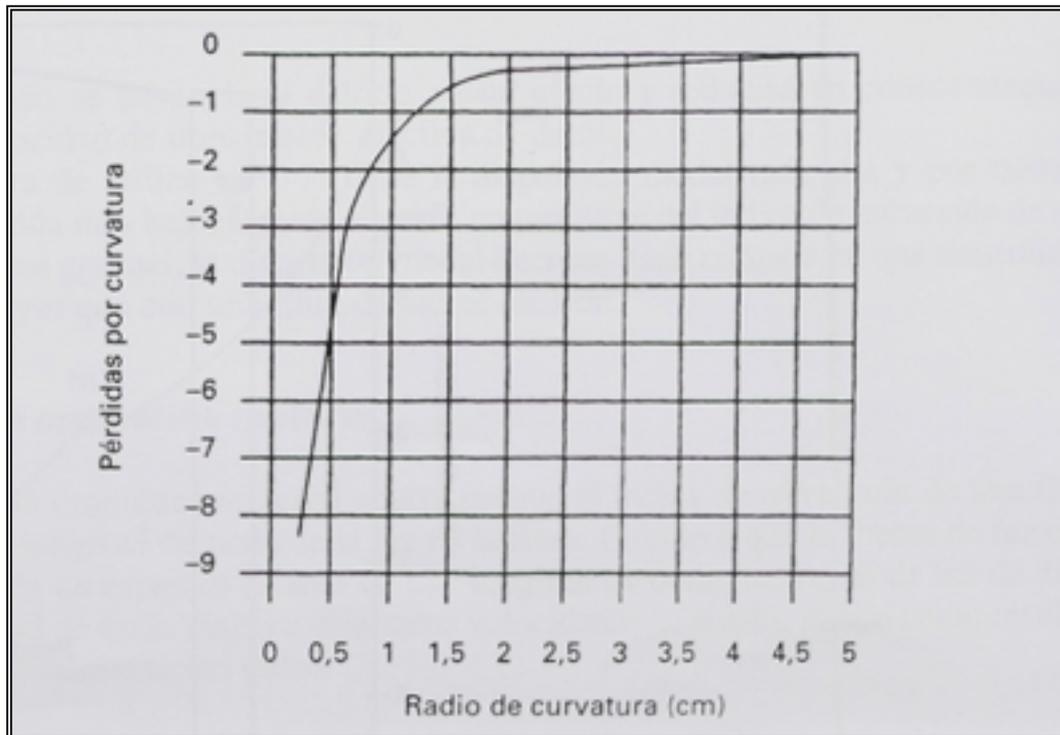
- Pérdidas inherentes a la fibra
- Pérdidas que resultan en la fabricación
- Reflexión de Fresnel

**Perdidas por curvatura**

Las pérdidas por curvatura se producen porque los rayos de luz en el exterior de una curva pronunciada no pueden viajar con suficiente rapidez como para mantener el ritmo de los demás rayos, y se pierden. A medida que la luz recorre la curva, la luz del exterior de la misma debe viajar más deprisa para mantener una fase constante de la onda. Según se va reduciendo el radio de curvatura, se llega a un punto en que parte de la onda tendría que viajar más rápido que la velocidad de la luz. En ese punto, la luz del guíaondas se pierde.

Las pérdidas por curvatura también pueden ocurrir en escala más pequeña. Curvas pronunciadas del núcleo de una fibra con desplazamientos de unos pocos milímetros o menos, causadas por la protección exterior de la fibra, la fabricación, el procedimiento de instalación, etc., pueden causar también pérdidas de potencia. Las cuales se denominan pérdidas por microcurvaturas y pueden ser significativas para grandes distancias.

**Figura 5.2 Pérdidas por curvatura**

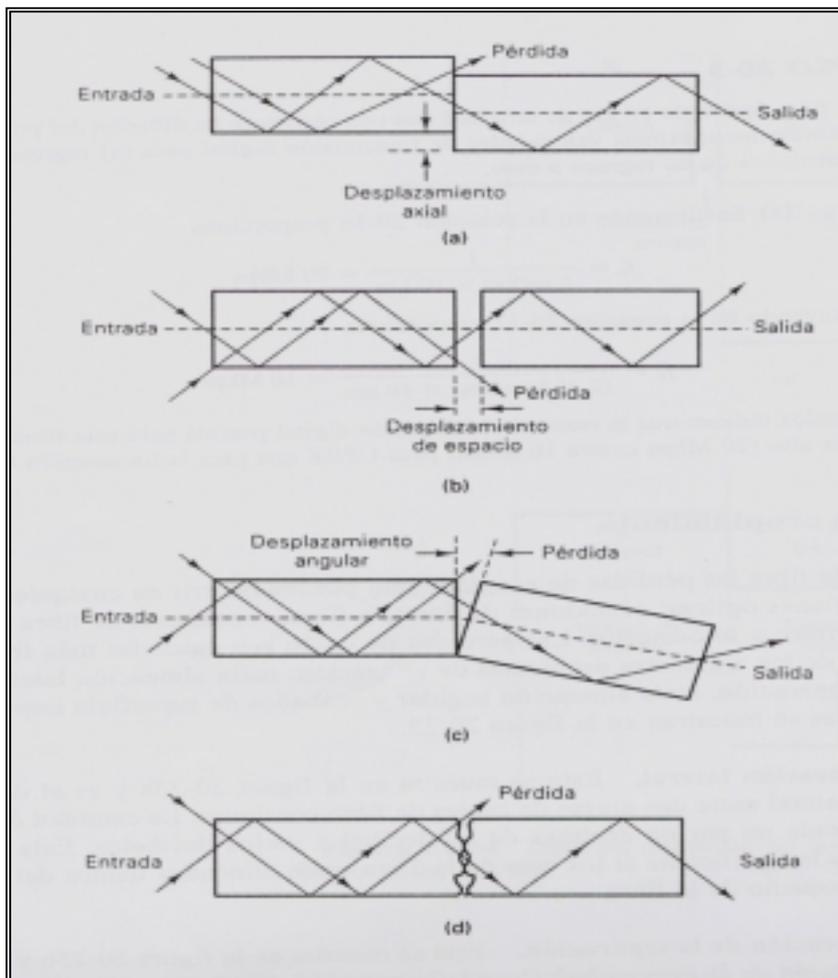


### Pérdidas por conexión y empalmes

Empalmes: los empalmes mecánicos tienen generalmente las mayores pérdidas, a menudo en el rango que va desde 0,2 dB a 1.0 dB, dependiendo del tiempo de empalme.

Los empalmes por fusión tienen pérdidas más bajas, generalmente menores de 0,2 dB. con la utilización de un buen equipo se logran pérdidas de 0,07 dB. Las pérdidas pueden atribuirse a un montón de factores incluyendo, un mal corte, burbujas de aire, contaminación, desadaptación del índice de refracción, desadaptación del diámetro del núcleo, pero principalmente son causadas por problemas de alineación (figura 5.3):

- mala alineación lateral: es el desplazamiento axial o lateral entre dos piezas de cable contiguas. La pérdida puede ser desde un par de décimas de decibel a varios decibels. Esta pérdida generalmente es insignificante si los ejes de las fibras están alineados dentro del 5 % del diámetro de la fibra.
- mala alineación de la separación o separación de la extremidad: cuando se realiza un empalme las fibras deben tocarse. Cuanto más separadas estén las fibras, mayor será la pérdida de la luz.
- mala alineación angular o desplazamiento angular: si el desplazamiento angular es menor que 2, la pérdida será menor de 0,5 dB.
- acabado de superficie imperfecta: las puntas de las dos fibras unidas deben estar altamente pulidas y encuadrarse juntas adecuadamente. Si las puntas de las fibras están a menos de 3° de la perpendicular, las pérdidas serán menores de 0,5 dB.



Conexiones: las pérdidas de los conectores de fibra óptica están frecuentemente en el rango que va desde 0,3 dB a 1,5 dB, y dependen en gran medida del tipo de conector utilizado. Otros factores que contribuyen a las pérdidas por conexión incluyen la suciedad o los contaminantes en el conector, la instalación impropia del conector, una cara dañada del conector, un corte pobre, desadaptación de los núcleos de las fibras, desadaptación del índice de refracción.

### Pérdidas inherentes a la fibra

Esta clase de pérdidas puede dividirse en:

Por absorción: las pérdidas por absorción en las fibras ópticas son análogas a la disipación de potencia en los cables de cobre; las impurezas en las fibras absorben la luz y la convierten en calor. El vidrio ultrapuro utilizado para fabricar fibras es aproximadamente 99,999% puro. Aun así, las pérdidas por absorción entre 1 y 1000 dB/Km son típicas.

Esencialmente, hay tres factores que contribuyen a esta clase de pérdidas: absorción ultravioleta, infrarroja y de resonancia del ion.

- **Absorción ultravioleta.** Es provocada por electrones de valencia en el material de silicio del cual se fabrican las fibras. La luz ioniza a los electrones de valencia en conducción. La ionización es equivalente a la pérdida total del campo de luz y, en consecuencia, contribuye a las pérdidas de transmisión de la fibra.
- **Absorción infrarroja.** Resultado de fotones de luz que son absorbidos por los átomos de las moléculas, en el núcleo de vidrio. Los fotones absorbidos se convierten en vibraciones mecánicas aleatorias típicas de calentamiento.
- **Absorción de resonancia de ion.** Es causada por los iones OH en el material. La fuente de los iones OH son moléculas de agua que han sido atrapadas en el vidrio, durante el proceso de fabricación. También es causada por las moléculas de metales tales como hierro, cobre y cromo.

Importantes avances tecnológicos ha permitido reducir el contenido residual de OH de las fibras a menos de 1 ppb. En la figura 5.4 se muestra la evolución de la atenuación de las fibras en función de la longitud de onda.

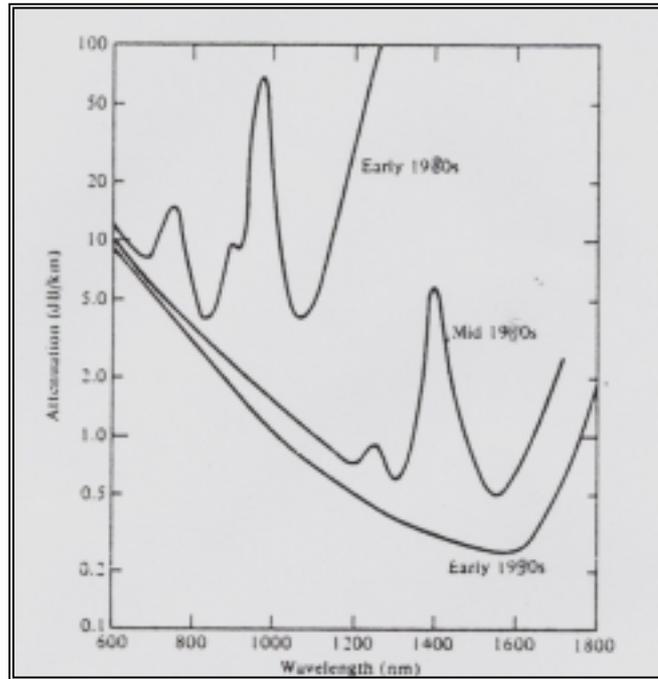


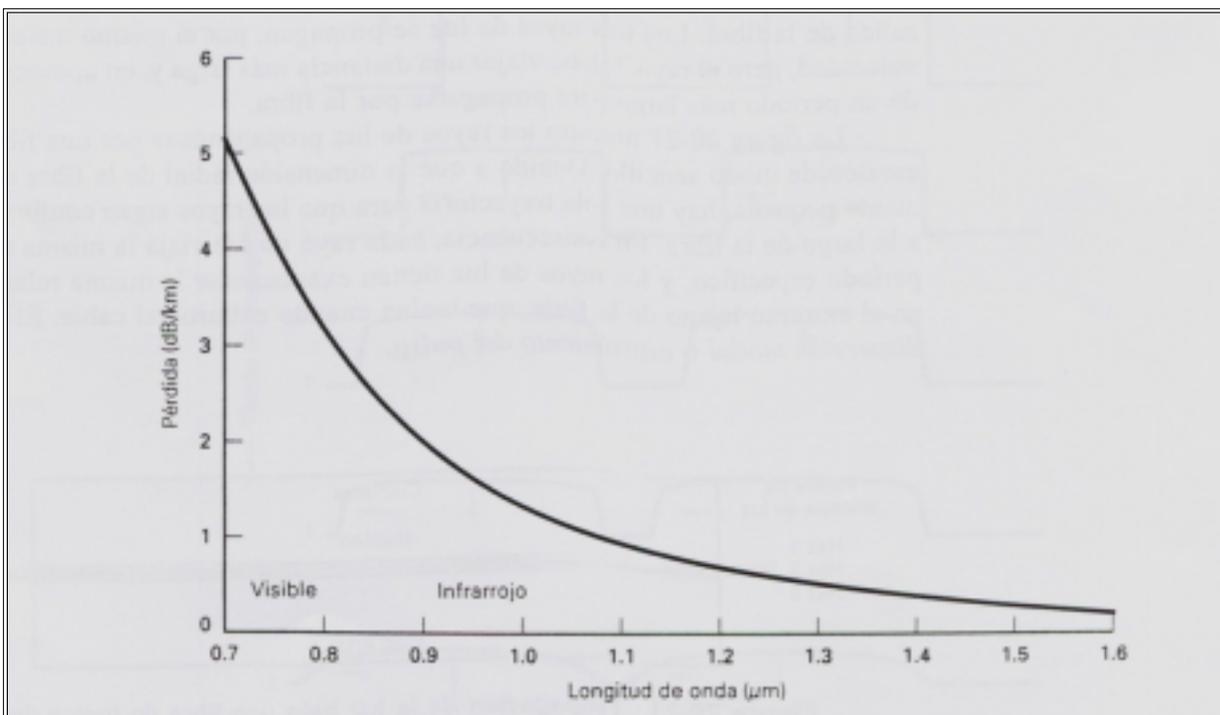
Figura 5.4

Por dispersión de Rayleigh: responde a las pérdidas de luz debido a variaciones en la densidad óptica, composición y estructura molecular.

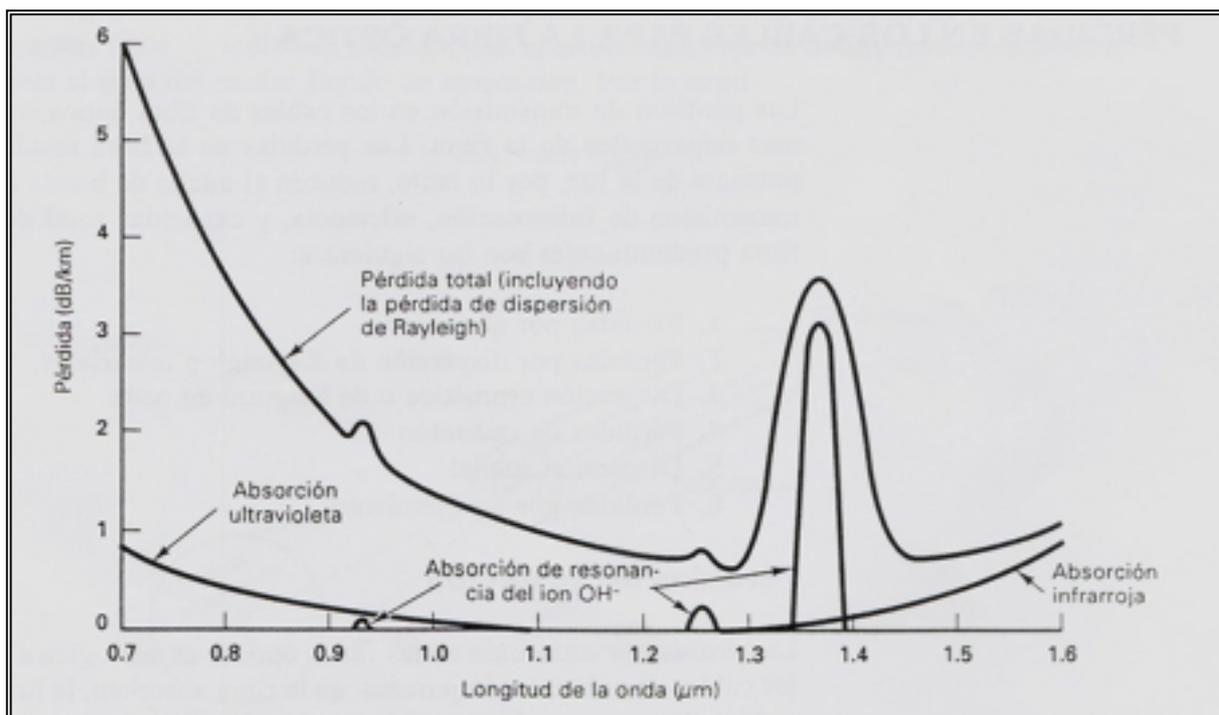
Durante el proceso de fabricación, el vidrio es producido en fibras largas, de un diámetro muy pequeño. En esta etapa el vidrio está en un estado plástico (no líquido y no sólido).

La tensión aplicada al vidrio durante este momento causa que el vidrio se enfríe y desarrolle irregularidades submicroscópicas que se forman, de manera permanente, en la fibra. Cuando los rayos de luz que se están propagando por una fibra chocan contra una de éstas impurezas, se difracta. La difracción causa que la luz se disperse o se reparta en muchas direcciones. Una parte de la luz difractada continua por la fibra y el resto se escapa por la cubierta. Los rayos de luz que se escapan representan una pérdida en la potencia de la luz. Esto se llama pérdida por dispersión de Rayleigh.

En la figura 5.5 se ilustra la relación entre la longitud de onda y la pérdida de dispersión de Rayleigh.



El gráfico 5.6 muestra las pérdidas totales por absorción en la fibra óptica



#### Pérdidas resultantes de la fabricación de la fibra

Las irregularidades durante el proceso de fabricación pueden dar lugar a pérdidas de rayos luminosos. Por ejemplo, un cambio de 0,1 % en el diámetro del núcleo puede significar una pérdida de 10 dB/Km.

Por lo tanto es muy importante mantener una alta precisión durante todo el proceso de fabricación de la fibra para minimizar las pérdidas.

#### Reflexión de Fresnel

La reflexión de Fresnel ocurre en cualquier frontera de un medio donde cambie el índice de refracción, causando que una parte de los rayos incidentes sean reflejados al primer medio. El extremo de una fibra es un buen ejemplo de este hecho. La luz, que viaja del aire al núcleo de la fibra, es refractada al núcleo. Sin embargo, parte de la luz, alrededor del 4 %, es reflejada devuelta al aire. La cantidad que se refleja puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

#### Potencia de luz reflejada en la frontera

$$\text{Luz reflejada (\%)} = 100 \times (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2$$

Donde  $n_1$  = índice de refracción del núcleo

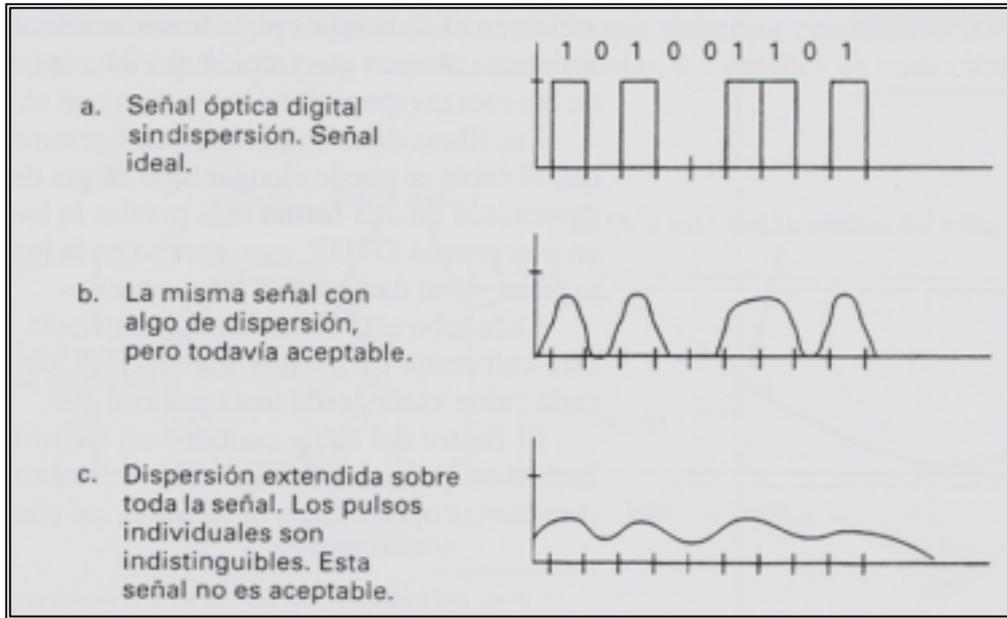
$n_2$  = índice de refracción del aire

#### Pérdidas por dispersión

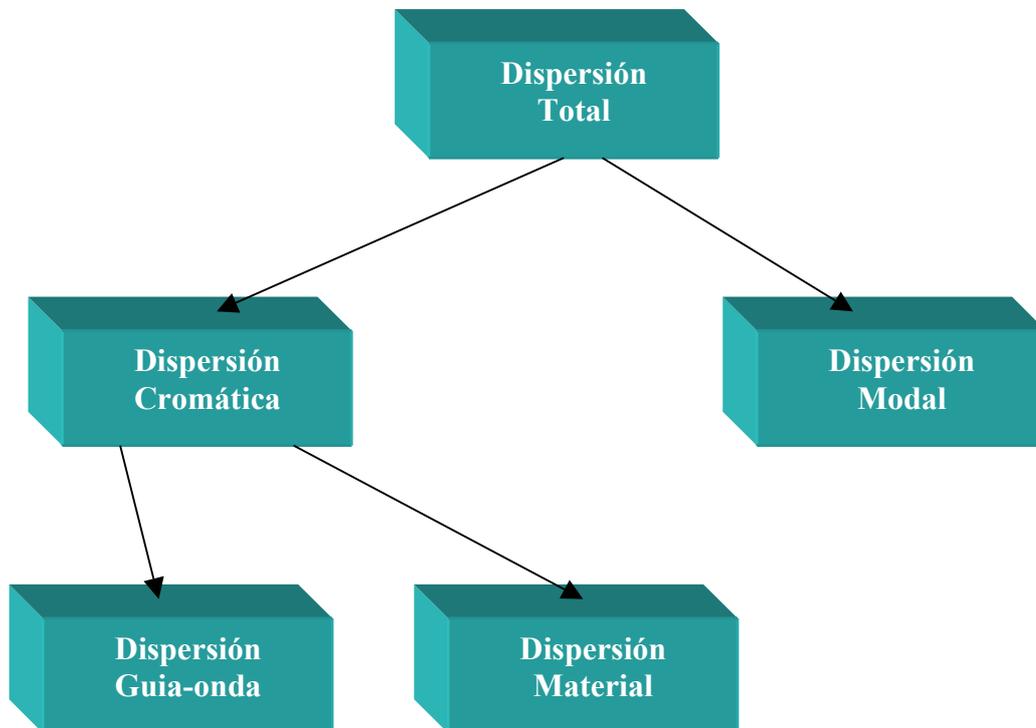
El ancho de banda de una fibra óptica está limitado por la dispersión total de la fibra (ensanchamiento del pulso). La dispersión limita la capacidad de transmisión de información porque los pulsos se distorsionan y se ensanchan, solapándose unos con otros y haciéndose indistinguibles para el equipo receptor. Para evitar que esto ocurra, los pulsos se deben transmitir a una frecuencia menor, reduciendo la velocidad de transmisión de datos.

Como se muestra en figura 5.7 :

- Los pulsos originales de datos ópticos son discretos, unos y ceros que pueden ser fácilmente identificados.
- Después de que la señal se ha propagado una cierta distancia a lo largo de la fibra óptica, tiene lugar la dispersión. Los pulsos se ensanchan pero pueden ser todavía decodificados por el equipo receptor.
- Tras una propagación aún mayor por la fibra, la señal se distorsiona totalmente y el equipo receptor no puede decodificarla.



La dispersión es en función de la longitud de la fibra óptica, cuanto mayor sea la longitud, más pronunciado será el efecto. Puede dividirse en dos categorías: dispersión cromática y dispersión modal (también llamada dispersión multimodo). La dispersión cromática puede ser posteriormente subdividida en dispersión guiada y dispersión material, como se representa aquí gráficamente:



### Dispersión modal

La dispersión, también conocida como esparcimiento del pulso, explicada anteriormente es causada por la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz que toman diferentes trayectorias por una fibra. Es la apertura del impulso de luz y por lo tanto su unidad de medida es [ms/Km].

### Dispersión cromática

Las fibras ópticas sufren otro tipo de dispersión, la cual está asociada al hecho de que las fuentes ópticas no son monocromáticas, a este tipo de dispersión se denomina cromática y se debe principalmente a dos fenómenos físicos:

- Dispersión cromática de material
- Dispersión cromática de guía-onda

*Dispersión cromática de material:* Los materiales que se emplean para fabricar fibras ópticas tienen índices de refracción en función de la longitud de onda, y por lo tanto la velocidad de onda de los fotones es en función de su longitud. Los diodos emisores de luz (LED) emiten luz que contiene una combinación de longitudes de onda. Cada longitud de onda, dentro de una señal de luz compuesta, viaja a una velocidad distinta. En consecuencia, los rayos de luz que simultáneamente se emiten de una LED y se propagan por una fibra óptica no llegan, al extremo lejano de la fibra, al mismo tiempo. Esto resulta una señal de recepción distorsionada.

La dispersión cromática puede eliminarse utilizando una fuente emisora monocromática tal como un diodo de inyección láser (ILD).

*Dispersión cromática de guía-onda:* Esta clase de distorsión es debido a la anchura espectral de la fuente de luz, cuando el índice de refracción permanece constante. La razón de esto es que la geometría de la fibra causa que la constante de propagación de cada modo cambie con la longitud de onda de la luz. Este tipo de dispersión es prácticamente despreciable.

En las fibras multimodo tanto de índice de refracción escalón como gradual, generalmente, la dispersión multimodal es mayor que la dispersión cromática, por lo tanto esta última se desprecia en un buen número de aplicaciones de telecomunicaciones.

Una comparación de los mecanismos de dispersión que sufre un pulso óptico cuando se propaga a lo largo de una fibra óptica se ilustra en la **figura 5.8**.

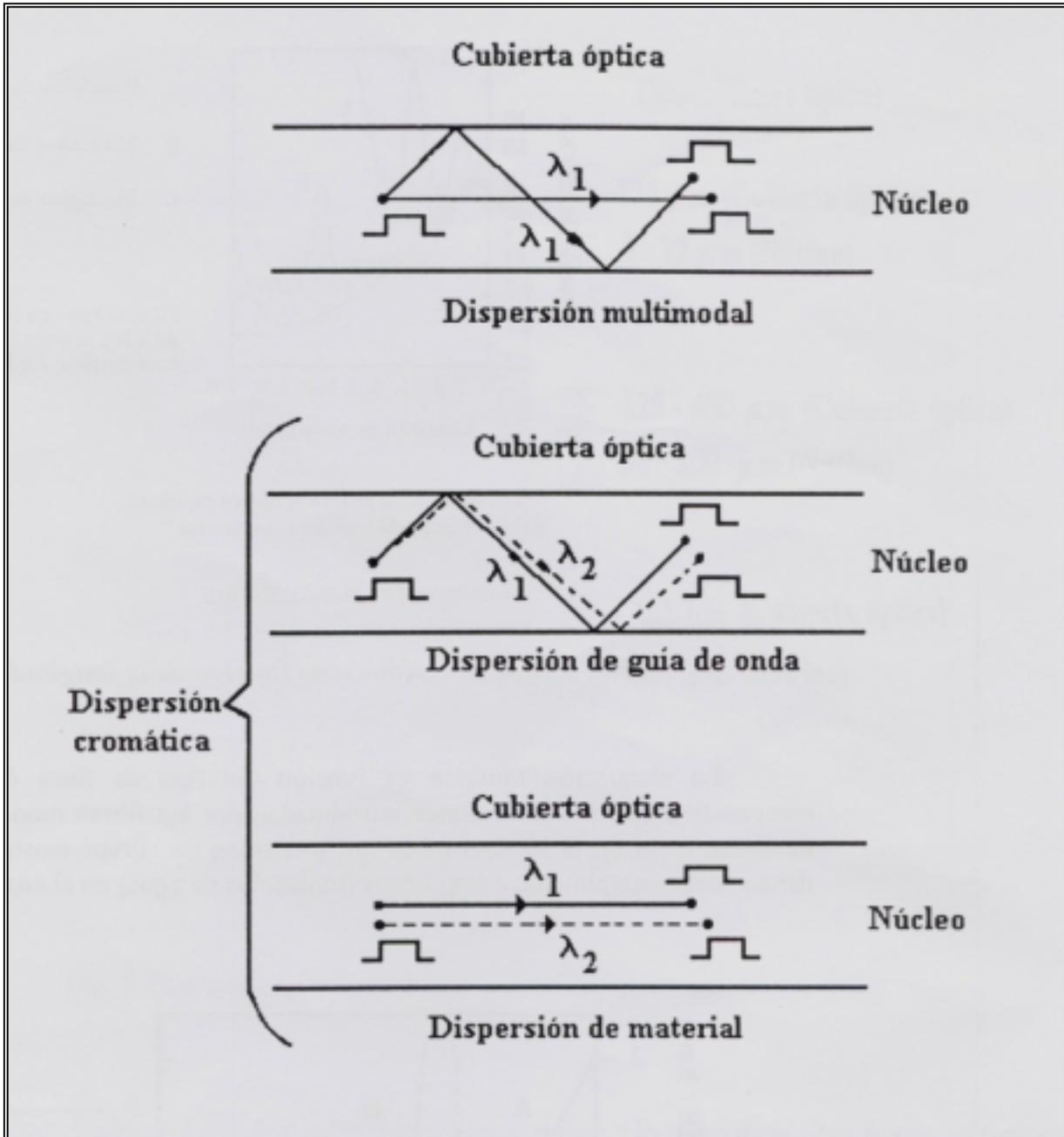


Figura 5.8

**Ancho de banda**

Una medida de la capacidad de transmisión de la información de una fibra óptica es el producto del ancho de banda por la longitud de la fibra, expresados en Mhz x Km, donde el ancho de banda es definido como la frecuencia a la cual la función de poder de transferencia experimenta una caída de 3 dB.

En los sistemas reales la distorsión del pulso no depende de la inversa de la longitud, pero es cierto que esta afectado por la longitud debido a imperfecciones en la estructura, empalmes, conexiones, variaciones de diámetro y del índice de refracción, microcurvaturas, etc., que se encuentran a lo largo de la fibra. Por lo tanto, basándose en hechos empíricos, la dependencia de la longitud se evalúa como  $1/\Omega L$ . Definiendo el ancho de banda B de una fibra de L longitud como:

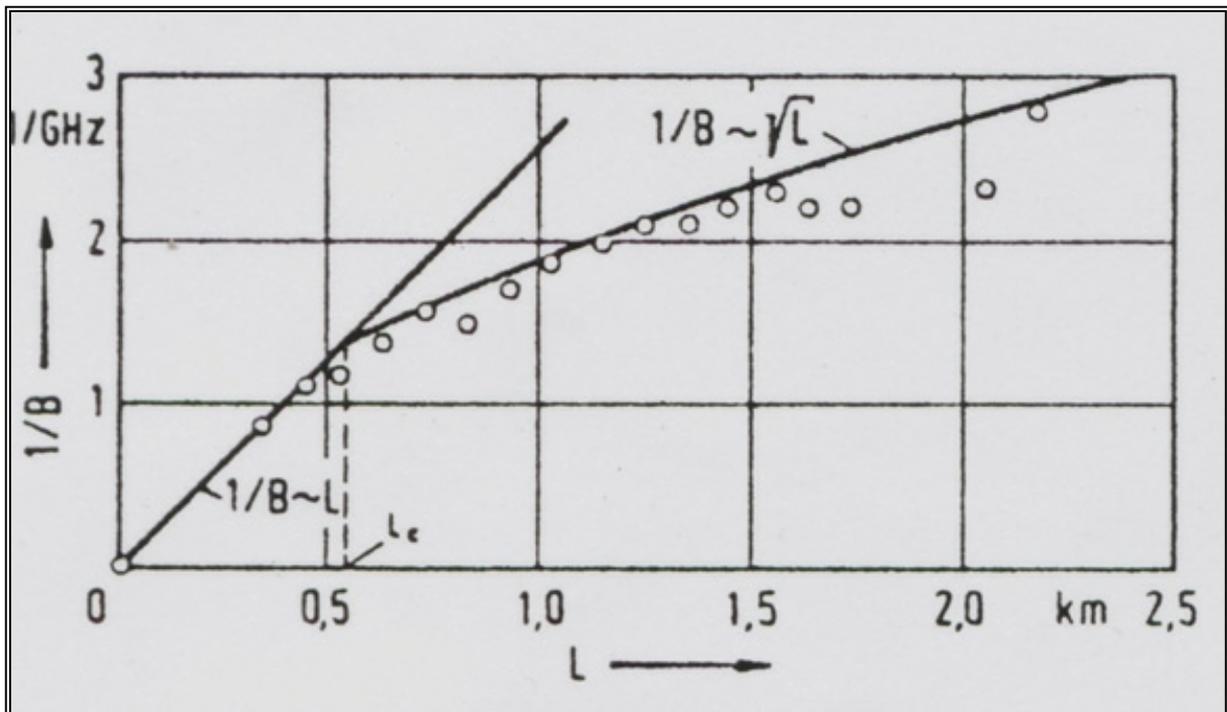
$$B = B_0/L^q$$

Donde :

$B_0$  = ancho de banda de 1 Km

q = factor de concatenación @ 0,5

Figura 5.9. Ancho de banda Vs. Longitud de la fibra



Si consideramos el hecho de que para la transmisión de información es necesaria una pequeña banda de frecuencias (quizás del orden de los kilohertzios), pensemos entonces en la cantidad de bandas que puede contener la región luminosa del espectro de frecuencias sin que se interfieran unas con otras. Es posible transmitir información a velocidades mucho mayores. Podrían llegar a usarse velocidades del orden de los gigahertzios e incluso superiores y aún así nos quedaría una anchura de banda suficiente para poder manejar un gran número de canales simultáneamente. En los sistemas de fibra óptica pueden enviarse datos digitales y analógicos de manera conjunta sin ningún tipo de problemas. Esto significa que los costes son menores que con los cables de cobre, hay también menor diafonía e interferencias, una menor cantidad de cables significa que casi inevitablemente, más tarde o más temprano todos los canales de comunicaciones telefónicas utilizarán este medio para la transmisión de datos, teléfono, telégrafo y señales de video.

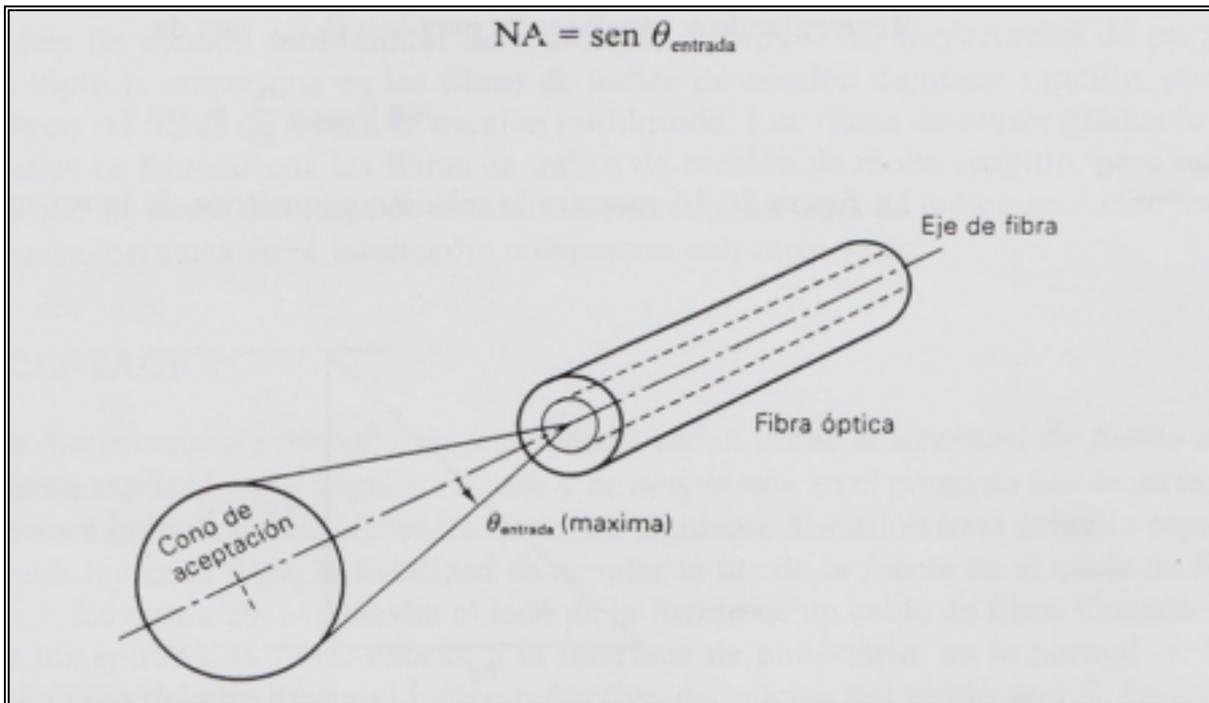
### Apertura numérica (AN)

La apertura numérica representa la cantidad de luz aceptada por la fibra óptica. Entre más grande sea el AN mayor será la cantidad de luz recogida por la fibra de la fuente de luz emisora.

Se define matemáticamente como el seno del ángulo de aceptación que es el ángulo máximo del rayo con respecto a la normal de la superficie de la fibra, para el cual la reflexión interna total tiene lugar en la frontera núcleo-revestimiento. Por lo tanto:

$$AN = \sin \varphi = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Fig. 5.10. Representación gráfica de la apertura numérica de una fibra.



## 6. Clasificación de las fibras ópticas

Las fibras ópticas pueden ser clasificadas según diferentes criterios:

- **Modo de propagación**
- **Materiales que conforman el núcleo y el revestimiento**
- **Dimensiones del núcleo y del revestimiento**
- **Características de transmisión**

### Modo de propagación

Las fibras ópticas se clasifican bajo este criterio de acuerdo a la forma en que los rayos de luz emitidos se propagan dentro de ellas.

Existen dos clases principales:

- Fibras monomodo (single-mode)
- Fibras multimodo (multi-mode)

Para determinar analíticamente estos tipos de fibras y para encontrar el diseño óptimo del núcleo para un formato y tipo de revestimiento conocido existe una ecuación que establece estas condiciones

$$2 \Pi a / \lambda \cdot (2 \cdot n \cdot \Delta n)^{0,5} \leq 2.41 = \text{monomodo}$$

$$\geq 2.41 = \text{multimodo}$$

Donde:

a = radio del núcleo

λ = longitud de onda

Δn = diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento

n = índice de refracción del núcleo

### Fibras multimodo

Una fibra multimodo es una fibra que puede propagar en más de una trayectoria los rayos de luz, ya que posee un núcleo de mayor diámetro que permite una mayor apertura numérica. El número máximo de modos de luz que pueden existir en el núcleo de una fibra se puede determinar matemáticamente por la siguiente expresión:

#### Número de modos de una fibra óptica

$$M = 1 + 2D \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{0.5} / \lambda$$

Donde:

D = diámetro del núcleo

$n_1$  = índice de refracción del núcleo

$n_2$  = índice de refracción del revestimiento

$\lambda$  = longitud de la onda de la luz

Una fibra multimodo se utiliza comúnmente en aplicaciones de comunicación de corta distancia (generalmente menos de unos pocos kilómetros).

De acuerdo con el perfil del índice de refracción existen dos tipos de fibras multimodo:

- Fibra multimodo de índice escalón
- Fibra multimodo de índice gradual

#### Fibra multimodo de índice escalón

Las fibras multimodo de índice escalonado están fabricadas a base de vidrio, con una atenuación de 30 dB/km, o plástico, con una atenuación de 100 dB/km. Tienen una banda de paso que llega hasta los 40 MHz por kilómetro. En estas fibras, el núcleo está constituido por un material uniforme cuyo índice de refracción es claramente superior al de la cubierta que lo rodea. El paso desde el núcleo hasta la cubierta conlleva por tanto una variación brutal del índice, de ahí su nombre de índice escalonado. (Figura 6.1)

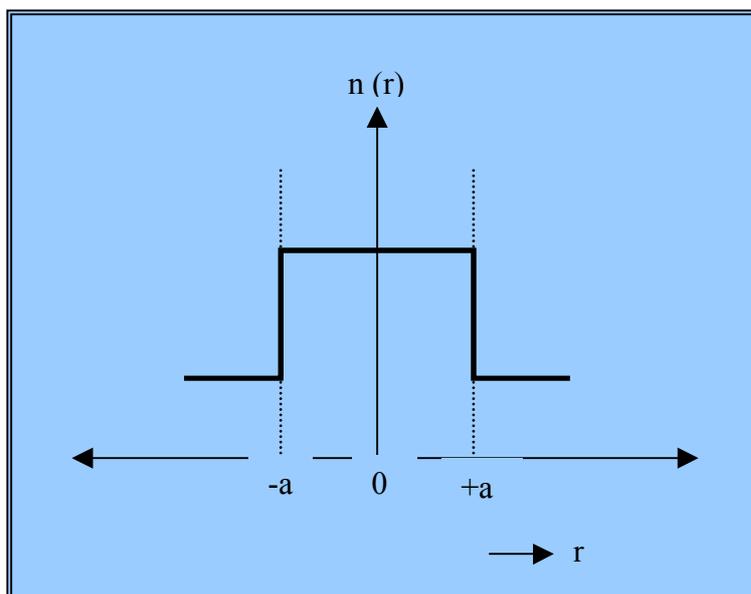
Este tipo de fibra tiene una apertura de luz a fibra grande y, en consecuencia permite que más luz entre al cable. Los rayos de luz que le pegan a la interface núcleo-revestimiento en un ángulo mayor que el ángulo crítico son propagados por el núcleo en una manera zigzageante, reflejándose continuamente en el límite de la interface. Por lo contrario, los rayos que inciden en la interface con un ángulo menor al crítico, entran al revestimiento y se pierden.

Los rayos de luz viajan por caminos muy diferentes en el núcleo de la fibra a la misma velocidad, con lo cual llegan a su destino en distintos tiempos. Si la luz incidente tiene forma de pulso, éste se presentará disperso en el otro extremo de la fibra, (Figura 6.2).

Tal esparcimiento del pulso restringe la velocidad de transmisión de datos ya que son inversamente proporcionales. Un pulso más ancho significa que se pueden enviar menos pulsos por segundo, lo que resulta una disminución del ancho de banda de la transmisión.

Este es el factor principal que limita la velocidad de la transmisión de datos en una fibra multimodo.

Su utilización a menudo se limita a la transmisión de información a cortas distancias, algunas decenas de metros y flujos poco elevados. Su principal ventaja reside en el precio más económico.



**Fibra multimodo de índice gradual**

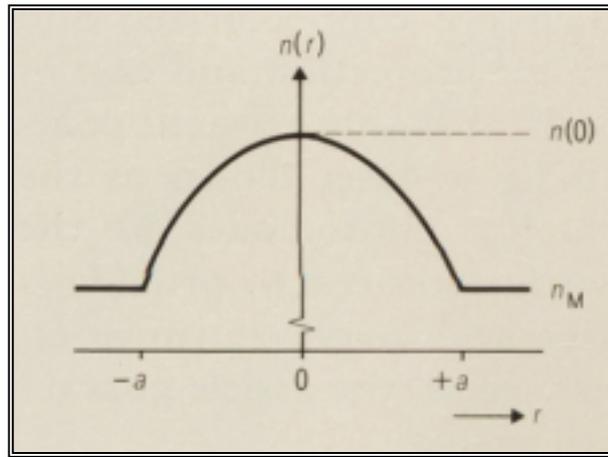
Las fibras multimodo de índice de gradiente gradual tienen una banda de paso que llega hasta los 500MHz por kilómetro. Su principio se basa en que el índice de refracción en el interior del núcleo no es único y decrece cuando se desplaza del núcleo hacia la cubierta.

La luz se propaga por este tipo de fibras a través de la refracción dentro del núcleo produciendo un doblamiento continuo de los rayos de luz emitidos.

Puesto que el índice de refracción es una medida de la disminución de la velocidad de la luz que viaja en el medio, la velocidad de los rayos de la luz propagada se incrementa conforme se alejen del centro del núcleo. De esta manera se puede lograr que los rayos de modos altos lleguen al mismo tiempo que los rayos de modos bajos en el otro extremo de la fibra óptica, resultando una disminución de la dispersión modal.

Es por dicho motivo que este tipo de fibra tiene un ancho de banda de transmisión de datos mayor que una fibra de índice escalón.

En la figura 6.3 se ilustra la variación del índice de refracción con respecto al radio de da fibra óptica



**Fibras monomodo**

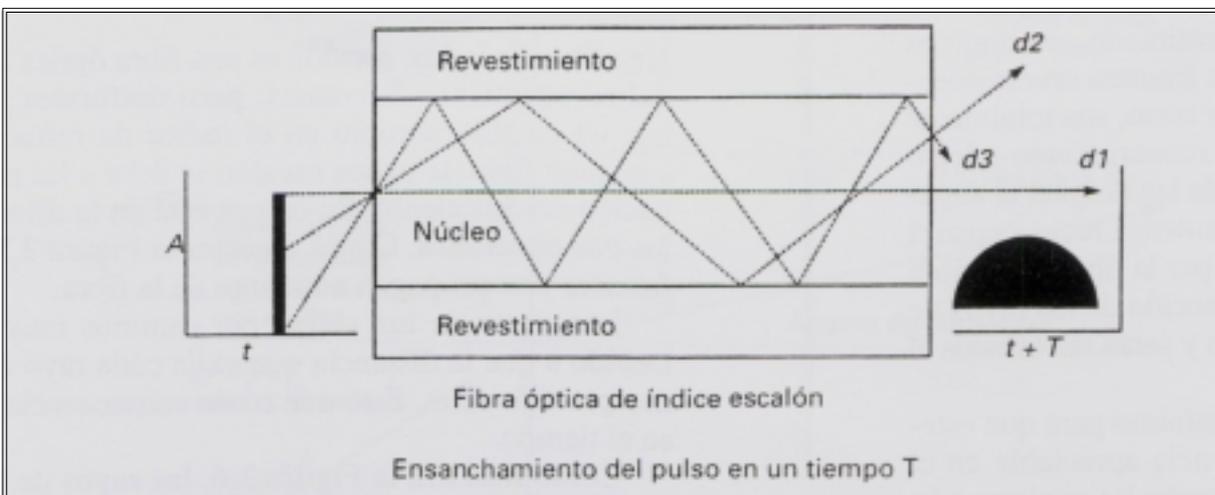
Potencialmente, este último tipo de fibra ofrece la mayor capacidad de transporte de información. Tiene una banda de paso del orden de los 100 GHz/km. Los mayores flujos se consiguen con esta fibra, pero también es la más compleja de implantar. Debido al pequeño tamaño del núcleo es muy difícil acoplar la luz a la fibra. Para todas las conexiones y empalmes de la fibra, se deben utilizar componentes de alta precisión.

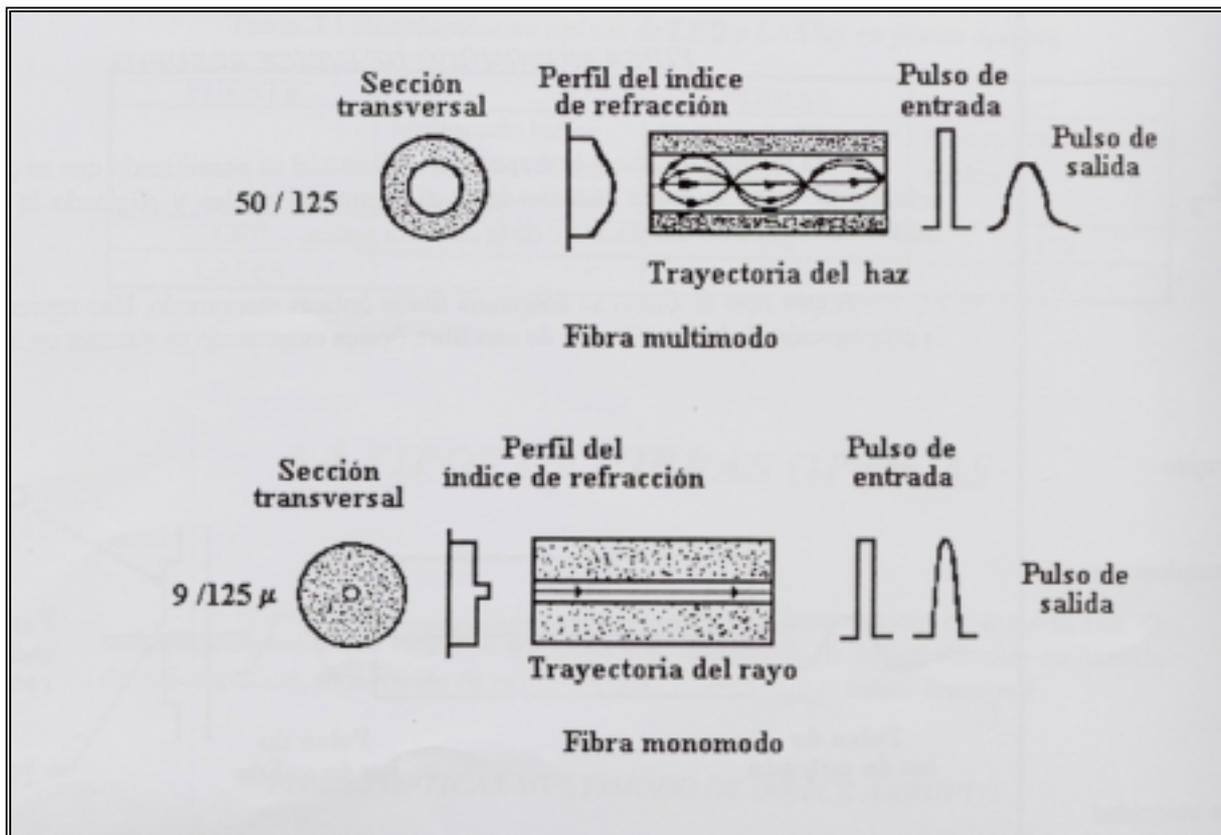
Esta clase de fibras sólo permite una sola trayectoria para los rayos de luz que se propagan por su núcleo. Esto se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra.

El perfil del índice de refracción es similar al de una fibra multimodo de índice escalón.

En las fibras monomodo, la dispersión modal es nula, y es por este motivo que las fibras ópticas monomodo pueden transmitir simultáneamente mayores volúmenes de información.

Una representación cualitativa que permite ilustrar comparativamente la dispersión de los pulsos de luz propagados a través de fibras ópticas multimodo y monomodo se muestra seguidamente, figura 6.4.





**COMPARACIÓN DE LOS TRES TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS**

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>MONOMODO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Dispersión mínima. En consecuencia, un pulso de luz entrado al cable puede reproducirse muy exacto en el lado receptor.</li> <li>· Mayor ancho de banda</li> <li>· Mayor velocidad de transmisión de información</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Núcleo muy pequeño, difícil de acoplar la luz. Menor apertura numérica.</li> <li>· Fuente de luz y dispositivos de empale más costosos.</li> </ul>
<b>MULTIMODO ÍNDICE ESCALÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Bajos costos y fáciles de fabricar. Fácil acoplamiento de la fuente de emisión de luz. Apertura numérica relativamente grande.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Alta dispersión. Grandes diferencias en tiempo de propagación, debido a que la luz toma muchas trayectorias.</li> <li>· Bajo ancho de banda.</li> <li>· Baja velocidad de transmisión.</li> </ul>
<b>MULTIMODO ÍNDICE GRADUAL</b>	<p>No existen ventajas y desventajas sobresalientes. Son de fácil acoplamiento de luz, pero más difíciles que las multimodo escalón. Baja dispersión (menor que la fibra multimodo índice escalón y mayor que las monomodo). Este tipo de fibra se considera una fibra intermedia comparada con los otros tipos.</p>	

\* International Electrotechnical Commission. Publicación 793-1: Optical Fibers, Part 1 : Generic Specification.

### Materiales que conforman el núcleo y el revestimiento

Esencialmente, hay tres variedades de fibras ópticas disponibles actualmente. Las tres variedades están construidas de vidrio, plástico o una combinación de vidrio y plástico. En la siguiente tabla se ilustran estos tres tipos:

NÚCLEO	REVESTIMIENTO	CATEGORÍA *
VIDRIO	VIDRIO	A1: Índice gradual A2: Índice escalón
VIDRIO	PLÁSTICO	A3
PLÁSTICO	PLÁSTICO	A4

Las fibras con núcleo de vidrio y revestimiento de vidrio, llamadas SCS ofrecen las mejores características de propagación y baja atenuación. Por otra parte, mecánicamente son las menos fuertes y las más susceptibles a los incrementos de atenuación cuando se exponen a la radiación.

Las fibras monomodo siempre tienen núcleo y revestimiento de vidrio.

Las fibras con núcleo de vidrio y revestimiento plástico, frecuentemente llamadas PCS (sílice –cubierta de-plástico) incluyen low-loss silicone resins y fluoridized polyalkenes y polymethylacrylates en el revestimiento plástico. Poseen una atenuación baja y resultan menos afectadas por la radiación que las fibras totalmente de vidrio. Estos cables se utilizan mucho en aplicaciones para fines militares.

Las fibras de plástico tienen varias ventajas sobre las fibras de vidrio. En primer lugar son más flexibles y como consecuencia más fuertes que el vidrio. Son fáciles de instalar, pueden resistir mayores presiones, son menos costosas y pesan aproximadamente 60% menos que el vidrio. La desventaja principal de este tipo de fibras es la alta atenuación, con lo cual no propagan la luz tan eficientemente como el vidrio.

Como consecuencia las fibras de plástico se limitan a corridas relativamente cortas, como pueden ser dentro de un mismo edificio o complejo de edificios.

“Por los tanto la selección de una fibra para una aplicación específica irá en función de los requisitos concretos del sistema y las contrapartidas que ofrece cada tipo.”

Además del vidrio, sílice fundida ( $SO_2$ ), en estado puro el dopado es el elemento principal para la fabricación de fibras de alta calidad, con bajas pérdidas. Se han hecho pruebas con otros vidrios compuestos por  $Na_2O+CaO$  o  $Na_2O+B_2O_3$  logrando disminuir las elevadas temperaturas del proceso de fabricación necesarias para trabajar el silicio puro. Pero no se han obtenido buenos resultados ya que las pérdidas de estas fibras son elevadas.

En la actualidad, Bell Laboratories están investigando la posibilidad de usar otra sustancia no-silicato, cloruro de zinc. Los experimentos preliminares han indicado que las fibras hechas de esta sustancia serán hasta 1000 veces más eficientes que el vidrio.

### Dimensiones del núcleo y del revestimiento

Las dimensiones del núcleo y del revestimiento, como se explicó anteriormente, están relacionadas con el modo de propagación de la luz dentro del núcleo de la fibra. Por ejemplo, si el diámetro del núcleo de la fibra es hasta 3 veces mayor que la longitud de onda, es una fibra monomodo. Por otra parte si el diámetro es mayor que éste factor es una fibra multimodo.

Las fibras ópticas que se usan en telecomunicaciones se fabrican en cinco grupos principales, teniendo en cuenta los diámetros del núcleo y del revestimiento:

**Diámetros comunes de una fibra óptica y de su protección [μm]**

CLASE	NÚCLEO	REVESTIMIENTO	RECUBRIMIENTO	TUBO O PROTECCIÓN
I	8 a 10	125	250 o 500	900 o 2000
II	50	125	250 o 500	900 o 2000
III	62,5	125	250 o 500	900 o 2000
IV	85	125	250 o 500	900 o 2000
V	100	140	250 o 500	900 o 2000

El tamaño de una fibra se especifica en el formato “núcleo/revestimiento”. Por lo tanto, una fibra 62,5/125 significa que la fibra tiene un núcleo de 62,5 mm de diámetro y un revestimiento de 125 mm de diámetro.

El recubrimiento envuelve al revestimiento y puede tener un diámetro de 250 a 500 mm. Para la fabricación de cables se utiliza una protección plástica de 900 mm de diámetro que envuelve el recubrimiento.

**I. Núcleo: 8 a 10/125 μm**

Una fibra que tenga un tamaño de núcleo de 8 a 10/125 mm se conoce como una fibra monomodo. Puede propagar la mayor tasa de datos y tiene la atenuación más baja. Se utiliza frecuentemente para aplicaciones de transmisión de datos a alta velocidad o para largas distancias. Debido al pequeño diámetro de su núcleo, el equipamiento óptico utiliza conectores de alta precisión y fuentes láser. Esto implica un aumento de costo del equipamiento.

Es interesante aclarar que el equipamiento de las fibras monomodo a menudo es mucho más caro que el de las fibras multimodo. Sin embargo, un cable de fibras monomodo es más barato que un cable de fibras multimodo.

**II. Núcleo: 50/125 μm**

La fibra cuyo tamaño del núcleo es 50/125 mm fue la primera fibra de telecomunicaciones en venderse en grandes cantidades y es bastante corriente hoy en día. Su pequeña apertura numérica y pequeño tamaño del núcleo hacen que la potencia de la fuente acoplada a la fibra sea la menor de todas las fibras multimodo. Sin embargo, de todas las fibras multimodo, es la que tiene mayor ancho de banda potencial.

**III. Núcleo: 62,5/125 μm**

La fibra de diámetros 62,5/125 mm es, en el presente, la más popular para transmisión multimodo y se está convirtiendo en estándar para muchas aplicaciones. Esta fibra tiene un ancho de banda potencial menor que la anterior, pero es menos susceptible a las pérdidas por microcurvaturas. Su mayor AN y su mayor diámetro de núcleo proporcionan un acoplamiento de luz ligeramente mayor que la fibra 50/125.

**IV. Núcleo: 85/125 μm**

Esta es una fibra de medidas europeas y no es popular en Norteamérica. Tiene buena capacidad para acoplar luz y utiliza el revestimiento de diámetro estándar de 125 mm. Esto permite la utilización de conectores y empalmes estándar con esta fibra.

**V. Núcleo: 100/140 μm**

Es la fibra multimodo de mayor diámetro del núcleo 100/140 mm lo que la convierte en la más fácil de conectar. Es menos sensible a las tolerancias del conector y a la acumulación de suciedad en el mismo. Acopla la mayor cantidad de luz de la fuente, pero tiene un ancho de banda significativamente más bajo que otras de tamaño de núcleos más pequeños. Generalmente se utilizan para tendidos de longitud intermedia y con muchos conectores que tienen requerimientos de baja velocidad de datos. No es muy común y es de compleja fabricación.

CLASE	NÚCLEO	AN	PÉRDIDAS	ANCHO DE BANDA	LONGITUD DE BANDA
I	8 a 10	La más pequeña	Las más bajas	El mayor	1.350-1.550
II	50	Más alta	Más bajas	Más grande	850-1.310
III	62,5	Media	Bajas	Medio	850-1.310
IV	85	Grande	Altas	Más pequeño	850-1.310
V	100	La más grande	Más altas	El más pequeño	850-1.310

**Características de transmisión**

Dependen en gran medida de la longitud de onda utilizada para transportar la información.

La longitud de onda es la distancia que ocupa un ciclo de una onda electromagnética, depende de la velocidad de la luz y de la frecuencia de la onda. Se enuncia matemáticamente como:

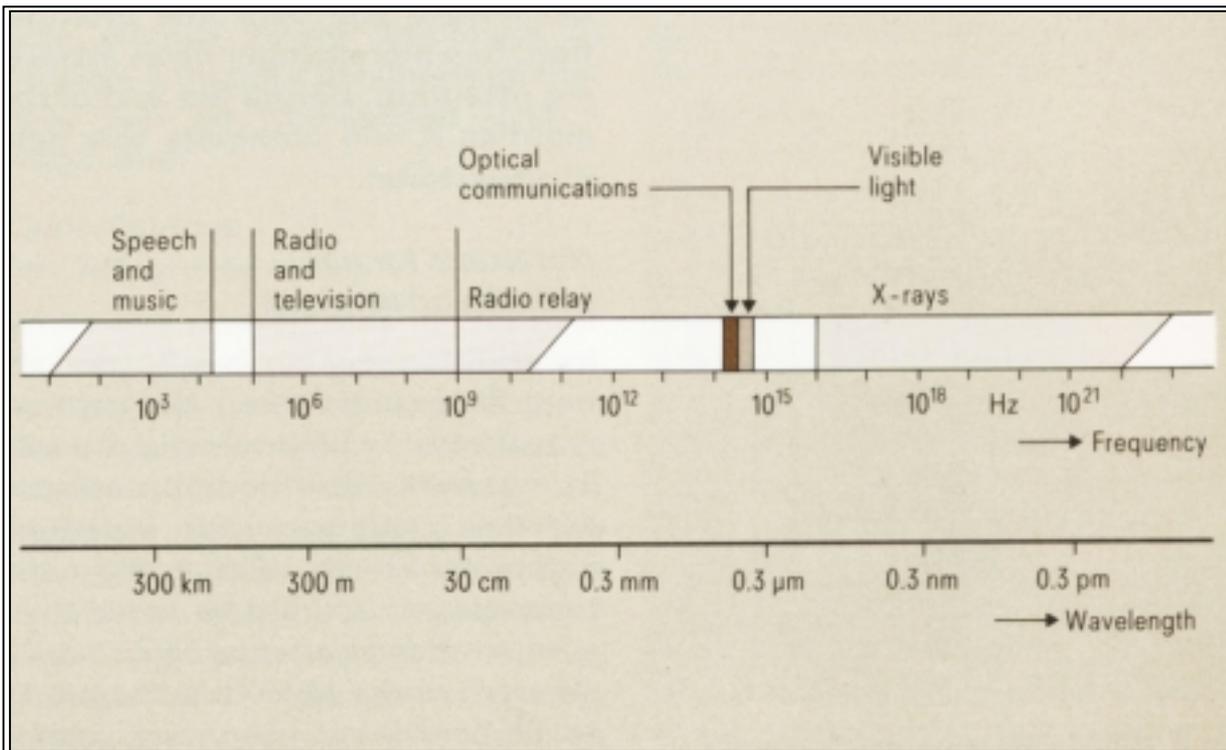
$$\lambda = c/f$$

donde:  $\lambda$  = longitud de onda [nm]

c = velocidad de la luz [m/s]

f = Frecuencia [Hz]

En la figura 6.5 se ilustra el espectro de longitud de onda electromagnética.

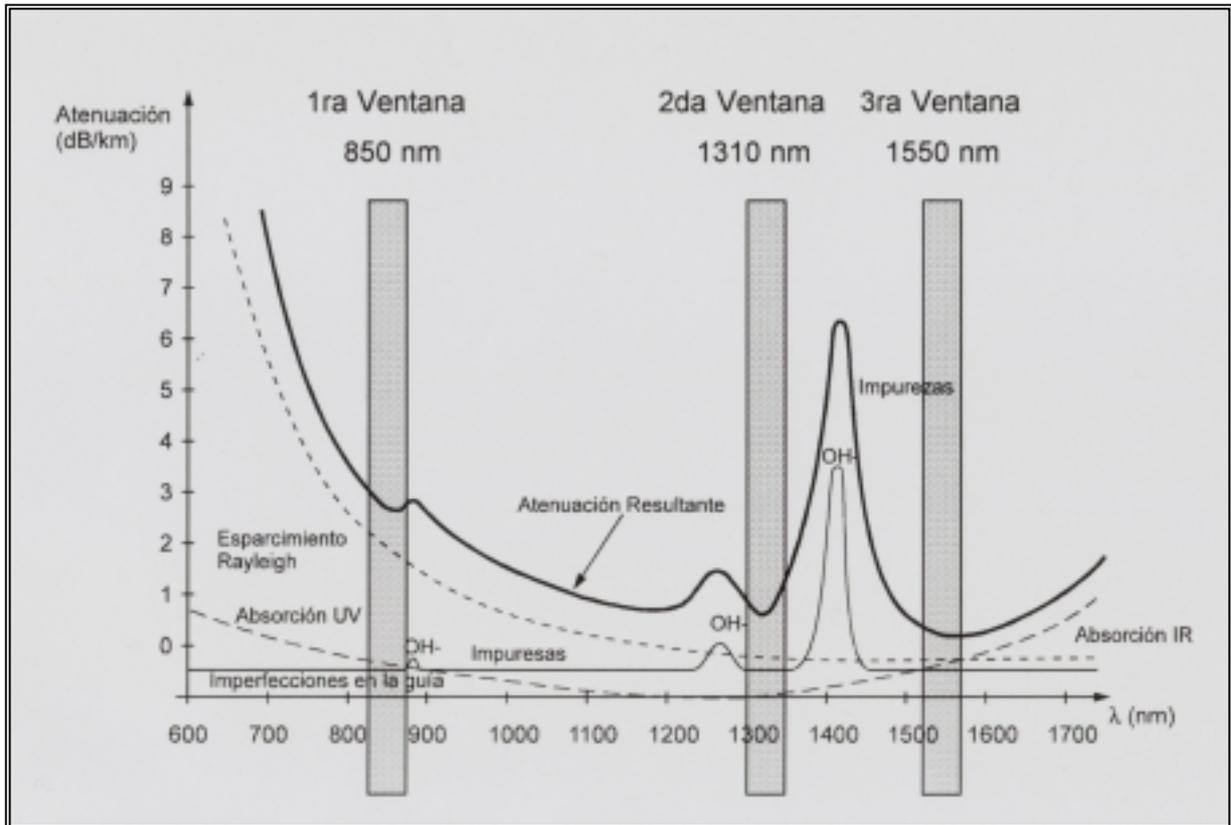


Se ha descubierto por medio del análisis matemático y también a través de experimentos que en varios materiales existen las llamadas “ventanas ópticas”. Esto significa que a unas determinadas frecuencias, las ondas pasarán a través de estos materiales más fácilmente que a otras frecuencias. En el caso de las fibras ópticas, si se modula a determinadas frecuencias los efectos de la dispersión y las pérdidas de material debidas a propagación de ondas tienden a cancelarse unas con otras y crear “ventanas”. Algunos experimentos tienden a demostrar que trabajando en frecuencias aún mayores que las infrarrojas, se puede llegar a conseguir mejores características de transmisión y de esta manera mejorar la calidad de la transmisión.

Existen 4 ventanas (regiones de longitud de onda) que hoy en día se utilizan para transmitir información a través de una fibra.

Wavelength region (windows)	Major use	Typical fibers
Around 630 nm	Short-haul data transmission	Plastic
Around 850 nm	General purpose	Graded-index glass, PCS, step-index glass
Around 1300 nm	Long-haul trunk lines	Grade-index silica, single-mode silica
Around 1550 nm	General purpose	High-grade silica (single-mode)

En la figura 6.6 se ilustran las 3 ventanas actualmente utilizadas para la transmisión de señales.



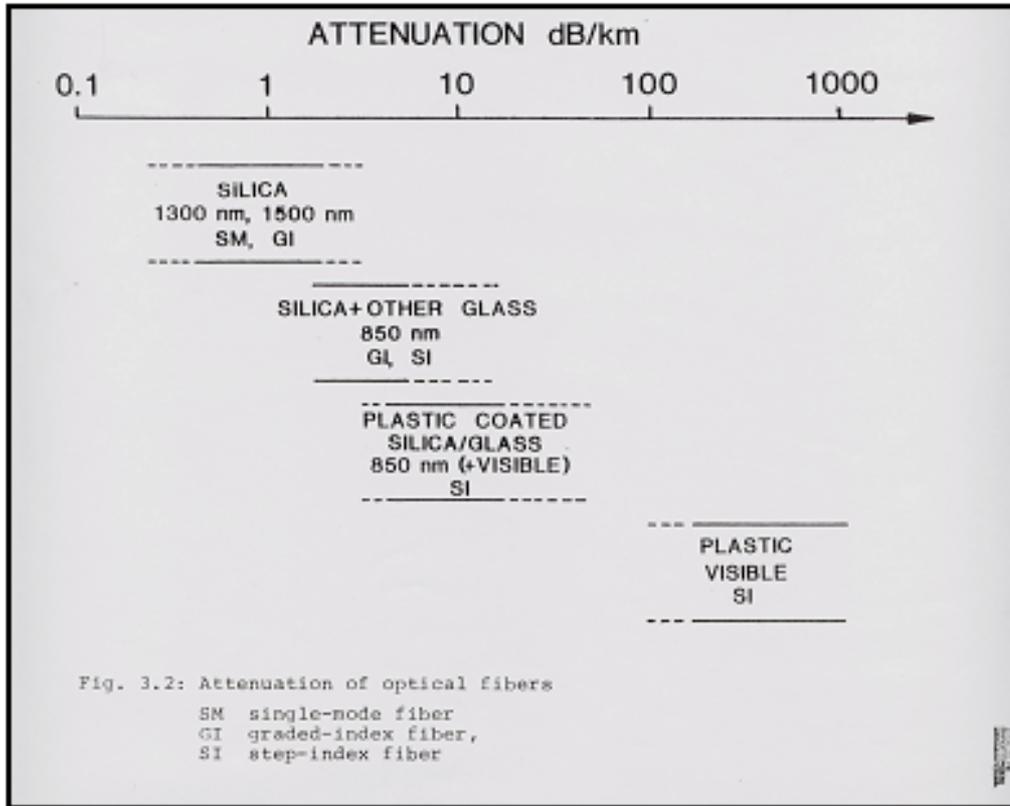
Junto con la región de longitud de onda, los criterios de transmisión más importantes son:

- La atenuación [dB/Km]
- El ancho de banda [MHz]

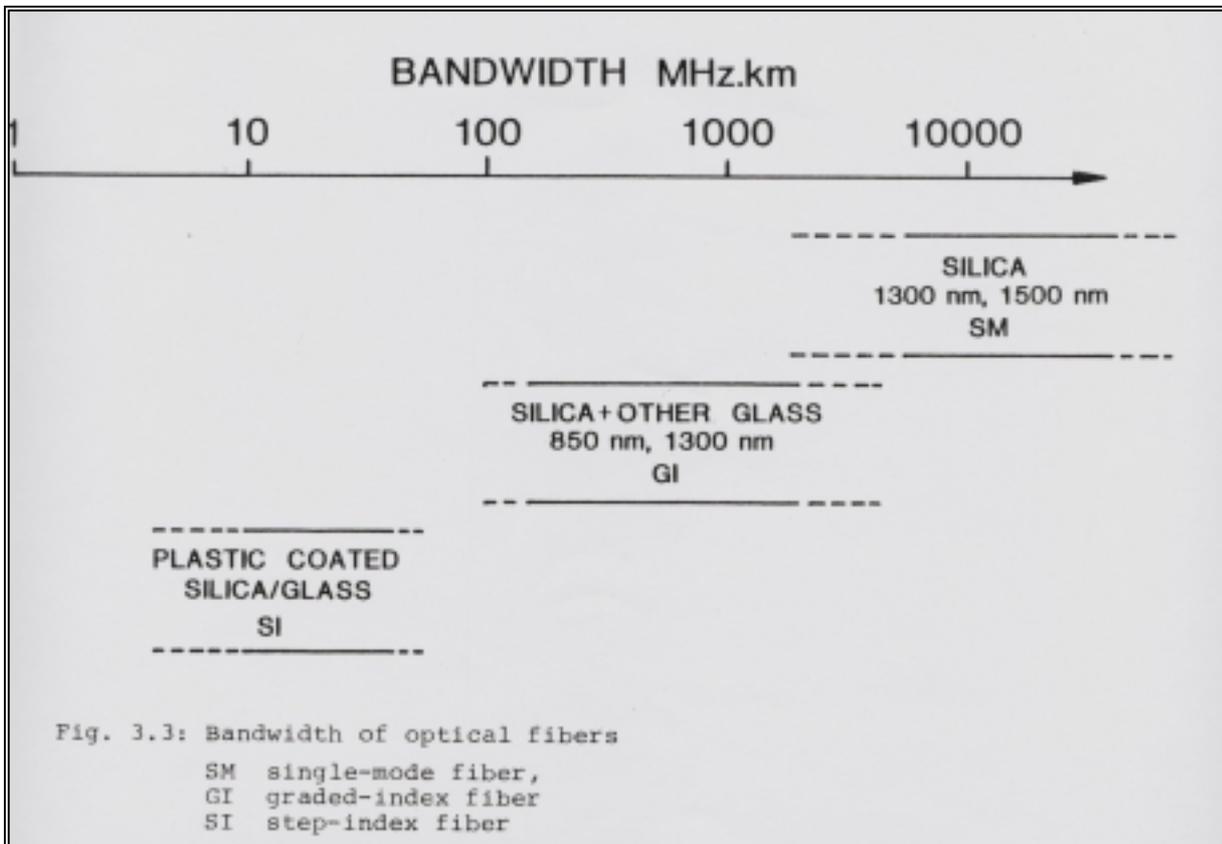
La apertura numérica puede también ser usada para clasificarlas, especialmente para elegir una determinada fibra para una determinada fuente. La Dispersión es otro criterio alternativo de ancho de banda.

CATEGORIA IEC	FIBRA	APERTURA NUMÉRICA
	Monomodo	0,1
A1	Índice gradual 50/125	0,2
	Índice gradual 100/140	0,3
A2, A3	Índice escalón	0,2 – 0,5
A4	Plásticas	0,5 – 0,66

Una manera de clasificar fácilmente las fibras de acuerdo a la atenuación que coincide con el material, longitud de onda y modo de propagación se ilustra en la figura 6.7. El costo de las fibras aumenta con la disminución de la atenuación



En cuanto al ancho de banda una fácil clasificación es ilustrada en la figura 6.8.



## 7. Procesos de fabricación de fibra óptica

Con el fin de atender la creciente necesidad de las diversas aplicaciones de comunicación de voz, datos y video a través de la fibra de vidrio ha sido necesario desarrollar un procedimiento para la fabricación, de forma económica, tanto de fibras monomodo como multimodo.

En 1970, Corning Glass Works, en Estados Unidos, fabricó la primera fibra óptica de bajas pérdidas, representando un adelanto significativo en la producción de vidrio de alta pureza, con contenido de impurezas de ciertos metales de transición en el vidrio de 10 a 50 partes por mil millones y con una atenuación de 16 dB/Km. Este evento estimuló gran cantidad de investigaciones y desarrollos a lo largo de todo el mundo, logrando disminuir las pérdidas llegando, hoy en día, a una atenuación de 0,10 dB/Km.

### Requerimientos generales

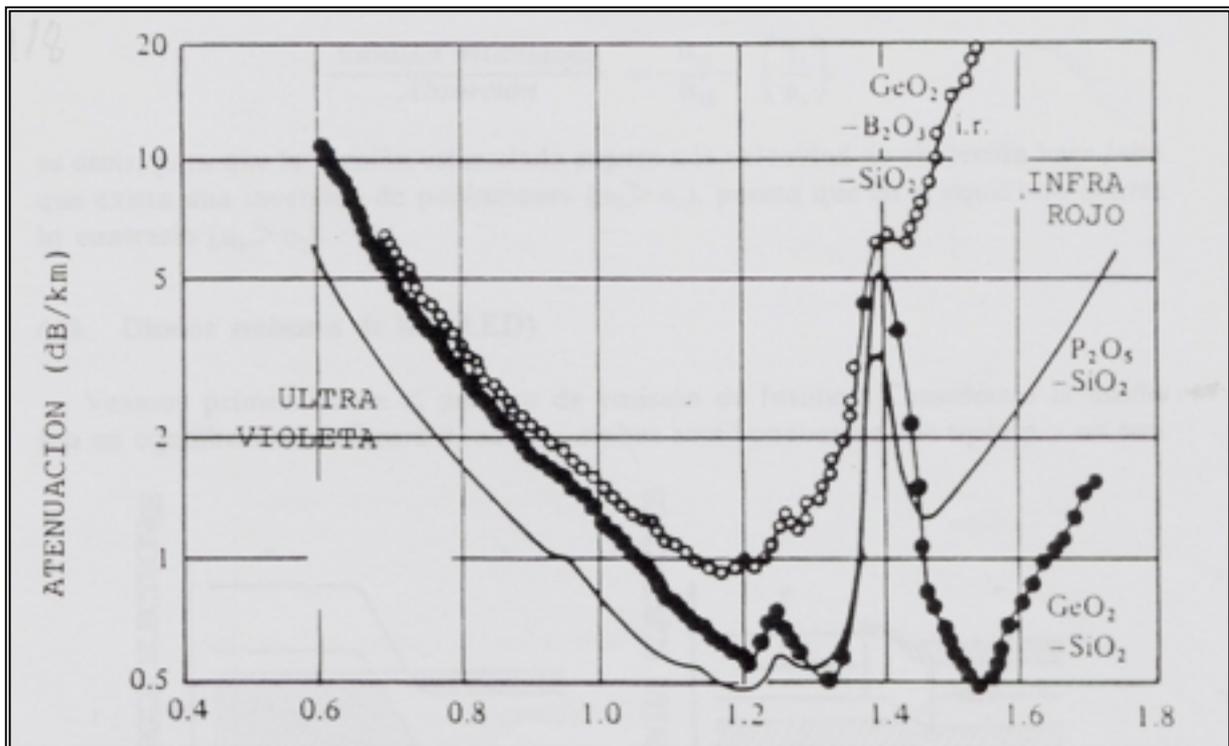
La performance de la fibra óptica depende, fundamentalmente, del proceso de fabricación y los materiales utilizados para los mismos.

La materia prima debe ser tan pura como sea posible para prevenir la absorción y dispersión de la luz. La contaminación durante la fabricación debe mantenerse lo más baja posible para asegurar una alta calidad en el producto terminado.

En la actualidad casi todas las fibras se fabrican a partir de vidrios que tienen un gran contenido de sílice dopado con óxidos, tales como los óxidos de boro, titanio, germanio o fósforo. Esto no quiere decir que sea el único tipo de fibra porque se está experimentando con otros vidrios (Silicatos de sodio, calcio, plomo, sulfuros, seleniuros, etc.).

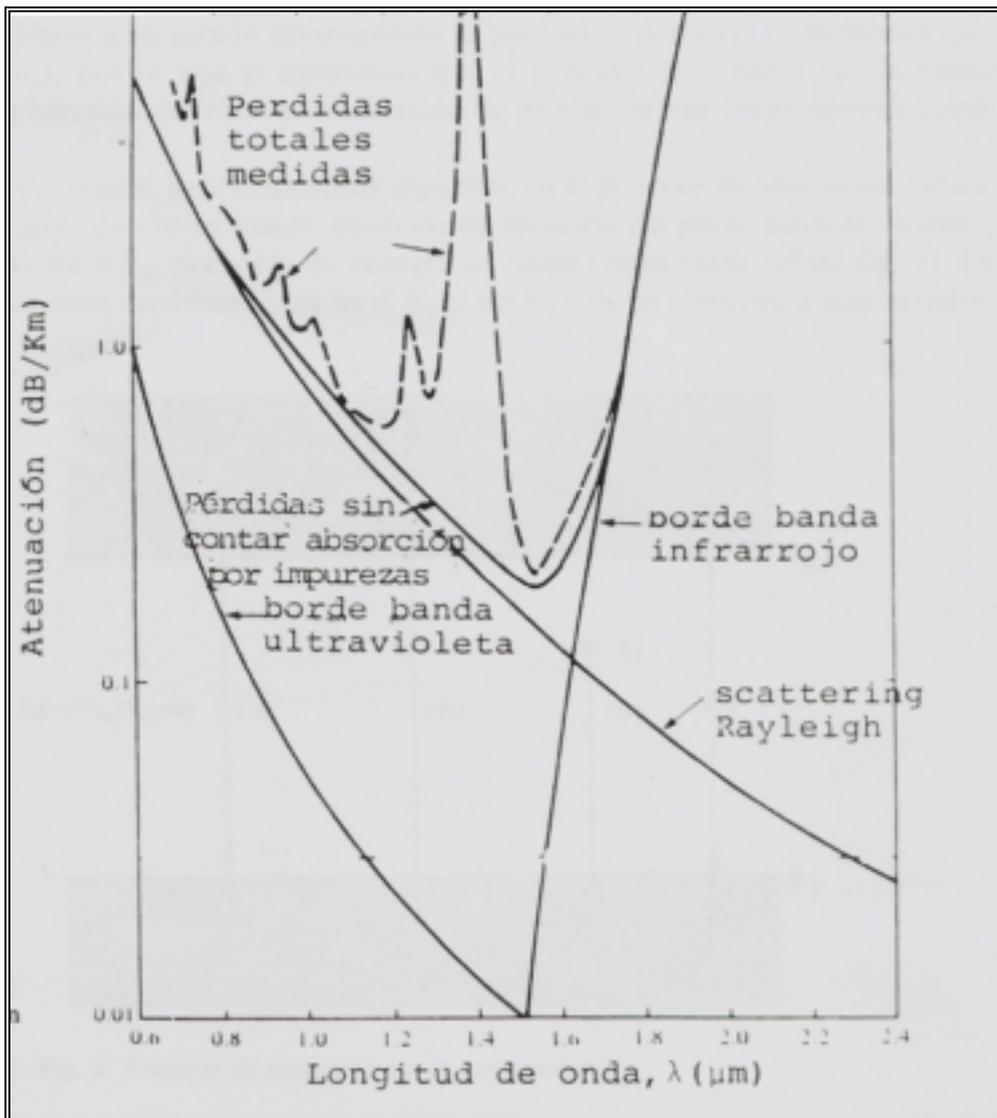
El silicio, como otros materiales, presenta una fuerte absorción en el ultravioleta que depende de la estructura electrónica de los átomos y en el infrarrojo, la cual está asociada a las vibraciones de los mismos átomos. Aunque las frecuencias a las que se presentan estos dos fenómenos están alejadas de las frecuencias ópticas utilizadas, las absorciones anteriores son tan fuertes que sus bandas de absorción se extienden algo en la región óptica de nuestro interés.

En la siguiente figura 7.1 se ilustra la variación de la atenuación de las fibras en función con los dopantes que se utilizan para ajustar el índice de refracción. Entre los más comunes se encuentran Ge, P, B. Desde este punto de vista el dopante más ventajoso es el germanio.



A parte de los materiales y dopantes utilizados en la fabricación de la fibra, que son controlables de modo relativamente fácil, los materiales pueden contener impurezas que originan importantes absorciones. En este sentido, las impurezas más perniciosas son el vapor de agua y los átomos de metales de transición, tales como el vanadio, cromo, hierro, manganeso, cobalto y níquel. Estas impurezas se encuentran como iones en los vidrios y su concentración debe ser menor de una parte en  $10^9$ , si queremos que la atenuación no exceda 1 dB/Km en la región de longitudes de onda alrededor de 1 mm. La banda de absorción causada por los iones  $Fe^{++}$  va de 0,7 a 1,3 mm y la de los iones de  $Cr^{++}$  de 0,6 a 0,7 mm.

La absorción debido a los  $OH^-$  surge de la presencia de las moléculas de agua en el vidrio. Los iones  $OH^-$  presentan su línea de absorción fundamental a 2,8 mm, pero con segundos y terceros armónicos a 1,4 y 0,95  $\mu m$  respectivamente. Para que desaparezcan estos picos es necesario que la concentración de los iones  $OH^-$  sea menor que una parte en  $10^9$ , constituyendo el denominado vidrio seco en contraposición al húmedo. En la figura 7.2 se aprecia que los mínimos de atenuación se presentan a 0,9 1,0, 1,2, 1,3 y 1,55  $\mu m$ . Si el vapor de agua es eliminado y se utilizan fibras de sílice dopadas con germanio, la atenuación en los mínimos a 1,3 y 1,55  $\mu m$  es mucho más baja que a 0,85  $\mu m$ .



Los principales criterios por los cuales la calidad de un proceso de producción es clasificado son:

- Atenuación
- Dispersión. Ancho de banda
- Resistencia mecánica

Un aceptable proceso de producción debe asegurarse su calidad fijando requerimientos concernientes a estos parámetros. Estos deben ser cumplidos en todo proceso para lograr un alto estándar de calidad y se deben asegurar que estos parámetros sean uniformes en toda la fibra.

Bajo un punto de vista totalmente económico,

- El out-put
- La velocidad de producción

Son importantes criterios de evaluación de los procesos. El out-put debe ser entendido como la cantidad de producto final, fibra óptica, que cumple con ciertos parámetros técnicos fijados en el proceso.

Por lo tanto algunas preguntas básicas deben ser respondidas sobre cualquier proceso de producción.

- ¿Existen pasos críticos dentro de los procesos de fabricación reduciendo drásticamente la cantidad de producto final?
- ¿Es esencial un exigente proceso de control sobre ciertos parámetros para lograr un elevado out-put?
- ¿Es posible una producción continua de fibra óptica?
- ¿Es posible fabricar fibras de extensa longitud y alta calidad?
- ¿Es limitado el largo de la fibra que puede producirse de un estiramiento?

El criterio de evaluación más importante de los procesos de fabricación de fibras ópticas es la versatilidad del mismo. ¿La maquinaria y tecnología que se dispone es apropiada para la producción de una gran variedad de fibras ópticas o sólo lo son para una clase de fibras?

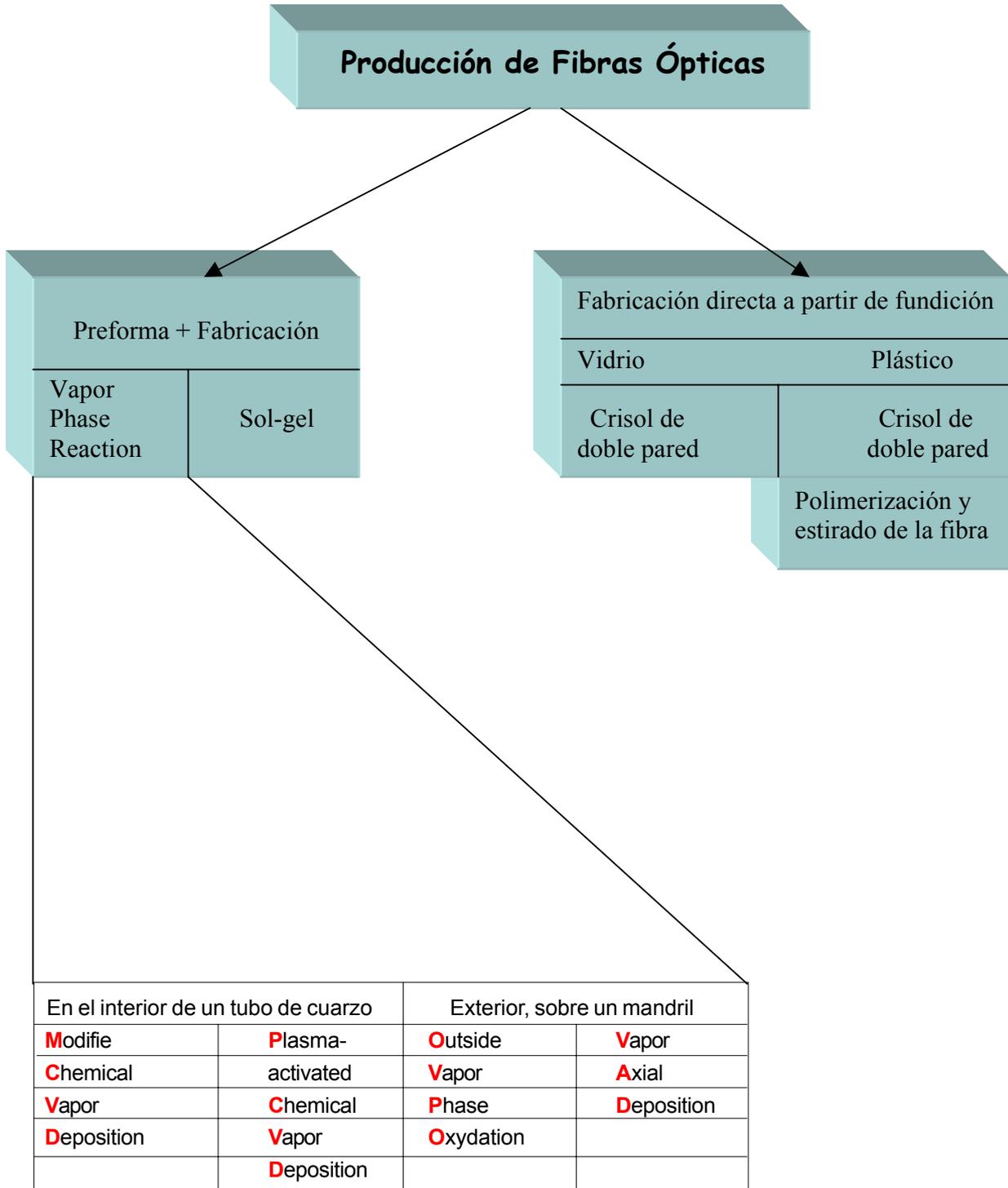
Después de dar una explicación general de todos los procesos de producción, en las siguientes secciones, se describirá cada proceso en detalle y se evaluarán, a través de las respuestas a las preguntas planteadas anteriormente.

Finalmente, se debe aclarar que, antes de comenzar con cualquier proceso de producción, debe existir una etapa de diseño, en la cual se determinará el diámetro, perfil del índice de refracción, corte de longitud de onda, etc. para satisfacer las especificaciones dadas de ancho de banda, atenuación, apertura numérica y sensibilidad a la microcurvatura. Este diseño está íntimamente relacionado con la elección de las materias primas y dopantes. El diseño de las fibras no será tratado en este trabajo. Pero debemos saber que este proceso, para alcanzar una alta performance, se realiza bajo métodos empíricos de prueba y error.

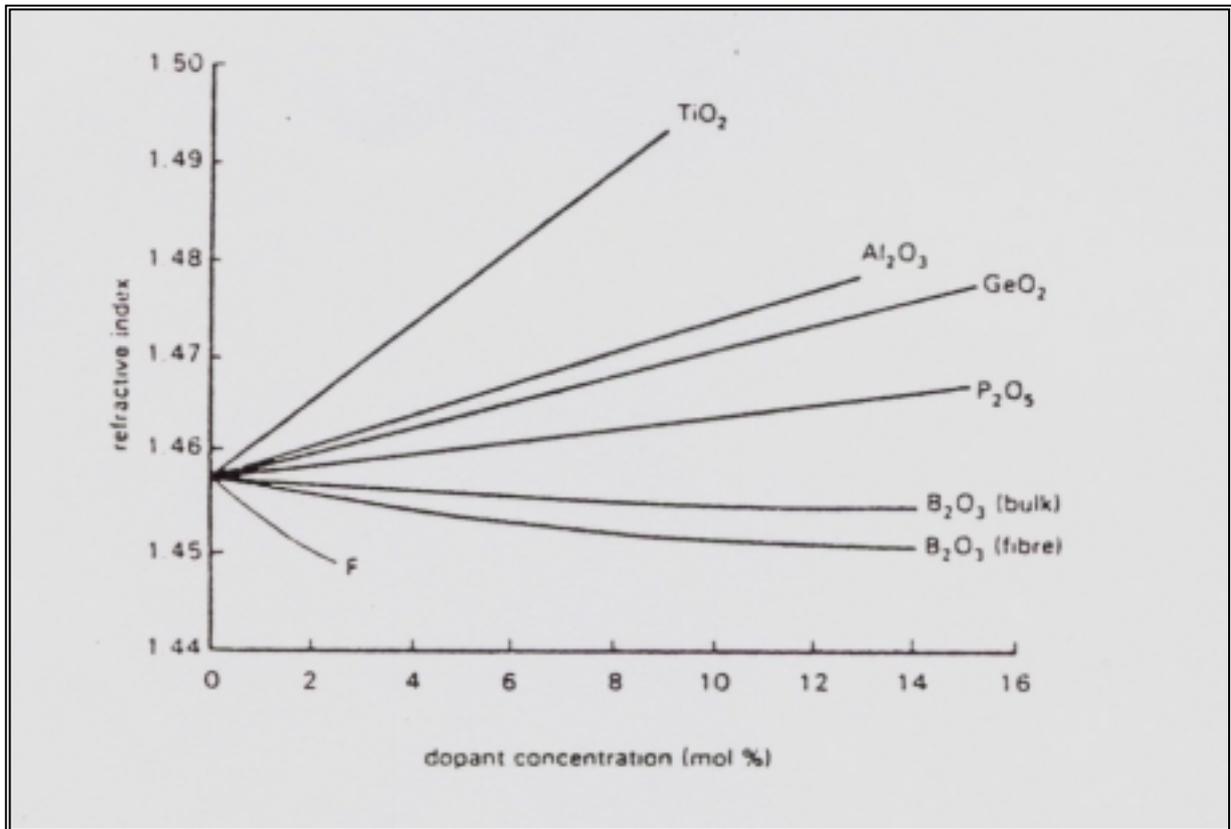
### **Explicación general de los procesos de producción**

Básicamente existen dos caminos para la fabricación de fibras (Figura 7.3):

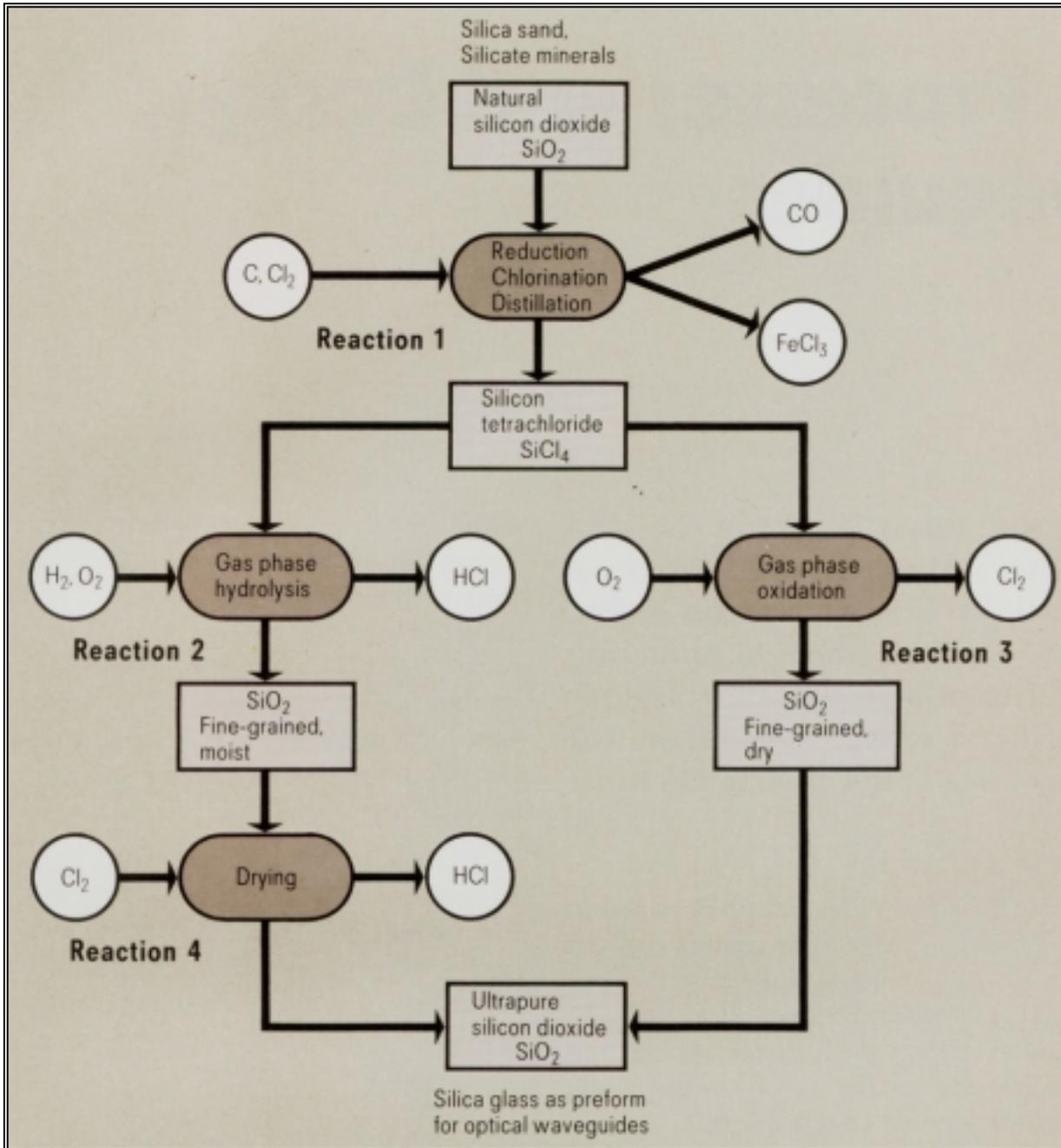
- 1- Primera etapa de fabricación de la preforma y luego una segunda etapa de fabricación de la fibra. Es el más utilizado hoy en día para la fabricación de:
  - Fibras de alta calidad, con núcleo de vidrio y revestimiento de vidrio (SCS)
  - Fibras con núcleo de vidrio y revestimiento de plástico, (PCS)
- 2- Fabricación directa de la fibra a partir de la fundición.



Las guías ópticas utilizadas para las telecomunicaciones consisten principalmente de vidrio de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), con el núcleo de la fibra óptica dopado con germanio y fósforo para incrementar el índice de refracción y posiblemente, boro o flúor para reducirlo. En la figura 7.4 se muestra la variación del índice de refracción de acuerdo con el tipo y concentración de los distintos dopantes.



El óxido de silicio natural, obtenido en forma de cristales de cuarzo o arena de silicio, no puede ser usado directamente para la fabricación de fibra óptica debido a la gran cantidad de impurezas que contiene tales como óxidos de metales. Es por ello que tiene que ser procesado. Figura 7.5



El dióxido de silicio es depositado en un reactor donde por medio de una reducción con carbono y una posterior cloración se obtiene tetracloruro de silicio,  $\text{SiCl}_4$  en estado líquido en condiciones normales de presión y temperatura. El silicio puro requiere de altas temperaturas para licuarlo. El agregado de dopantes, en particular germanio, boro y fósforo, reducen el punto de fusión del vidrio e incrementa su viscosidad.

Debido a que la presión de vapor de las impurezas metálicas es mucho menor que la del tetracloruro de silicio, mediante una destilación fraccionada se logra desprender del  $\text{SiCl}_4$  cloruros metálicos y monóxido de carbono obtenido como resultado de la reducción del  $\text{SiO}_2$ .

Para recuperar el dióxido de silicio ya purificado, necesario para la fabricación de fibras de alta calidad del  $\text{SiCl}_4$  en estado de vapor existen dos técnicas posibles:

- Hidrólisis. Haciendo reaccionar el  $\text{SiCl}_4$ , introduciendo  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$ . De esta manera se logra liberar el cloro de la molécula transformándolo en  $\text{HCl}$  a  $1000^\circ\text{C}$  como residuo y  $\text{SiO}_2$  en finos granos ligeramente húmedos. Por lo tanto, es necesario secarlo, para eliminar el agua residual producto de la reacción anterior, la técnica más conveniente es mediante la incorporación de gas  $\text{Cl}_2$ . Este proceso de secado permite el aumento de la transmisión de la luz a través del vidrio.

- Oxidación. Originada por una reacción térmica iniciada a 1300 °C. De esta manera, agregando oxígeno el  $\text{SiCl}_4$  se quema liberando  $\text{Cl}_2$  como residuo y obteniendo finos granos secos de  $\text{SiO}_2$  de alta pureza, como producto de esta reacción exotérmica.

El dióxido de silicio purificado es sinterizado a temperaturas mayores a 1200°C para luego solidificarse, libre de burbujas.

### Procesos de preparación de la preforma

Existen distintos procesos de fabricación de preformas, entre ellos se distinguen cuatro que consisten en la deposición de sílice dopado:

- MCVD: Deposición modificada de vapor químico
- PCVD: Deposición de vapor químico mediante plasma a baja presión
- OVPO: Deposición exterior de vapor mediante oxidación
- VAD: Deposición axial de vapor

En los dos primeros métodos la reacción comienza en el interior de un tubo de silicio, mientras que en los dos restantes en el exterior de un tubo de silicio.

### MCVD (Deposición modificada de vapor químico)

Este proceso fue desarrollado por Bell Laboratories en 1974 y mejorado por diversos laboratorios de todo el mundo.

El proceso comienza a partir de un tubo de silicio fundido de 96 por ciento de pureza cuyas dimensiones, en general, son de aproximadamente 25 mm de radio exterior y 19 mm de radio interior y 1000 mm de longitud. Que contiene menos de 130 ppm de OH.

El tubo es colocado en una bancada y se lo hace girar, mientras los reactantes pasan por el interior del tubo acompañados por un gas transportador como puede ser el Ar o  $\text{N}_2$ . El calor se aplica exteriormente mediante uno a más quemadores de gas oxígeno o  $\text{H}_2/\text{O}_2$  que se desplazan lateralmente calentando el tubo.

Las reacciones producidas por los reactantes introducidos dentro del tubo de silicio, calentado por las llamas de los quemadores, dan lugar a finas partículas de vidrio que son depositadas en dirección de la posición del quemador.

A medida que estas partículas son depositadas formando capas, son sintetizadas simultáneamente formando finas capas de vidrio transparente. Esto se logra, moviendo el quemador a lo largo del tubo en dirección del gas que fluye en su interior. Generalmente de 30 a 100 capas son depositadas por varias pasadas del quemador. La composición de cada capa puede ser variada durante cada pasada por la adición de distintos dopantes en el flujo de gas. Mediante un programa apropiado de deposición pueden fabricarse tanto fibras con índice escalón como con índice gradual.

Finalmente, el último paso es la consolidación de la preforma hueca para dar lugar a un cilindro macizo de vidrio. Este último proceso se denomina colapsado y es generado por un fuerte calentamiento exterior de la preforma.



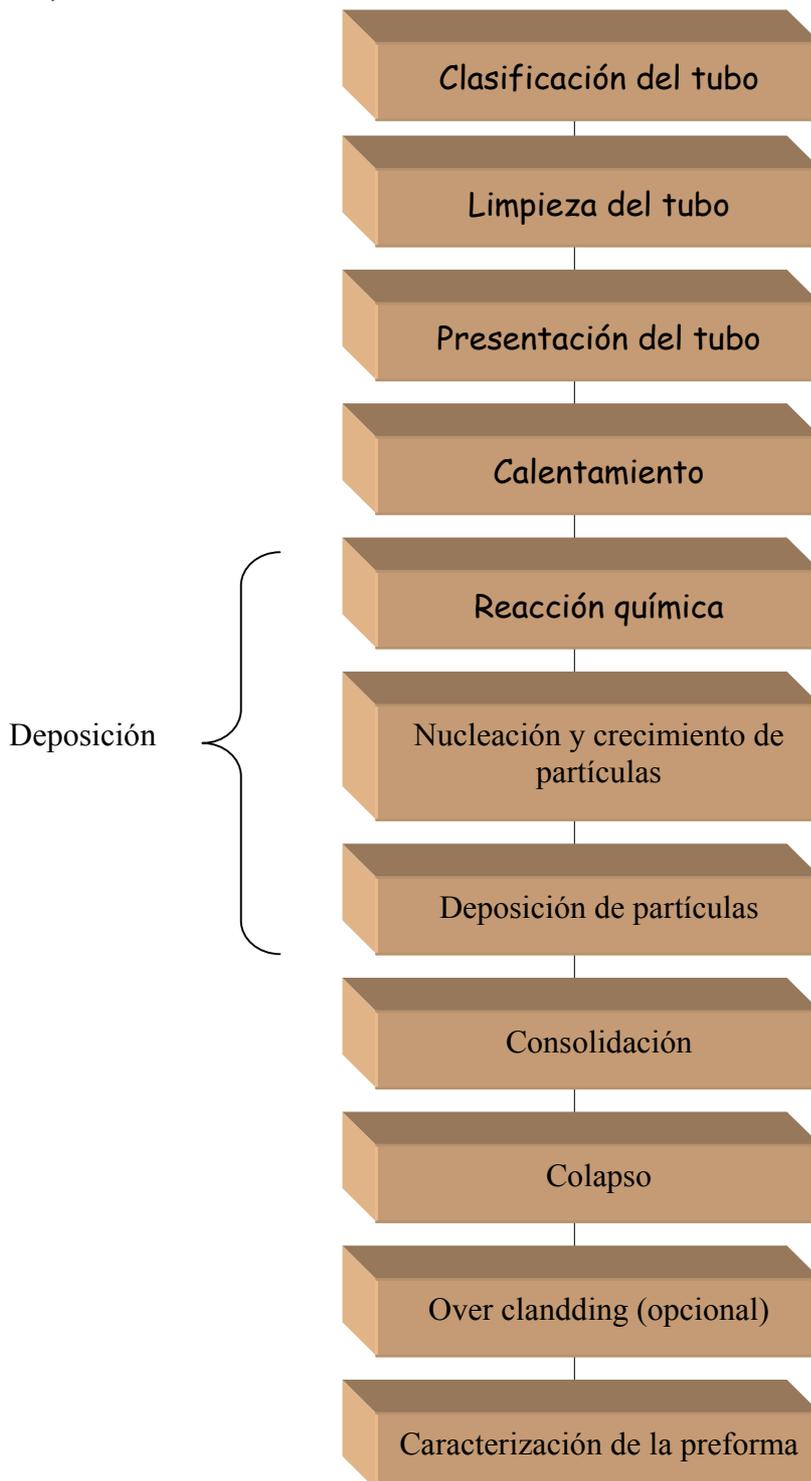
Fig. 7.6

El sistema de alimentación de gas es un subsistema crítico. Éste es el encargado de mezclar, controlar y monitorear el fluido de los constituyentes de alta pureza del caudal de gas. Tetracloruro de silicio y tetracloruro de germanio en estado líquido a temperatura ambiente, son contenidos en recipientes a través de los cuales fluye el gas transportador (carrier). Otros componentes, especialmente fluoruros, en estado gaseoso son agregados al flujo de gas desde cilindros presurizados. Todos estos componentes son ingresados al interior del tubo para reaccionar y realizar la deposición.

Equipos modernos operan bajo microcomputadoras para suministrar la cantidad requerida de cada uno de los componentes del gas, la velocidad del quemador y regular la temperatura del tubo.

El fluido residual que sale por el otro extremo del tubo, luego de haber reaccionado contiene una mezcla de gases y sólidos incluyendo  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$  y  $\text{GeCl}_4$  que no reaccionó. Existen equipos de regeneración para recuperar el germanio que no reaccionó para ser reutilizado.

En el siguiente cuadro se muestran todas las operaciones que se realizan en este proceso de fabricación de la preforma.



**Clasificación del tubo:** El tubo es medido en todas sus dimensiones, sus extremos, ovalidad, etc.

**Limpieza del tubo:** El tubo, generalmente, es sometido a un proceso de desengrase y a una lluvia ácida para removerle cualquier impureza o vestigio que se encuentre incrustado en la superficie.

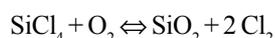
**Presentación del tubo:** el tubo es ajustado y alineado precisamente en el sujetador de la bancada donde va a ser trabajado. Es necesario tener gran cuidado en esta tarea y asegurarse que el tubo quede libre de estrés utilizando una articulación. La conexión con el sistema de alimentación de gas debe ser ajustada fuertemente para evitar escapes.

**Calentamiento:** Esta etapa consiste en hacer correr el quemador a lo largo del tubo calentándolo hasta una temperatura de 2000°C. El quemador es monitoreado por una computadora que recoge datos de distintos sensores y regula la temperatura con un error de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Este baño de calor sirve para homogeneizar la preforma y eliminar el resto de las impurezas que hayan quedado en el tubo.

**Deposición:** una vez acondicionado el tubo, el programa de deposición puede empezar. Primero, es necesario que el tubo se encuentre calentado. Luego pequeñas capas de sílice pura de 10 a 15 mm son depositadas en el interior del tubo. Estas capas previenen la fuga de OH desde el tubo substrato hasta la parte central de la futura fibra, donde causarían grandes aumentos de pérdida.

Este proceso desde un punto de vista físico-químico incluye varias reacciones, las cuales se pasarán a describir en detalle.

La reacción de oxidación



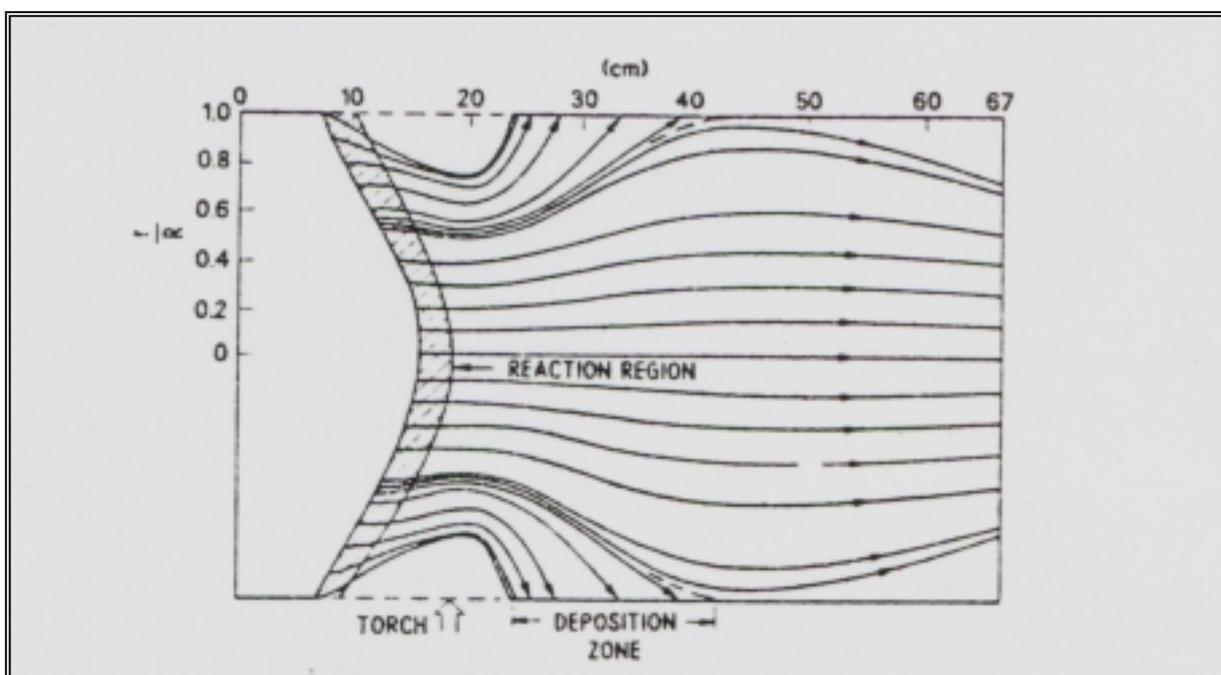
Comienza entre los 1000 y 1300°C hasta los 1500°C donde todo el  $\text{SiCl}_4$  es oxidado a  $\text{SiO}_2$ . El  $\text{GeCl}_4$  solo reacciona parcialmente para formar  $\text{GeO}_2$  arriba de 1550°C. Pero a temperaturas más altas, la alta presión del  $\text{Cl}_2$  resultante de la oxidación del  $\text{SiCl}_4$  evita la formación de  $\text{GeO}_2$ .

El problema es encontrar una temperatura exterior del tubo consistente con una distribución de temperatura interior del tubo para favorecer la oxidación, deposición y posterior sintetización. MCVD es operado, generalmente, a una temperatura exterior mayor a 1500°C. El valor exacto dependerá de la cantidad de dopantes y su composición.

La incorporación de iones OH en la preforma puede ser evitada en este paso del proceso por:

- 1- exceso de  $\text{Cl}_2$  que captura el  $\text{H}_2$  presente transformándose en HCl
- 2- cuidadosa purificación de las materias primas
- 3- disminución de la presión parcial del  $\text{O}_2$  agregando Ag o He como "buffer" o disminuyendo el exceso de  $\text{O}_2$ .

El mecanismo de deposición de partículas en MCVD es llamado termoforesis: una partícula suspendida en un gradiente de temperatura experimenta una fuerza neta en dirección a donde la temperatura disminuye. En la **figura 7.7** se muestra las típicas trayectorias de una partícula. La eficiencia de la deposición es:



$$\varepsilon = 0.8 [1 - (T_e/T_{rxn})]$$

Donde:

$T_e$  = la temperatura de equilibrio a la cual el gas y la pared del tubo equilibran en dirección a la zona caliente

$T_{rxn}$  = temperatura a la cual ocurre la reacción química.

El valor de  $T_e$  es un importante parámetro del proceso que dependerá del largo de la trayectoria del quemador, la velocidad, la temperatura ambiente y del espesor de la pared del tubo.

La deposición no puede ser arbitrariamente incrementada aumentando la tasa del gas ya que, posiblemente, existan regiones del tubo donde no se ha alcanzado la  $T_{rxn}$ . Para evitar esta situación se puede:

- 1- Utilizar una baja tasa de flujo de gas
- 2- Agregar He al flujo de gas para aumentar la difusión térmica
- 3- Operar a altas temperaturas

El control de la  $T_e$  es muy importante para minimizar deposiciones que se vayan angostando en función de la longitud. En ningún caso se pueden evitar completamente este tipo de deposiciones en las puntas del tubo y su largo es de alrededor de los 15 cm, puede ser disminuido agregando He en el flujo de gas y agua como refrigerante en el exterior del tubo. Las secciones que hayan sufrido un angostamiento en la deposición son residuos o scrap.

**Consolidación:** luego de finalizar la deposición es necesario realizar la consolidación mediante el sintetizado. En MCVD, este paso se realiza simultáneamente luego de la deposición por el barrido del quemador a lo largo del tubo. Se debe tener mucha precaución ya que una mala consolidación (o un exceso en la temperatura de deposición) provocaría burbujas en la fibra de vidrio. Generalmente, la temperatura de este proceso varía entre 1500 – 1800 °C.

**Colapso:** la fase de colapso sirve para dar lugar a un cilindro macizo de vidrio de aproximadamente 1 cm de diámetro a partir del tubo consolidado. En MCVD, el proceso de consolidación de la preforma puede ser dejado de lado y realizar el proceso de colapsado en la misma bancada (o no). Dejando pasar el quemador unas seis veces a lo largo de la preforma es suficiente para colapsarla. La temperatura de colapso es entre 1900-2100°C.

Un problema inherente a este proceso es la volatilización del GeO ( $\text{GeO}_2 + \text{PGeO}(-) + \frac{1}{2} \text{O}_2$ ) de la superficie interna de la preforma, al colapsarse. Esto puede causar una falla caída en el perfil del índice de refracción de la futura fibra. Pueden tomarse medidas para controlar este fenómeno como controlar el volumen de  $\text{GeCl}_4$  para compensar  $\text{GeO}_2$  quemado.

Las condiciones para realizar el colapso fueron determinadas mediante hechos empíricos.

**Overcladding:** Este proceso es opcional y sirve para agregar material adicional de revestimiento de menor calidad o para ajustar la relación núcleo/revestimiento.

Un tubo de silicio es calzado sobre la preforma colapsada y se funde sobre ésta. Éste proceso también tiene lugar en una bancada donde se lo hace girar y se utiliza la misma fuente de calor que en los procesos anteriores. La temperatura necesaria para fundir el sobrerrevestimiento sobre la preforma es del orden de 1900-2100°C.

La ventaja de este proceso es que pueden trabajarse preformas de paredes más delgadas para controlar más eficientemente el proceso de deposición y luego agregar revestimiento adicional para alcanzar la relación núcleo/revestimiento deseada.

**Caracterización de la preforma:** las dimensiones de la preforma finalmente procesada son registradas y documentadas. Es chequeada y revisada cuidadosamente bajo procedimientos de control de calidad para detectar alguna posible imperfección que causaría un incremento de las pérdidas de la futura fibra óptica. Es manipulada con mucho cuidado, utilizando guantes de protección y almacenada en depósitos acondicionados especialmente protegiéndola de la suciedad.

En la **figura 7.8** se esquematiza este proceso de fabricación de preformas.

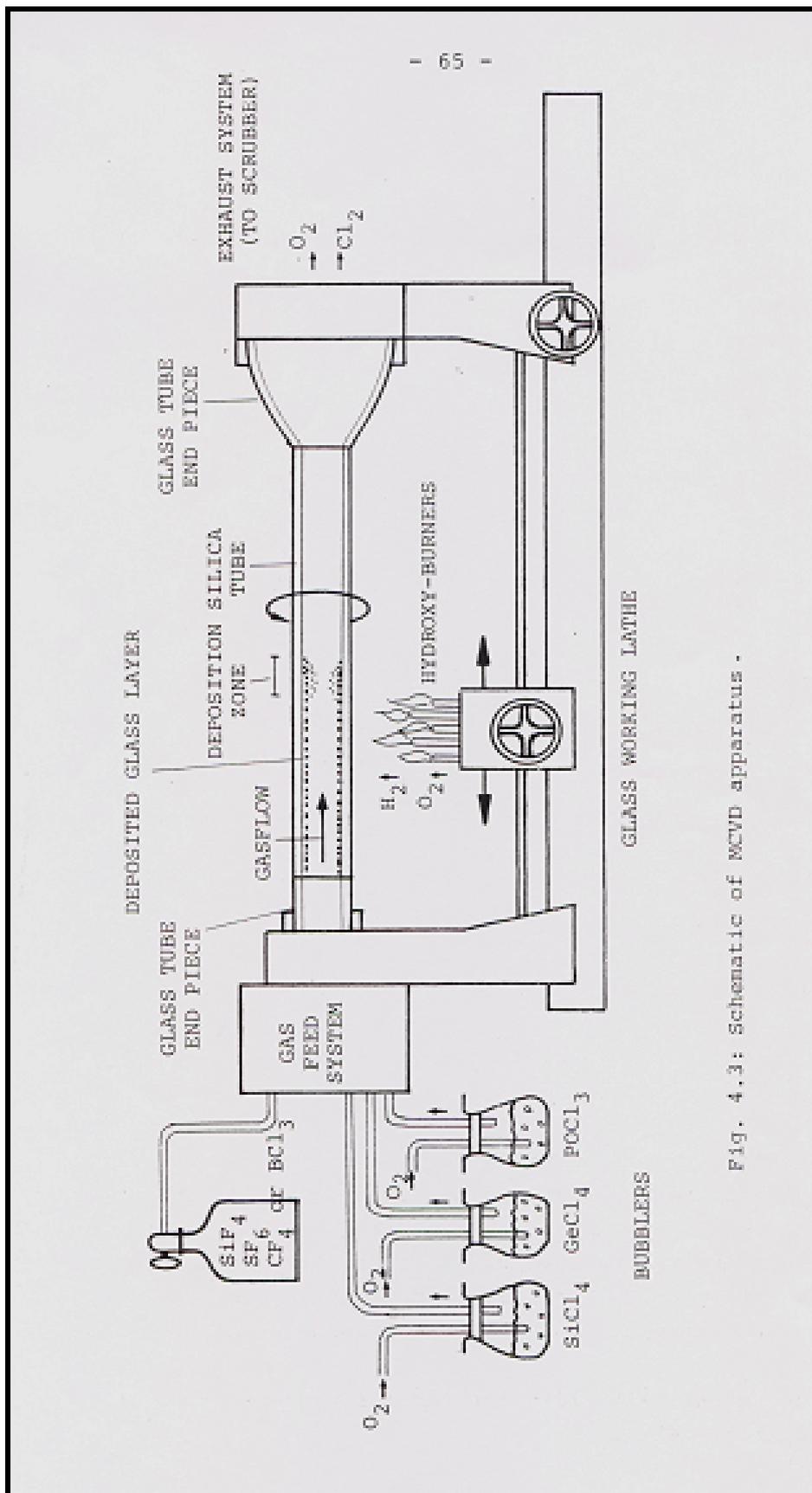
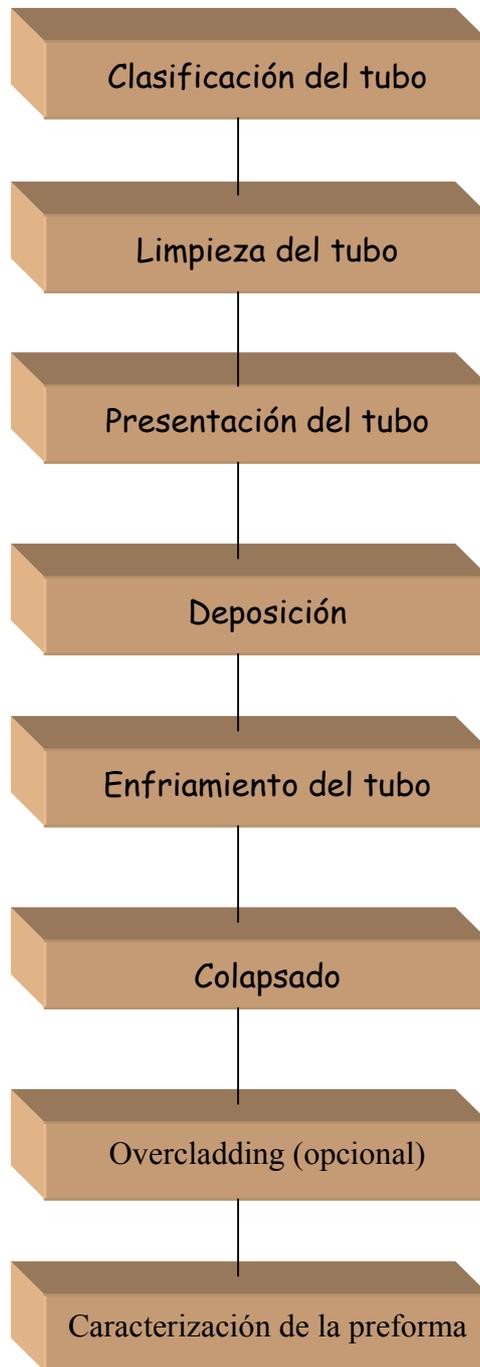


Fig. 4.3: Schematic of MCVD apparatus .

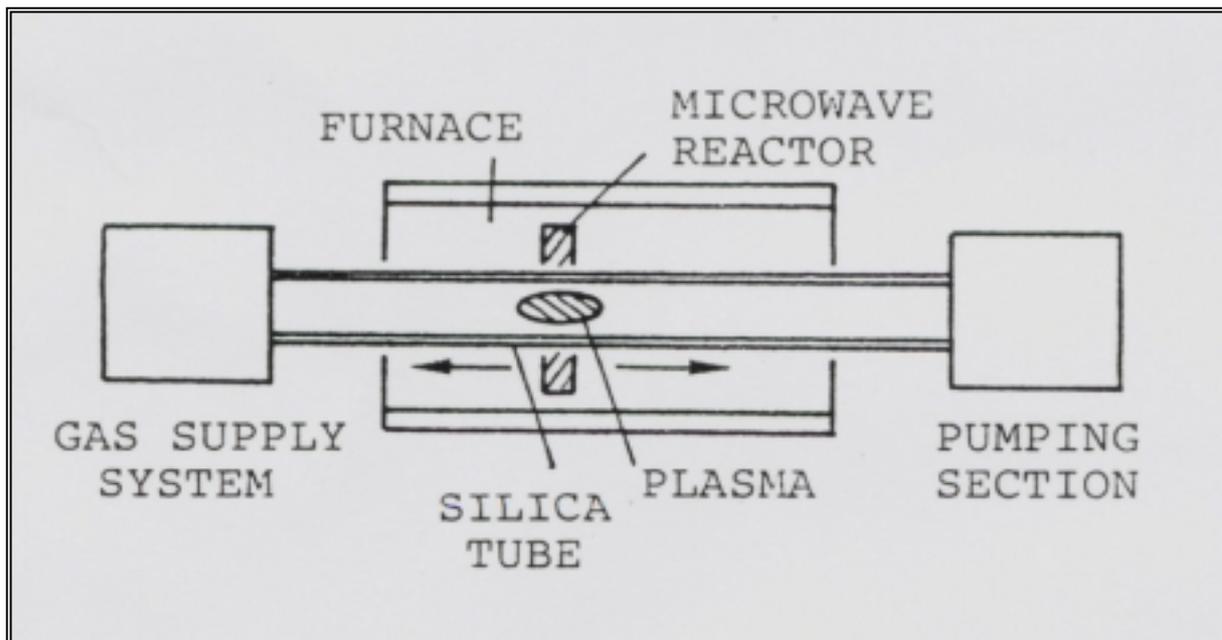
**PCVD (Deposición de vapor químico mediante plasma a baja presión)**

Este proceso fue implementado por Philips (1976). Los principales pasos de este proceso son ilustrados en el siguiente esquema.



Los pasos de “Clasificación”, “Limpieza”, “Presentación”, “Calentamiento” y “Colapsado” son los mismos descriptos en el proceso anterior. La diferencia principal, y ventaja, de este método comparado con el MCVD es que un “no isothermal plasma” inicia una reacción heterogénea en la pared interior del tubo. Gracias a este plasma se evita la formación de “soot” porque se trabaja con temperaturas más bajas. PCVD es un proceso de “baja temperatura”. La eficiencia de la deposición del  $\text{SiO}_2$  es casi 100% y la del  $\text{GeO}_2$  85%.

La **figura 7.9** muestra un esquema de este proceso.



El horno calienta el sustrato que gira en su interior a 1200°C. Un resonador de microondas alrededor del tubo transfiere energía electromagnética en el orden de 1 KW en el interior del tubo, donde a baja presión (1 a 4 KPa) el "no isothermal plasma" es formado. Una bomba provee el vacío necesario.

**Deposición:** La deposición del SiO<sub>2</sub> y GeO<sub>2</sub> ocurre de manera heterogénea (sólo sobre la pared interna del tubo) "upon initiation of the plasma". El resonador de microondas barre el tubo y capas muy finas (0,5 mm) sin depositadas en su paso.

La tasa de deposición es de 0,5 gr/min. Puede ser aumentada incrementando la energía de las microondas.

### OVPO (Deposición exterior de vapor mediante oxidación)

#### *Outside Vapor-Phase Oxidation.*

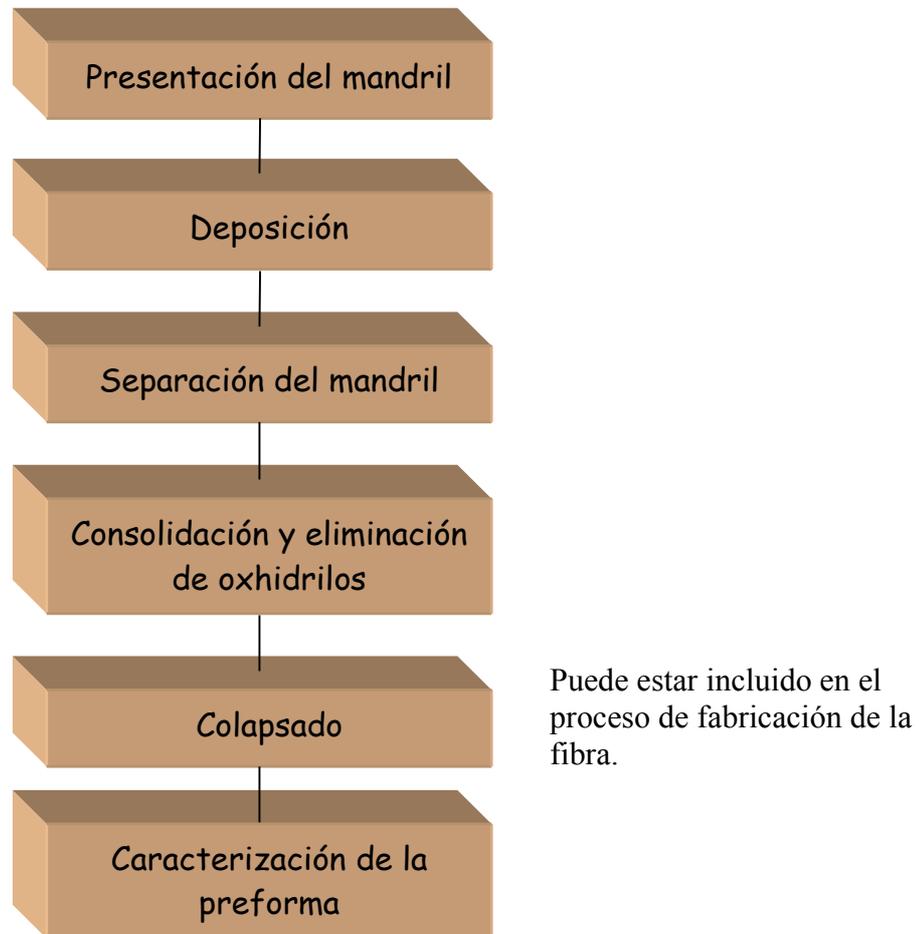
Este proceso fue creado por Corning Glass Works (1973). También es conocido como OVD, Outside Vapor Deposition.

Los pasos del siguiente proceso son ilustrados en el siguiente esquema.

La diferencia esencial de éste método en comparación con los dos explicados anteriormente es que el proceso de deposición de las finas partículas de sílice se realiza lateralmente en el exterior del tubo de vidrio, provocado por los reactantes que esta vez se encuentran mezclados con el gas del quemador.

Estas partículas, de 0,1 mm de diámetro, se pegan entre ellas formando una preforma porosa sobre un mandril giratorio. Una vez finalizada esta etapa, se retira el eje y se sinteriza esta preforma porosa convirtiéndose en una preforma de vidrio transparente lista para generar la fibra óptica.

**Caracterización del mandril:** una barra de grafito de aproximadamente 5 mm de diámetro y 1 m de largo aproximadamente sirve como mandril, girando sobre su propio eje sujetado a una bancada. Sobre éste se depositarán las finas partículas de vidrio para dar lugar al núcleo y revestimiento de la futura fibra óptica.



**Deposición:** los reactantes, generalmente  $\text{SiCl}_4$  y  $\text{GeCl}_4$ , se introduce en un quemador de gas-oxígeno o gas-Hidrógeno, cuya llama se desplaza lateralmente sobre un mandril que a su vez rota sobre su eje. En la llama se produce la reacción química de los reactantes con el oxígeno, dando lugar a unas finas partículas de sílice dopado que se depositan sobre el mandril giratorio. Estas partículas, en estado parcialmente sinterizadas, forman capas uniéndose mutuamente formando así el núcleo y revestimiento de la fibra cuando el rodillo es lateralmente recorrido por el quemador. La tasa de deposición en este caso es superior a 5 gr/min. con una eficiencia del 50%. Una gran cantidad de capas permiten un control muy preciso del perfil del índice de reflexión.

La composición de los reactantes cambia con cada una de las capas depositadas, lo que conduce al perfil de índice de refracción deseado tanto en el núcleo como en el revestimiento.

**Separación del mandril:** la preforma porosa obtenida es desvinculada del mandril con mucho cuidado de no dañarla. Este paso es crítico ya que puede incrementar las pérdidas en gran medida.

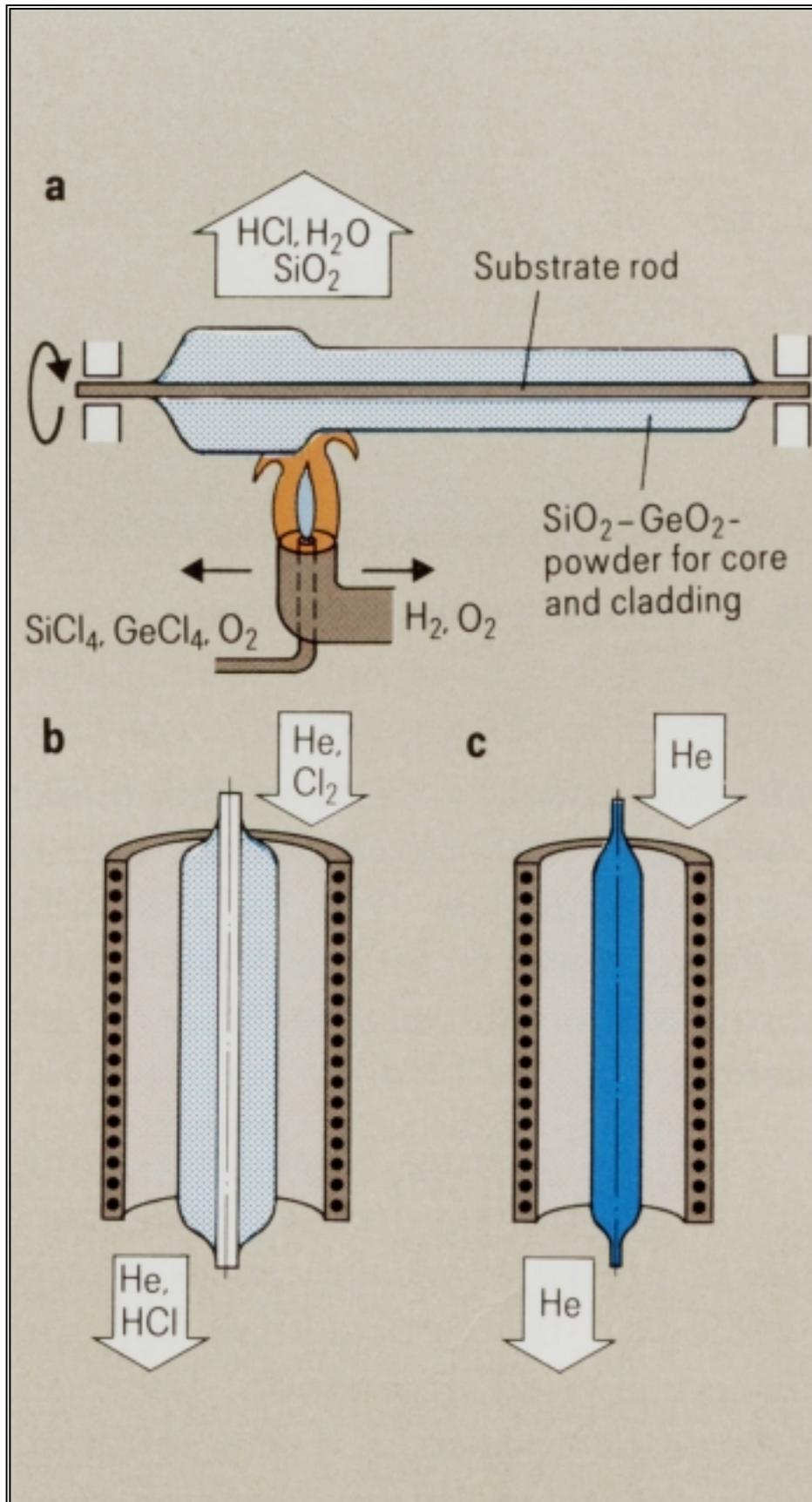
**Consolidación y eliminación de los oxhidrilos:** la preforma porosa es sujeta de un extremo e introducida, verticalmente, en un horno que se encuentra a unos  $1500^\circ\text{C}$ . Donde se produce la sinterización de la misma. La atmósfera del horno está compuesta por gas He con un bajo porcentaje de gas cloro. El helio asegura una preforma transparente, libre de burbujas y el cloro purga el vidrio eliminando los OH que pueda contener mediante la siguiente reacción:



Este tratamiento reduce el nivel de oxhidrilos desde 200 ppm hasta 0.1 ppm.

**Colapsado:** La preforma transparente obtenida como resultado de los pasos anteriores debe ser colapsada en otro horno a  $1800-2200^\circ\text{C}$ , dependiendo de la composición del vidrio, para eliminar el orificio del centro por el cual se encontraba el mandril. Alternativamente, este paso puede ser omitido y el agujero de la preforma es eliminado por calentamiento en el proceso de fabricación de la fibra propiamente dicho.

- En la **figura 7.10** se ilustran los principales pasos de este proceso, que incluyen:
- a) Proceso de deposición
  - b) Secado
  - c) Sinterizado



**VAD (Deposición axial de vapor)**

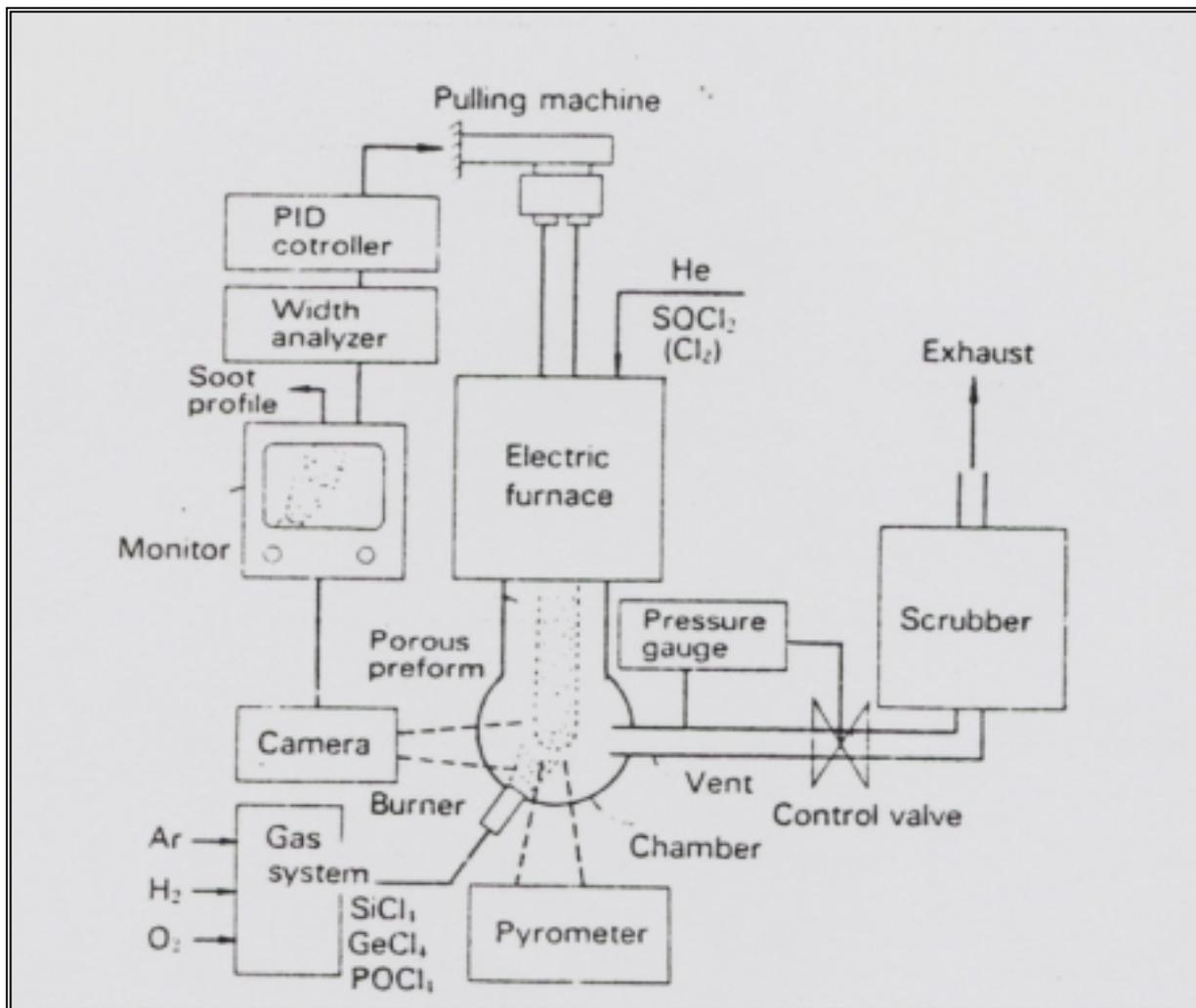
Este proceso fue desarrollado por Ibaraki Electrical Communications Laboratory (1977) y es utilizado por la mayoría de los productores de fibra japoneses (Sumitomo, Furukawa, Fujikura).

Se denomina VAD, deposición axial de vapor. De nuevo, los reactantes se inyectan en la llama de un quemador produciéndose, como en el método anterior, un chorro de finas partículas de sílice dopado de  $0.05\ \mu\text{m}$  a  $0,2\ \mu\text{m}$  que se depositan en el extremo de una preforma sustrato. La preforma crece en la dirección axial debido al movimiento de rotación y de elevación vertical que sufre el mandril acorde con este crecimiento, comprobándose su simetría circular y crecimiento uniforme. **Figura 7.11**

La preforma porosa, cuya densidad es de  $0,2 - 0,4\ \text{gr/cm}^3$ , debe ser consolidada para transformarse en una preforma transparente lista para someterse al estiramiento para formar la fibra óptica.

Los pasos de este proceso se ilustran en el siguiente esquema.





**Preparación de rodillo sustrato:** El rodillo sustrato, generalmente de sílice, es sujeto verticalmente sobre el equipo. El diámetro de éste coincide con el diámetro de la futura preforma consolidada.

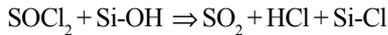
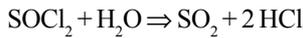
**Deposición:** Los quemadores contienen una mezcla de gases que está compuesta por  $O_2$ ,  $H_2$  y  $SiCl_4$ ,  $GeCl_4$  y  $POCl_3$ . Un gas inerte, Ar, fluyen entre el  $O_2$  y  $H_2$  para prevenir daños en los quemadores. Un consumo típico del gas de quemador utilizado comúnmente podría ser 7 l/min de  $O_2$ , 4 l/min de  $H_2$  y 1 l/min de Ar. Para la fabricación de fibras monomodo generalmente se utilizan 2 quemadores: uno para la deposición del núcleo y otro para la del revestimiento. Para las fibras multimodo un quemador es suficiente, pero varios quemadores aumentan la velocidad de deposición. Para realizar un perfil de índice de refracción específico es necesario tener control cuidadosamente los siguientes parámetros: la estructura de la llama del quemador, la posición, la temperatura de la flama, la distancia de la misma con respecto del rodillo, la relación  $H_2/O_2$ , la forma de la preforma, la calidad de la materia prima, la temperatura en la superficie de la preforma. Este último es monitoreado mediante un pirómetro determina la concentración de  $GeO_2$  y por lo tanto el perfil de índice de refracción. Mediante un mapeo bidireccional de la temperatura de la preforma (500-900C°) un dispositivo de control regula la composición del gas, el flujo y la velocidad de "pull" logrando un absoluto control automatizado de la producción de la preforma. Circuitos cerrados de TV y sensores láser He-Ne ayudan a controlar íntegramente el proceso.

Para prevenir una posible ovalación de la preforma el mecanismo encargado de ejercer el "pull" debe estar perfectamente calibrado.

**Deshidratación:** han sido identificadas cuatro fuentes de contaminación de la preforma a partir de OH: Impurezas de la materia prima tales como  $\text{SiHCl}_3$ ,  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  y  $\text{HCl}$ ; produciendo  $\text{Si-OH}$ .  
 Contaminación directa a partir de la llama  $\text{H}_2/\text{O}_2$  de los quemadores.  
 Contaminación durante el proceso de "jacketing", durante la elongación  
 Contaminación en el proceso de fabricación de la fibra, propiamente dicho.

Para poder eliminar los posibles contaminantes OH de la preforma es necesario realizar este proceso de deshidratación (**Fig.7.12**) En esta figura se muestra la cámara en la cual pueden realizarse el proceso de deshidratación y consolidación.

La deshidratación se logra, agregando  $\text{SOCl}_2$  mediante dos reacciones:



A una temperatura de  $900\text{-}1350^\circ\text{C}$ . El tiempo total de este proceso es de aproximadamente 90 minutos.

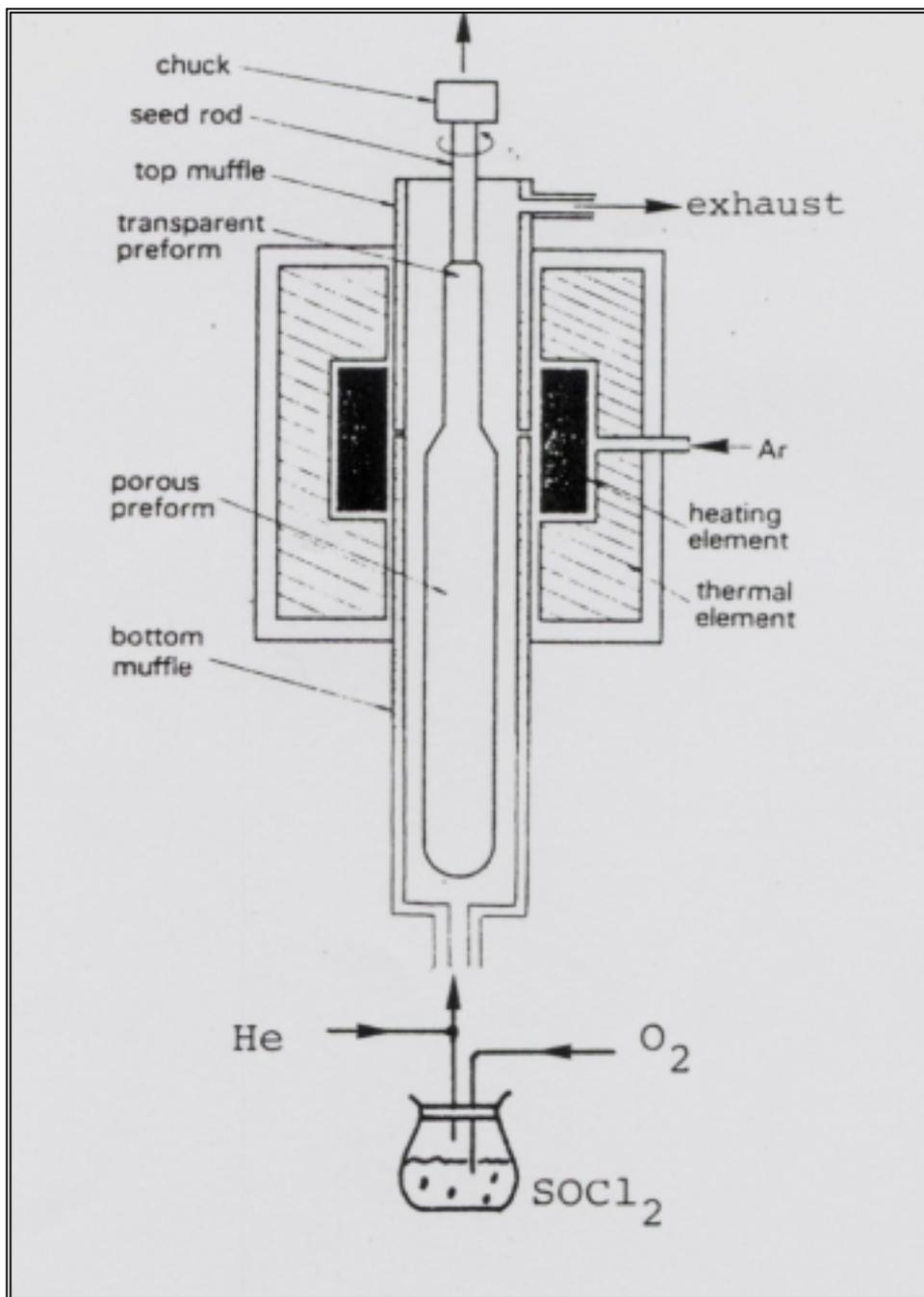
Una deshidratación lenta a baja temperatura ( $1150^\circ\text{C}$ ) es preferible antes que una rápida a alta temperatura. A alta temperatura los poros de la preforma comienzan a cerrarse, dando inicio a la consolidación, dejando atrapadas moléculas de OH.

Trabajando a bajas temperaturas es posible reducir el contenido de impurezas OH a menos de 0,1 ppm. El gas  $\text{SOCl}_2$  puede reemplazarse por  $\text{Cl}_2$ .

**Consolidación:** la preforma opaca y porosa se transforma en una homogénea y transparente mediante este proceso. Se reduce la preforma a 1/8 de su volumen original.

Como se indicó anteriormente, en la **figura 7.12** esta etapa puede realizarse en la misma cámara que la deshidratación.

Fig. 7.12



**Elongación:** una vez consolidada la preforma, cuyo diámetro exterior es ahora de 25 mm es elongada hasta que este sea aproximadamente de 10 mm. Este paso es necesario junto con el de overcladding, para ajustar precisamente la relación núcleo/revestimiento deseada.

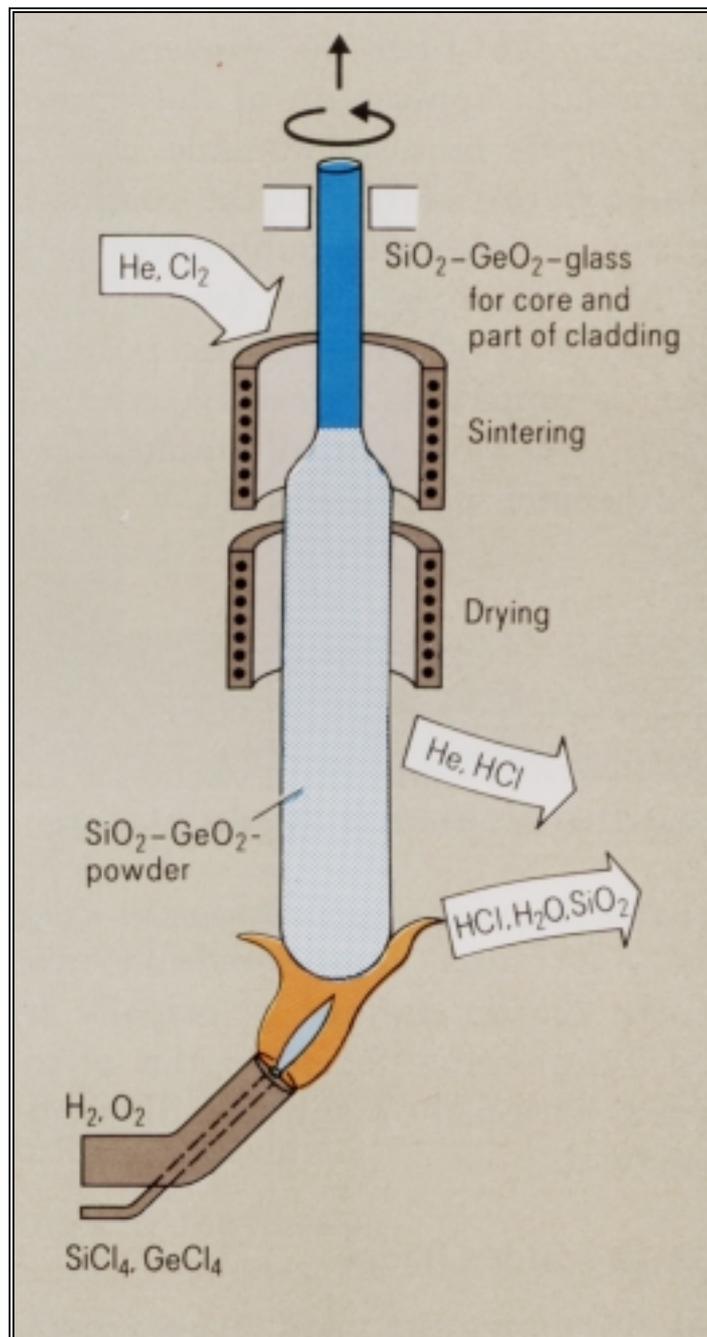
Las preformas de fibras de índice gradual pueden consistir solamente de material del núcleo, mientras que las preformas para fibras de modo simple tienen al menos una parte de material de revestimiento depositado. La elongación es lograda sobre un dispositivo donde la preforma es expuesta a la llama de unos quemadores que se mueven en dirección contraria a uno de los soportes de la bancada que se traslada a mayor velocidad.

Este paso puede ser omitido por otros procesos donde el revestimiento es sinterizado simultáneamente con la deposición del núcleo.

**Overcladding:** este paso, como fue descrito en el proceso MCVD, es usual en este tipo de proceso.

**Caracterización de la preforma:** Idem proceso MCVD.

En la **figura 7.13** se muestra otro esquema de este proceso de producción de preformas donde puede visualizarse como la llama es aplicada en la parte inferior del rodillo produciéndose la deposición de las partículas de dióxido de silicio dopado y el consecuente crecimiento horizontal de la preforma que luego será sometida al secado y posterior sinterizado.



### Tendencias de producción

En la producción de preformas para fibra óptica pueden ser observadas distintas tendencias para hacer más eficiente este proceso. Estas tendencias se ponen en evidencia mediante patentes y publicaciones científicas en revistas o congresos.

Existen rigurosos esfuerzos para incrementar la productividad:

- Incrementar la tasa de deposición
- Aumentar el tamaño de la preforma
- Aumentar el out put mejorando los procesos críticos
- Haciendo la fabricación de la preforma un proceso continuo
- Utilización de nuevos materiales más económicos que permitan realizar fibras de mejor calidad
- Mejorar el proceso de control

Otras investigaciones se están realizando referidas a:

- Reemplazo el P y B como dopantes. Debido a que el boro induce pérdidas y los grupos P-OH han sido identificados como los responsables del aumento gradual de la atenuación. Los fluoruros y  $Al_2O_3$  son mejores candidatos para ser utilizados como dopantes para disminuir e incrementar el índice de refracción respectivamente.
- Reducción del contenido de OH
- Reducción de la atenuación de la fibra a una longitud de onda de 1,55  $\mu m$
- Desarrollo de distintos métodos de fabricación de preformas (sol-gel process)

La velocidad de fabricación de la fibra mediante el estirado también es un factor limitante en el proceso de fabricación que merece ser estudiado.

### Comparación de las distintas técnicas descritas para la fabricación de preformas

Primeramente se procederá a enumerar las ventajas y desventajas de cada uno de los procesos. Luego se realizará una comparación entre los mismos.

#### MCVD

##### *Ventajas*

- Deposición interior. Con lo cual se logra una baja contaminación
- Flexible / versátil

##### *Limitaciones*

- Proceso discontinuo
- Requiere un tubo sustrato de muy alta calidad
- Baja eficiencia de deposición de  $GeO_2$  (10-20%)
- Existen variaciones en el perfil del índice de refracción
- Tamaño de preforma limitado
- Es necesario un tubo de sílice

Este proceso a tenido una amplia expansión alrededor de todo el mundo y es probablemente el método más sencillo para realizar preformas.

Dependiendo de los requisitos de calidad, el 10 a 50 % de las preforma no es utilizado para la fabricación de la fibra, debido al problema de disminución del perfil de índice de refracción. Únicamente las versiones de alta tasa de deposición de este proceso son apropiadas para fabricar fibras de modo simple.

#### PCVD

##### *Ventajas*

- Baja temperatura de deposición
- Deposición interior
- Alta eficiencia de deposición
- Buen control de temperatura
- Buen control de dimensional

##### *Limitaciones*

- Proceso discontinuo
  - Tasa de deposición limitada
  - Incorporación de hidrógeno
  - Tamaño de preformas limitado
  - Es necesario un tubo de sílice
- Los parámetros de este proceso son fácilmente controlables.

**OVPO**

*Ventajas*

- Buen control del perfil
- No es necesario el colapsado, pero agrega complejidad al proceso de estiramiento de la fibra.
- Gran tolerancia de contaminación de hidrógeno en las materias primas
- No es necesario un tubo de sílice
- Buen control dimensional (tolerancias, excentricidad, ovalación)
- Alta tasa de deposición
- Pueden lograrse preformas más largas

*Limitaciones*

- La fabricación con un agujero central requiere mayor control de la atmósfera
  - Limitación en la apertura numérica de la fibra
  - El control de la deposición es complejo
- La fabricación de fibras multimodo bajo este proceso tiene un problema específico que es la fractura de la preforma debido a un shock térmico.

**VAD**

*Ventajas*

- Posible proceso continuo
- Bajos niveles de OH alcanzados
- Amplia tolerancia de contaminación por hidrogeno en materias primas
- Permite la fabricación de preformas largas
- No es necesario el proceso de colapsado
- No se necesita un tubo de sílice
- Alta tasa de deposición

*Limitaciones*

- El control del índice de refracción es crítico y complejo
  - Variación de la densidad de las partículas de sílice
  - Dificultad en la dopación con fluoruro
- En cualquiera de estas técnicas, las impurezas de iones de metales de transición no son problema generalmente.
- Para lograr buenos resultados es necesario un control sobre la temperatura, con un error de  $\pm 2$  °C., al igual que un preciso control del flujo de gas.
- En el siguiente cuadro se realiza una comparación de todos los métodos de deposición de vapor de sílice teniendo en cuenta el número de capas depositadas, la tasa de deposición, la eficiencia de deposición de SiO<sub>2</sub> y GeO<sub>2</sub> y tiempo de fabricación.

	MCVD	PCVD	OVPO	VAD
Nº de capas	30 - 100	500 – 1000	1000	N/A
Tasas de deposición. (1)	0,5 – 1 g/min (2,3 g/min)	0,5 g/min (1,3 g/min)	1-4 g/min (6 g/min)	1-4 g/min
Eficiencia de la deposición de SiO <sub>2</sub>	40 – 70 %	Casi 100 %	50 %	60 – 80 %
Eficiencia de la deposición de GeO <sub>2</sub>	10 – 20 %	70 – 90 %		
Tiempo de fabricación de la preforma. (2)	7 Hs/15 Kg de preforma	4 Hs/8 Kg de preforma		6 Hs/10 Kg de preforma

- 1) Las tasas expresadas entre paréntesis son alcanzadas mediante mejoras en el proceso.
- 2) El tiempo es para lograr fibras de 50/125 mm

### Proceso Sol-Gel de fabricación de preformas

Este es un método totalmente distinto a los exhibidos con anterioridad.

Está compuesto por los siguientes pasos:

1. Hidrólisis: **de metales “alkóxidos”, para crear un gel en presencia de agua y un solvente.** Ej: Si  $(\text{OCH}_3)_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{metanol}$  en la siguiente proporción molar 1:4:4,5
2. Secado del gel: **para formar un gel con cuerpo poroso (densidad = 1,1 g/cm<sup>3</sup>), durante 1 semana a 70°C.**
3. Cloración: **para reducir el alto contenido de OH (1000 p.p.m.)**
4. Sinterizado: **el gel de cuerpo poroso es sometido a un proceso de sinterizado para lograr una preforma transparente de vidrio.**

Esta última etapa es realizada a 1100 °C bajo una atmósfera de He, para formar un vidrio sin poros, completamente homogéneo.

Las principales ventajas de este método son:

- Baja temperatura
- Producción en masa

Este proceso todavía no ha sido difundido a niveles industriales, solo ha sido utilizado en laboratorios.

### Fabricación de la fibra

Las preformas fabricadas por cualquiera de los métodos mencionados son ahora estiradas hasta formar la fibra. Pero antes de someterla al proceso de estirado es necesario exponerla a la llama de un quemador a 1700-1900 °C. para eliminar cualquier impureza que se halle incrustada en la superficie de la preforma.

El siguiente paso es el estirado de la fibra. La preforma se coloca en un horno de elevada temperatura donde su extremo se calienta hasta 2.100 °C. Un sistema de estirado y arrastre se encarga del movimiento, de la manera que la fibra estirada mantenga un diámetro exterior de 125-140 mm. Durante este proceso los vidrios del núcleo y del revestimiento mantienen sus relaciones geométricas, a pesar de la reducción de diámetro que en algunos casos puede ser tan alta como 300 a 1. La relación núcleo a revestimiento y el perfil de índice de refracción del núcleo en la preforma se reproducen perfectamente en la fibra.

El proceso de estirado se lleva a cabo mediante las siguientes operaciones, todas ellas deben ser cuidadosamente controladas:

- calentamiento de la preforma
- estirado del vidrio fundido
- monitoreo y control del diámetro de la fibra
- aplicación del recubrimiento
- monitoreo y control del espesor y concentricidad del recubrimiento
- solidificación del recubrimiento
- arrastre y posteriormente bobinado.

Fuente de calor: la fuente de calor debe ser capaz de alcanzar 2200°C con un error de  $\pm 2$  °C para fundir o derretir la preforma de sílice. La temperatura es monitoreada por un pirómetro cuya señal de salida es utilizada para controlar el calor del horno.

Existen dos tipos de hornos utilizados generalmente para realizar este proceso.

Horno de inducción de zirconia, en el cual no es necesario un gas protector, pero la cámara de calor debe estar relativamente ajustada a la entrada y salida de la preforma de la fibra, para proveer una atmósfera continua y homogénea, libre de gases.

Las otras clases de cámaras de calor comúnmente utilizadas son de grafito; calentamiento directo. Estas cámaras de calor son más baratas que las anteriores pero la fuente de calor debe ser cambiada periódicamente. El problema no es el precio del elemento sino la necesidad de interrumpir el proceso, desconectando el equipo para cambiarle las piezas necesarias.

En todos los casos, la construcción debe asegurar que ninguna impureza, prácticamente, o vapores de los materiales de la cámara de calor pueda adherirse a la fibra. Argón o Nitrógeno es usualmente aplicado para prevenir que los materiales de la cámara se quemen.

### Condiciones de limpieza

Las impurezas fusionadas en la fibra, antes de aplicar el recubrimiento, disminuyen notablemente la resistencia de la fibra. Con lo cual es fundamental operar dentro de ambientes cuidadosamente tratados.

Algunas fábricas encuentran beneficioso para la fabricación de la fibra, proveer de una sala o habitación con una atmósfera limpia a las preformas.

La ubicación o posición crítica se extiende desde la parte inferior de la cámara de calor (donde la temperatura de la fibra es de 1600°C) hacia el primer contenedor del recubrimiento (temperatura de la fibra de 60 – 80 °C). Dependiendo de la velocidad de estiramiento (1 – 5 m/seg) esta distancia, donde la fibra es expuesta a un ambiente de aire, es de 0,8 a 4 m de longitud.

En general la atmósfera de las salas donde las fibras son moldeadas o estiradas son cuidadosamente controladas.

### Monitoreo del diámetro de la fibra

El diámetro de la fibra es monitoreado por un láser de He-Ne. Un servo mecanismo es dirigido u operado por la señal procesada del láser que controla también la precisión del mecanismo de alimentación de la preforma y la velocidad de enrollamiento de la fibra estirada. Esta parte del sistema provee un control dimensional de la fibra.

### Recubrimiento

Para proteger la vulnerable fibra de vidrio y para preservar su resistencia inherente, un primer recubrimiento es aplicado justo después de su estiramiento. Este paso es descrito en detalle en la siguiente sección.

### Enrollamiento de la fibra

Una especie de roldana de 30 cm, aproximadamente, provee la suficiente tensión para extraer la fibra.

Los valores típicos de tensión son 20 – 50 grs. una rueda opcional y giratoria se utiliza para mantener la tensión constante. Entonces la fibra es colocada en un tambor de metal o plástico aproximadamente de 20 – 40 cm de diámetro.

### Recubrimiento

Dos importantes propiedades de la fibra son influenciadas por los pasos de recubrimiento:

- resistencia de la fibra
- pérdidas por microcurvatura

Las posibles fallas en la fibra de vidrio usualmente resultan de las roturas o imperfecciones de la superficie o por estrés. Por lo tanto la fibra debe ser recubierta lo más temprano posible en la fase de estiramiento.

Los recubrimientos también dan resistencia adicional a la fibra eliminando parte del estrés.

El exceso de las pérdidas de la fibra es a veces asociado a técnicas de recubrimiento inapropiadas.

Para evitar grumos y burbujas de aire en el recubrimiento, e incluso secciones sin recubrir:

- la viscosidad del material líquido del recubrimiento debe ser optimizada
- la forma del contenedor del recubrimiento debe ser optimizada
- materiales libres de impurezas deben ser utilizados
- una atmósfera libre de impurezas mediante el estiramiento debe ser mantenida
- debe evitarse la cura prematura del material de recubrimiento

### El recubrimiento es el factor restrictivo de la velocidad de estiramiento

Primero, la fibra debe ser dejada en reposo a una cierta temperatura antes de estar lista para ser recubierta. Segundo, la velocidad de la fibra a través del proceso de recubrimiento o su acabado debe ser suficientemente baja para asegurar la humedad apropiada. Tercero, el recubrimiento debe curar.

En vez de aplicar el recubrimiento en una sola capa, varios recubrimientos por capas, cada uno curado separadamente; facilita un gran incremento de la velocidad de estiramiento.

La ya previamente mencionada distancia entre la cámara de calor y el acabado del recubrimiento determina la altura de la torre de estirado. Han sido construidas torres de hasta 17 m de altura, pero desarrollos de investigación posteriores permitieron el diseño de torres más pequeñas donde la fibra se desplaza sobre varios rodillos entre numerosas operaciones de recubrimiento.

Dos diferentes sistemas de recubrimiento son los más utilizados hoy en día. El primero, consiste en depositar un blando recubrimiento que disminuye el estrés posibilitando bajas pérdidas por microcurvaturas (recubrimiento primario). Acabados presurizados han facilitado considerablemente el proceso de recubrimiento y a partir de éste la velocidad de estirado aumenta. Un primer recubrimiento es usualmente aplicado en 2 capas: una de una silicona mejorada sobre la fibra y otra de una silicona no tan crítica. Debido a una baja resistencia a la abrasión es necesario la aplicación adicional de un recubrimiento duro, usualmente nylon. Este cobertor, a veces llamado recubrimiento secundario, se adapta ajustadamente al recubrimiento anterior y tiene un diámetro de 0,8 a 1,0 mm.

El otro sistema aplica una o dos capas de acrílico. Lámparas UV de alta potencia curan el o los acrílicos apenas estirada la fibra. AT & T Bell Laboratories ha alcanzado velocidades de estiramiento de hasta 12 m/s en una torre de estirado experimental, pero lo estándar son velocidades mucho menores.

Como el vidrio es sensible a los rayos UV; el máximo poder UV utilizable es limitado. Dicha fibra es usualmente protegida contra la influencia externa por un tubo de plástico hueco o bien es colocada en cavidades de un plástico cilíndrico que forma parte del cable óptico.

En la siguiente tabla se brinda un resumen de los detalles técnicos de los sistemas de recubrimiento. La elección de cualquiera de los dos sistemas parece ser más bien una cuestión de creencia o costumbre más que de superioridad.

<b>Materiales</b>	“Silicone rubber” (poly-dimethyl siloxane, polymethyl-phenyl-siloxane)	«acrylate» (uretane acrylate, epoxy-acrylate, polymers, methyl-butadien-acrylate)
<b>Curado</b>	Por calor	Por radiación UV
<b>Velocidad del proceso de aplicación del recubrimiento “coating”</b>	1 - 2m/s (5m/s)	1 - 5 m/s (12 m/s)
<b>Diámetro del recubrimiento</b>	0,25 – 0,4 mm	0,25 – 0,5 mm

Los valores de velocidad que se encuentran entre paréntesis corresponden a resultados alcanzados en laboratorios.

### Fibras de silicio con recubrimiento plástico

Las fibras PCS (fibras de vidrio con revestimiento plástico). El núcleo de estas fibras tiene un índice refractario uniforme. El revestimiento está constituido por un polímero de bajas pérdidas con un bajo índice de refracción.

La material prima para producir este tipo de fibras, generalmente es un rodillo de sílice de alta pureza el cual determina el bajo límite de pérdidas. El cuarzo natural es la opción más popular. Fósforo y boro pueden ser agregados para disminuir la temperatura de fusión del rodillo.

Este rodillo es sometido a la llama de un quemador para eliminar las impurezas incrustadas en su superficie, que será la interface entre el núcleo y el revestimiento. Luego la fibra es estirada de la misma forma que se explico anteriormente. El recubrimiento protector es perfectamente aplicado por los métodos de la sección anterior; el cual requiere un líquido que cure como material de recubrimiento. En general se utilizan dos capas de revestimiento: en primer lugar una capa delgada y suave y una segunda más rígida; mezclada con el líquido cobertor que acelera el proceso de curación y por lo tanto de fabricación de la fibra. Es necesario lograr una exacta composición de los materiales de revestimiento. Entre los más utilizados podemos nombrar:

- resinas siliconadas
- polialcanos, parcialmente fluorizados
- polimetacrilicos
- perfluorato etílico prolífico

La selección de un apropiado revestimiento es guiado por las siguientes consideraciones:

- bajas pérdidas ópticas
- disponibilidad de materiales de alta pureza
- adhesión a la sílice
- resistencia
- facilidad y practicidad en el proceso de revestimiento

Otros métodos alternativos para realizar el revestimiento incluyen el extrudado de un polímero fundido. Pero este proceso es muy difícil de controlar, con lo cual no es muy utilizado hoy en día.

### Estiramiento a partir de vidrio fundido

En este método denominado “de doble crisol” para la fabricación de las fibras, el vidrio del núcleo se coloca en el interior del crisol, que tiene un agujero en el fondo, y el material necesario para el revestimiento se coloca en otro crisol, que también posee un agujero concéntrico con el agujero del crisol interior. Cuando el vidrio interior comienza a fluir, el vidrio del revestimiento inicia también el fluido envolviendo y fundiéndose al vidrio del núcleo. Luego del estirado, la fibra es enrollada en tambores.

Para poder realizar fibras bajo este proceso se necesitan materias primas de alta pureza.

Esto exige que durante la preparación se realice un muestreo para asegurar que únicamente se utilizan materiales de alta pureza.

Los polvos que se utilizan para formar el vidrio ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ) son previamente mezclados y calentados en un crisol hasta que se funden y luego se revuelven. En la tabla siguiente se ilustran la composición y performance de las fibras realizadas bajo este método.

Material del núcleo	Material del revestimiento	Apertura numérica	Pérdidas
$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	0,18	3,4
$\text{Na}_2\text{O-Li}_2\text{O-CaO-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-Li}_2\text{O-CaO-SiO}_2$	0,23	4,2
$\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-CaO-SiO}_2$	0,26	5,2
$\text{P}_2\text{O}_5\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	0,3	8,5
$\text{Ti}_2\text{O-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2\text{-BaO-CaO-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	0,3	12
$\text{Na}_2\text{O-BaO-GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	0,32	7,2
$\text{Na}_2\text{O-BaO-GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	0,43	9,8
$\text{Na}_2\text{O-BaO-GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	0,50	12
$\text{Na}_2\text{O-BaO-GeO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	0,6	15
$\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-GeO}_2$	-	0,53	20

El calor necesario para fundir los elementos que componen la fibra, es suministrado directamente a la mezcla a través de un horno eléctrico o utilizando potencia de radio frecuencia (100 KHz). Es interesante el empleo de radio frecuencia para fundir los materiales que componen las fibras ópticas. La conductividad eléctrica del gas del vidrio, cuando esta en estado líquido, es lo suficientemente alta como para que la potencia de RF se acople en el material y lo caliente.

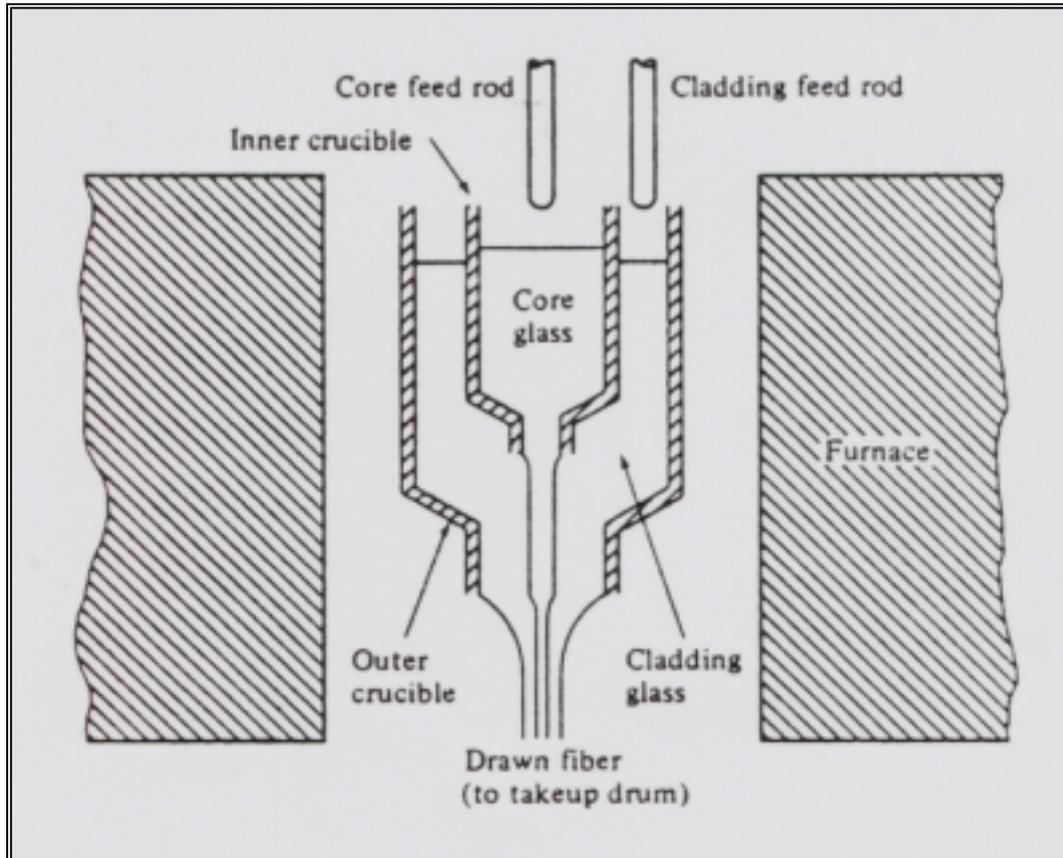
La fusión generalmente se realiza en un crisol de platino, entre 800 y 1500 °C, dependiendo de los materiales que se utilicen. También existen otros tipos de crisoles de silicio, que son más baratos, estos solamente pueden utilizarse una sola vez, porque los componentes del vidrio disuelven el silicio.

Luego del calentamiento inicial, el material fundido debe ser revuelto para su homogeneización por medio de unas paletas especiales o "stirrer" de platino o cerámica y sometido al paso de un chorro de gas. Aditivos tales como óxidos de arsénico y antimonio controlan las impurezas a través de procesos redox.

En este método de fabricación se efectúa el estirado simultáneo de dos vidrios que conforman el núcleo y el revestimiento.

Como ya se menciona anteriormente, la fusión de los vidrios se realiza en un crisol de platino de paredes dobles. Este crisol posee una boquilla doble en su parte inferior concéntricamente alineada que por variación de su apertura permite regular el diámetro de la fibra y el espesor de su revestimiento.

En la figura 7.14 se esquematiza este proceso de fabricación, donde se puede apreciar el crisol doble y los demás componentes.



Las ventajas de este proceso son la simplicidad para producir la fibra, proceso semicontinuo, y el bajo punto de fusión del vidrio utilizado.

Las desventajas resultan del hecho de que la contaminación es más difícil de controlar. Las materias primas deben ya tener el grado final de pureza. Materiales altamente refractarios y de alto costo como el platino deben ser utilizados. La atmósfera que rodea al doble crisol debe ser cuidadosamente controlada. Existen también dificultades para lograr una mezcla 100% homogénea debido a que la mezcla se calienta ligeramente más en algunos puntos del crisol que en otros, tendiendo a formarse corrientes de convección. Esto hace que se formen burbujas difíciles de detectar y eliminar.

Finalmente el control de la difusión y la uniformidad a lo largo de la fibra es extremadamente difícil.

Se han realizado trabajos de investigación para mejorar este proceso, pero hoy en día son pocas las industrias que lo aplican ya que se pueden obtener solamente fibras de baja calidad y bajo costo. El proceso es ventajoso para realizar fibras de índice escalonado con una gran apertura numérica.

### Fibras plásticas

Las combinaciones más comunes de materiales para el núcleo y revestimiento son:

Núcleo	Revestimiento	NA
Poliestireno – PS	PMMA (poly-methyl-methacrylate)	0,6
PMMA	Fluorinated alkyl-meth-acrylate copolymer	0,5

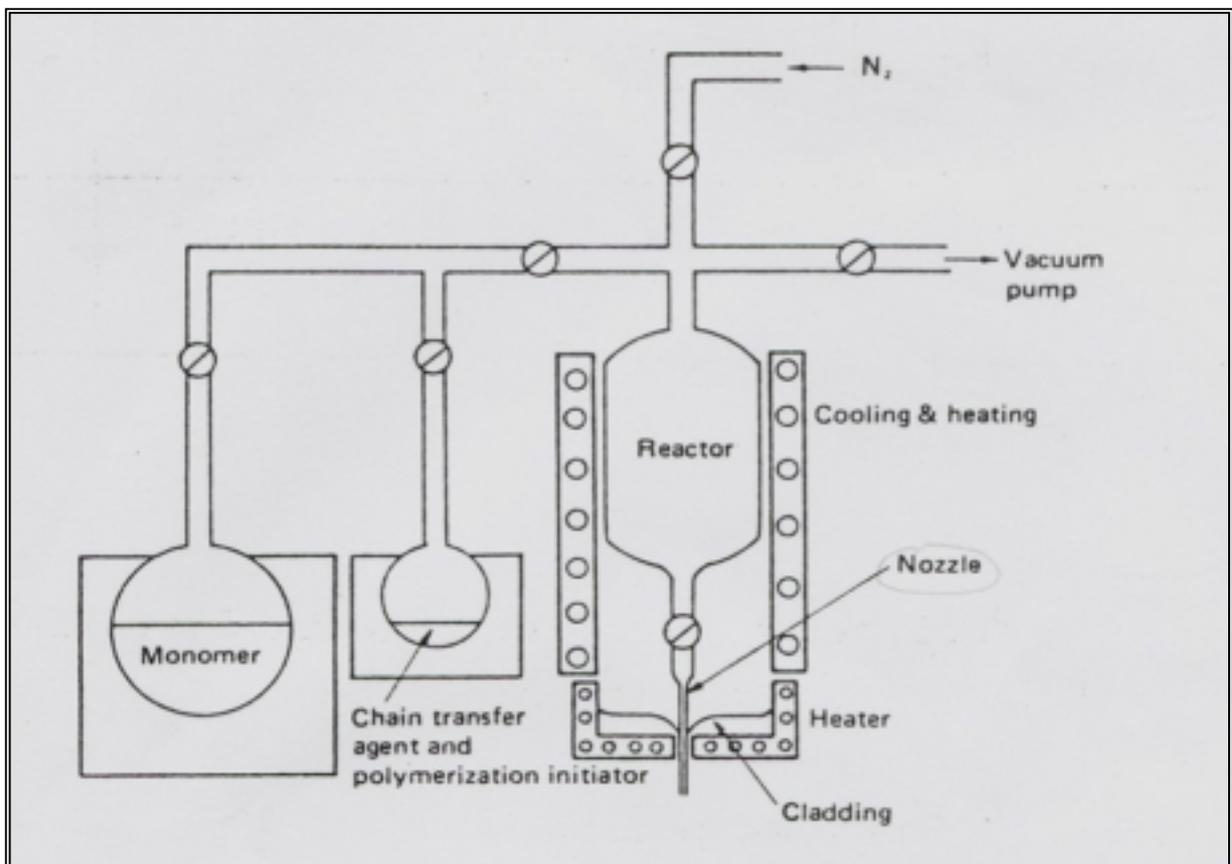
Los pasos de fabricación incluyen:

- Destilación del monómero
- Polimerización
- Estirado
- Revestimiento con polímeros fundidos

En la figura 7.15 se esquematiza el funcionamiento de este proceso para obtener fibras plásticas. El método de estirado es similar al del proceso de “doble crisol”.

La clave para obtener fibras de bajas pérdidas (55 dB/Km a una determinada longitud de onda) es la utilización de un sistema completamente cerrado en el cual se impide que el polvo, oxígeno y otros contaminantes se incluyan en la fibra. Otro paso importante para lograr bajas pérdidas es la deuterización parcial del PMMA utilizado en el núcleo.

Lamentablemente los detalles exactos de este proceso de producción no están disponibles, ya que el más grande y único productor de fibras PMMA, dicho por ellos mismos, no facilitan esta información.



## 8. Comparación con otros sistemas convencionales de telecomunicaciones

La fibra óptica se ha convertido en un medio popular para muchos requerimientos de comunicaciones. Su atractivo se puede atribuir a las muchas ventajas que presenta la fibra óptica sobre otros métodos de transmisión eléctricos convencionales. Este medio de transmisión luminoso tiene también, sin embargo, impedimentos que deberían examinarse antes de proceder a su instalación. Las siguientes secciones describen algunas de estas consideraciones.

### **Ventajas**

#### *Gran capacidad:*

La fibra óptica tiene la capacidad de transmitir grandes cantidades de información. Con la tecnología presente se pueden transmitir 60.000 conversaciones simultáneamente con 2 fibras ópticas. Un cable de fibra óptica [2 cm de diámetro exterior] puede contener hasta 200 fibras ópticas, lo que incrementaría la capacidad de enlace a 6.000.000 de conversaciones. En comparación con las prestaciones de los cables convencionales, un gran cable multipar puede llevar 2400 conversaciones, un cable coaxial puede llevar 10.000 conversaciones y un enlace de radio por microondas o satélite puede llevar 2.000 conversaciones.

#### *Tamaño y peso:*

Un cable de fibra óptica tiene un diámetro mucho más pequeño y es más ligero que un cable de cobre de capacidad similar. Esto lo hace fácil de instalar, especialmente en localizaciones donde ya existen cables (tales como los tubos ascendentes de los edificios) y el espacio es escaso.

#### *Interferencia eléctrica:*

La fibra óptica no se ve afectada por la interferencia electromagnética (EMI) o interferencia de radiofrecuencia (RFI), y no genera por sí misma interferencia. Puede suministrar un camino para una comunicación limpia en el más hostil de los entornos EMI. Las empresas eléctricas utilizan la fibra óptica a lo largo de las líneas de alta tensión para proporcionar una comunicación clara entre sus estaciones de conmutación. La fibra óptica está también libre de conversaciones cruzadas. Incluso si una fibra radiara no podría ser recapturada por otra fibra óptica.

#### *Aislamiento:*

La fibra óptica es un dieléctrico. Las fibras de vidrio eliminan la necesidad de corrientes eléctricas para el camino de la comunicación. Un cable de fibra óptica propiamente dieléctrico no contiene conductores eléctricos y puede suministrar un aislamiento eléctrico normal para multitud de aplicaciones. Puede eliminar la interferencia originada por las corrientes a tierra o por condiciones potencialmente peligrosas causadas por descargas eléctricas en las líneas de comunicación, como los rayos o las faltas eléctricas. Es un medio intrínsecamente seguro que se utiliza a menudo donde el aislamiento eléctrico es esencial.

#### *Seguridad:*

La fibra óptica ofrece un alto grado de seguridad. Una fibra óptica no se puede intervenir por medio de mecanismos eléctricos convencionales como conducción superficial o inducción electromagnética, y es muy difícil de pinchar ópticamente. Los rayos luminosos viajan por el centro de la fibra y pocos o ninguno pueden escapar. Incluso si la intervención resultara un éxito; se podría detectar monitorizando la señal óptica recibida al final de la fibra. Las señales de comunicación vía satélite o radio se pueden intervenir fácilmente para su decodificación.

#### *Fiabilidad y mantenimiento:*

La fibra óptica tiene también una larga vida de servicio; estimada en más de 30 años para algunos cables. El mantenimiento que se requiere para un sistema de fibra óptica es menor que el requerido para un sistema convencional, debido a que se requieren pocos repetidores electrónicos en un enlace de comunicaciones; no hay cobre que se puede corroer en el cable y que pueda causar la pérdida de señales o señales intermitentes; y el cable no se ve afectado por cortocircuitos, sobre tensiones o electricidad estática.

#### *Versatilidad:*

Los sistemas de comunicaciones por fibra óptica son los adecuados para la mayoría de los formatos de comunicaciones de datos, voz y video. Estos sistemas son adecuados para RS 232, RS 422, V.35, ETHERNET, ARCNET, FDDI, T1, T2, T3, SONET, 2/4 cable de voz, señas E&M, video compuesto y mucho más.

*Expansión:*

Los sistemas de fibra óptica bien diseñados se pueden expandir fácilmente. Un sistema diseñado para una transmisión de datos a baja velocidad, por ejemplo, T1 (1,544 Mbps), se puede transformar en un sistema de velocidad más alta, OC-12 (622 Mbps), cambiando la electrónica. El cable de fibra óptica utilizado puede ser el mismo.

*Regeneración de la señal:*

La tecnología presente puede suministrar comunicaciones por fibra óptica más allá de los 70 Km (43 millas) antes de que se requiera regenerar señales, la cual puede extenderse a 150 Km (93 millas) usando amplificadores láser. Futuras tecnologías podrán extender esta distancia a 200 Km (124 millas) y posiblemente 1000 Km (621 millas). El ahorro en el costo del equipamiento del repetidor intermedio, así como su mantenimiento, puede ser sustancial. Los sistemas de cable eléctrico convencionales pueden, en contraste, requerir repetidores cada pocos Km.

**Desventajas***Conversión electro-óptica:*

Antes de conectar una señal eléctrica de comunicación a una fibra óptica, la señal debe convertirse al espectro luminoso [850, 1310 o 1550 nanómetros (nm)]. Esto se realiza por medios electrónicos en el extremo del transmisor, el cual da un formato propio a la señal de comunicaciones y la convierte en una señal óptica usando un LED o un láser de estado sólido. A continuación, esta señal óptica se propaga por la fibra óptica. En el extremo del receptor de la fibra óptica, la señal óptica se debe convertir otra vez en señal eléctrica antes de poder ser utilizada. El coste de conversión asociado a la electrónica debería ser considerado en todas las aplicaciones.

*Caminos Homogéneos:*

Se necesita un camino físico recto para el cable de fibra óptica. El cable se puede enterrar directamente, situar en tubos o disponer en cables aéreos a lo largo de caminos homogéneos. Esto puede requerir la compra o alquiler de la propiedad. Algunos derechos sobre el camino pueden ser imposibles de adquirir. Para localizaciones como terrenos montañosos o algunos entornos urbanos pueden ser más adecuados otros métodos de comunicación sin hilos.

*Instalación especial:*

Debido a que la fibra óptica es predominantemente vidrio de sílice, son necesarias técnicas especiales para la ingeniería e instalación de los enlaces. Ya no se aplican los métodos convencionales de instalación de cables de hilos como, por ejemplo, sujeción o crimpado, soldadura y wire-wrapping. También se requiere un equipamiento adecuado para probar y poner en servicio las fibras ópticas. Los técnicos deben ser entrenados para la instalación y puesta en servicio de los cables de fibra óptica.

*Reparación:*

Un cable de fibra óptica que ha resultado dañado no es fácil de reparar. Los procedimientos de reparación requieren un equipo de técnicos con mucha destreza y habilidad en el manejo del equipamiento. En algunas situaciones puede ser necesario reparar el cable entero. Este problema puede ser aún más complicado si hay un gran número de usuarios que cuentan con dicho servicio. Es importante, por ello, el diseño de un sistema propio con roturas físicamente diversas, que permita afrontar tales contingencias. Aunque pueda haber muchas ventajas que favorezcan una instalación de fibra óptica, deberán ser sopesadas cuidadosamente frente a sus desventajas en cada aplicación. Deberían ser analizados todos los costes de operación e implementación de un servicio de fibra óptica.

A continuación se presentarán las ventajas de los sistemas de transmisión de fibra óptica en comparación con los sistemas de cobre.

**Cobre vs. Fibra Óptica**

<b>Características</b>	<b>Fibra óptica</b>	<b>Cobre</b>
<b>Ancho de Banda</b>	El ancho de banda en la fibra óptica no depende de la frecuencia (de la señal). Es una función del tipo de fibra óptica seleccionada y solamente la distancia tiene algún efecto (la fibra monomodo tiene más ancho de banda que la fibra multimodo)	Los efectos debidos a la capacitancia (inducción) tienen gran influencia en la eficiencia de los cables de cobre que se someten a transmisión de frecuencias muy altas. Esto limita dramáticamente el Ancho de Banda
<b>Inmunidad a las Interferencias</b>	La Fibra Óptica ofrece excelente inmunidad contra el ruido inducido, incluyendo la Diafonía y la atenuación así como la interferencia producida por otras fuentes de emisión	Los cables de cobre tienen gran afectación debido a la diafonía, el ruido inducido entre los cables y por otras fuentes de emisión de radiaciones electromagnéticas. De igual manera se requiere realizar pruebas de desempeño que contemplen la interferencia entre las mismas señales que son portadas por los diferentes cables que forman un conjunto.
<b>Diferenciales en la Tierra Física</b>	Los sistemas basados en Fibra Óptica están completamente aislados porque no son afectados por los diferenciales de resistividad potencial en cada punto terminal	Los cables de cobre que interconectan diferentes áreas (sites) o incluso dentro del mismo edificio pueden tener diferentes potenciales de resistividad asociados a los diferentes equipos instalados. Esto puede resultar en un gran problema que represente una inversión muy considerable para estabilizar los potenciales de resistencia ohmica.
<b>Pérdida por Unidad de Distancia</b>	Las fibras ópticas monomodo tienen pérdidas que localizadas en el rango de .2 a .5 dB por Km. La atenuación de las fibras multimodo varía entre 2 y 3.5 dB por Km.	La atenuación en los cables de cobre depende de la frecuencia a la que es transmitida la señal. Y son mucho mayores que en los equipos en fibra óptica.
<b>Pérdidas por Conectividad</b>	Las pérdidas debidas a empalmes van desde .04 dB aproximadamente (en fusiones de alta calidad) hasta .5 dB para empalmes mecánicos y acoplamientos ópticos	Las conexiones de cables de cobre usualmente tienen pérdidas que se reflejan en 10 veces las de la fibra óptica.
<b>Costos de Conectividad</b>	Los conectores de fibra óptica tienen un costo promedio de 12 dólares. Los equipos para instalación de conectores varían entre 1,200 y 3,000 dólares	Las conexiones de cobre normalmente son más baratas y fáciles de instalar que las de fibra óptica.

<b>Empalmes</b>	Los empalmes mecánicos varían considerablemente en costo. Los empalmes temporales tienen un costo de 20 dólares y los de instalación permanente pueden llegar hasta 50 dólares cada uno más los costos asociados del equipo para instalarlos. Los Empalmes por fusión tienen un costo inicial muy elevado, derivado de la adquisición de la máquina de empalme (de 20,000 a 70,000 dólares), después de realizar la adquisición del equipo para empalmar el costo de realizar el empalme se reduce considerablemente	La realización de empalmes en cables de cobre es una práctica más común y por lo tanto con menor costo ya que además no se requiere equipo especializado para realizarlo.
<b>Equipo de Prueba</b>	El equipo requerido para realizar correctamente las pruebas a la fibra óptica tiene un costo mayor por lo que su correcta utilización es considerablemente más costosa. Sin embargo las pruebas que se deben realizar están perfectamente definidas y los alcances de las mismas permiten tener la absoluta seguridad del desempeño de la fibra óptica	Los equipos de prueba para cables de cobre son comunes en la industria en la actualidad. Con el desarrollo de los equipos de transmisión de datos a altas velocidades, en la actualidad se requiere un mayor número de pruebas.
<b>Efectos por las Emisiones Electromagnéticas (EMI) y tormentas eléctricas</b>	Los cables de fibra óptica son fabricados en configuración no metálica. Esta característica beneficia la instalación de los equipos ya que no están sujetos a transmisión de energía eléctrica inducida debida a la electricidad transmitida a través de los cables	Se debe tener mucho cuidado para reducir o minimizar los efectos derivados de la electricidad inducida por tormentas eléctricas. Las especificaciones particulares para protección en contra de los rayos varían en cada región no solamente por la cantidad de tormentas que puedan presentarse sino por el tipo de suelos y la variación de la resistividad y balanceo de la misma
<b>Costos del equipo (interfaces)</b>	El equipo que transmite señales a través de cable de fibra óptica tiene en la actualidad un costo mayor en comparación a los equipos que transmiten señales electrónicas. Por lo tanto, el equipo para fibra óptica es utilizado en áreas en las que son multiplexadas muchas señales y a su vez enviadas a distancias considerables. Usualmente a nivel de usuario individual la señal se envía por	Las interfaces de los equipos electrónicos tradicionales y equipos terminales tienen actualmente un costo menor a los similares de fibra óptica. Esto tiende a cambiar en la medida que la tendencia es llevar fibra óptica hasta el escritorio del usuario final.

	<p>medio de cables de cobre. Esto tiende a cambiar en la medida que en la actualidad los costos de las interfaces han tenido una reducción importante, siendo ésta tendencia en forma continua.</p>	
--	---	--

## 9. Precauciones de seguridad

Hay ciertas precauciones que deben tomarse cuando se trabaja con fibras ópticas. Éstas ayudan a mantener un entorno de trabajo seguro y reducen el tiempo perdido por accidentes. Además de estas precauciones deben seguirse también otras reglas de seguridad para el entorno de la instalación. Este capítulo discute las precauciones de seguridad que se deben observar cuando se trabaja con fibras ópticas.

### Corte y pelado del cable

Cuando se corta y se pela un cable de fibra óptica, el personal debería llevar guantes y gafas de seguridad apropiadas. Herramientas tales como cortadoras (cutter), peladoras, etc., pueden ser muy afiladas y causar daños. Los pequeños trozos cortados de fibra pueden volar fácilmente durante los procedimientos de corte, marcado y rayado.

### Trozos de fibra óptica

Los trozos de fibra que resultan a partir de los procesos de pelado o rayado deberán guardarse inmediatamente en un contenedor cerrado y etiquetado como “residuos de fibra”. Los trozos de fibras de vidrio cortados están muy afilados y pueden dañar fácilmente el ojo o pinchar la piel. Las fibras deberán ser manejadas únicamente con pinzas.

### Luz de láser

La luz de una fibra óptica puede dañar seriamente al ojo incluso si la luz es invisible. Antes de trabajar con cualquier fibra óptica deben apagarse todas las fuentes de luz. Nunca se debe mirar al extremo de una fibra, ya que podría estar acoplada a un láser.

Hay que cerrar con llave las fuentes láser y etiquetarlas con “no encender” para prevenir accidentes.

Los daños derivados de observar la luz emitida por un láser son irreparables (producen ceguera). El Instituto de la Sociedad Americana de Normas ANSI (American National Society Institute) ha realizado una clasificación de los láseres en cuatro clases, que están catalogados de acuerdo al daño que producen a la vista. Clase 1 Se considera que no dañan la vista ó el ojo. Clase 2 Emisores con baja potencia dentro del espectro visible de luz que pueden ser observados en forma directa solamente bajo condiciones de cuidado controladas. Clase 3 Solamente pueden ser observadas en condiciones muy controladas y con medidas de seguridad en extremo rigurosas Clase 4 Producen daños tanto a la vista como a la piel cuando son expuestas a su radiación Es necesario hacer notar que bajo las condiciones normales de operación la radiación óptica no es accesible al usuario. Los sistemas de comunicación basados en fibra óptica normalmente operan con láseres de clase 1. Solamente cuando se realizan operaciones de servicio e instalación de partes el personal que las realiza se expone a las radiaciones ópticas Ver directamente los emisores láser con lentes de aumento incrementan la cantidad de energía que impacta los ojos. Se debe de tener particular cuidado para asegurarse que los equipos que tienen láseres activos instalados sean apagados ó desconectados sobre todo antes de realizar inspecciones ó verificaciones de los conectores instalados en ellos.

Existen tarjetas para realizar pruebas que detectan si hay energía radiada, misma que no se observa por estar sobre el rango de luz detectado por el ojo humano.

### Tensión del cable

Bajo tensión los miembros de refuerzo de un cable de fibra óptica pueden almacenar mucha energía elástica, por lo que fácilmente pueden dar un latigazo hacia atrás y causar daños. Se debe tener un cuidado especial durante las operaciones de tendido del cable o cuando el miembro de refuerzo esté bajo tensión mecánica.

### Solventes y soluciones de limpieza

Los líquidos que se utilizan para limpiar las fibras ópticas y para eliminar los compuestos de relleno pueden irritar los ojos y la piel. Además, los vapores de estos líquidos son potencialmente inflamables y

pueden causar problemas respiratorios. Cuando se trabaja con estos solventes, se deben proteger los ojos y las manos, se debe mantener el área bien ventilada y no se debe fumar o permitir encender fuego en el área de trabajo.

### **Empalmadora de fusión**

La chispa eléctrica que genera una empalmadora de fusión de fibra óptica puede causar una explosión en presencia de vapores inflamables. Nunca se deberá utilizar una empalmadora de fusión en un área confinada, como una arqueta o galería subterránea.

## 10. Conclusión

Las nuevas tecnologías, que invaden nuestra forma de vida, modificándola continuamente, evolucionan a pasos agigantados. Atraviesan ciclos de promesa, exageración, desilusión, rechazo y renacimiento.

Hoy en día se están tomando acciones concretas en el área de las telecomunicaciones en respuesta a la oferta y demanda de las mismas. Como consecuencia de este fenómeno ha surgido la fibra óptica, una nueva corriente tecnológica como opción para incrementar la densidad de las telecomunicaciones más rápidamente y con un mejor servicio.

Nadie sabe con certeza cuál será el futuro de la fibra óptica pero sí se está seguro en un aspecto de esta nueva tecnología: que está causando una gran revolución en los campos eléctricos, electrónicos, comunicaciones, informáticos y medicina. Sus aplicaciones están creciendo a una velocidad que prácticamente sobrepasa a la del campo de los circuitos integrados.

En robótica, las fibras ópticas están siendo desarrolladas con el fin de dar a los robots la capacidad de "ver". Proporcionan un control de gran precisión al movimiento de los brazos de un robot, movimiento de manos, etc., pues miden con gran exactitud la posición o movimiento de estas extremidades. También los rayos de luz utilizados con fibras ópticas proporcionan la lógica simple luz-oscuridad o uno y cero que tan fácilmente se adapta al control por computadoras.

En medicina, la fibra óptica se utiliza para introducir luz dentro del cuerpo y obtener imágenes de su interior permitiendo a los especialistas examinar lo que ocurre dentro del cuerpo.

En industrias petroleras, son empleadas en conjunto con sensores apropiados para facilitar las investigaciones de exploración con el fin de encontrar el "oro negro".

Existen infinidad de aplicaciones para la fibra óptica que van surgiendo como respuesta a nuevas como en la industria automotriz, nuclear, de la construcción, etc.

Para poder satisfacer la demanda de éste producto en cantidad y calidad es necesario el desarrollo continuo de nuevas tecnologías y materiales que permitan cumplir con distintas especificaciones de acuerdo a las necesidades de uso a un bajo costo.

Este es el gran desafío que deben enfrentar las industrias de fabricación de fibra óptica. Ser capaces de alcanzar altos niveles de calidad fijando requerimientos concernientes a los siguientes principales parámetros:

- Atenuación
- Dispersión
- Resistencia mecánica

Los mismos deben ser cumplidos y asegurar que estos parámetros sean uniformes en toda la fibra.

También debe tenerse en cuenta la velocidad de producción y evitar procesos críticos que afecten la producción.

Pero, como ya se mencionó anteriormente, la característica fundamental de un proceso de fabricación de fibra óptica es la versatilidad del mismo. La capacidad de poder fabricar distintos tipos de fibras ópticas basadas en distintos requerimientos, con las mismas máquinas y tecnología disponible. Para satisfacer la, cada vez más variada, demanda de la fibra óptica.

En este trabajo se han estudiado, básicamente, dos caminos para la fabricación de fibras: a partir de una preforma prefabricada y fabricación directa de la fibra a partir de la fundición. Utilizando, en ambos casos, como materia prima principal el silicio. Hoy en día se están realizando estudios sobre distintas materias primas y dopantes para lograr mejores resultados de calidad y eficiencia, cumpliendo con requerimientos preestablecidos; aumentando el volumen de producción y disminuyendo los costos.

Actualmente existen cuatro procesos de fabricación de uso comercial. El más usado es el de deposición química modificada de vapor (MCVD), inventado por los laboratorios de la AT&T. Bell Laboratories. El proceso de deposición externa de vapor (OVD) es utilizado por Corning Glass Co. y alguno de sus asociados en

Europa. La deposición axial de vapor (VAD) es el proceso más usado en Japón, mientras que la Philips, en Eindhoven, Holanda utiliza el proceso de deposición química de vapor mediante plasma de baja temperatura (PCVD).

Además de estos cuatro procesos, se están desarrollando en diferentes laboratorios otros procesos tales como: La plasma MCVD, en Bell Laboratories; el proceso de productos híbridos OVD-VAD, en Japón y los procesos Sol-gel, en distintos laboratorios.

Por último es necesario comprender que para poder evaluar o diseñar un proceso de fabricación de fibra óptica, es importante tener en cuenta que la calidad de un producto se evalúa de acuerdo a la satisfacción de las distintas necesidades, que surgen según su utilización, a un costo razonable.

## 11. Bibliografía consultada

1. Andrew S. Tanenbaum, *Redes de Ordenadores*, 2ª Edición, Ed. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., 1991.
2. Bob Chomycz, *Instalaciones de fibra óptica: Fundamentos, técnicas y aplicaciones*, Ed. Mc. Graw Hill, Capítulo 1, 3, 5, 22.
3. Eduard L. Safford, *Introducción a la Fibra Óptica y el Laser*, Ed. Paraninfo, 1988, Capítulo 1.
4. Frank R. Dungan, *Sistemas Electrónicos de Telecomunicaciones*, Ed. Paraninfo, Pgs. 449-520.
5. Heinz G. Pfaender. "Schott Guide to Glass". Chapman & Hall.
6. Hilberto Jardon Aguilar, Roberto Linares y Miranda, *Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas*, Ed: Alfaomega, Capítulo 3.
7. Jose María Fernandez Navarro. "El Vidrio. Constitución. Fabricación. Propiedades". Consejo superior de investigaciones científicas, Instituto de cerámica y vidrio.
8. Jose Martín Sanz, *Comunicaciones Ópticas*, Ed. Paraninfo, 1996.
9. Midwinter, J. E., *Optical Fibers for Transmission*, Ed. John Wiley & Sons, 1979.
10. M. Schwartz, *Cableado de Redes*, Ed. Paraninfo, 1996.
11. Schulz, P.C.. "Fabrication of optical waveguides by the outside vapor deposition process. **IEEE**.
12. Technical Staff of CSELT: *Optical Fibre Communication*, Ed. Mc. Graw Hill, 1981.
13. Wayne Tomasi, *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, 2ª Edición, Capítulo 20.
14. Revista de Telefónica Argentina: *Dispersión cromática en Fibras Ópticas*, monomodo, 1ª Edición, Junio 1993.
15. Revista: *Optical Fibre Cables, Componentrs and Accessories*, BICC Cables Limited, Communications and Electronics Division 1996.
16. Revista Ceramic Transactions: *Advances in Fusion and Processing of Glass*, Volumen 29, Alfred University: Arun K. Varshneya, Dennis F. Bickford, and Peter P. Bihuniak.
17. Revista Telcom Report: *Optical Communications*, Volumen 6, Octubre 1983, Special Issue, Ed. Siemens.
18. <http://lanic.utexas.edu/la/Mexico/telecom/cap2.html>.
19. <http://utama.bolnet.bo/eldiario/sucre56.html>.
20. <http://www.cicese.mx/-aarenta/frames/redes/fddi/spanish.html>.
21. <http://informatica.aragon.unam.mx/ilhuicatl/fibra.html>.
22. <http://www.universalcon.com/>
23. <http://www.metrored.com.ar>
24. <http://www.colredes.com/fibraoptica.htm>
25. <http://www.cable.net.co/>
26. <http://www.fiberlights.com/>
27. <http://www.sistecon.com.mx/productos.htm>
28. <http://www.occfiber.com/>