

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

Los sistemas de comunicación electromagnéticos han sido ampliamente utilizados para diversos fines. Actualmente juegan un papel central en la vida cotidiana del mundo entero. Desde fines caseros como son el uso de internet hasta propósitos militares, pasando por utilidades industriales, la fibra óptica se ha convertido en el medio más útil para la comunicación dadas sus grandes ventajas. En un mundo que requiere un grán tráfico de información, es necesario tener cada vez más capacidad y velocidad de transmisión. Kahn y Ho citan a Shannon quien define la capacidad de un medio de comunicación como *la razón máxima de bits que se pueden transmitir sin error, tomando en cuenta ruido, ancho de banda y potencia limitada* [9]. En el mismo artículo se menciona que las velocidades de transmisión que se han alcanzado son del orden de los terabits por segundo. La capacidad de transmisión es directamente proporcional al ancho de banda, dado que las frecuencias utilizadas en los sistemas de comunicación con fibra óptica se encuentran en el rango $100 THz - 400 THz$ el ancho de banda utilizable sería de entre 10 y 40 THz , por tanto la utilización de la fibra óptica ofrece mucho mayor capacidad que los sistemas que utilizan cable metálico [12].



Figura 1.1: Fotófono de A.G. Bell

La gran capacidad de los sistemas de comunicación ópticos se puede entender fácilmente si se recuerda que transmitir un terahert (1 THz) equivale a enviar 10^{12} *bits/seg*. Puesto que una página puede almacenarse en unos 10^4 *bait*s y un bait contiene 8 *bits*, la capacidad de transmisión será del orden de 10^7 *pags/seg*, es decir diez millones de páginas por segundo. El presente trabajo centra su interés en la necesidad de optimizar la velocidad de transmisión en las fibras. Por esta razón se realiza un estudio de la propagación de trenes de pulsos ultracortos del orden de los picosegundos ($1\ ps = 10^{-12}\ seg$).

1.2 Antecedentes

En esta sección se presentan los antecedentes históricos de los medios de comunicación que aprovechan las propiedades de la luz.

Desde tiempos remotos se ha utilizado la luz para comunicar mensajes. Probablemente la forma más rudimentaria en que el hombre haya utilizado la luz para este fin sea la comunicación de mensajes simples a sus vecinos mediante señales de humo [12]. El primer aparato serio de comunicación óptico fue desarrollado por el francés Claude Chappe en los años 1790 [7], este aparato era una clase de *telégrafo óptico*, sin embargo el telégrafo de Morse desbancó completamente al primero por su confiabilidad. Casi un siglo más tarde el inventor del teléfono, Alexander Graham Bell, patentó un invento

llamado *Photophone* o *fotofono* [12], [2], [7] el cual, no gozó de la misma popularidad que su otro invento, el fotófono se muestra en la figura 1.1. La invención del fotófono fue anterior a la del teléfono, Graham Bell tenía el sueño de intercambiar mensajes por vía aérea utilizando la luz pero el aire no ofrecía condiciones favorables para la transmisión de información por medio de esta debido a que otras señales podían afectar el funcionamiento de los aparatos [7], cualquier vibración externa podía interferir en el funcionamiento del aparato. A pesar del poco o nulo éxito del fotófono, Bell demostró que la luz podía aprovecharse para el intercambio de información.

1.2.1 Las Guías de Onda

A mediados del siglo XIX, el francés Jaques Babinet y el suizo Daniel Collud descubrieron que es posible guiar la luz en chorros de agua [7], descubrimiento de suma importancia que abrió la posibilidad de construir una guía de onda para la luz y así facilitar su propagación. Este descubrimiento no recibió la atención suficiente en ese tiempo por no tener, aparentemente, una aplicación directa, aun que la idea de Bell de utilizar la luz como medio de transmisión de información ahora podía hacerse realidad.

Fue John Tyndall, físico de origen inglés, quien popularizó en 1854 una nueva y más popular versión del experimento antes descrito, en este se guiaba luz a través de un chorro de agua que fluía de un tanque a otro (ver fig. 1.2). Casi cien años después en 1930, en Munich, Heinrich Lamm reportó haber transmitido la imagen de una bombilla de luz, y diez años más tarde varios médicos utilizaban abate-lenguas con plexiglass para obtener ciertas imágenes [7]. Ese mismo año J.L.Baird, inglés y C.W.Hansell, estadounidense transmitieron imágenes a través de una fibra [12]. En este tiempo ya era común escuchar acerca de los logros (si bien pequeños) que se hacían en transmisión de imágenes por medios ópticos. Estos avances no gozaron de mucha atención debido

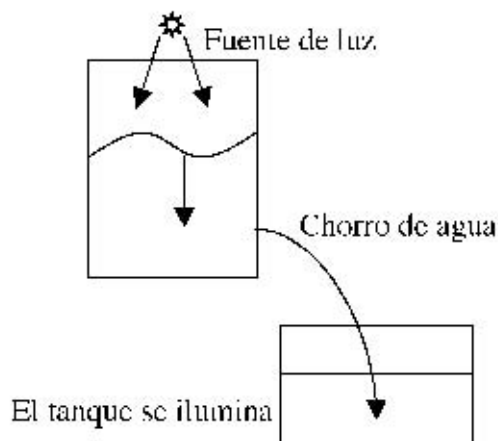


Figura 1.2: Experimento de Tyndall

a que no se tenía clara la manera en que se podrían explotar.

En 1951, los holandeses Van Heel y Hopkins desarrollaron experimentos que los llevaron a la invención de una fibra flexible conocida como *fiberscope* [7],[12]. Este desarrollo fué la primera aproximación de una fibra óptica moderna. Durante los 50's, *Brian O'Brien, Sr., en los E.U. y Harry Hopkins y Nardiner Kapany en Inglaterra comenzaron a buscar la manera de guiar la luz. La idea clave era fabricar una fibra de dos capas*[7].

La luz sería confinada a un núcleo con un índice de refracción menor al de una cubierta, lo cual evitaría que la luz se perdiera [7]. En el año de 1956, Kapany utilizó por primera vez el término *fibra óptica* [2]. No fué sino hasta la década de los sesenta, con el invento del laser, que las comunicaciones ópticas tuvieron un desarrollo serio. En la edición de Julio de 1960 de la revista *Electronics Magazine*, Theodore Maiman afirmó que los canales útiles en el espectro electromagnético podían ampliarse si se desarrollaba un amplificador experimental de frecuencia óptica, esto significaba que se podía intercambiar información de una manera mas eficiente y las propiedades de estas

guías de onda finalmente podrían explotarse. A pesar de las ventajas que ahora ofrecían las fibras ópticas, tenían el grave problema de presentar una elevada pérdida, debido a una atenuación de $1dB/m$ mientras que las comunicaciones a larga distancia requerían una atenuación máxima del orden de $10dB/km$ (dos ordenes de magnitud menos), esto retrasó el uso de la fibra.

Un pequeño grupo de investigadores conducido por Charles K. Kao y George Hockham se dieron a la tarea de investigar la atenuación en fibras ópticas. Después de observar un gran número de fibras concluyeron que la atenuación se debía a las impurezas de los materiales con que se fabricaban las fibras y no a los materiales mismos [7]. Estaban convencidos de que la fibra óptica podía tener una atenuación menor que los $20dB/km$ y una capacidad de un gigaciclo. La idea propuesta por Kao era un cable dividido en núcleo y cubierta, la cubierta tendría un índice de refracción alrededor de 10% menor al del núcleo.

La propuesta de K. Kao de poder reducir la atenuación de las fibras atrajo la atención de los laboratorios alrededor del mundo, especialmente de la oficina Británica de correos. Tomó cuatro años llegar a los $20dB/km$ propuestos. Robert Maurer, Donald Keck y Peter Schultz, en el Corning Glass Works, utilizaron silicio fundido dopado para elaborar fibras ópticas y en septiembre de 1970 obtuvieron la marca de Kao en la región de los $633nm$, esta marca fué confirmada por la oficina de correos Británica [2].

Los sistemas modernos operan a $1.55\mu m$ con pérdidas de $0.2dB/km$. Más importante aún es que las fibras dopadas con erbio (Er-doped fiber) compensan la atenuación. Actualmente las ventajas de las comunicaciones ópticas son sus bajos costos y su superioridad ante otros sistemas, dada la gran capacidad que poseen.

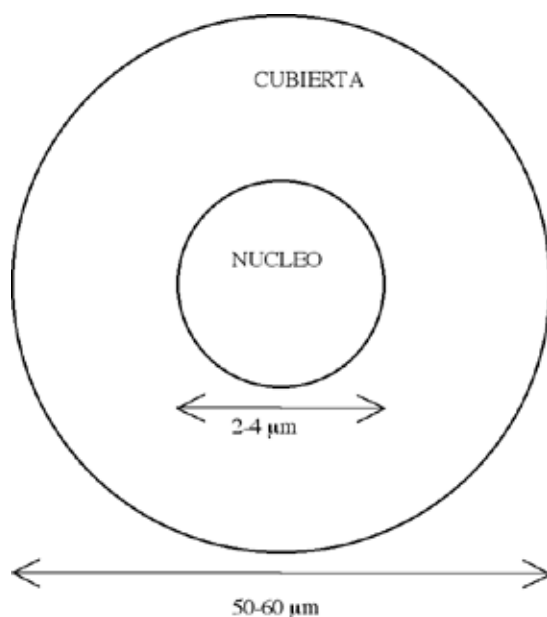


Figura 1.3: Esquema de una fibra óptica

1.3 Anatomía de la Fibra Óptica

Una fibra óptica común en la actualidad consta básicamente de un núcleo y una cubierta con diferentes índices de refracción. El núcleo de la fibra puede variar en tamaño y la distribución de su índice de refracción puede ser de escalón o continua [5], esto es de acuerdo a los propósitos de uso de la fibra. La fibra también tiene un recubrimiento especial que le protege del exterior principalmente por su baja tensibilidad [12].

El principio bajo el cual las fibras ópticas pueden conducir la luz se puede plantear desde el punto de vista de la óptica geométrica, el fenómeno central es el de la reflexión interna total (o Total Internal Reflection TIR) [10]. Sin embargo es posible deducir las propiedades de la fibra de las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de continuidad correspondientes en la interfase núcleo-cubierta, esta descripción de las propiedades de la fibra se torna complicada y solo en el principio del siglo XX se han resuelto ciertos casos particulares por su utilidad práctica [11], este es el caso de la guía de onda

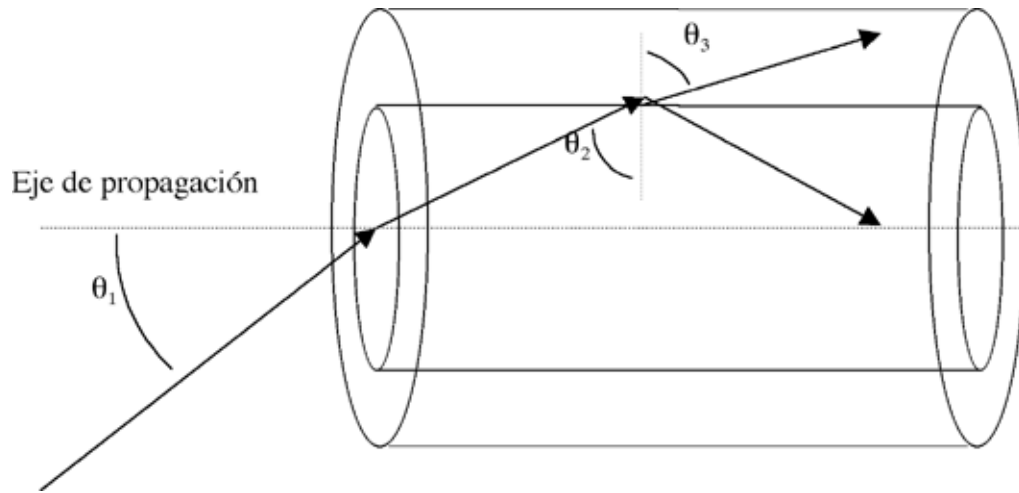


Figura 1.4: Fenómeno de Reflexión Interna Total

cilíndrica.

El fenómeno de la TIR se da gracias a la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y la cubierta de la fibra. Se conoce la ley de Snell que para el caso particular de la interfase núcleo-cubierta en la fibra es

$$n_2 \sin \vartheta_2 = n_3 \sin \vartheta_3$$

donde n_i y ϑ_i son los índices de refracción y ángulos de incidencia y refracción respectivamente (fig 1.4). Para que ocurra el fenómeno, se busca que $\vartheta_3 = \pi/2$, o sea que la luz refractada se *meta* en la interfase, de donde se encuentra que

$$\arcsin \left(\frac{n_2 \sin(\pi/2)}{n_1} \right) = \vartheta_2, \quad \arcsin \frac{n_2}{n_1} = \vartheta_2 \quad (1.1)$$

Este es el ángulo mínimo de incidencia para la interfase y es típicamente de unos 82° . En el caso de la fibra con índice graduado, la solución se da en pasos, considerando capas de ancho dr , y procediendo de manera similar.

El fenómeno de TIR también determina el llamado ángulo de aceptación y la apertura numérica de la entrada de la fibra. Esto se desprende de que en la interfase aire-fibra

se da también refracción y dado que el ángulo del rayo con la interfase no debe exceder los $8^\circ = \pi/2 - \vartheta_2$ y el índice de refracción del aire (de acuerdo al dibujo n_1) es prácticamente igual a uno (i.e. $n_1 = 1$), la ley de Snell nos permite definir a la apertura numérica (AN) y al ángulo de aceptación como

$$AN = \sin\vartheta_{acc} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

donde ϑ_{acc} es el máximo valor que puede tomar ϑ_1 para que la señal quede confinada al núcleo. En el diseño de sistemas con fibra se utiliza la apertura numérica para determinar el ángulo de incidencia de la señal.

Se define el número de onda adimensional de la fibra como

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = k_0 a AN$$

donde k_0 es el número de onda de la luz incidente y a es el radio del núcleo [1], de este modo toma sentido el hecho de que el radio del núcleo de las fibras varíe según los propósitos de la misma, debido a que este número está relacionado con el número de modos que la fibra soporta. Una fibra monomodal requiere un núcleo de $2\mu m$ a $4\mu m$, mientras que el radio externo es de $50\mu m$ a $60\mu m$. En el caso de las fibras multimodales el radio interno es de $50\mu m$ y el externo es de $200\mu m$ aproximadamente[1]. Las fibras monomodales se utilizan para la transmisión de información, mientras que las multimodales para transportar energías mayores con fines quirúrgicos y de iluminación en espacios reducidos, entre otros.

1.4 Fabricación

Los materiales utilizados para la fabricación de fibras ópticas son variados, pueden ser de vidrios de silicio o bien de ciertos plásticos con propiedades ópticas apropiadas. El

vidrio de silicio se consigue al fundir moléculas de SiO_2 , este se dopa o enriquece para variar su índice de refracción: para el núcleo, el dopante puede ser GeO_2 o P_2O_5 que aumentan el índice, mientras que para la cubierta puede ser *Fluorine* que disminuye el índice [1].

1.4.1 Fibras de Silicio

Existen diversos procesos de fabricación para las fibras ópticas. Dos de los más utilizados son el de *fusión continua* y el de *fusión discontinua* [4]. El primero consiste en fundir los materiales del núcleo y cubierta por separado y después a fundirlos de manera continua. Esta fusión se consigue con un doble crisol, donde se *vierten* respectivamente los materiales que constituyen al núcleo y cubierta, consiguiendo así la fibra. Según describe Jimenez-Cortés [4], el proceso de fabricación discontinua comienza con la obtención de una barra de vidrio de alta pureza (i.e. silicio), de 10 – 30mm de diámetro.

Agrawal [1] describe brevemente el proceso de deposición química de vapor modificada (MCVD por sus siglas en inglés). Este proceso consiste en calentar $SiCl_4$ y O_2 a una temperatura de unos 1800° para depositar varias capas sucesivas de SiO_2 . El mechero (i.e. la flama) se mueve hacia adelante y atrás para asegurar que el proceso sea uniforme mientras que el índice de refracción del núcleo se controla añadiendo *fluorina*. Cuando se ha alcanzado la anchura deseada se añaden vapores de $GeCl_4$ o $POCl_3$ para el núcleo. Una vez obtenidas todas las capas, se aumenta la temperatura para que el producto colapse en una barra.

La manera de obtener el silicio en forma pura i.e. 0.02 partes por millón, es por evaporación-deposición [1]. Este proceso complicado consiste básicamente de evaporar el silicio impuro por medios químicos y proceder a su deposición, el silicio se evapora

dejando atrás compuestos de mayor punto de ebullición. El silicio pasa por unos tubos hacia otro recipiente, donde es enfriado de nuevo y almacenado en esta forma pura. Este silicio purificado se almacena en forma de barras que luego alimentarán los diferentes sistemas de fabricación de fibra óptica.

Las fibras ópticas de silicio son frágiles, por lo que es usual protegerlas mediante recubrimientos de diversos plásticos. Comercialmente, las propiedades de propagación y el tamaño de las fibras permiten colocar varias de ellas en tubos recubiertos de plástico para intercomunicar a los sistemas.

1.4.2 Fibras de Acrílico

Existe otro tipo de fibras más resistentes a las agresiones del medio ambiente. Tales son las fibras de acrílico, cuyo componente principal puede ser el *metacrilato de metilo* o el *polimetacrilato de metilo*. Estas fibras son resistentes a los rayos UV y altamente transparentes a la luz visible [4]. Las fibras acrílicas están generalmente recubiertas de polímero fluorinado cuya colocación en la fibra es casi siempre por deposición.

1.5 Pérdidas

Es importante precisar el significado de la atenuación de una fibra óptica. Este parámetro se define en términos de la potencia transmitida por la fibra.

$$P_T = P_0 e^{-\alpha L} \quad (1.2)$$

donde P_0 es la potencia inicial y P_T la transmitida, mientras que α es la constante de atenuación [1] medida en $[1/km]$. Como se ha visto, se acostumbra expresar la atenuación en unidades de dB/km , por lo que es necesario utilizar la relación

$$\alpha_{db} = -\frac{10}{L} \log \left(\frac{P_T}{P_0} \right) = 4.343\alpha,$$

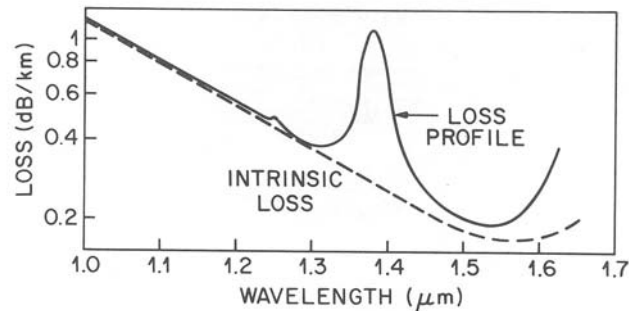


Figura 1.5: Espectro de pérdidas, se puede observar con línea punteada el término dominante.

donde α tiene unidades de $1/km$, pues L se mide en km .

Las pérdidas (o atenuación) en la fibra se deben a diversos factores y es posible modelarla sumando las contribuciones de cada factor. La *dispersión de Rayleigh* y otros efectos de dispersión que aparecen por fluctuaciones de concentración de los dopantes [8] parecen ser los más importantes (por dominar la curva espectral). Estos efectos de dispersión son funciones de λ^{-4} , en la figura 1.5 se puede apreciar cómo este término domina la suma. En esta gráfica se puede observar el mínimo en la región de los $1.55\mu m$

En el uso práctico de las fibras ópticas existen varios factores que contribuyen a la atenuación de la señal óptica, las contribuciones a la atenuación se deben principalmente a la temperatura y esfuerzos ejercidos por la instalación, así como la absorción de hidrógeno del ambiente entre otros [8].

1.6 Dispersión de la Velocidad de Grupo

Es importante mencionar que en la propagación de señales ópticas, se presenta el fenómeno de dispersión. Geométricamente puede explicarse este fenómeno de la siguiente manera: la señal de entrada incide en la fibra con un cierto ángulo; puesto

que esta señal se introduce mediante un haz de luz de cierto ancho, uno de los lados tendrá más camino óptico recorrido que el otro. En términos de rayos, aquél que incida primero llegará primero. Sin embargo, en las fibras ópticas esta explicación es ilustrativa del fenómeno pero no del todo útil. Una mejor manera de explicar la dispersión es que los diferentes modos de propagación lo hacen a diferentes velocidades, esto tiene como efecto que la señal (i.e. la energía que porta) se *haga más ancha en el tiempo* o disperse [8]. El estudio de este efecto es de suma importancia en el caso de la propagación de pulsos pues la dispersión hace que estos pierdan intensidad, lo que puede originar que al llegar al otro extremo de la fibra sea imposible recuperar la información enviada.

Por lo anterior, los sistemas de comunicación a larga distancia con fibras ópticas requieren, igual que otros sistemas, estaciones de repetición. Sin embargo, en el caso de las fibras, la distancia entre repetidoras es grande. Además, en la actualidad se estudian diferentes perfiles de pulsos y diferentes materiales para las fibras que permiten la autocompresión de los pulsos, dicho en otras palabras, que impiden la dispersión de la velocidad de grupo y por tanto la deformación de los pulsos. Esto podría hacer posible que las repetidoras fueran innecesarias.

Para la propagación de pulsos ultracortos en fibras ópticas es necesario estudiar la dispersión de la velocidad de grupo y la manera en que se deforman los pulsos debido a este efecto. La respuesta de un medio a un estímulo (i.e. señal de entrada) depende de la frecuencia de ésta, lo cual se traduce, para el caso de la fibra óptica (que es un dieléctrico) en que el índice de refracción tenga una dependencia de la frecuencia $n(\omega)$ y por tanto que la velocidad de propagación dependa también de ella. La dependencia $n(\omega)$ se da básicamente por las resonancias electrónicas características de los materiales [1], sin embargo, la ecuación de Sellmeier describe correctamente esta dependencia de

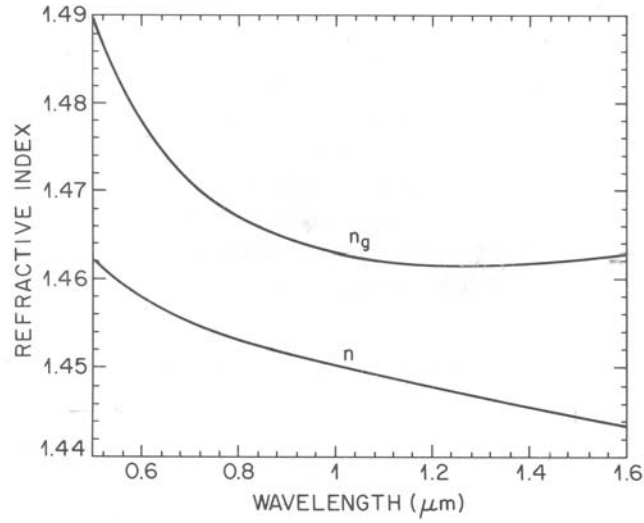


Figura 1.6: Índice de refracción e índice grupal.

la siguiente manera

$$n(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2},$$

donde los coeficientes B_j se obtienen al ajustar mediante diferentes métodos la ecuación con la curva experimental (ver fig. 1.6). La figura 1.6 muestra cómo el índice de refracción decae monótonicamente cuando la longitud de onda λ aumenta, a continuación se explicarán el significado e importancia del índice grupal.

Los fenómenos de dispersión se describen utilizando la constante de modo de propagación β , esta constante es de utilidad para describir la dispersión a diferentes aproximaciones y se define como una serie de Taylor alrededor de la frecuencia central ω_0 :

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{d^m \beta}{d\omega^m} (\omega - \omega_0)^m, \quad (1.3)$$

se definen los coeficientes

$$\beta_m = \left[\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right]_{\omega=\omega_0}$$

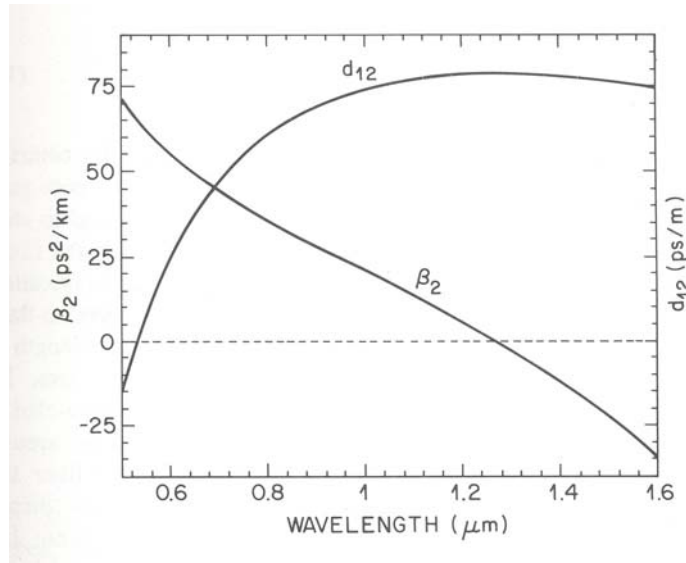


Figura 1.7: Parámetro de dispersión

donde

$$\beta_1 = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{v_g} \quad (1.4)$$

y

$$\beta_2 \approx \frac{\omega}{c} \frac{d^2 n}{d\omega^2}. \quad (1.5)$$

Puesto que n_g está relacionada de manera inversa con la velocidad grupal, puede esperarse que a la longitud de onda en que el índice grupal alcance su valor mínimo, la velocidad de grupo alcanzará su máximo. Este punto es cuando $\lambda_c \simeq 1.3\mu m$ como se aprecia en la figura 1.6. Por otro lado, el coeficiente β_2 está relacionado con la segunda derivada del índice de refracción por lo que puede esperarse que sea cero en el mismo punto en que n_g tenga su mínimo. Esto sucede efectivamente como se aprecia en la figura 1.7. A longitudes de onda menores que λ_c se dice que el régimen de dispersión es normal debido a que un pulso de menor longitud de onda se transmitirá a menor velocidad, mientras que para valores mayores sucede exactamente lo opuesto, por lo

que se dice que en esta región el régimen de dispersión es anómalo.

Se ha visto en este capítulo que tanto el mínimo de las pérdidas como el de la constante de dispersión se encuentran en la región $\lambda \in (1.22\mu m, 1.55\mu m)$ por lo que es conveniente trabajar cerca de estas longitudes de onda. Como se ha mencionado antes, los sistemas modernos trabajan en la region cercana a los $1.55\mu m$, por lo que el régimen de dispersión es anómalo. El índice de refracción grupal no tiene su mínimo en este punto, sin embargo el espectro de pérdidas está muy cerca de su mínimo, por lo que se sacrifica velocidad por obtener la mínima pérdida.