

# Capítulo 1

## Comunicaciones por fibra óptica.

Un Sistema de Comunicaciones es aquél que sirve para transmitir información de un lugar a otro, ya sea que estén separados por unos cuantos metros o por distancias intercontinentales. Usualmente la información es transportada por una onda electromagnética de alta frecuencia denominada onda portadora, cuya frecuencia puede variar desde algunos kilohertz hasta cientos de terahertz. Los sistemas de comunicaciones ópticas utilizan señales portadoras de altas frecuencias (alrededor de 100 THz) en la región visible o en la de infrarrojo cercano del espectro electromagnético. En ocasiones estos sistemas son llamados sistemas de ondas luminosas [1] para distinguirlos de los sistemas de microondas, cuyas frecuencias portadoras son típicamente cinco órdenes de magnitud más pequeñas (alrededor de 1GHz). Los sistemas de comunicaciones de fibra óptica son sistemas de comunicación ópticos que utilizan fibras ópticas como líneas de transmisión. Estos sistemas se han utilizado a nivel mundial desde 1980 y han revolucionado la tecnología relacionada con las telecomunicaciones.

### **1.1 Evolución de las Comunicaciones por Fibra Óptica**

El desarrollo de la telegrafía en la década de 1830 a 1840 marcó el comienzo de la era de las comunicaciones eléctricas. Utilizando terminología actual, la tasa de transmisión de bits equivalente o efectiva  $B$  de ese tipo de sistemas era de alrededor de 10b/s con el uso de técnicas de codificación como el código Morse. El uso de estaciones repetidoras intermedias permitió establecer comunicaciones a través de grandes distancias (alrededor de 1000 Km) [1].

La primera comunicación transatlántica exitosa fue posible en 1886. La telegrafía utilizaba esencialmente un esquema digital mediante dos pulsos eléctricos de diferente duración (los puntos y líneas del código Morse). La invención del teléfono en 1876 produjo un importante cambio ya que las señales eléctricas eran transmitidas en forma analógica por medio de una corriente eléctrica de variación continua.

El desarrollo de redes telefónicas mundiales durante el siglo XX produjo diversos avances en el diseño de sistemas eléctricos de comunicaciones. El uso de cables coaxiales en lugar de pares de alambres incrementó considerablemente la capacidad de los sistemas. El primer sistema de cable coaxial, puesto en servicio en 1940, fue un sistema con portadora de 3 MHz capaz de transmitir 300 canales de voz o un solo canal de televisión. El ancho de banda de este tipo de sistemas es limitado debido a las

pérdidas del cable dependiendo de la frecuencia, que se incrementan rápidamente a frecuencias mayores de 10 MHz.

Esta limitación condujo al desarrollo de sistema de comunicaciones de microondas, en los cuales una señal electromagnética portadora con frecuencias en el rango de 300 MHz a 300 GHz es utilizada para transmitir señales utilizando las técnicas de modulación adecuada

El primer sistema de microondas fue puesto en servicio en 1948 y operaba a una frecuencia portadora de 6 GHz. Desde entonces, tanto los sistemas de cable coaxial como los de microondas han evolucionado considerablemente y son capaces de operar a tasas de transmisión de aproximadamente 100 Mb/s [2].

El sistema coaxial más avanzado fue puesto en funcionamiento en 1948 y operaba a una tasa de transmisión de 274 Mb/s [2]. Una gran desventaja de este tipo de sistemas coaxiales es su corta longitud de enlace (de 3 a 5 km como máximo), lo cual hace que el sistema y su operación sean altamente costosos.

Los sistemas de microondas generalmente permiten distancias de enlace mayores y operan en bandas de frecuencias más altas en comparación con los sistemas de cable coaxial. Un parámetro comúnmente utilizado para evaluar el desempeño de un sistema de comunicaciones es el producto tasa de transmisión-distancia, BL, donde B es la tasa de transmisión y L es la longitud de enlace.

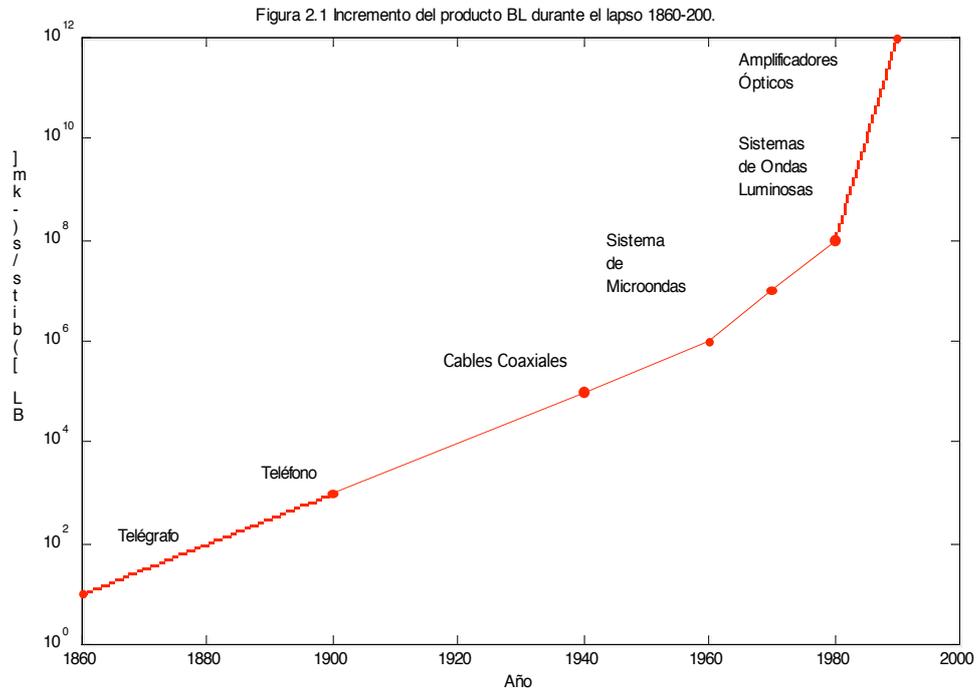


Figura 1.1 Incremento del producto BL durante el lapso 1860-2000. La aparición de nuevas tecnologías se indica con círculos [2].

Durante la segunda mitad del siglo XX se comprendió que sería posible un incremento de varios órdenes de magnitud en el producto BL si se utilizasen ondas ópticas como

portadoras. Sin embargo, no existían en ese momento (la década de 1950) ninguna fuente óptica coherente ni un medio de transmisión adecuado.

La invención del láser y su demostración en el año de 1960 resolvieron el primer problema. Entonces los esfuerzos se enfocaron en hallar la manera de utilizar el láser para comunicaciones ópticas. Se aportaron muchas ideas durante la década de 1960, siendo una de las más notables aquella que proponía confinar la luz a través de lentes de gas. En 1966 se afirmó que las fibras ópticas podrían ser la mejor opción, que las fibras guiaban la luz de una manera similar a como los electrones son guiados en alambres de cobre. El mayor problema consistía en las grandes pérdidas de las fibras ópticas de esa época, que eran mayores a 1000 dB/km. En el año de 1970 ocurrió un gran progreso, cuando las pérdidas de las fibras pudieron ser reducidas a valores por debajo de 20 dB/km en la región de longitudes de onda cercanas a 1  $\mu\text{m}$  [3]. Casi al mismo tiempo, se demostró la operabilidad de láseres semiconductores de arseniuro de galio (GaAs) en modo continuo y a temperatura ambiente [4].

La disponibilidad simultánea de fuentes ópticas compactas y fibras ópticas de pérdidas bajas condujeron a un esfuerzo mundial para desarrollar sistemas de comunicaciones basados en fibras ópticas. La figura 1.2 muestra el incremento de la capacidad de los sistemas ópticos de comunicaciones logrado después de 1980 a través de diversas generaciones de desarrollo. Como se muestra en dicha figura, las fases de investigación y desarrollo fueron seguidas de manera cercana por el despliegue comercial de estos sistemas. El progreso es claramente rápido, como lo constata la multiplicación de la tasa de transmisión en un factor de 1000,000 en un periodo de menos de 25 años. Durante ese mismo lapso, las distancias de transmisión crecieron de 10 a 10,000 km. Como resultado, el producto BL de los sistemas ópticos de comunicaciones actuales puede llegar a ser  $10^7$  veces mayor que el de los sistemas de la primera generación.

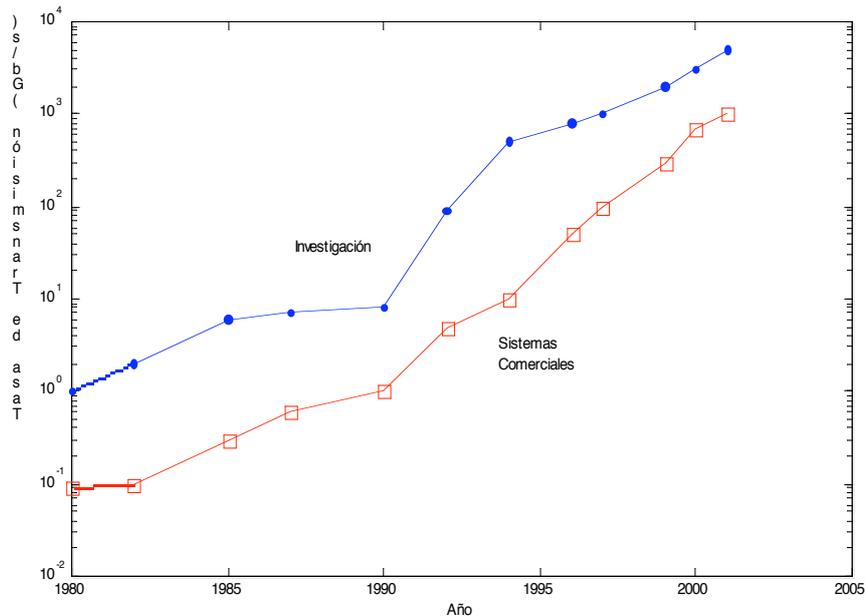


Figura 1.2 Incremento de la capacidad de los sistemas ópticos después de 1980.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Los sistemas comerciales (cuadrados) siguen a los sistemas creados en investigación (puntos) con un retraso de pocos años. El cambio en la pendiente después de 1992 se debe a la aparición de sistemas WDM [2]

## 1.2 Evolución y tendencias actuales del desarrollo de las comunicaciones ópticas.

Las investigaciones relacionadas con sistemas de comunicación de fibra óptica comenzaron alrededor del año 1975. Los extraordinarios progresos alcanzados en el lapso de 1975-200 pueden agruparse en numerosas generaciones distintas.

La primera generación de sistemas ópticos de comunicaciones operaba cerca de  $\lambda=0.8\mu\text{m}$  y utilizaba láseres semiconductores de GaAs. Después de diversas pruebas de campo durante el lapso de 1977 a 1979, dichos sistemas estuvieron disponibles comercialmente en el año de 1980. Trabajaban a una tasa de transmisión de 45 MB/s y permitieron un espaciamiento de repetición (longitud de enlace) de hasta 10 km, reduciendo considerablemente los costos de instalación y mantenimiento de los repetidores en comparación con los sistemas de cable coaxial, cuyo espaciamiento de repetición era de 1 km.

Durante la década de 1970 los científicos se percataron de que el espaciamiento de repetición podía ser incrementado considerablemente si los sistemas ópticos operaban con portadoras cerca de la región de  $1.3\mu\text{m}$ , donde las pérdidas de las fibras son menores a 1 dB/km. Además, las fibras ópticas presentan dispersión mínima en esta región de longitudes de onda, lo cual originó esfuerzos a nivel mundial para desarrollar láseres semiconductores y detectores de InGaAs que operaran cerca de  $\lambda=1.3\mu\text{m}$ . La segunda generación de sistemas de comunicación basados en fibras ópticas estuvieron disponibles al principio de la década de 1980, pero la tasa de transmisión de los primeros sistemas estuvo limitada a menos de 100 Mb/s debido a la dispersión presente en las fibras multimodo. Esta limitación desapareció con el uso de fibras ópticas monomodo. Un experimento de laboratorio realizado en 1981 demostró la posibilidad de llevar a cabo transmisiones a 2 Gb/s a través de 44 km de fibra óptica monomodo, con la pronta entrada de sistemas comerciales al mercado. [1]

En 1987 la segunda generación de sistemas ópticos de comunicaciones, operando a tasas de transmisión de hasta 1.7 Gb/s con espaciamientos de repetición de 50 km estaba comercialmente disponible. El espaciamiento de repetición de estos sistemas se encontraba limitado debido a las pérdidas de las fibras en el rango espectral de  $1.3\mu\text{m}$ , con un valor típico de 0.5 dB/km. Las pérdidas del  $\text{SiO}_2$  son mínimas cerca de  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ : en 1979 se obtuvo un pérdida de 0.2 dB/km en ese rango espectral [2]. Sin embargo, la introducción de sistemas ópticos de tercera generación se vio considerablemente retrasada debido a una alta dispersión cerca de  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ . No podían utilizarse láseres semiconductores de InGaAsP convencionales debido al ensanchamiento de pulsos resultante de la oscilación simultánea de varios modos longitudinales.

El problema de la dispersión puede resolverse ya se utilizando fibras de dispersión desplazada (*dispersión-shifted fibers* en inglés [2]) diseñadas para presentar una dispersión mínima cerca de  $\lambda=1.55\mu\text{m}$ , o bien limitando el espectro del láser a un único modo longitudinal. Ambas técnicas fueron practicadas durante la década de 1980 y en 1985 experimentos de laboratorio indicaron la posibilidad de transmitir información a tasas de hasta 4Gb/s a través de distancias mayores de 100 km [5]. En 1990 estuvieron disponibles comercialmente sistemas ópticos de tercera generación que operaban a

tasas de transmisión de 2.5 Gb/s. Estos sistemas eran capaces de trabajar a tasas de transmisión de hasta 10 Gb/s [6]. El mejor desempeño se logra utilizando fibras de dispersión desplazada en combinación con láseres de oscilación en un único modo longitudinal.

Una desventaja de los sistemas de  $\lambda=1.55\mu\text{m}$  de tercera generación es que la señal es regenerada periódicamente utilizando repetidores electrónicos con espaciamiento de típicamente 60 a 70 km. El espaciamiento puede aumentarse haciendo uso de técnicas de detección coherente homodinas o heterodinas, ya que éstas mejoran la sensibilidad del receptor. Los sistemas que utilizan dichas técnicas se denominan sistemas ópticos coherentes, los cuales estuvieron en etapa de desarrollo durante la década de 1980. Sus ventajas potenciales fueron demostradas a través de diversos experimentos, pero su introducción comercial fue pospuesta debido al advenimiento de los amplificadores en fibra en el año de 1989.

La cuarta generación de sistemas ópticos de comunicaciones utiliza amplificación óptica para incrementar el espaciamiento de repetición y multicanalización por división de longitud de onda (*Wavelength-Division Multiplexing*, WDM) para incrementar las tasa de transmisión de bits. Como puede observarse en las diferentes pendientes antes y después de 1992 en la figura 1.2, el advenimiento de la técnica WDM comenzó una revolución que dio como resultado la duplicación de la capacidad de los sistemas cada 6 meses aproximadamente, permitiendo a los sistemas ópticos operar a tasas de 10 Tb/s en 2001. En la mayoría de los sistemas WDM las pérdidas de las fibras son compensadas de manera periódica usando amplificadores de fibra óptica con impurezas de erbio (*erbium-doped fiber amplifiers*, EDFA) con distancias de separación en el rango de 60 a 80 km. Estos amplificadores fueron desarrollados después de 1985 y estuvieron disponibles comercialmente a partir de 1990. Un experimento en 1991 demostró la posibilidad de realizar una transmisión a 21,000 km con una tasa de 2.5 Gb/s, y a 14,300 km con una tasa de 5 Gb/s, utilizando una configuración de lazo re circulante [7], lo cual demostró a su vez que era posible crear un sistema submarino de transmisión totalmente óptico basado en amplificadores para comunicaciones intercontinentales. En 1996 fueron realizadas transmisiones a 11,300 km con tasa de 5 Gb/s usando los cables submarinos actuales [8], en incluso estuvieron disponibles sistemas comerciales transatlánticos y transpacíficos.

Desde entonces, un gran número de sistemas ópticos submarino han sido tendidos a nivel mundial:

El sistema FLAG (*fiber-optic Link Around the Globe*), de 27,000km, comenzó a operar en 1998, comunicando numerosos países asiáticos y europeos [9]. Otro gran sistema óptico conocido como África One, que rodea el continente africano y cubre una distancia total de transmisión de alrededor de 35,000 km, comenzó a funcionar en 2000 [10]. Varios sistemas WDM fueron tendidos a través de los océanos Atlántico y Pacífico durante el período de 1998 a 2001 en respuesta al incremento en el tráfico de datos debido a Internet.

El objetivo actual del desarrollo de los sistemas ópticos es aumentar la capacidad de los sistemas transmitiendo un mayor número de canales por medio de la técnica WDM. Con los grandes anchos de banda resultantes de las señales WDM, generalmente no es posible amplificar todos los canales utilizando un solo amplificador, por lo cual nuevos

esquemas de amplificación están siendo explorados para cubrir la región espectral comprendida entre  $\lambda=1.45\mu\text{m}$  y  $\lambda=1.62\mu\text{m}$ . Ello dio origen en 200 a un experimento con una tasa de transmisión de 3.28 Tb/s, en el que 82 canales de 40 Gb/s cada uno fueron transmitidos simultáneamente a través de 3000 km, dando un producto BL de casi 10,000 Tb-km/s. al cabo de un año fue posible aumentar la capacidad del sistema a casi 11 TB/s ( 273 canales WDM, cada uno operando a 40 Gb/s), pero la distancia de transmisión estaba limitada a 117 km[11]. En otro experimento, 300 canales WDM cada uno operando a 11.6 Gb/s , fueron transmitidos a través de 7, 380 km, resultando un producto BL de más de 25,000 Tb/s [12].

La quinta generación de sistemas ópticos de comunicaciones se relaciona con el incremento del rango de longitudes de onda sobre el cual puede opera simultáneamente un sistema WDM [2]. La ventana de longitudes de onda convencional, conocida como banda C [2], cubre el rango espectral de 1.53 a 1.57 $\mu\text{m}$  y está siendo extendida tanto por su extremo de longitudes de onda más cortas como por el de longitudes de onda más largas, llamadas banda S y L, respectivamente. La técnica de amplificación de Raman [2] puede ser usada para señales en cualquiera de las tres bandas, e incluso ha sido desarrollado un nuevo tipo de fibra, denominada fibra seca (*dry fiber*), que posee la propiedad de que las pérdidas de la fibra son menores en todo el rango espectral comprendido entre 1.3 y 1.65 $\mu\text{m}$  [13]. La existencia de estas fibras y os nuevos esquemas de amplificación podrían dar origen a sistemas con miles de canales WDM. Los amplificadores de fibra óptica con impurezas de erbio (EDFA) fueron utilizados para amplificación de solitones por primera vez en 1989; desde entonces, diversos experimentos han demostrado el potencial que a futuro poseen los sistemas de comunicaciones basados en solitones.

### 1.3 Sistemas Ópticos de Comunicaciones.

En principio un sistema óptico de comunicaciones se diferencia de un sistema de microondas únicamente por el rango de frecuencias de sus ondas portadoras. Las frecuencias de las portadoras ópticas son típicamente de alrededor de 200 THz [2], en contraste con las portadoras de sistemas de microondas, con frecuencias desde 300 MHz hasta 300 GHz [13]. La capacidad de un sistema óptico puede ser hasta 10,000 veces mayor que el de un sistema de microondas debido al hecho de poseer portadoras de tan altas frecuencias, ya que el ancho de banda de la onda moduladora puede ser un muy pequeño porcentaje de la frecuencia de la onda portadora. Si por ejemplo, se consideran señales moduladoras que posean un ancho de banda del 1% de la frecuencia portadora, entonces el ancho de banda sería del orden de terahertz, implicando una capacidad de envío de señales de cientos de canales de TV a un mismo tiempo, o envío de señales digitales con tasas de transmisión del orden de 1 Tb/s, dependiendo de los esquemas de modulación y de codificación [2,15].

En la figura 1.3 se muestra un diagrama de bloques de un sistema óptico de comunicaciones, el cual consiste en un transmisor, un canal de comunicaciones y un receptor, que son elementos comunes para todos los sistemas de comunicaciones. Los sistemas ópticos de comunicaciones pueden ser clasificados en dos grandes categorías: guiados y no guiados [2,18]. En el caso de sistemas ópticos guiados, la luz permanece confinada en el espacio utilizando fibras ópticas. Debido a que todos los sistemas

ópticos guiados de comunicaciones utilizan fibras ópticas, son llamados sistemas de comunicaciones vía fibra óptica. En el caso de los sistemas ópticos de comunicaciones no guiados, el haz óptico emitido por el transmisor se propaga en el espacio de manera similar a como lo hacen las microondas. Sin embargo, los sistemas ópticos no guiados son menos adecuados que las microondas para aplicaciones de radiodifusión, ya que los haces ópticos se propagan de manera más directiva hacia delante (debido a su corta longitud de onda). El uso de esos sistemas requiere, en general, del apuntamiento preciso entre el transmisor y el receptor. En el caso de propagación terrestre, las señales de los sistemas ópticos no guiados se deterioran considerablemente debido al esparcimiento libre [2].

El uso de comunicaciones vía fibra óptica es en general posible en cualquier área que requiera transferir información de un lugar a otro; no obstante, los sistemas basados en fibra óptica se han desarrollado principalmente para aplicaciones en telecomunicaciones, debido a que las redes telefónicas mundiales se utilizan para transferir además de voz, señales de datos de computadoras y mensajes de fax.

Las aplicaciones en telecomunicaciones pueden dividirse en dos categorías; de largo alcance y de corto alcance, dependiendo de que las señales ópticas sean transmitidas a distancias relativamente cortas o largas en comparación con distancias interurbanas (alrededor de 100 km).

Los sistemas de telecomunicaciones de largo alcance requieren líneas troncales de alta capacidad y se benefician del uso de sistemas basados en fibra óptica. Como se vio anteriormente, cada nueva generación de sistemas ópticos es capaz de operar a tasas de transmisión más altas a través de distancias mayores, aunque la regeneración periódica de las señales ópticas mediante el uso de repetidores es todavía necesario para la mayoría de los sistemas de largo alcance. No obstante, el incremento de más de un orden de magnitud tanto en la tasa de transmisión como en el esparcimiento de los repetidores de los sistemas ópticos en comparación con los sistemas coaxiales ha hecho de los primeros una opción muy atractiva para aplicaciones de largo alcance. Además pueden alcanzarse distancias de transmisión de miles de kilómetros mediante el uso de amplificadores ópticos.

Las aplicaciones en telecomunicaciones de corto alcance cubren el tráfico intraurbano y las redes locales. Estos sistemas generalmente operan a tasas de transmisión bajas y a distancias de menos de 10 km [2]. El uso de sistemas ópticos de un solo canal en este tipo de aplicaciones no es redituable, por lo que deben considerarse esquemas de redes multicanales con diversos servicios. El concepto de redes digitales de servicios integrados de banda ancha requiere sistemas de comunicaciones de alta capacidad que puedan transportar múltiples servicios. La tecnología de modo asíncrono de transferencia (*Asynchronous Transfer mode*, ATM) también requiere grandes anchos de banda que sólo los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica pueden satisfacer.

## 1.4 Componentes de los sistemas ópticos de comunicaciones



Figura 1.3 Diagrama de bloques de un sistema óptico de comunicaciones típico.

El diagrama de bloques de la figura 1.3 puede representar a un sistema de telecomunicaciones vía fibra óptica, con la única diferencia de que el canal de comunicaciones es un cable de fibra óptica. Los otros dos componentes, el transmisor y el receptor ópticos, son diseñados para satisfacer las necesidades específicas y adecuarse a las características del canal de transmisión.

### 1.4.1 Las fibras ópticas como canal de comunicaciones

La función de un canal de comunicaciones es transportar la señal (óptica) desde un transmisor hasta un receptor sin distorsionarla. La mayoría de los sistemas ópticos utilizan fibras ópticas como canal de comunicaciones, ya que las fibras de dióxido de silicio pueden transmitir la luz con pérdidas muy pequeñas (0.2 dB/km). Aun con estas bajas pérdidas, la potencia se reduce únicamente al 1 % de la potencia inicial después de 100 km. Es por esta razón que las pérdidas de las fibras constituyen un parámetro de diseño importante y determinante el espaciamiento de los repetidores o amplificadores en un sistema óptico de largo alcance. Otros parámetros de diseño importante es la dispersión de la fibra, que provoca el ensanchamiento de los pulsos luminosos conforme se propagan. Si los pulsos ópticos se dispersan demasiado, la señal transmitida se degrada severamente, y a la larga será imposible recuperar con precisión la señal original.

Este problema es más severo en el caso de las fibras multimodo, ya que los pulsos se ensanchan rápidamente (típicamente menor que 0.01ns/km) como para considerarlo aceptable en la mayoría de las aplicaciones, y puede ser reducido adicionalmente controlando la anchura espectral de la fuente óptica. Sin embargo, la dispersión del

material establece el límite definitivo de la tasa de transmisión y la distancia de los sistemas de comunicaciones vía fibra óptica [2].

### 1.4.2 Transmisores ópticos.

La función de un transmisor óptico es convertir una señal eléctrica en una señal óptica y enviar esta última hacia la fibra óptica. La figura 1.4 muestra el diagrama de bloques de un transmisor óptico, que consiste en una fuente óptica, un modulador y un acoplador de canal [2]. Los láseres semiconductores o los diodos emisores de luz (*LEDs, Light-Emitting Diodes*) son utilizados como fuentes luminosas debido a su compatibilidad con el canal de comunicaciones de fibra óptica. La señal óptica es generada al modular la onda óptica portadora. Aunque generalmente se utilizan moduladores externos, en algunos casos puede prescindirse de ellos, ya que la salida de las fuentes ópticas semiconductoras se puede modular directamente al variar la corriente de inyección. Este tipo de esquemas simplifican el diseño del transmisor y generalmente son reutilizables. El acoplador es regularmente un micro lente que enfoca la señal óptica en el plano de entrada de la fibra óptica con la mayor eficiencia posible [2].



Figura 1.4 Diagrama de bloques de los componentes de un transmisor óptico.

La potencia de entrada es un parámetro sumamente importante, ya que al elevarla puede incrementarse el espaciamiento entre repetidores (o amplificadores). Sin embargo, la existencia de un conjunto de diversos efectos no lineales limita el valor de dicha elevación de potencia.

La potencia de entrada es relativamente baja (menor que -10 dBm) cuando se utilizan LEDs, pero los láseres semiconductores pueden emitir potencias de alrededor de 10 dBm. Debido a que los LEDs están también limitados en cuanto a su frecuencia máxima de modulación, la mayoría de los sistemas ópticos pueden trabajar a tasas de hasta 40 Gb/s [2].

### 1.4.3 Receptores ópticos

Un receptor óptico convierte la señal óptica proveniente de la fibra óptica en la señal eléctrica original. La figura 1.5 muestra un diagrama de bloques. Consiste en un acoplador, un fotodetector y un demodulador.

El acoplador enfoca hacia el fotodetector la señal óptica recibida. Los fotodiodos semiconductores son utilizados generalmente como foto detectores debido a su compatibilidad con el sistema en general. El diseño del demodulador depende del formato de modulación utilizado. En particular, el sistema óptico de formatos FSK y PSK requieren técnicas de demodulación homodinas y heterodinas [2]. La mayoría de los sistemas ópticos de telecomunicaciones utilizan un esquema denominado modulación de intensidad con detección directa, abreviada generalmente como IM/DD debido a su nombre en inglés (*Intensity Modulation with Direct Detection*). En este caso, la demodulación es realizada por un circuito de decisión que identifica a los bits como ceros y unos, dependiendo de la amplitud de la señal eléctrica. La precisión del circuito de decisión depende de la relación señal a ruido (*Signal-to-Noise Ratio, SNR*) de la señal eléctrica generada en el fotodetector.

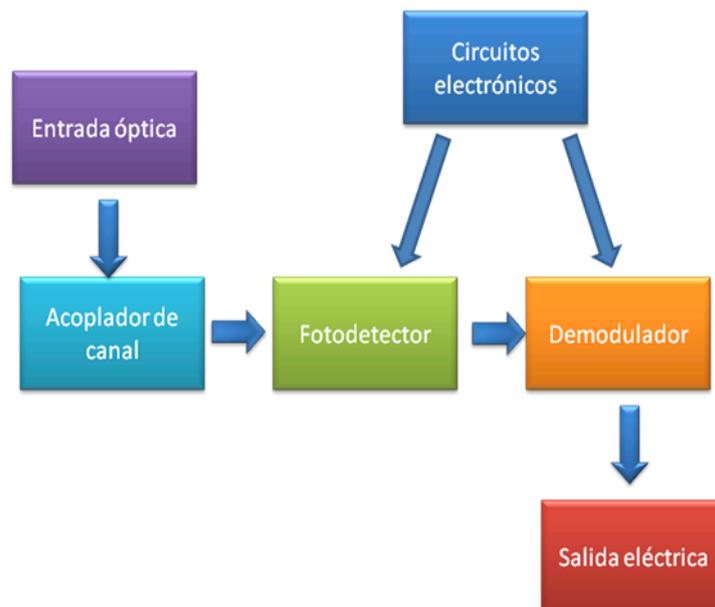


Figura 1.5 Diagrama de bloques de los componentes de un receptor óptico.

La mayoría de los sistemas ópticos exigen para su operación una tasa de error de bits (*Bit-Error Rate, BER*) de  $10^{-9}$ , e incluso algunos llegan a requerir un BER muy pequeño, del orden de  $10^{-14}$ . En ocasiones son utilizados códigos correctores de errores para mejorar el BER de un sistema de comunicaciones.

Un parámetro importante de cualquier receptor es su sensibilidad, ésta se define como el mínimo valor promedio de la potencia requerido para obtener un BER de  $10^{-9}$ . La sensibilidad del receptor depende de la SNR, que a su vez depende de varias fuentes de ruido que degradan la señal recibida. Incluso para un receptor perfecto existe una adición de ruido por el proceso de detección en sí, el cual es denominado ruido cuántico (*quantum noise*) [2], y tiene su origen en la naturaleza de partícula del electrón. En la práctica ningún receptor trabaja en el límite del ruido cuántico debido a la existencia de otras fuentes de ruido, algunas de las cuales son internas en el receptor, como el ruido

térmico. Existen otras fuentes de ruido en el transmisor y en la fibra, por ejemplo: cualquier proceso de amplificación de la señal óptica a lo largo de la línea de transmisión mediante amplificadores ópticos introduce un ruido conocido como ruido de amplificador, el cual tiene su origen en el proceso fundamental de emisión espontánea [2]. La dispersión cromática en las fibras ópticas origina ruido adicional a través de fenómenos tales como la interferencia intersímbolo y el ruido de partición de modos (*mode-partition noise*) [2].

La sensibilidad del receptor es determinada por un efecto acumulativo de todos los posibles mecanismos de ruido que degradan la relación señal a ruido. En general, la sensibilidad del receptor también depende de la tasa de transmisión, ya que el efecto de ciertas fuentes de ruido es proporcional al ancho de banda de la señal.

## Bibliografia

- [1] Tesis
- [1] Agrawal G. P. *Fiber Optic Communication Systems*, 3<sup>rd</sup> edition, Wiley-Interscience, USA (2002).
- [2] Kogelnik H. *IEEE Journal of Selected Topics on Quantum Electronics*, 6, p. 1279 (2000)
- [3] Kapron F.P., Keck D. B. and Maurer R.D. *Applied Physics Letters*, 17 p. 43 (1970)
- [4] Hayashi I., Panish M. B., foy P.W. and Sumski S. *Applied Physics Letters*, 17, p.109 (1985)
- [5] Gnauck A. H., Kasper B. L., Linke R. A. et. al. *Journal of Lightwave Technology*, 3,p.1032 (1985)
- [6] Nakagawa K. *Transactions of the IECE of Japan Journal*, 78B, p.713 (1995)
- [7] Bergano N.S., Aspell J., Davidson C.R. et. al. *Electronics Letters*, 27, p.1889 (1991)
- [8] Otani T., Goto K. et. al. *Electronics Letters*, 31, p. 380 (1995)
- [9] Welsh T., Smith R., Azami H. and Crisner R. *IEEE Communications Magazine*, 34 (2), p. 50 (1996)
- [10] Marra W.C. and Schesser J. *IEEE Communicatios Magazine*, 34(2), p.50 (1996)
- [11] Fukuchi K., Kasamatsu T., Morie M. et. al. Paper PD24. *Proc. Optical Fiber Communications Conference*. Optical Society of America, Washington, D.C. (2001)
- [12] Vareille G., Pitel F. and Marcerou J. F. Paper PD22. *Proc. Optical Fiber Communications Conference*, Optical Society of America, Washington, D.C. (2001)
- [13] Thomas G. A., Shraiman, B. L., Glodis P. F. and Stephan M. J. *Nature*, 404, p. 262 (2002)
- [14] Pozar D.M. *Microwave Engineering*, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley-Interscience, USA (1998)
- [15] Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, 2<sup>nd</sup> edition, Prentice Hall, USA (2001)
- [16] Mynbaev D.K. and Scheiner, L. *Fiber Optic Communications Technology*, Prentice Hall, USA (2001).