

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Cableado de una red de voz y datos

Es conveniente entender que el cableado de una red de voz y datos es la infraestructura o camino a través del cual viajan los paquetes de información generados por equipos como teléfonos, computadoras, cámaras de video, lectoras de tarjetas, entre otros.

2.2 Cableado tradicional

Anteriormente, la interconexión de diferentes dispositivos y equipos para formar una red, se lograba mediante la construcción de un cableado tradicional, el cual se componía de cables coaxiales. En la mayoría de los casos se usaban diferentes cables especiales para cada equipo en cuestión, lo que provocaba dificultades en la administración de la red del sistema de comunicaciones.

2.2.1 Desventajas del cableado tradicional

La mayor parte de las fallas en las comunicaciones están relacionadas con el mal funcionamiento, la vejez del cableado y los defectos de una mala instalación.

La vida útil de un cableado tradicional se estima en cinco años. En realidad lo que sucede es que dicho cableado muy pronto presenta características y capacidades técnicas escasas, siendo necesario pensar en una solución con altas características de transporte de información y que funcione 15 años en forma garantizada.

Las principales causas de falla de un cableado tradicional son las siguientes:

- Mala calidad de los componentes.
- La no observación de las normas en su planificación e instalación.
- No exigir la certificación de los componentes. Este punto es el único que garantiza los límites de explotación de los elementos que integran el cableado.
- La instalación del cableado no se realiza con base en un estudio previo de las necesidades futuras de la empresa.
- No considera la implementación un sistema abierto que permita su futura expansión.

2.3 Cableado estructurado

Se refiere a un sistema de interconexión único para la transferencia de voz, datos, imágenes, video y otros servicios tanto actuales como futuros y que está diseñado con una arquitectura integral, abierta, con posibilidades de crecimiento y soporte de nuevas tecnologías.

2.3.1 Ventajas del cableado estructurado

- Facilita las tareas de mantenimiento y supervisión, ya que resulta sencillo identificar las partes que lo componen.
- Posibilita la inclusión de una alta densidad de servicios.
- Permite la integridad de diferentes tecnologías de redes.
- Resulta fácilmente ampliable.
- Asegura un funcionamiento óptimo si se cumplen las normas y los requisitos de su instalación.

2.4 Principio de funcionamiento del cableado estructurado

Conocer el principio teórico de una línea de transmisión, permite entender el funcionamiento del cableado estructurado.

Una línea de transmisión puede estar conformada por un par de conductores que permiten la transferencia de energía eléctrica desde una fuente hacia una carga, y cuyo comportamiento depende de la frecuencia, del medio y de la distancia.

Una línea de transmisión se puede comprender como dos conductores separados por un material dieléctrico uniformemente espaciado a lo largo de su longitud.

La **figura 2.1** ilustra una línea de transmisión comprendida por dos conductores de un diámetro (d) que están físicamente separados por una distancia (D). Una tensión eléctrica balanceada (V) es aplicada entre los dos conductores. Una intensidad eléctrica (I) de igual magnitud y de sentido opuesto, fluye en cada conductor.

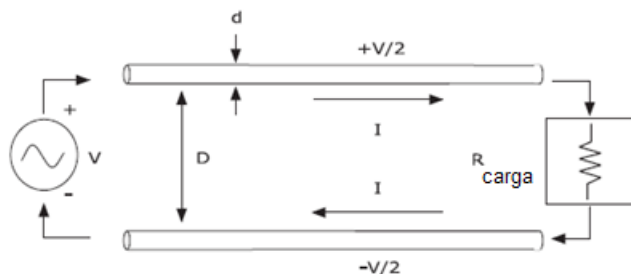


Figura 2.1 Representación eléctrica de una línea de transmisión.

2.4.1 Modelo funcional simple de una línea de transmisión

Se basa solo en pérdidas resistivas como lo ilustra la **figura 2.2**. La tensión eléctrica entregada en cada conductor es directamente proporcional a la intensidad eléctrica y a la resistencia de la línea (R) en Ohm. Mientras más grande es el diámetro del conductor más baja es la resistencia.

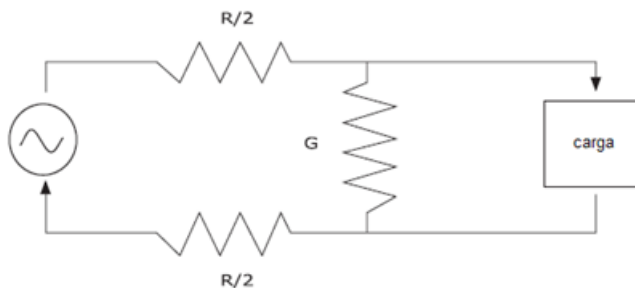


Figura 2.2 Modelo resistivo de una línea de transmisión.

Un factor adicional es la conductancia (G), que representa la fuga de intensidad eléctrica a través de un dieléctrico no ideal. G es el recíproco de la resistencia entre los dos conductores y es siempre expresada de esta manera para propósitos de cálculo.

Con el manejo de distancias más largas así como también de más altas frecuencias, es claro que el modelo puramente resistivo no es adecuado. Un factor adicional ayuda en la explicación de las limitaciones en la distancia y ancho de banda.

La tensión eléctrica aplicada entre los dos conductores causa un movimiento de cargas eléctricas las cuales son depositadas sobre la superficie de cada conductor como se puede apreciar en la **figura 2.3**.

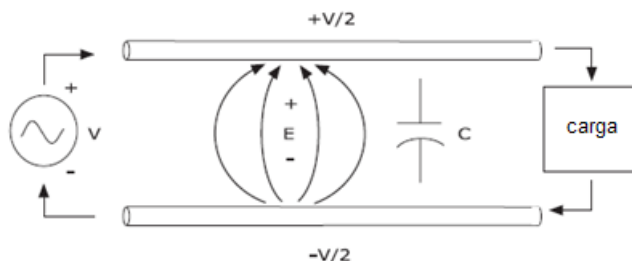


Figura 2.3 Modelo capacitivo de una línea de transmisión.

La distribución de las cargas eléctricas da lugar a la formación de un campo eléctrico (E) en el espacio dieléctrico entre los conductores. Este campo eléctrico es modelado como una capacitancia (C). La capacitancia es medida en Farad (F).

Con el avance de la tecnología de la transmisión, fue necesario considerar un factor adicional en el modelo de las líneas de transmisión.

La intensidad eléctrica a través de los conductores establece un campo magnético concéntrico en cada conductor, como lo ilustra la **figura 2.4**.

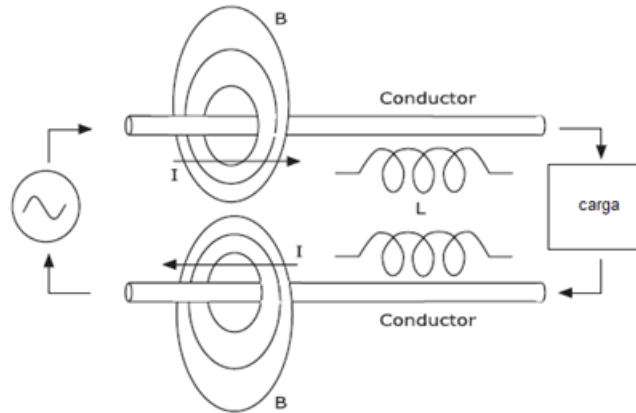


Figura 2.4 Modelo inductivo de una línea de transmisión.

El campo magnético es más intenso en el espacio comprendido entre los dos conductores y más débil en la zona exterior de ambos conductores. Una separación mayor entre los conductores da como resultado un campo magnético más grande y por consecuencia una mayor inductancia. La magnitud de la inductancia también depende de la permeabilidad magnética de cualquier material magnético alrededor de los conductores.

Un material con alta permeabilidad da como resultado una más alta intensidad de campo magnético para una intensidad eléctrica dada y por consecuencia una inductancia más alta. Los efectos de un campo magnético pueden ser modelados como una inductancia. Las unidades de la inductancia son medidas en Henries (H).

Entonces una línea de transmisión puede ser representada por secciones de pequeña longitud (Δx) de circuitos eléctricos pasivos, como se observa en la **figura 2.5**.

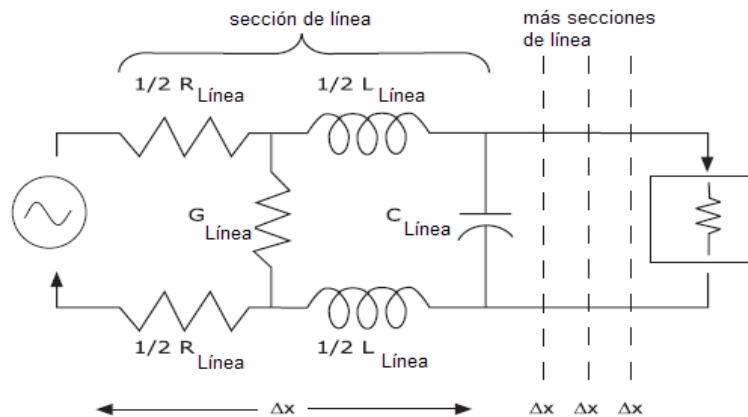


Figura 2.5 Representación de una línea de transmisión.

Estos componentes distribuidos se conocen como parámetros primarios de transmisión en donde:

- R está expresada en Ohms, representa la resistencia de un par de conductores para una longitud incremental (Δx). Las resistencias en serie están relacionadas a las dimensiones y separación de los conductores.

- L expresada en Henries, representa la inductancia de un par de conductores para una longitud incremental (Δx). Las inductancias en serie están relacionadas a las dimensiones y separación de los conductores.
- C expresada en Farads, representa la capacitancia entre un par de conductores para una longitud incremental (Δx). La capacitancia está relacionada a las dimensiones y separación de los conductores y a la constante dieléctrica del material aislante.
- G expresada en Siemens, representa la conductancia entre un par de conductores para una longitud incremental (Δx). La conductancia está relacionada con la pérdida dieléctrica del material aislante.

Los campos eléctricos y magnéticos, los circuitos de intensidad eléctrica y de tensión eléctrica formados, están relacionados por las ecuaciones de Maxwell.

Los parámetros primarios (R , L , G y C) pueden ser calculados desde el conocimiento del diseño físico del cable, lo cual tiende a ser complejo y dependerá de:

- La geometría del cable.
- De las propiedades del material del cable.
- De la frecuencia de la señal aplicada.

No es esencial conocer la relación entre los parámetros para apreciar los conceptos de las líneas de transmisión.

En forma complementaria se tienen los parámetros secundarios de una línea de transmisión, los cuales son:

- Calculados de los parámetros primarios.
- Obtenidos por mediciones directas.

Los parámetros secundarios pueden ser usados para modelar el comportamiento de una señal eléctrica a su paso por un cable. Para este propósito el cable puede ser considerado como una caja negra como lo ilustra la **figura 2.6**.

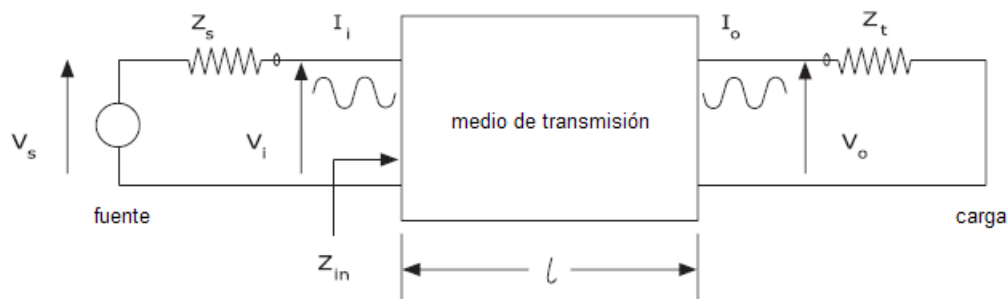


Figura 2.6 Modelo del comportamiento de una señal eléctrica.

2.4.2 Impedancia característica

La impedancia característica corresponde a la impedancia de entrada de una línea de transmisión uniforme de longitud infinita:

$$Z_{in} = V_i / I_i = Z_0, \quad l \rightarrow \infty$$

También corresponde a la impedancia de entrada de una línea de transmisión de longitud finita la cual termina con la misma impedancia característica. En general la impedancia característica tiene su componente resistivo y su componente reactivo. La impedancia característica es una función de la frecuencia de la señal aplicada pero no está relacionada con la longitud del cable.

La potencia máxima es transferida desde la fuente a la carga cuando la impedancia fuente (Z_s) y la impedancia de terminación (Z_t) son iguales al conjugado complejo de la impedancia característica de la línea de transmisión Z_0 .

Dos impedancias son complejas conjugadas si estas tienen el mismo componente resistivo y su componente reactivo tiene signos opuestos.

Bajo estas condiciones, toda la energía es transmitida hacia la carga. En muy alta frecuencia (VHF), la impedancia característica tiende a ser un valor fijo que es resistivo. Por ejemplo un cable coaxial tiene una impedancia de 75 Ohms en altas frecuencias. Típicamente un cable de par trenzado tiene una impedancia característica de 100 Ohms arriba de 1 MHz.

2.4.3 Atenuación

- Se expresa en dB por unidad de longitud, ejemplo dB/1000 pies y es la medida de cuanto se debilita la señal o se reduce su amplitud al viajar a través del cable.
- Se debe a las pérdidas en el cobre, las cuales son ineludibles.
- A las pérdidas en el dieléctrico (disipación), debidas a los materiales de aislamiento y recubrimiento de los conductores y el cable.

Corresponde al cociente en dB entre la potencia de entrada y la potencia de salida cuando la carga y la impedancia fuente son iguales a la impedancia característica del cable

$$(Z_s = Z_t = Z_0^*, \text{ donde } Z_0^* \text{ es el conjugado complejo de } Z_0).$$

Como referencia la potencia de entrada se obtiene midiendo directamente la potencia en la carga sin pasar a través del cable. Para el caso en donde las terminaciones no están perfectamente emparejadas, el cociente de la potencia de entrada con la potencia de salida es llamada atenuación.

$$\text{Atenuación (dB)} = 20 \log (V_i/V_o)$$

$$\text{Cuando: } Z_s = Z_t = Z_0$$

Donde: V_i = Tensión eléctrica de entrada

V_o = Tensión eléctrica de salida

2.4.4 Diafonía

- Acoplamiento no deseado de señales desde el par de transmisión, al par de recepción.
- Se expresa en dB y es una medida de que tan bien están aislados entre si los pares de un cable.
- Mientras mayor es el valor del NEXT en dB menor será el acoplamiento no deseado hacia otros pares, por lo tanto será mejor el cable.

Se refiere a la interferencia de señales entre pares de cable, el cual puede ser causado por un par que toma en forma indeseada la señal de:

- Pares adyacentes del conductor.
- Cables cercanos.
- Está determinada por la longitud del paso del trenzado, mientras más corto sea el paso del trenzado menor será la diafonía.

Por ejemplo, esta interferencia puede resultar de un campo magnético que rodea a un conductor que lleva intensidad eléctrica. La diafonía puede ser inteligible o no, dependiendo del modo de acoplamiento. Existen los siguientes tipos de diafonía: NEXT, near-end crosstalk, FEXT, far-end crosstalk, ELFEXT, equal level far-end crosstalk, PSNEXT, power sum near-end crosstalk y PSELFEXT power sum equal level far-end crosstalk.

2.4.5 Velocidad Nominal de Propagación (NVP)

Una señal que viaja de la entrada a la salida sufre un retardo en el tiempo por una cantidad igual a la longitud del cable dividida por la velocidad de propagación para el medio de transmisión. En el caso de una línea de transmisión ideal consistente de dos conductores en el espacio, la velocidad de propagación es igual a la velocidad de la luz en el vacío.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

Donde: c = velocidad de la luz en el vacío

μ = permeabilidad relativa del dieléctrico

ε = permisividad relativa del dieléctrico

La NVP corresponde a un porcentaje de la velocidad de la luz, típicamente está en el intervalo de .6 c hasta .9 c .

2.4.6 Retardo de propagación

El desarrollo de nuevas aplicaciones de alta velocidad usando múltiples pares para transmisión en paralelo, ha mostrado la necesidad de especificaciones adicionales de transmisión para sistemas de cableado a 100 Ohms con 4 pares.

La siguiente ecuación es usada para calcular el retardo máximo de propagación permisible entre 1 MHz a la frecuencia más alta referenciada para una categoría de cable dada.

$$\text{Delay (ns/100 m)} = \frac{534 + 36}{\sqrt{\text{freq MHz}}}$$

2.4.7 Retardo Oblicuo

El retardo oblicuo es la diferencia en el retardo de propagación entre cualquiera de los pares dentro del mismo cable. El retardo oblicuo entre el par más rápido y el par más lento en los cables categoría 6/clase E y categoría 5e/clase D no debe exceder 45 (ns) en 100 m.

2.4.8 Coeficiente de reflexión

Si consideramos el caso en donde la impedancia de terminación es diferente a la impedancia característica del cable es decir que $Z \neq Z_0$. En este caso, la señal será parcialmente reflejada en la unión cable/carga.

La magnitud de la reflexión está dada por el coeficiente de reflexión (ρ). Si $Z_t < Z_0$ entonces la polaridad de la onda de reflexión es invertida; si $Z_t > Z_0$ entonces la polaridad de la onda de reflexión es no invertida.

$$\text{Coeficiente de reflexión } (\rho) = (Z_t - Z_0) / (Z_t + Z_0)$$

2.4.9 Pérdida por retorno

Es una medida de la energía reflejada causada por el desacoplamiento de impedancias en el sistema de cableado. Todos los componentes deben contar con los requerimientos mínimos de NEXT de acuerdo a la categoría a la que pertenecen.

La energía de la señal reflejada es llamada pérdida por retorno (RL) por sus siglas en inglés, se da en dB y se deriva del coeficiente de reflexión

$$\text{Pérdida por retorno (RL) en dB} = 10 \log (\rho^2)$$

La pérdida por retorno es un parámetro importante en las redes que manejan velocidades de giga bit que emplean transmisiones full dúplex sobre todos sus pares, ya que cada par lleva información en ambas direcciones.

2.4.10 Pérdida por desacoplamiento

La potencia de una señal transmitida es reducida por una cantidad llamada pérdida por desacoplamiento (M) en dB y se deriva del coeficiente de reflexión.

$$\text{Pérdida por desacoplamiento (M) in dB} = 10 \log (1 - \rho^2)$$

Para cualquier longitud de cable, la atenuación puede ser calculada tomando en cuenta la atenuación del cable más el efecto de múltiples reflexiones en cada terminal del cable.

2.4.11 Relación señal ruido (SNR)

Es la relación entre el nivel de señal recibida y el nivel de ruido recibido. El nivel de señal recibida debe exceder significativamente el nivel de ruido recibido para tener una transmisión aceptable.

$$\text{SNR (dB)} = 20 \log (V_o/V_n) = 20 \log (V_i/V_n) - 20 \log (V_i/V_o)$$

Donde: V_o = Nivel de señal de tensión eléctrica recibida

V_n = Nivel de tensión eléctrica de la señal de ruido en el receptor

V_i = Nivel de de señal del tensión eléctrica transmitida

2.4.12 Relación atenuación diafonía (ACR)

Es la relación obtenida de la resta entre el NEXT y la atenuación en dB. El ACR se da para altas frecuencias y puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\text{ACR} = \text{Mínima pérdida por NEXT} - \text{atenuación máxima}$$

2.4.13 Relación Power Sum Attenuation diafonía (PSACR)

Se determina por la resta entre el Power sum near-end crosstalk menos la atenuación.

$$\text{PSACR} = \text{Minimum PSNEXT loss} - \text{atenuación máxima}$$

2.5 Desempeño del par trenzado balanceado

El cable de par trenzado balanceado es comúnmente utilizado en los edificios para las telecomunicaciones. Las implementaciones exitosas requieren de un adecuado diseño, de una correcta instalación y de la realización de pruebas del cableado instalado en todo el canal. Un canal dentro de un cableado estructurado incluye todos los cables, cordones y conectores desde un extremo hasta el otro.

Las características y comportamiento de los cables, los cordones y de los conectores dependen mucho de la frecuencia de la señal aplicada. Estas diferencias son más aparentes en las frecuencias superiores a 1 MHz.

Los parámetros de transmisión más importantes incluyen lo siguiente:

- Atenuación de la señal en función de la frecuencia.
- Reflexión de la señal en las terminaciones.
- Cantidad de ruido en relación con la señal recibida.

El ruido en un cable puede ser producido por conductores adyacentes que comparten la misma cubierta o de una fuente externa.

El cable par trenzado balanceado posee una impedancia característica de 100 Ohms a 100 MHz. La disminución de la atenuación para un cable de alto desempeño se consigue con diseños y materiales mejorados.

2.6 Modelo del canal

La **figura 2.7** muestra los componentes de un canal que determinan su nivel de desempeño.

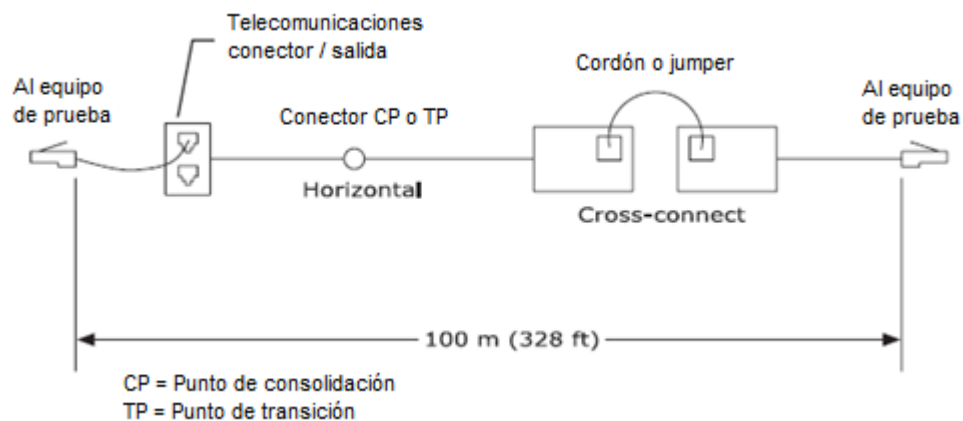


Figura 2.7 Componentes de un canal.

2.7 Parámetros de desempeño

Los parámetros más importantes que afectan el desempeño son: la atenuación, las pérdidas por PSNEXT y las pérdidas por retorno, en el caso de una transmisión bidireccional. Otros parámetros como la velocidad de propagación, delay skew, pérdida por conversión longitudinal y PSELFEXT, son también importantes para ciertas aplicaciones de alta velocidad en donde existen esquemas de

decodificación más complejos en donde se implementa la transmisión dúplex del par trenzado balanceado.

2.8 Limitantes en el desempeño por la atenuación

La atenuación del canal (en la prueba) es igual a la suma de las atenuaciones de sus componentes más la desviación de la atenuación, ajustada por la temperatura. En el peor caso. El canal mostrado en la **figura 2.7** consiste de una longitud de 90 m de horizontal y hasta un total de 10 m de cordones y accesorios combinados. Generalmente los cordones son flexibles y por lo tanto presentan mayores pérdidas por metro que el cableado horizontal.

Todos los componentes deben contar con los requerimientos mínimos de atenuación, de acuerdo a la categoría que corresponden.

2.9 Pérdidas por NEXT

Las pérdidas en el canal por NEXT, es la suma de la diafonía inducida en el cable, en los conectores y en los cordones.

La pérdida por NEXT es dominada por los componentes en zona cercana (<20 m [<66 ft]).

Para verificar el desempeño, la pérdida por NEXT se mide desde el TR y desde conector (outlet). Todos los componentes deben cumplir el mínimo de NEXT para la categoría que les corresponde.

2.10 Pérdidas por PSELFEXT (Power Sum Equal Level Far-End Crosstalk)

Es la composición de señales indeseadas de múltiples transmisores acopladas en el par más cercano medido en el par más lejano. Se mide con base en un algoritmo de sumas de energía. Todos los componentes deben contar con los requerimientos mínimos de PSELFEXT de acuerdo a la categoría que pertenecen.

2.11 Pérdidas por PSACR (Power Sum Attenuation-to-Crosstalk Ratio)

El desempeño balanceado del canal está determinado por las mediciones de las transmisiones sobre los cables que conectan el hardware. Estas mediciones se toman dentro del dominio de la frecuencia. El intervalo de frecuencias que pueden ser exitosamente transmitidas para distancias dadas, determina el ancho de banda disponible para el canal.

Pueden emplearse diferentes criterios para determinar el ancho de banda disponible. Uno de los cuales es el mínimo nivel de señal en la salida de un canal relativo al pico del nivel de ruido NEXT. Este criterio es definido como PSACR.

Para asegurar un aceptable bit error rate (BER), la señal debe ser una réplica razonable de la señal transmitida. La atenuación es un decremento de la magnitud de la señal. Los componentes de más alta frecuencia de una señal digital, incurrir en mayor atenuación sobre un canal de par trenzado balanceado. El efecto next no solo es la reducción de la amplitud si no también un cambio en la figura de la señal transmitida como aparece en el receptor. Adicionalmente, el ruido del NEXT

agrega variaciones abruptas en la magnitud de la señal. La confiabilidad del receptor para detectar cambios en la forma de onda de la señal, es afectada por estas debilidades de las señales.

2.12 Concepto de Ancho de Banda.

Existe una relación fundamental entre el ancho de banda de un canal expresada en Hz y la velocidad de los datos expresada en bits/segundo. El flujo del tráfico en una carretera es una buena analogía para ilustrar esta relación. El ancho de banda es similar a la amplitud y número de carriles de la carretera. La velocidad de los datos es similar al flujo del tráfico o al número de vehículos que cruzan por hora. Una manera de incrementar el flujo del tráfico es haciendo más amplia la carretera. Otra forma es mejorando la superficie del pavimento y eliminando los cuellos de botella.

De manera similar, es posible soportar velocidades de datos más altas en cualquier canal, utilizando esquemas de codificación de líneas para empaquetar más a los bits de información por cada Hz de ancho de banda disponible. Las líneas de codificación más elaboradas requieren un más alto SNR, el cual es similar a mejorar o suavizar la superficie de la carretera en nuestra analogía.

El ancho de banda disponible se determina comúnmente como el intervalo de frecuencias en donde el SNR es positivo. Para la mayoría de las redes LAN actuales, la fuente de ruido dominante es la interferencia del NEXT entre todos los pares que transmiten y todos los pares que reciben. Si los cuatro pares son empleados para una transmisión en paralelo, entonces el ruido total por NEXT es PSNEXT. En este caso:

- SNR es el PSACR cuando otras fuentes de ruido son insignificantes y donde, $PSACR = PSNEXT - \text{atenuación}$.
- El ancho de banda es el intervalo de frecuencias en donde, $PSACR > 0$.

2.13 Desempeño de los puntos de conexión permanentes

La **figura 2.8** representa un modelo de los puntos de conexión permanentes

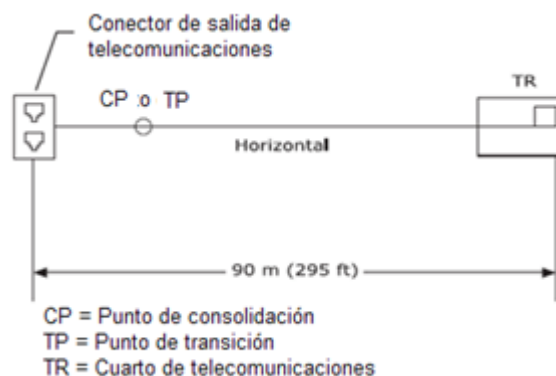


Figura 2.8 Puntos permanentes en una horizontal.

Los puntos de conexión permanentes consisten de hasta 90 metros de cableado horizontal, incluyendo un conector en cada extremo.

2.14 Cordones de parcheo

Los jumpers cross-connect y los cables empleados para patch cords o cordones de parcheo deben cumplir con los mismos requerimientos de desempeño que el cableado horizontal, con las siguientes excepciones:

Para conductores de cable, presentan más atenuación que los conductores sólidos o de un solo hilo. Un requerimiento en la categoría 5e, clase D y categoría 6, clase E, y clase F estándar es la prueba de pérdida por retorno del patch cord. El patch cord es frecuentemente la conexión débil en un sistema de cableado. Esta prueba se requiere antes y después de manipular mecánicamente al patch cord para asegurarse que la impedancia permanece estable dentro de los límites permitidos. Una desviación mayor a ± 5 Ohms de la impedancia nominal de los 100 Ohms puede dar como resultado una falla. Se ha observado en la práctica que algunos patch cords categoría 5 de cable tienden a presentar variación en su impedancia cuando son manipulados o doblados. Los patch cords categoría 5e y categoría 6 están diseñados para asegurar un desempeño estable referente a la pérdida por retorno.

2.15 Propiedades de la fibra óptica

Los dos medios de transmisión que se encuentran más frecuentemente en un sistema de cableado estructurado son el par trenzado de cobre y la fibra óptica. Dentro de este capítulo 2 Marco Teórico, se han descrito las propiedades del par trenzado de cobre. A partir de este inciso 2.15 se tratarán las propiedades de la fibra óptica.

Un modelo simple de un sistema de telecomunicaciones consiste de tres partes:

- Transmisor.
- Medio.
- Receptor.

Dentro de un sistema de fibra óptica el medio por su puesto es una fibra óptica. El transmisor y el receptor están diseñados para acoplarse con las propiedades del medio. Para un sistema de fibra óptica esto significa que el transmisor y el receptor trabajan en frecuencias propias de los sistemas basados en el uso de fibras ópticas.

Los transmisores y receptores ópticos, convierten un tipo de energía a otro. Un transmisor óptico convierte señales eléctricas a señales ópticas para ser transmitidas a través de un cable de fibra óptica. En el receptor, las señales ópticas se convierten de regreso en señales eléctricas. El uso de transceivers ópticos, el cual combina las funciones de un transmisor y un receptor, es muy común en la industria.

2.15.1 Transmisores de fibra óptica

Casi toda la electrónica disponible de la fibra óptica se basa en lo siguiente:

- Diodo emisor de luz (LED).
- Emisor láser con superficie de cavidad vertical (VCSEL).
- Diodo láser (LD).

El transmisor es un dispositivo electrónico que:

- Recibe una señal eléctrica modulada.
- Convierte la señal eléctrica modulada en una señal óptica modulada (usualmente digital).
- Lanza la señal óptica modulada dentro de una fibra óptica.

2.15.2 Selección de la fibra óptica

Las características de los pulsos de luz emitidos por un transmisor óptico, influyen en la selección de la fibra óptica. Algunas características comunes son:

- Centro de longitud de onda.
- Ancho espectral.
- Patrón de emisión.
- Potencia promedio.
- Frecuencia de modulación.

2.15.3 Centro de longitud de onda

Cualquier fuente de luz emite dentro de un intervalo de longitudes de onda. Los transmisores de fibra óptica usados con lentes de fibra óptica normalmente emiten luz en o cerca de una de las siguientes longitudes de onda, medidos en nanómetros (nm):

- 850 nm.
- 1300 nm.
- 1310 nm.
- 1550 nm.

Este valor nominal es llamado centro de longitud de onda.

Aunque la periodicidad de la radiación EM emitida por los transmisores ópticos podría ser especificada usando cualquier frecuencia (f) o longitud de onda (λ), es tradicionalmente especificada por longitud de onda. Recordando que la frecuencia y la longitud de onda están relacionadas por la fórmula $v = f \lambda$, donde v es la velocidad de propagación en el medio de transmisión.

2.15.4 Ancho espectral

La potencia total emitida por un transmisor es distribuida sobre un intervalo de la longitud de onda alrededor de su centro. Este intervalo es el ancho espectral y típicamente se especifica en nanómetros. Los anchos espectrales varían desde lo angosto para los láseres (varios nanómetros) hasta lo ancho para los LEDs (desde los diez a los cientos de nanómetros como se indica en la figura 2.9).

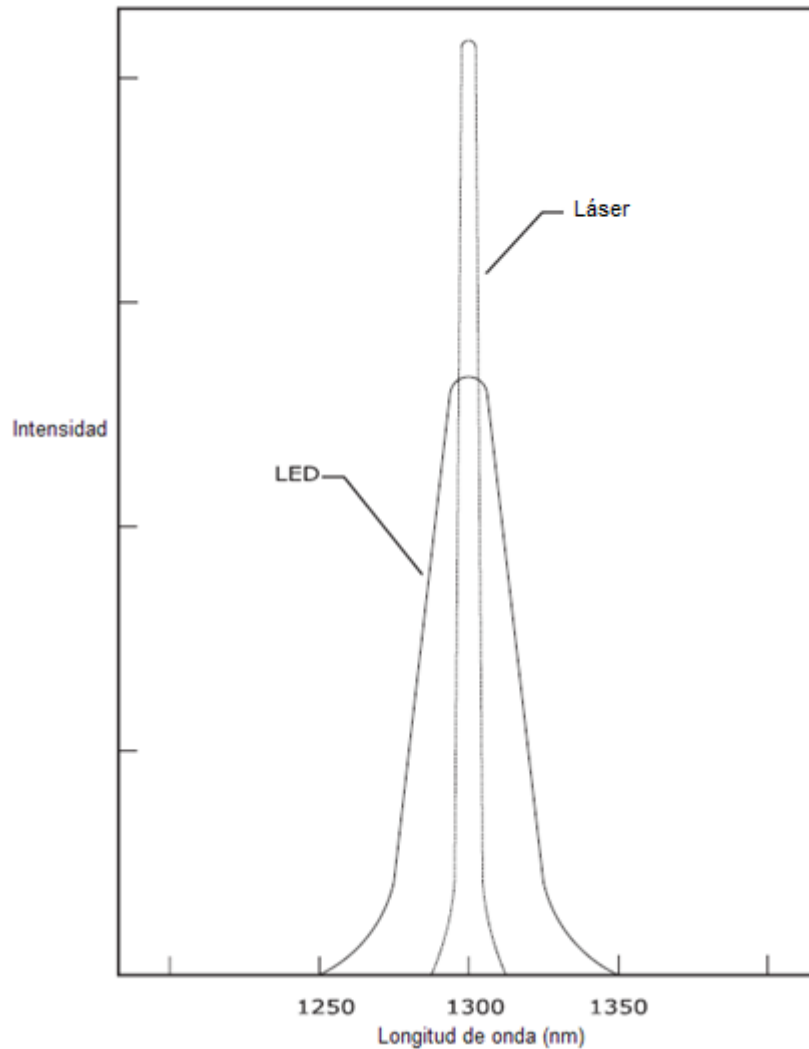


Figura 2.9 Comparación del perfil espectral del láser y el LED.

El ancho espectral está dado como el intervalo de longitudes de onda emitido con un nivel de intensidad mayor o igual que la mitad del nivel de intensidad máxima, referido por sus siglas en inglés como full width half maximum (FWHM) spectral width, como se muestra en la figura 2.10.

2.15.8 Diodo Emisor de Luz (LED)

El LED es un transmisor común y relativamente barato. La siguiente **tabla 2.1** describe las características típicas de los transmisores basados en LED:

Aspecto	Características
Costo	Relativamente barato
Uso	Principalmente utilizado con sistemas de telecomunicaciones que emplean fibra óptica multimodo
Centro de la longitud de onda	<ul style="list-style-type: none">• De 800 hasta 900 nm• De 1250 hasta 1350 nm
Ancho espectral	<ul style="list-style-type: none">• De 30 hasta 60 nm FWHM en la región baja (cerca de los 850 nm)• Hasta 150 nm FWHM en la región alta (cerca de los 1300 nm) debido a que la dispersión más baja del LED trabaja cerca de los 850 nm es típicamente más económica. Las transferencias de datos hasta 100 Mb/s usan típicamente LEDs longitudes de onda corta; Los LEDs de longitud de onda larga se emplean para transferencia de datos de 100 hasta 622 Mb/s
Frecuencia de modulación	<ul style="list-style-type: none">• La mayoría son debajo de 200 MHz• Pueden ser tan altas como 600 MHz
Nivel de potencia promedio emitida	De -10 hasta -30 dBm dentro de la fibra óptica multimodo

Tabla 2.1 Características de los transmisores basados en LEDs.

2.15.9 Láser de longitud de onda corta

Es comúnmente referido como un láser CD. El CD es un transmisor económico. La **tabla 2.2** describe las características de fuentes CD típicos:

Aspecto	Características
Costo	Relativamente económico
Uso	Principalmente utilizado con sistemas de telecomunicaciones de fibra óptica multimodo con altos niveles de transmisión de datos, que van desde 200 Mb/s hasta 1 Gb/s. Principal aplicación como canal de fibra óptica
Centro de longitud de onda	780 nm
Ancho espectral	Angosto comparado con los LEDs (4 nm)
Frecuencia de modulación	Más alto que el LED (puede exceder 1 GHz), permitiéndoles trabajar en velocidades más altas
Nivel de potencia promedio emitida	+1 hasta 5 dBm

Tabla 2.2 Características de fuentes típicas de CD.

Nota: El láser CD fue la primer fuente introducida para la fibra multimodo. Aunque todavía es utilizado, el mercado tiende a utilizar VCSELs para aplicaciones multimodo de 1 Gb/s y superior.

2.15.10 Emisión láser de superficie de cavidad vertical (VCSEL)

Fueron introducidos como un transmisor multimodo Ethernet Gigabit y canal de fibra óptica. También se emplea para usos futuros con velocidades de transmisión de hasta 40 GB.

Aunque tiene características de desempeño láser, se fabrican fácilmente y su precio es más bajo que el LED. La **tabla 2.3** describe las características de las fuentes VCSEL típicas.

Aspecto	Características
Costo	Relativamente económico
Uso	Empleado con sistemas de telecomunicaciones de fibra óptica multimodo con niveles de transmisión de datos de un Gigabit y superiores
Centro de longitud de onda	850nm y 1300 nm
Ancho espectral	Muy reducido (desde 1 hasta 6nm)
Frecuencia de modulación	Mucho más alto que el LED, permitiendo transmisiones de datos que exceden los 5 GHz
Nivel de energía promedio emitida	+1 hasta -3 dBm en fibra óptica multimodo

Tabla 2.3 Características de fuentes típicas de VCSEL.

Nota: A diferencia de los LEDs, el nivel completo de la energía emitida de las fuentes VCSEL se da empleando la fibra óptica multimodo de 50/125 μm y 62.5/125 μm .

2.15.11 Diodos Láser (LD)

Son típicamente más caros que las fuentes basadas en LEDs y CD. La **tabla 2.4** describe las características de las fuentes de luz LD típicas.

Aspecto	Características
Costo	Más costoso que las fuentes emisoras basadas en LED y CD
Uso	<ul style="list-style-type: none"> • Empleado casi exclusivamente en enlaces de fibra óptica monomodo • Algunos sistemas disponibles emplean láser VCSEL con fibra óptica multimodo para maximizar la longitud de la implementación
Centro de la longitud de onda	<ul style="list-style-type: none"> • Predominantemente 1300 nm • Para los 1550 nm son más populares para largas distancias las comunicaciones para sistemas monomodo
Ancho espectral	Muy reducido (usualmente de 1 a 6 nm FWHM) comparado con los LEDs
Frecuencia de modulación	Mucho más rápida que la frecuencia de modulación de LEDs. Excede los 5 GHz
Nivel de potencia promedio emitida	<ul style="list-style-type: none"> • Más alta que los LEDs, con valores comunes de +1 a -3 dBm en fibras ópticas monomodo. • Estos niveles de potencia pueden presentar un riesgo de seguridad si las emisiones son vistas en forma directa

Tabla 2.4 Características de las fuentes de luz basadas en Diodo Láser

2.15.12 Comparación de Diodos Emisores de Luz, Disco Compacto y Láser

La **tabla 2.5** muestra en resumen, la comparación entre los diferentes tipos de transmisores.

Característica a comparar	LED	Láser de longitud de onda corta (CD)	VCSEL	Láser (LD)
Costo	Económico	Económico	Económico	Costoso
Tipo de fibra óptica	Multimodo	Multimodo	Multimodo	Monomodo
Centro de longitud de onda	850 nm 1300 nm	780 nm	850 nm	1310 nm 1550 nm
Ancho espectral	Para 850, 30 a 60 nm FWHM Para 1300, hasta 150 nm FWHM	4 nm	1 a 6 nm FWHM	1 a 6 nm FWHM
Frecuencia de modulación	Usualmente debajo de 200 MHz	Puede exceder 1 GHz	Hasta 10 GHz	Puede exceder 10 GHz
Nivel de potencia promedio emitida	-10 hasta -30 dBm	+1.0 hasta -5 dBm	+1 hasta -3 dBm	+1 hasta -3 dBm

Tabla 2.5 Comparativa entre los diferentes tipos de fuentes de luz.

2.15.13 Receptores de fibra óptica

Casi todos los tipos de receptores de fibra óptica incorporan un fotodetector para convertir la señal óptica a una señal eléctrica.

Un receptor debe acoplarse al transmisor y a la fibra óptica.

Los parámetros característicos de los receptores de fibra óptica son los siguientes:

- Sensitividad.
- Intervalo de bit de error (BER por sus siglas en inglés Bit Error Rate).
- Intervalo dinámico.

2.15.14 Sensitividad e intervalo de bit de error (BER)

La sensitividad y el BER se relacionan con lo siguiente:

- La sensitividad de un receptor especifica el nivel de potencia mínima y la señal de entrada que se debe tener para que se lleve a cabo un nivel de desempeño aceptable, el cual usualmente se especifica como un BER.
- El BER es un número fraccional de errores permitidos que ocurren entre el receptor y el transmisor. Por ejemplo, un BER de 10 a la -9 significa un bit de error por cada billón de bits enviados (Este intervalo de error lo manejan los sistemas actuales).

Si la potencia de la señal de entrada cae abajo de la sensitividad del receptor, el número de errores de bits se incrementa más allá del máximo BER especificado para el receptor.

Si se recibe poca potencia en el detector, el resultado puede ser:

- Una señal detectada con elevados errores de bits.
- No se detecta la señal.

2.15.15 Intervalo dinámico

El exceso de potencia en la señal recibida también puede comprometer la operación del receptor.

Si mucha potencia es recibida en el detector, el resultado puede ser:

- Más alto que el BER aceptable.
- Posible daño físico al receptor.

El intervalo dinámico es el intervalo de potencia que un receptor puede procesar en un BER especificado. Este se determina por la diferencia entre la potencia máxima y la potencia mínima que el receptor puede procesar en un BER especificado.

2.15.16 Parámetros para seleccionar el tamaño del núcleo de la fibra óptica

Los factores clave para determinar cual fibra óptica usar en una aplicación dada son:

- Equipo activo.
- Distancia.
- Ancho de banda (velocidad de transferencia de los datos).

2.15.17 Equipo activo

Antes de determinar el tamaño del núcleo de la fibra óptica, se deben evaluar ciertas consideraciones para determinar cómo son seleccionados el cable y los componentes para un enlace de telecomunicaciones, segmento o sistema.

Mientras que el orden puede ser diferente, los elementos que necesitan considerarse son los mismos. En el corazón del diseño se encuentra la aplicación que será atendida. Esto determina que

equipos electrónicos y pasivos estén disponibles que soporten la aplicación. Este puede ser un nuevo servicio o un crecimiento de un servicio existente.

El equipo existente limita las opciones ya que algunos de los parámetros del sistema y especificaciones ya están establecidas. Si no hay equipo existente, el diseño del sistema es más flexible. Un factor importante es la distancia entre los dos puntos finales del sistema. Las características de la fibra óptica y la capacidad del equipo activo, determinan que tan separados pueden estar los extremos o puntos finales.

El intervalo de los enlaces de telecomunicaciones de fibra óptica va desde enlaces cortos entre computadoras y servidores hasta enlaces extensos de troncales de líneas telefónicas. La longitud de extremo a extremo del enlace más largo en el sistema, es la consideración principal en la selección del tipo de la fibra óptica o el tamaño basado en los componentes activos. En algunas redes podría haber más un tipo de fibra óptica aceptable debido a la longitud de los enlaces involucrados, así como también al equipo activo disponible.

Por ejemplo un banco podría usar:

- Fibra óptica multimodo para comunicar entre sus sucursales locales.
- Fibra óptica monomodo para enlazar sus sucursales foráneas.

Incrementar la longitud de un enlace afecta de la siguiente manera:

- Se incrementa la atenuación de la señal de extremo a extremo.
- Se reduce el ancho de banda debido a la dispersión de la señal.
- Se distorsiona la señal debido al fenómeno de retardo el modo diferencial (DMD) en la fibra multimodo.

El equipo activo puede estar basado en LEDs, VCSELs o Láser. Si el equipo tiene LEDs o VCSEL, se puede emplear fibra óptica de 50/125 μm o 62.5/125 μm . Si el equipo activo tiene tecnología Láser estándar entonces se debe usar fibra óptica monomodo de 8/125 μm .

Después de determinar que tipo de fibra óptica debe emplearse considerando las pérdidas, presupuesto, el equipo activo correcto, el equipo pasivo y el tipo de fibra óptica, entonces se puede diseñar el sistema basado también en los parámetros e intervalos que soporta cada componente.

2.15.18 Ancho de Banda

Es la capacidad de transportar información del sistema. El ancho de banda de extremo a extremo de un sistema incluye al ancho de banda de las partes que lo componen.

Para un sistema de fibra óptica lo que determina el ancho de banda es:

- El transmisor.
- La fibra óptica.

Los procesos de instalación no deben afectar el ancho de banda.

Los transmisores tienen limitaciones en el ancho de banda debido al tiempo que tardan en cambiar de un estado lógico bajo a uno alto, a este periodo se le conoce como tiempo de levantamiento (Rise time).

El tiempo de levantamiento usualmente se mide desde el 10% al 90% del nivel de energía. En un planteamiento simplificado el tiempo de levantamiento se considera como cero. En transferencias de alta velocidad el tiempo de levantamiento se vuelve significativo.

La **figura 2.11** ilustra como el tiempo de levantamiento de un transmisor, limita la transferencia de datos con el incremento de velocidad. Se indica el desempeño lógico contra el desempeño real en cada caso.

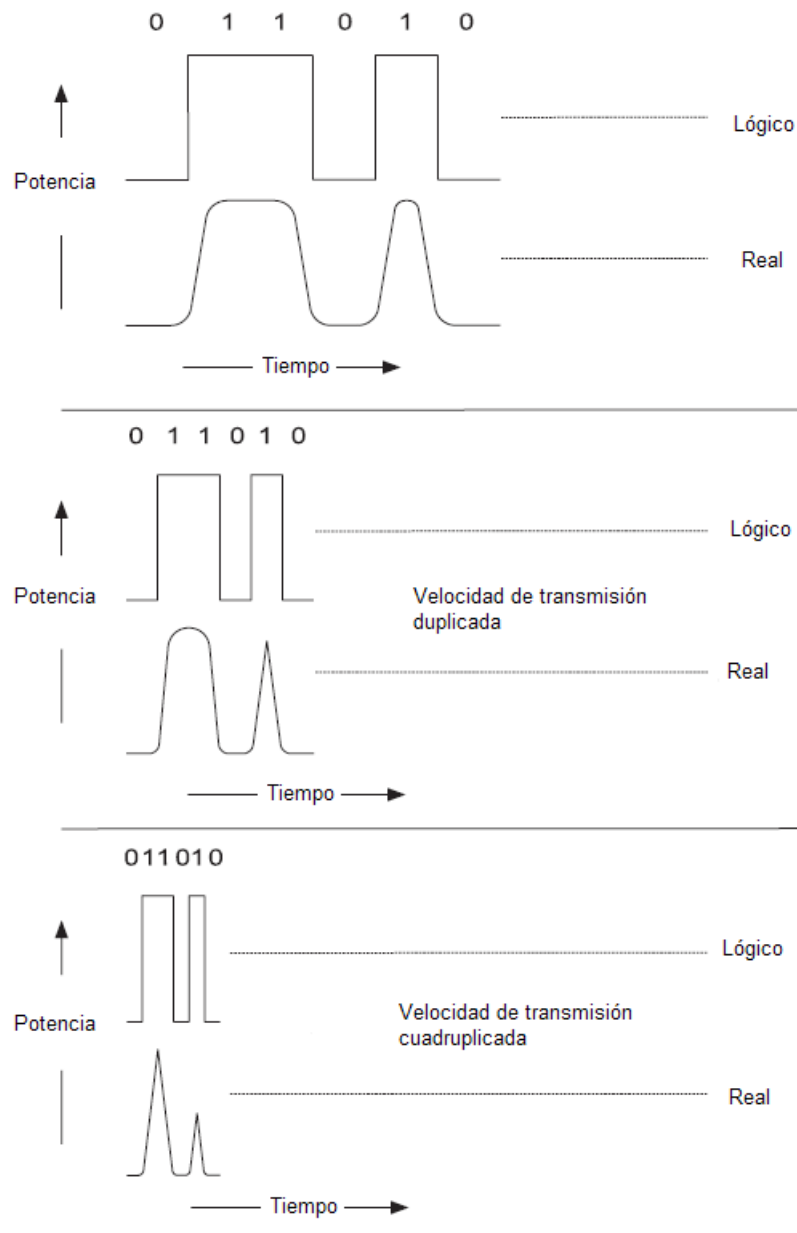


Figura 2.11 Afectación de la transmisión de datos por efecto de la velocidad.

La fibra óptica presenta limitaciones en el ancho de banda debido a la dispersión. La dispersión da lugar a que un pulso de luz se propague a través de la fibra óptica.

Para los sistemas basados en fibra óptica monomodo, ocurre que en lugar del ancho de banda, la dispersión de pulso máxima es usada frecuentemente para definir su capacidad. La dispersión del pulso es una función del ancho espectral del transmisor, de la construcción de la fibra y de su longitud.

La dispersión en sistemas monomodo difícilmente es un aspecto importante en las aplicaciones.

La máxima dispersión es usualmente expresada en picosegundos (ps) entre el producto del ancho espectral en nanómetros y la distancia en kilómetros (ps/nm-km).

La dispersión en los sistemas monomodo es una función de la longitud de onda. Es importante que la especificación de la dispersión de la fibra, coincida con el intervalo de la longitud de onda de operación del transmisor.

En los sistemas basados en fibra óptica multimodo, calcular y predecir los requerimientos de ancho de banda es más complejo que un sistema monomodo, ya que consiste en combinar los efectos de los siguientes tres aspectos:

- Tiempo de levantamiento del transmisor.
- Modalidad de dispersión de la fibra.
- Dispersión cromática.

Esto implica consideraciones y cálculos complejos. Usualmente los fabricantes establecen el ancho de banda necesario para soportar los sistemas dados.

Las aplicaciones más comunes miden pocos kilómetros y típicamente la electrónica de la fibra óptica usa transmisores de LED y fibra óptica multimodo para una transmisión de datos de 155 Mb/s o inferiores. Para una transmisión de datos de 1 Gb/s o superiores, típicamente se usa el transmisor VCSEL.

Para distancias cortas la fibra óptica multimodo con un modo de ancho de banda de 160 MHz.Km en 850 nm soporta transmisiones de datos de arriba de 20 Mb/s para 2 km (1.2 mi). Esta misma fibra óptica soporta transmisiones de datos de hasta un Gb/s (Gigabit Ethernet) para distancias de hasta 300 m (984 ft) utilizando VCSEL. Adicionalmente esta misma fibra óptica con un mínimo de ancho de banda de 500MHz.km a 1300 nm, soporta transmisiones de datos de hasta 155 Mb/s en 2 km (1.2 mi).

2.15.19 Mediciones y especificaciones de los sistemas multimodo

Los fabricantes de fibra óptica miden el ancho de banda empleando fuentes láser muy estrechas sobre una longitud fija de fibra óptica debido a la variación de la dispersión cromática con las características de las fuentes (como centro de longitud de onda y ancho espectral) y la longitud de la fibra. El valor del ancho de banda indicado por un fabricante solo representa el efecto del modo de dispersión ya que el ancho espectral de una fuente láser típica es usualmente tan pequeña que hace la dispersión cromática insignificante.

Ya que el ancho de banda reportado por los fabricantes de fibra óptica es el resultado de mediciones hechas con una fuente LD, estas mediciones no aplican para los sistemas basados en LEDs.

El modo de ancho de banda (usualmente llamado ancho de banda por los fabricantes) es comúnmente expresado como un producto de la frecuencia con la distancia (ejemplo MHz.km). Esto significa que una fibra óptica dada puede soportar velocidades de transmisión de datos más altas sobre distancias más cortas que sobre distancias largas.

Por ejemplo un sistema que requiere 90 MHz de extremo a extremo de ancho de banda requiere de un grado más alto de fibra óptica para un enlace de 2 km que para un enlace de un km. Para enlaces de varios cientos de metros o menores, el ancho de banda de la fibra óptica frecuentemente no es una consideración.

Mucho de la experimentación ha conducido a caracterizar la relación entre:

- El componente del ancho de banda multimodo.
- Ancho de banda del sistema de un canal completo de fibra óptica.

Varios métodos son propuestos para aproximar esta relación y toman en cuenta:

- El comportamiento de la dispersión.
- Las características espectrales del transmisor.

La **figura 2.12** muestra uno de los algoritmos usados para generar una curva de la longitud del sistema contra el ancho de banda del sistema para una fibra óptica multimodo de 62.5/125 μm y un transmisor de LED específico. Si fuera usado solamente el producto ancho de banda por distancia de las especificaciones del fabricante, la curva podría predecir una longitud del sistema realizable más largo. Esto demuestra el error tan dañino de una sobresimplificación del ancho de banda.

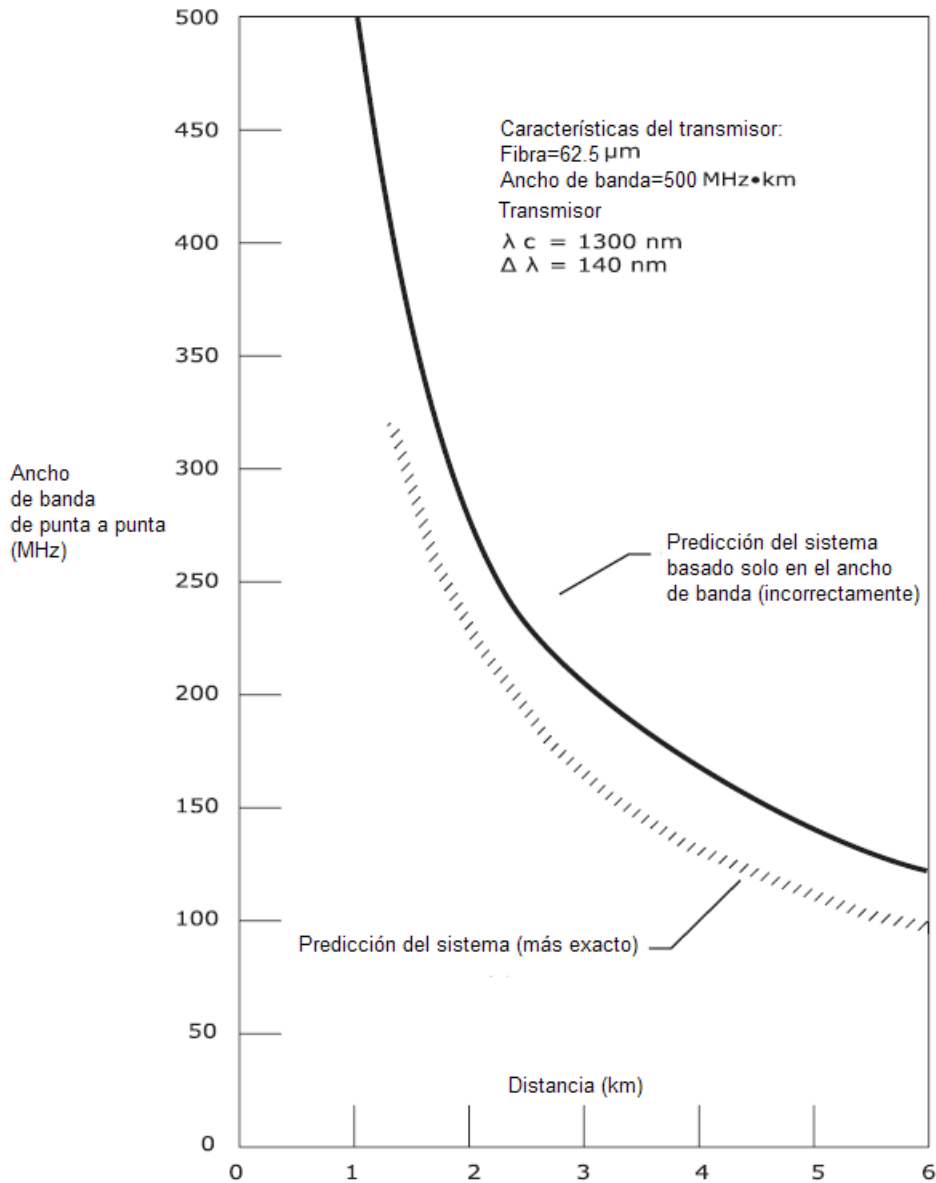


Figura 2.12 Curva del ancho de banda contra la longitud del sistema.

2.15.20 Clasificación de la fibra

Las dos principales clasificaciones de la fibra óptica son la fibra óptica multimodo y la fibra óptica monomodo.

La fibra óptica multimodo es la más adecuada para enlaces menores de:

- 2000 m (6560 ft) para velocidades de transmisión de datos de 155 Mb/s o menores.
- 550 m (1804 ft) para velocidades de transmisión de datos de 1 Gb/s o menores.
- 300 m (984 ft) para velocidades de transmisión de datos de 10 Gb/s o menores.

Los NA más altos de la fibra óptica multimodo, permiten el uso de transmisores LED, VCSELs, SW y CD económicos. Estos son más que adecuados para aplicaciones de distancias cortas.

La fibra óptica monomodo es la más adecuada para:

- Requerimientos de banda ancha que exceden las capacidades de la multimodo.
- Distancias que exceden la capacidad de la multimodo
- Cuando las aplicaciones requieren monomodo.

La **tabla 2.6** resume la comparación entre los dos tipos de fibra óptica.

Aspecto	Multimodo 62.5/125 μm	Multimodo 50/125 μm	Monomodo
Atenuación	Baja	Baja	Mínima
Ancho de banda	Moderado	Alto	Muy alto
Apertura numérica	Mediana	Pequeña	Mínima
Diámetro externo de la fibra	125 μm	125 μm	125 μm
Longitud de onda	850 nm y 1300 nm	850 nm y 1300 nm	1310 nm y 1500 nm

Tabla 2.6 Comparación de los dos tipos de fibra óptica.