

5. Capítulo 5: Medios de Transmisión

En un sistema de transmisión de datos, el medio de transmisión es la ruta física entre transmisor y receptor. En el capítulo 3 se dijo que las ondas electromagnéticas son guiadas a lo largo de un medio sólido como el cable par trenzado de cobre, el cable coaxial y el cable de fibra óptica. Para los medios de transmisión no guiados, las ondas se desplazan a través de la atmósfera, el espacio exterior o el agua.

Las características y la calidad de la transmisión de datos se determinan por las características del medio, como por las características de la señal. En el caso de los medios guiados, el medio en sí es más importante en determinar las limitaciones de la transmisión. Para medios no guiados, el ancho de banda de la señal producida por la antena de transmisión es más importante que el medio para determinar las características de la transmisión. Una propiedad clave de las señales transmitidas por una antena es la direccionalidad. En general, las señales a frecuencias más bajas son omnidireccionales; es decir, la señal se propaga en todas las direcciones desde la antena. En frecuencias más altas, es posible enfocar la señal en usando un haz de dirección.

La velocidad y la distancia son consideraciones claves en el diseño de un sistema de transmisión de datos que transmita a la velocidad más alta posible recorriendo grandes distancias. Una serie de factores de diseño relacionados con la transmisión, el medio y la señal determinan la velocidad de datos y la distancia que se pueden obtener:

- Ancho de banda: si todos los demás factores permanecen constantes, cuanto mayor sea el ancho de banda de una señal, mayor será la velocidad de datos que se puede lograr.
- Deficiencias de transmisión: las deficiencias, como la atenuación, limitan la distancia. Para los medios guiados, el par trenzado generalmente sufre más deterioro que el cable coaxial, que a su vez sufre más que la fibra óptica.
- Interferencia: interferencia de señales competidoras que se superponen en pueden distorsionar o cancelar una señal. La interferencia es de particular preocupación por los medios no guiados, pero también es un problema con los medios guiados. Para estos últimos, la interferencia puede ser causada por emanaciones de cables cercanos (diafonía alienígena) o conductores adyacentes debajo de la misma cubierta del cable (diafonía interna). Por ejemplo, los pares trenzados son a menudo agrupados y los conductos a menudo llevan múltiples cables. La interferencia puede ser causada por el acoplamiento electromagnético de transmisiones no guiadas. La protección adecuada de un medio guiado puede minimizar este problema.
- Número de receptores: se puede usar un medio guiado para construir enlace punto a punto o un enlace compartido con múltiples puntos. En este último caso, cada punto introduce algo de atenuación y distorsión en la línea, limitando la distancia y la velocidad de datos.

La Figura 5.1 representa el espectro electromagnético e indica las frecuencias en el cual operan varios medios guiados y las técnicas de transmisión no guiadas.

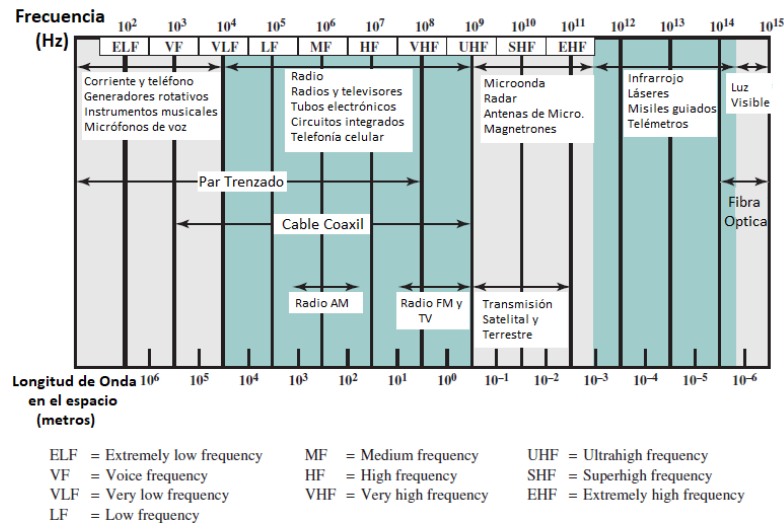


Figura 5.1: Espectro de frecuencias y medios de transmisión

La tabla 5.2 muestra las características de los medios guiados de transmisión en cuanto a las frecuencias en las que operan, la atenuación y el retardo típico.

Tabla 5.2: Características de medios guiados

	Rango de Frecuencias	Atenuación Típica	Retardo Típico	Espacio entre repetidores
Par trenzado	0 a 3,5 KHz	0,2 dB/km @ 1 kHz	50 µs/km	2 km
Par trenzado (multipar)	0 a 1 MHz	0,7 dB/km @ 1 kHz	5 µs/km	2 km
Cable Coaxil	0 a 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 µs/km	1 a 9 km
Fibra Optica	186 a 370 THz	0,2 a 0,5 dB/km	5 µs/km	40 km

5.1. Medios de Transmisión Guiados

Para medios de transmisión guiados, la capacidad de transmisión, en términos de velocidad de datos o ancho de banda, depende de manera crítica de la distancia y de si el medio es punto a punto o multipunto. La tabla 5.1.3 indica las características típicas de medios guiados comunes para aplicaciones punto a punto de larga distancia. Los tres medios guiados comúnmente utilizados para la transmisión de

datos son par trenzado, cable coaxial y fibra óptica (Figura 5.1.1.1). A continuación, se desarrollan conceptos acerca de los medios guiados mencionados.

5.1.1. Par trenzado

El medio de transmisión guiado menos costoso y más utilizado es el par trenzado.

Descripción física: Un par trenzado consta de dos cables de cobre aislados enlazados en un patrón espiral regular. Un par de cables actúa como un enlace de comunicación único. Por lo general, varios de estos pares se agrupan en un cable que los envuelve en una funda protectora resistente. En distancias más largas, los cables pueden contener cientos de pares. La torsión tiende a disminuir la interferencia de diafonía entre pares adyacentes en un cable. Los pares vecinos en un paquete generalmente tienen longitudes de giro algo diferentes para reducir la interferencia de diafonía. En enlaces de larga distancia, la longitud de giro generalmente varía de 5 a 15 cm. Los cables tienen un espesor de entre 0,4 a 0,9 mm.

Aplicaciones: El medio de transmisión guiada más común para la transmisión de señales digitales y analógicas es el par trenzado. Es el medio más utilizado en la red telefónica y es muy usado para las comunicaciones dentro de los edificios.

En el sistema telefónico, se conectan teléfonos individuales residenciales a la central telefónica local, o "oficina final", por cable de par trenzado. Estos son referidos como bucles de suscriptor. Dentro de un edificio de oficinas, cada teléfono también está conectado a un par trenzado, que va directo a una central telefónica. Estas instalaciones de par trenzado fueron diseñadas para admitir tráfico de voz mediante señalización analógica. Sin embargo, por medio de un módem, estas instalaciones pueden manejar el tráfico de datos digitales a velocidades de datos modestas.

El par trenzado es también el medio más común utilizado para la señalización digital a través de conexiones a un conmutador de datos digital o PBX digital dentro de un edificio, una velocidad de datos de 64 kbps es común. Ethernet que opera sobre cableado de par trenzado y se usa comúnmente dentro de un edificio para LAN que admiten computadoras personales. Velocidades típicas de Ethernet suelen ser 100 Mbps a 1 Gbps. También puede admitir velocidad de 10 Gbps y en los últimos dos años velocidades de 40 y 100 Gbps.

El par trenzado es muy fácil de conectar y es mucho menos costoso que los otros dos medios guiados que se utilizan normalmente: cable coaxial, y cable de fibra óptica.

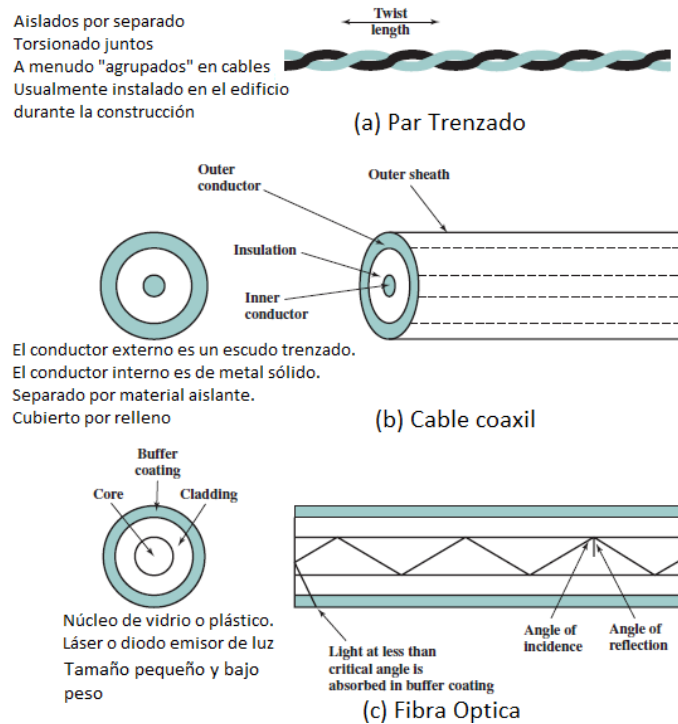


Figura 5.1.1.1: Medios de transmisión guiados

Características de la transmisión: El par trenzado se puede utilizar para hacer transmisiones con sistemas analógico o digital. Cuando se usan señales analógicas, se requieren amplificadores aproximadamente cada 5 a 6 km. Para transmisión digital (utilizando señales analógicas o digitales), se requiere repetidores cada 2 o 3 km. En comparación con otros medios de transmisión guiados de uso común, el par trenzado es limitado en distancia, ancho de banda y velocidad de datos. Como muestra la figura 5.1.1.2 (a), la atenuación para par trenzado es muy dependiente de la frecuencia. El cableado de par trenzado también es susceptible a reflejos de señal, o pérdida de retorno, causada por desajustes de impedancia a lo largo de la línea de transmisión y diafonía de pares trenzados adyacentes o cables de pares trenzados adyacentes. Debido a la geometría bien controlada del mismo par trenzado (los pares se fabrican con una tasa de torsión única y precisa que varía de par a par dentro de un cable) y la transmisión en modo diferencial de los distintos tipos de codificación (se discute en el próximo capítulo), el cableado de par trenzado utilizado para la transmisión de datos es altamente inmune a la interferencia de perturbadores de baja frecuencia (es decir, 60 Hz). A pesar de ello, por cuestiones de normas internacionales y seguridad, el cableado de par trenzado debe ir por ductos diferentes respecto al cableado de alimentación eléctrica.

Para la señalización analógica punto a punto, se necesita un ancho de banda de hasta aproximadamente 1 MHz. Esto acomoda varios canales de voz. Para señalización digital de larga distancia punto a punto, son posibles velocidades de datos de hasta unos pocos Mbps. Si se implementa Ethernet sobre cable de par trenzado se pueden lograr velocidades de 10 Gbps en 100 m y 40/100 Mbps en 25 m.

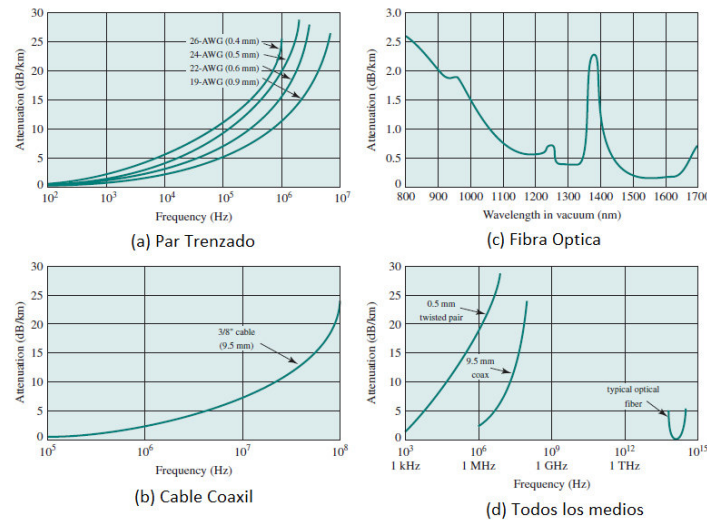


Figura 5.1.1.2: Medios guiados y su atenuación en función de las frecuencias

Par trenzado sin blindaje y con blindaje: El par trenzado viene en dos variedades: sin blindaje y blindado. Como su nombre lo indica, par trenzado sin blindaje (UTP, Unshielded Twisted Pair) consiste de uno o más cables de par trenzado, típicamente encerrados dentro de un cobertor termoplástico, que no proporciona blindaje electromagnético. La forma más común de UTP es un cable telefónico ordinario de grado de voz, que está pre cableado en edificios residenciales y de oficinas. Para fines de transmisión de datos, UTP puede variar desde el nivel de voz hasta el cable de muy alta velocidad para LAN. Para LAN de alta velocidad, UTP normalmente tiene cuatro pares de cables dentro del cobertor, con cada par retorcido con un número diferente de giros por centímetro para ayudar a eliminar la interferencia entre pares adyacentes. Cuanto más apretada sea la torsión, mayor será la velocidad de transmisión admitida, y será mayor el costo del metro de cable.

El par trenzado sin blindaje está sujeto a interferencias electromagnéticas externas, incluida la interferencia del par trenzado cercano y del ruido generado en el medio ambiente. En un entorno con varias fuentes de interferencia potencial, (p. ej., motores eléctricos, dispositivos inalámbricos y transmisores de RF), el par trenzado blindado (STP) puede ser una solución preferida. El cable de par trenzado blindado se fabrica en tres configuraciones diferentes:

- Cada par de cables está blindado individualmente con papel metálico, generalmente referido como un par trenzado de aluminio (FTP).
- Hay una lámina o pantalla trenzada debajo del cobertor plástico que cubre todos los cables (como un grupo). Esta configuración a veces se designa como par trenzado apantallado (F / UTP).
- Cada par de cables está blindado con papel metálico, así como también está blindado todo el grupo de cables. Esto se conoce como par trenzado totalmente blindado (S / FTP).

El blindaje reduce la interferencia y proporciona un mejor rendimiento a mayor velocidad de transferencia de datos. Sin embargo, puede ser más costoso, como así también es más difícil de manipular y conectar.

Categorías de par trenzado para transmisión de datos: La versión actual es responsabilidad de la industria de las telecomunicaciones, en especial del Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI, American National Standards Institute), el cual en el 2009 emitió los siguientes nuevos estándares:

- Cableado genérico de telecomunicaciones ANSI / TIA-568-C.0 para clientes. Premisas: permite la planificación e instalación de un sistema de cableado estructurado para todo tipo de locales de clientes.
- ANSI / TIA-568-C.1 Cableado de telecomunicaciones para edificios comerciales. Estándar: permite la planificación e instalación de un sistema de cableado estructurado para edificios comerciales.
- Cableado de telecomunicaciones de par trenzado balanceado ANSI / TIA-568-C.2 y componentes estándares: especifica los requisitos mínimos de un cableado de telecomunicaciones de par trenzado (p. ej., canales y enlaces permanentes) y componentes (por ejemplo, cable, conectores, hardware de conexión, cables de conexión, cables de equipo, cables de área de trabajo y puentes) que se utilizan hasta el enchufe / conector de pares y entre edificios en un ambiente de campus. Esta norma también especifica los procedimientos de prueba de campo y procedimientos de medición de referencia de laboratorio aplicables para todos los parámetros de las transmisiones.
- ANSI / TIA-568-C.3 Estándar de componentes de cableado de fibra óptica: especifica los requisitos de rendimiento de transmisión de cable y componentes para locales cableados con fibra óptica.

La Tabla 5.1.1.3 resume las características de las diferentes categorías y clases de cables de par trenzado reconocidos por el estándar.

Tabla 5.1.1.3: Categorías de cables de par trenzado

	Category 5e Class D	Category 6 Class E	Category 6A Class E _A	Category 7 Class F	Category 7A Class F _A
Ancho de Banda	100 MHz	250 MHz	500 MHz	600 MHz	1,000 MHz
Tipo de Cable	UTP	UTP/FTP	UTP/FTP	S/FTP	S/FTP
Pérdida Inserción (dB)	24	21.3	20.9	20.8	20.3
Pérdida Next (dB)	30.1	39.9	39.9	62.9	65
ACR (dB)	6.1	18.6	19	42.1	44.1

Pérdida de inserción: en este contexto se refiere a la cantidad de atenuación a través del enlace desde el sistema de transmisión al sistema receptor. Por lo tanto, los valores de dB más bajos son mejores. La tabla 5.1.1.3 muestra la cantidad de atenuación a una

frecuencia de 100 MHz. Esta es la frecuencia estándar usada en tablas que comparan varias clases de par trenzado. Sin embargo, la atenuación es una función creciente de frecuencia, y los estándares 568 especifican la atenuación a varias frecuencias. De acuerdo con ANSI / TIA-568-C.2 e ISO / IEC 11801 segunda edición, todas las características de transmisión se especifican como el peor de los casos para una longitud de 100 m. Si bien las longitudes de cableado pueden ser inferiores a 100 m, no hay disposiciones previsto en las normas para la ampliación de los límites especificados. Atenuación en decibelios es una función lineal de la distancia, por lo que la atenuación para distancias más cortas o más largas se calcula fácilmente.

Pérdida de diafonía de extremo cercano (NEXT, Near End Crosstalk): tal como se aplica a los sistemas de cableado de par trenzado es el acoplamiento de la señal de un par de conductores a otro par. Estos conductores pueden ser los pines metálicos en un conector o pares de cables en un cable. El extremo cercano se refiere al acoplamiento que tiene lugar cuando la señal de transmisión que ingresa al enlace se acopla de vuelta al par de conductores de recepción en el mismo extremo del enlace (es decir, el extremo cercano, significa que la señal transmitida es recogida por el par de recepción en el mismo extremo). Se puede pensar en esto como ruido introducido en el sistema, por lo que mejores valores de pérdida de dB es una situación satisfactoria; es decir, mayores magnitudes de pérdida NEXT están asociadas con menos ruido de diafonía. La figura 5.1.1.4 ilustra la relación entre la pérdida NEXT y la pérdida de inserción en el sistema A. Una señal transmitida desde el sistema B, con una potencia de señal transmitida de P_t , se recibe en A con una potencia de señal reducida de P_r . Al mismo tiempo, el sistema A está transmitiendo a B, y suponemos que la transmisión tiene la misma potencia de señal de transmisión de P_t . Debido a diafonía, se induce un cierto nivel de señal del transmisor de A en el cable de recepción del sistema A con un nivel de potencia. Esta es la señal de diafonía. Claramente, necesitamos tener $P_r > P_c$ para poder recibir de manera inteligible la señal deseada, y cuanto mayor sea la diferencia entre P_r y P_c , mejor será entendida la señal de recepción. A diferencia de la pérdida de inserción, la pérdida NEXT no varía en función de la longitud del enlace, porque, como lo indica la Figura 5.1.1.4, la pérdida NEXT es un fenómeno final. La pérdida NEXT varía en función de la frecuencia, con pérdidas que van aumentando en función de la frecuencia. Es decir, la cantidad de potencia de señal del transmisor de extremo cercano que se acopla a una línea de transmisión adyacente aumenta en forma lineal al aumento de la frecuencia.

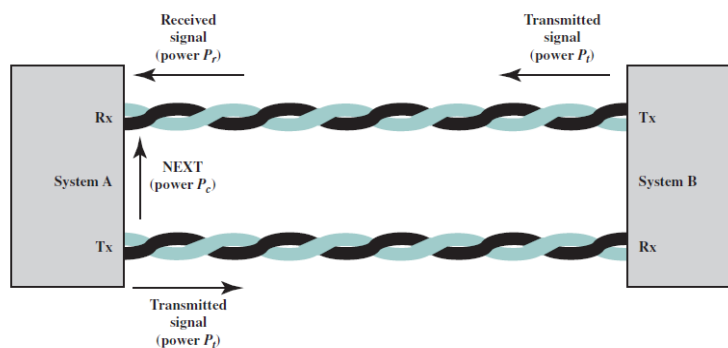


Figura 5.1.1.4: Relación de potencias de señales

Para la Tabla 5.1.1.3, la pérdida de inserción y la pérdida NEXT se calculan usando la siguiente ecuación:

$$A_{dB} = 10 \log_{10} (P_t / P_r)$$

$$NEXT_{dB} = 10 \log_{10} (P_t / P_c)$$

Siendo P_t : potencia transmitida, P_r : potencia recibida, P_c : potencia crosstalk

Atención: Tenga en cuenta que la pérdida NEXT se define en términos de la cantidad de pérdida de señal entre el transmisor local (P_t) y el receptor local. Por lo tanto, los valores más pequeños de la pérdida NEXT corresponden a una cantidad creciente de diafonía.

Otro parámetro importante utilizado en la especificación de la segunda edición de ISO / IEC 11801, es la relación atenuación a diafonía (ACR), que se define como:

$$ACR_{dB} = NEXT_{dB} - A_{dB}.$$

ACR es una medida de cuánto más grande es la intensidad de la señal recibida con respecto a la diafonía en el mismo par. Se requiere un valor positivo para que sea una operación exitosa.

5.1.2. Cable coaxial

Descripción física: El cable coaxial, como un par trenzado, consta de dos conductores, pero está construido de manera diferente para permitirle operar en un rango más amplio de frecuencias. Consiste en un conductor cilíndrico exterior hueco que rodea un conductor de cable interior (Figura 5.1.1.1(b)). El conductor interno está separado del conductor externo por anillos aislantes o algún material sólido dieléctrico¹. El conductor externo es cubierto con un forro o chaqueta. Un solo cable coaxial tiene un diámetro de 1 a 2,5 cm. El cable coaxial se puede usar en distancias más largas y admite más estaciones en una línea compartida que el cable de par trenzado.

Aplicaciones: El cable coaxial es un medio de transmisión versátil, utilizado en una amplia variedad de aplicaciones. Los más importantes de estos son:

- Distribución televisiva
- Transmisión telefónica de larga distancia
- Redes de área local

El cable coaxial se usa ampliamente como un medio para distribuir señales de TV a hogares: televisión por cable. Desde sus modestos comienzos como Community Antenna Television (CATV), diseñado para brindar servicio a áreas remotas, la televisión por cable alcanza casi a tantos hogares y oficinas como el teléfono. Un sistema de televisión por cable puede transportar docenas o incluso cientos de canales de televisión

¹ Que es aislante o mal conductor del calor o la electricidad.

en rangos de hasta unas pocas decenas de kilómetros. El cable coaxial ha sido tradicionalmente una parte importante de la red telefónica de larga distancia. Hoy se enfrenta a una competencia cada vez mayor de la fibra óptica terrestre, el microondas y el satélite. En la actualidad la fibra óptica está llegando a los hogares, ofreciendo servicios de telefonía, internet y servicios de televisión, todos conectados en un solo “pelo” de fibra con tecnología GPON². Usando multiplexación por división de frecuencia (FDM), un cable coaxial puede transportar más de 10,000 canales de voz simultáneamente.

Características de transmisión: El cable coaxial se utiliza para transmitir tanto señales analógicas como digitales. Como se puede ver en la Figura 5.1.1.2, el cable coaxial tiene características de frecuencia que son superiores a los del par trenzado y, por lo tanto, se pueden usar de manera efectiva a frecuencias más altas y velocidades de datos. Debido a su construcción concéntrica y protegida, el cable coaxial es mucho menos susceptible a interferencias y diafonía que el cable de par trenzado. Las principales limitaciones en el rendimiento son atenuación, ruido térmico y ruido de intermodulación. Este último solo está presente cuando varios canales (FDM) o bandas de frecuencia están en uso en el cable.

Para la transmisión a larga distancia de señales analógicas, se necesitan amplificadores a una distancia de pocos kilómetros, con un espacio más cercano requerido si se usan frecuencias más altas. El espectro utilizable para la señalización analógica se extiende hasta aproximadamente 500 MHz. Para la señalización digital, se necesitan repetidores cada aproximadamente un kilómetro, con una distancia más cercana para mayores tasas de datos.

5.1.3. Fibra óptica

Descripción física: Una fibra óptica es un medio delgado y flexible capaz de transmitir un rayo óptico. Se pueden usar varios vidrios y plásticos para hacer fibras ópticas. Las pérdidas más bajas se han obtenido utilizando fibras de sílice³ fundida ultrapura. La fibra ultrapura es difícil y costosa de fabricar; en su lugar fibras de vidrio multicomponente de mayor pérdida son más económicas y aún proporcionan un buen rendimiento. La fibra plástica es aún menos costosa y puede usarse para enlaces de corto alcance, para los cuales las pérdidas moderadamente altas son aceptables.

² Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (GPON o Gigabit-capable Passive Optical Network)

³ Material para fabricar vidrio

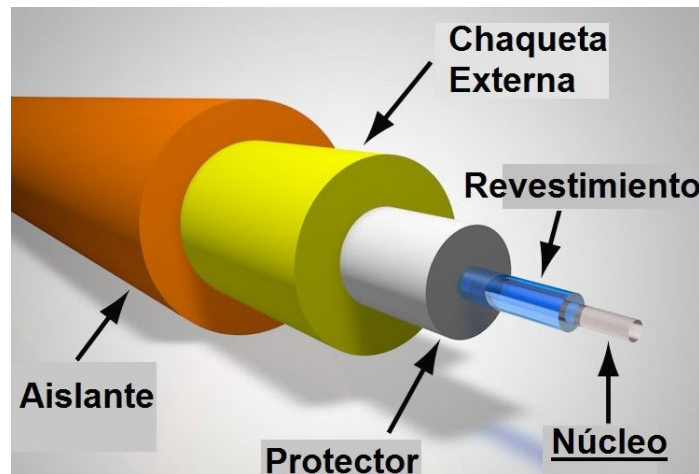


Figura 5.1.3.1: Arquitectura de la fibra óptica

Una hebra de fibra óptica (también llamada guía de onda óptica) tiene una forma cilíndrica y consta de tres secciones concéntricas: el núcleo, el revestimiento y la cubierta (Figura 5.1.3.1). El núcleo es la sección más interna y consta de hebras delgadas de vidrio o plástico; el núcleo tiene un diámetro en el rango de 8 a $62,5 \mu\text{m}$ ⁴. El núcleo está rodeado por un revestimiento, que es un revestimiento de vidrio o plástico que tiene propiedades ópticas diferentes de las del núcleo y un diámetro de $125 \mu\text{m}$. La interfaz entre el núcleo y el revestimiento actúa como un reflector para confinar luz que de otro modo escaparía del núcleo. La capa más externa es el revestimiento de plástico duro o cubierta que protege el vidrio de la humedad y el daño físico.

El cable de fibra óptica proporciona protección a la fibra contra el estrés durante la instalación y del medio ambiente una vez que está instalado. Los cables pueden contener desde una hasta cientos de fibras en el interior. La capa más externa del cable, que rodea un pelo o un paquete de pelos de fibras es la “cubierta” o revestimiento exterior. Ésta última está compuesta de plástico y otros materiales en capas para proteger contra la humedad, la abrasión, el aplastamiento y otros peligros ambientales.

Aplicaciones La fibra óptica ya disfruta de un uso considerable en telecomunicaciones de largas distancias. Las continuas mejoras en el rendimiento y disminución de los precios, junto con lo inherente a las ventajas de la fibra óptica la han hecho cada vez más atractiva para las redes de área local.

Las siguientes características distinguen la fibra óptica del par trenzado o el cable coaxial:

- Mayor capacidad: el ancho de banda potencial, y por lo tanto la velocidad de datos, de la fibra óptica es inmensa; se ha podido demostrar en la práctica velocidades del orden de los cientos de Gbps recorriendo decenas de kilómetros.
- Tamaño más pequeño y peso más ligero: las fibras ópticas son considerablemente más delgadas que cable coaxial o cable de par trenzado incluido, al menos un orden de magnitud más delgado para una capacidad de transmisión de información

⁴ El micrómetro, micrón o micra es una unidad de longitud equivalente a una milésima parte de un milímetro. Su símbolo es μm

comparable. Su delgadez y poco peso la hacen ideal para grandes edificios y construcciones subterráneas. Su utilización implica una reducción importante de las estructuras de soporte de cableado.

- Atenuación más baja: la atenuación es significativamente más baja para la fibra óptica que para cable coaxial o par trenzado (Figura 5.1.1.2 (c)) y es constante en un amplio rango.
- Aislamiento electromagnético: los sistemas de fibra óptica no se ven afectados por campos electromagnéticos. Por lo tanto, el sistema no es vulnerable a la interferencia, ruido de impulso o diafonía. Del mismo modo, las fibras no irradian energía, por lo que hay poca interferencia con otros equipos y hay un alto grado de seguridad de espionaje. Además, la fibra es inherentemente difícil de “pinchar” (modismo con el que se designa el robo de señal accediendo al núcleo del cable).
- Mayor espacio entre repetidores: menos repetidores significan un menor costo y menos fuentes de error. El rendimiento de los sistemas de fibra óptica desde este punto de vista ha estado mejorando constantemente. Los repetidores se pueden ubicar espaciados en decenas y cientos de kilómetros. Los sistemas coaxiales y de par trenzado generalmente necesitan repetidores en distancias más cortas, concretamente en muy pocos kilómetros.

Cinco categorías básicas de aplicación se han vuelto importantes para la fibra óptica:

- Troncales (backbone) de largo recorrido
- Troncales (backbone) metropolitanos
- Troncales (backbone) de intercambio rural
- Bucles de suscriptor
- Redes de área local

Las redes telefónicas fueron los primeros usuarios importantes de fibra óptica. Enlaces de fibra óptica se utilizan para reemplazar los enlaces de radio digital o de cobre entre los interruptores telefónicos, comenzando con enlaces de larga distancia, llamadas líneas largas o larga distancia, donde la distancia de la fibra y las capacidades de ancho de banda hicieron que la fibra óptica fuera potencialmente más rentable. La fibra se utiliza para conectar todas las oficinas centrales y los conmutadores de larga distancia porque tiene miles de veces el ancho de banda del cable de cobre y pueden transportar cientos de señales a mayores distancias antes de necesitar un repetidor, lo que hace que el costo de una conexión telefónica sobre fibra represente solo un pequeño porcentaje del costo de la misma conexión en cobre. Las rutas de largo recorrido promedian aproximadamente 1500 km de longitud y ofrecen alta capacidad (específicamente 20,000 a 60,000 canales de voz). Los cables submarinos de fibra óptica también han disfrutado de un uso creciente (Figura 5.1.3.2).

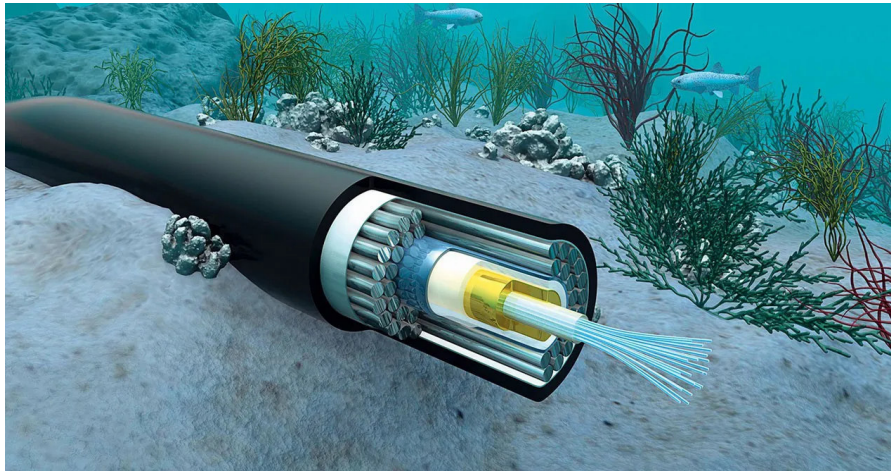


Figura 5.1.3.2: Fibra óptica submarina (Fuente: Wikipedia, agosto 2020)

Los circuitos de backbone metropolitanos tienen una longitud promedio de 12 km y pueden tener hasta 100,000 canales de voz en un grupo troncal. La mayoría de las instalaciones están instaladas en conductos subterráneos y sin repetidores, uniéndose a centrales telefónicas en un área metropolitana o área de la ciudad. En esta categoría se incluyen rutas que unen instalaciones de microondas de larga distancia que terminan en el perímetro de la ciudad conectadas a la central telefónica principal.

Los troncales de intercambio rural tienen longitudes de circuito que van de 40 a 160 km y permiten conectar municipios y comunas rurales. Dependiendo del prestador telefónico, estos sistemas conectan hasta 5000 canales de voz. Si bien es cierto las inversiones en la red de fibra óptica en nuestro país tiene cierto retraso, prácticamente toda la columna vertebral del sistema telefónico está compuesta de fibra óptica. Los cables van enterrados o en forma aérea, dependiendo de la geografía y de las regulaciones de las provincias y municipios. La conexión de Argentina con el mundo se hace principalmente a través de cables submarinos, que ahora conectan todos los continentes y la mayoría de las naciones isleñas con la excepción de la Antártida (Figura 5.1.3.3).



Figura 5.1.3.3: Fibra óptica submarina en el continente americano (Fuente: Wikipedia, agosto 2020)

Los circuitos de bucle de abonado son fibras que se conectan directamente la central telefónica del prestador del servicio con el domicilio del suscriptor. Estas instalaciones están comenzando a desplazar al par trenzado y los enlaces de cable coaxial a medida que las redes telefónicas evolucionan hacia redes de servicio completo capaces de manejo no solo de voz y datos, sino también de imágenes y videos. La penetración inicial de fibra óptica en esta aplicación ha sido para el suscriptor comercial, pero la fibra llegando al hogar es en el momento de escribir las presentes notas una realidad en grandes barrios de San Miguel de Tucumán, Yerba Buena, Tañ Viejo, Las Talitas, entre otros municipios.

Una aplicación final importante de fibra óptica es para redes de área local. Se han desarrollado estándares y se han introducido productos para redes de fibra óptica que tienen una capacidad total de hasta 100 Gbps y pueden admitir miles de estaciones en un gran edificio de oficinas o un complejo de edificios.

Características de transmisión: La figura 5.1.3.4 muestra la estructura general de un enlace de fibra óptica. El mismo consiste en un transmisor en uno de los extremos de una fibra y un receptor en el otro extremo. La mayoría de los sistemas funcionan transmitiendo en una dirección en una fibra y en la dirección inversa en otra fibra para operación full duplex. El transmisor toma como entrada una señal eléctrica digital. Esta señal alimenta a una fuente de luz LED o láser utilizando una interfaz electrónica. La fuente de luz produce una serie de pulsos de ondas de luz que codifican los datos digitales de la entrada eléctrica. El receptor incluye un sensor de luz que detecta la señal de luz entrante y la convierte de nuevo a una señal eléctrica digital.

La fibra óptica transmite la señal codificada usando un haz de luz que se desliza por reflexión interna. La reflexión interna total puede ocurrir en cualquier medio transparente que tiene un índice de refracción más alto que el medio circundante. En efecto, la fibra óptica actúa como una guía de onda para frecuencias en el rango de aproximadamente 10^{14} a 10^{15} Hz; esta cubre porciones de los espectros infrarrojo y visible.

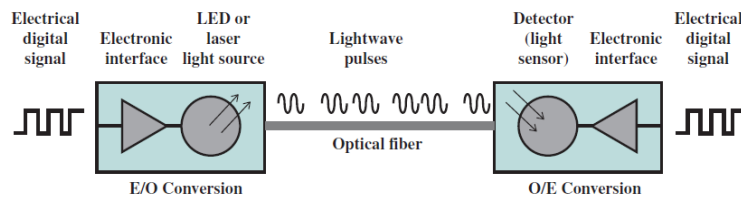


Figura 5.1.3.4: Envío de información usando fibra óptica

La figura 5.1.3.5 muestra el principio de transmisión de fibra óptica. La luz de una fuente ingresa al vidrio cilíndrico o al núcleo de plástico. Los rayos en ángulos superficiales se reflejan y se propagan a lo largo de la fibra; otros rayos son absorbidos por el material circundante. Esta forma de propagación se llama multimodo de índice de pasos o de índice discreto (step-index multimode), en referencia a la variedad de ángulos que reflejan. Con la transmisión multimodo, existen múltiples rutas de propagación, cada uno con una longitud de camino diferente y, por lo tanto, distinto tiempo para atravesar la fibra.

Propagación Multimodo de Índice Discreto: Alude al hecho de que hay multitud de ángulos para los que se da la reflexión total. En la transmisión multimodo, existen múltiples caminos que verifican la reflexión total, cada uno con diferente longitud y, por lo tanto, con diferente tiempo de propagación. Esto hace que los elementos de señalización que se transmiten (pulsos de luz) se dispersen en el tiempo y en la distancia, limitando la velocidad a la que los datos pueden ser correctamente recibidos. Dicho de otra forma, la necesidad de separar los pulsos de luz limita la velocidad de transmisión de los datos. Este tipo de fibra es más adecuada para distancias cortas y por eso su mayor uso en redes LAN.

Propagación Monomodo: Cuando se reduce el radio del núcleo de la fibra, se reflejarán menos ángulos. Reduciendo el radio del núcleo al orden de una longitud de onda, solo un ángulo o un modo puede pasar: el rayo axial. Esta propagación monomodo proporciona un rendimiento superior. La razón es que hay una sola ruta de transmisión con transmisión monomodo, por lo tanto, la distorsión encontrada en multimodo no puede ocurrir. Este modo de propagación se usa típicamente para aplicaciones de larga distancia, incluidos teléfono y cable televisión.

Propagación Multimodo de Índice Gradual: Las características de este modo están entre las de los otros dos mencionados. Estas fibras, al disponer de un índice de refracción superior en la parte central, hace que los rayos de luz avancen más rápidamente conforme

se alejan del eje axial de la fibra. En lugar de describir un zig-zag, la luz en el núcleo describe curvas helicoidales debido a la variación gradual del índice de refracción, reduciendo así la distorsión multimodal. El efecto de la mayor velocidad de propagación en la periferia del núcleo se traduce en que, aun recorriendo distancias superiores, todos los rayos llegan aproximadamente en los mismos tiempos. Este tipo de fibras de índice gradual también se usan en redes LAN.

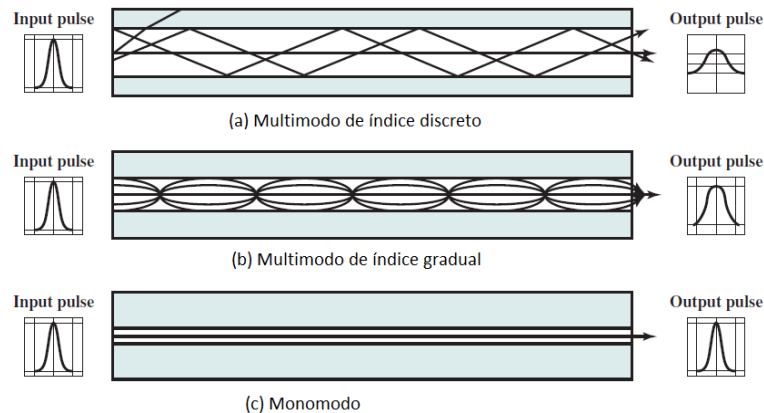


Figura 5.1.3.5: Modos de propagación de la fibra óptica

Se utilizan dos tipos diferentes de fuente de luz en los sistemas de fibra óptica: el emisor de luz diodo (LED) y el diodo láser de inyección (ILD). Ambos son dispositivos semiconductores que emiten un haz de luz cuando se aplica un voltaje. El LED es menos costoso, opera en un rango de temperatura mayor y tiene una vida operativa más larga. El ILD, que opera según el principio del láser, es más eficiente y puede mantener mayores tasas de transferencia de datos.

Existe una relación entre la longitud de onda empleada, el tipo de transmisión, y la velocidad de datos alcanzable. Tanto el modo único como el multimodo pueden admitir varias longitudes de onda de luz diferentes y pueden emplear fuentes de luz láser o LED. En la fibra óptica, hay cuatro grupos de longitudes de ondas, basados en las características de atenuación del medio y en las propiedades de las fuentes y receptores de luz. Un resumen de estos cuatro grupos se muestra en la siguiente tabla 5.1.3.6:

Tabla 5.1.3.6: Tabla de grupos de longitud de onda y frecuencias en fibra óptica

Longitud de onda (en el vacío), rango en nm ⁵	Rango de Frecuencias (THz)	Banda	Tipo de Fibra	Aplicación
820 a 900	366 a 333		Multimodo	LAN
1280 a 1350	234 a 222	S	Monomodo	VARIOS
1528 a 1561	196 a 192	C	Monomodo	WDM ⁶
1561 a 1620	192 a 185	L	Monomodo	WDM

⁵ Nanómetro (nm) Medida de longitud que equivale a la milmillonésima parte del metro.

⁶ WDM (wavelength division multiplexing): multiplexión por división de longitud de onda. Esta técnica de multiplexión se desarrolla en la Parte 2 de estas notas.

Tenga en cuenta los enormes anchos de banda disponibles. Para las cuatro ventanas, los anchos de banda respectivos son: 33, 12, 4 y 7 THz⁷. Esto es varios órdenes de magnitud mayor que el ancho de banda disponible en el espectro de radiofrecuencia.

Un aspecto que puede ser confuso sobre las cifras de atenuación reportadas para la transmisión de fibra óptica es que, invariablemente, el rendimiento de la fibra óptica se especifica en términos de longitud de onda, en lugar de hacerlo en términos de frecuencia. Las longitudes de onda que aparecen en gráficos y tablas son las longitudes de onda correspondientes a la transmisión en el vacío. Sin embargo, en la fibra, la velocidad de propagación es menor que c (la velocidad de la luz en el vacío); el resultado es que, aunque la frecuencia de la señal no cambia, la longitud de onda cambia.

Ejemplo: Para una longitud de onda en vacío de 1550 nm, la frecuencia correspondiente es $f = c / \lambda = (3 * 10^8) / (1550 * 10^{-9}) = 193.4 * 10^{12} = 193.4 \text{ THz}$. Para una fibra monomodo típica, la velocidad de propagación es aproximadamente $v = 2.04 * 10^8$. En este caso, una frecuencia de 193.4 THz corresponde a una longitud de onda de $\lambda = v / f = (2.04 * 10^8) / (193.4 * 10^{12}) = 1055 \text{ nm}$. Por lo tanto, en esta fibra, cuando se cita una longitud de onda de 1550 nm, la longitud de onda real sobre este tipo de fibra es de 1055 nm.

Las cuatro ventanas de transmisión están en dentro de la porción del espectro de la frecuencia de infrarrojo, debajo de la porción de luz visible, que es de 400 a 700 nm. La pérdida es menor a longitudes de onda más altas, lo que permite mayores velocidades de datos en distancias más largas. Muchas de las aplicaciones locales actuales utilizan fuentes de luz LED de 850 nm. Aunque esta combinación es relativamente económica, generalmente se limita a velocidades de datos inferiores a 100 Mbps y a distancias de unos pocos kilómetros. Para lograr velocidades de datos más altas y distancias más largas, se necesita una fuente de LED o láser de 1300 nm. Las velocidades de datos más altas y las distancias más largas, requieren fuentes láser de 1500 nm.

5.2. Medios de Transmisión no Guiados: Transmisión Inalámbrica

Tres rangos generales de frecuencias son de interés en la presente discusión sobre la tecnología de transmisión inalámbrica.

- Frecuencias en el rango de aproximadamente 1 GHz a los 40 GHz se denominan frecuencias de microondas. A estas frecuencias, es posible generar haces altamente direccionales, y el microondas es bastante adecuado para una transmisión punto a punto. Microondas también se utiliza para comunicaciones por satélite.
- El rango de 30 MHz a 1 GHz es adecuado para aplicaciones omnidireccionales. En este caso se refiere al rango de radio.
- Otro rango de frecuencia importante, para aplicaciones locales, es la porción del espectro de frecuencias del infrarrojo. Esto cubre, aproximadamente, de 3

⁷ THz (Terahertz), por definición 10^{12} Hz.

* 10^{11} a $2 \cdot 10^{14}$ Hz. Infrarrojo es útil para aplicaciones punto a punto locales y multipunto dentro de áreas pequeñas y cerradas, como una habitación individual.

Para medios no guiados, la transmisión y la recepción se logran mediante una antena. Antes de mirar categorías específicas de transmisión inalámbrica, se va a proporcionar una breve introducción referida a las antenas.

5.2.1. Antenas

Una antena se puede definir como un conductor eléctrico o sistema de conductores utilizado ya sea para irradiar energía electromagnética o para recoger energía electromagnética.

Para la transmisión de una señal, la energía eléctrica de radiofrecuencia generada en el transmisor se convierte en la antena, en energía electromagnética y se irradia hacia el entorno circundante (atmósfera, espacio, agua). La recepción se produce cuando la señal electromagnética se intercepta con otra antena, la cual convierte la energía electromagnética en energía eléctrica de radiofrecuencia y alimenta con esta última al receptor.

En la comunicación bidireccional, la misma antena se usa a menudo para ambas tareas: transmisión y recepción. Esto es posible porque cualquier antena transfiere energía del entorno circundante a sus terminales de receptor de entrada con la misma eficiencia que transfiere energía desde los terminales del transmisor de salida al entorno circundante, suponiendo que se use la misma frecuencia en ambas direcciones. Dicho de otra manera, las características de la antena son esencialmente las mismas si una antena está enviando o recibiendo energía electromagnética.

Una antena irradia energía en todas las direcciones, pero, por lo general, no funciona igualmente bien en todas las direcciones. Una forma común de caracterizar el desempeño de una antena es el patrón de radiación, que es una representación gráfica de propiedades de radiación de una antena en función de las coordenadas espaciales. Un simple patrón es producido por una antena idealizada conocida como antena isotrópica. Una antena isotrópica, también llamada antena omnidireccional, es un punto en el espacio que irradia energía en todas las direcciones por igual. El patrón de radiación real para la antena isotrópica es una esfera con la antena en el centro.

Antena parabólica reflexiva: Un tipo importante de antena es la antena parabólica reflectante, que se utiliza en aplicaciones terrestres de microondas y satélite. Una parábola es el lugar geométrico de todos los puntos equidistantes de una línea fija y un punto fijo que no está sobre la línea. El punto fijo se llama foco y la línea fija se llama directriz (Figura 5.2.1.1(a)). Si una parábola gira sobre su eje, la superficie generada se llama paraboloide. Una sección transversal a través del paraboloide paralelo a su eje forma una parábola y una sección transversal perpendicular al eje forma un círculo. Tales superficies se usan en faros de automóviles, telescopios ópticos y de radio, y antenas de microondas debido a la siguiente propiedad: Si una fuente de energía electromagnética (o sonido) se

coloca en el foco del paraboloide, y si el paraboloide es una superficie reflectante, luego la onda rebota en líneas paralelas al eje del paraboloide. La figura 5.2.1.1(b) muestra este efecto en sección transversal. En teoría, este efecto crea una viga paralela sin dispersión. En la práctica, hay cierta dispersión, porque la fuente de energía debe ocupar más de un punto. Cuanto mayor sea el diámetro de la antena, más estrechamente direccional es el haz. En recepción, si las ondas entrantes son paralelas al eje del paraboloide reflector, lo que resulta es que la señal se concentra en el foco.

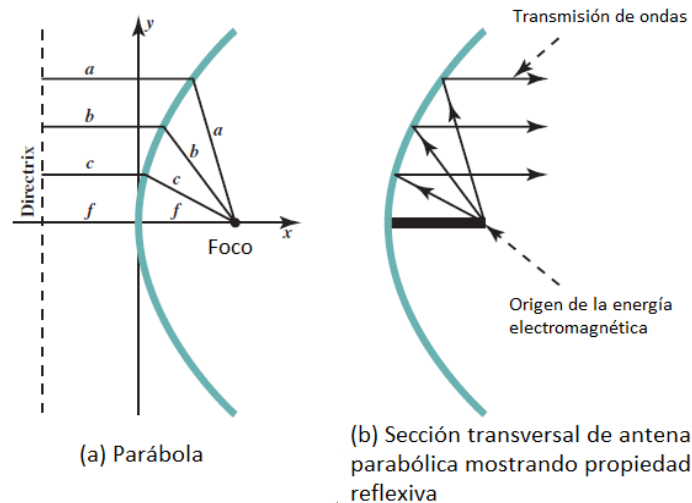


Figura 5.2.1.1: Antena parabólica reflexiva

Ganancia de antena: La ganancia de antena es una medida de la direccionalidad de una antena. La ganancia de antena se define como potencia de salida, en una dirección particular, comparada al producido en cualquier dirección por una antena omnidireccional perfecta (antena isotrópica). Específicamente, $G_{dB} = 10 \log (P_2 / P_1)$, donde G es la ganancia de la antena, P_1 es la potencia radiada de la antena direccional, y P_2 es la potencia radiada de la antena de referencia. Por ejemplo, si una antena tiene una ganancia de 3 dB, esa antena mejora la antena isotrópica en esa dirección en 3 dB, o un factor de 2. El aumento de la potencia radiada en una dirección dada es a expensas de otras direcciones. En efecto, el aumento de potencia se irradia en una dirección al reducir la potencia radiada en otras direcciones. Es importante tener en cuenta que la ganancia de antena no se refiere a que se obtiene más potencia de salida que potencia de entrada, sino más bien a la direccionalidad.

Considere una antena direccional que tiene una ganancia de 6 dB sobre una antena de referencia y que irradia 700 W. ¿Cuánto más potencia debe irradiar la antena de referencia para proporcionar la misma potencia de señal en la dirección preferida? A continuación, la solución:

$$6 = 10 \log (P_2 / 700)$$

$$P2 / 700 = 10^{0.6}, P2/700 = 3.98$$

$$P2 = 2786 \text{ W}$$

5.2.2. Microondas Terrestres

Descripción física: El tipo más común de antena de microondas es la parabólica "plato." Un tamaño típico es de aproximadamente 3 m de diámetro. La antena se fija rígidamente y enfoca un haz estrecho para lograr la transmisión a través de una línea de visión con la antena del receptor. Las antenas de microondas generalmente se encuentran a alturas sustanciales por encima nivel del suelo para extender el alcance entre antenas y poder transmitir sobre obstáculos intervinientes. Para lograr la transmisión a larga distancia, una serie de antenas de microondas se utilizan junto a torres de retransmisión, formando una serie de enlaces de microondas punto a punto unidos entre sí hasta alcanzar la distancia final deseada.

Aplicaciones: El uso principal para los sistemas de microondas terrestres es aplicarlo al servicio de telecomunicaciones de larga distancia, como una alternativa al cable coaxial o fibra óptica. La instalación de enlaces de microondas requiere mucho menos repetidores a igual distancia que el cable coaxial; eso sí, necesita tener línea vista entre ambas antenas. Este tipo de solución es comúnmente elegida cuando es necesario transmitir voz y señales de televisión. Otro uso muy común del microondas es para establecer enlaces cortos punto a punto entre edificios, y se lo usa como circuito cerrado de TV o para unir redes LAN's entre edificios. Por ejemplo, la Figura 5.2.2.1 muestra un enlace de microondas establecido entre la casa central de una firma que comercializa electrodomésticos (ubicada en el centro de la ciudad de San Miguel de Tucumán) y una sucursal que se encuentra a 4 kilómetros de distancia, en la misma ciudad. De esta forma, se pudo desplegar un sistema de gestión integral de ventas y administración, incluyendo en la solución conectividad de voz.



Figura 5.2.2.1: Solución de conectividad Pyme con sucursal

Características de la transmisión: La transmisión por microondas cubre una parte considerable del espectro electromagnético. Frecuencias comunes utilizadas para la transmisión están en el rango de 1 a 40 GHz. Cuanto mayor sea la frecuencia utilizada, mayor será el ancho de banda potencial y, por lo tanto, mayor será la velocidad de datos potencial. La Tabla 5.2.2.2 indica ancho de banda y velocidad de datos para algunos sistemas típicos.

Tabla 5.2.2.2: Ancho de banda y velocidades típicas en microondas terrestres

Banda (GHz)	Ancho de Banda (MHz)	Velocidad (Mbps)
2	7	12
6	30	90
11	40	135
18	220	274

Como con cualquier sistema de transmisión, una fuente principal de pérdida es la atenuación. Para las microondas (y frecuencias de radio), la pérdida se puede expresar como:

$$L = 10 \log (4\pi d / \lambda)^2 \text{ dB} \quad \text{Ecuación (5.1)}$$

donde “d” es la distancia y “λ” es la longitud de onda, en las mismas unidades. Por lo tanto, la pérdida varía según el cuadrado de la distancia. Por el contrario, para par trenzado y cable coaxial, la pérdida varía exponencialmente con distancia (lineal en decibelios). Así, los repetidores o amplificadores pueden ser colocados más separados para sistemas de microondas: lo típico es de 10 a 100 km. La atenuación se incrementa con la lluvia. Los efectos de la lluvia se vuelven especialmente notables arriba de los 10 GHz. Otra fuente de discapacidad es la interferencia. Con la creciente popularidad del microondas, las áreas de transmisión se superponen y la interferencia es siempre un peligro. Así la asignación de bandas de frecuencia está estrictamente regulada.

Al momento de escribir estas notas, en la Argentina, las frecuencias libres de uso para el territorio nacional están reguladas por la Resolución del Ministerio de Modernización N° 581/18, la cual establece que las bandas de frecuencias radioeléctricas detalladas a continuación, se declaran de uso compartido en el ámbito del territorio nacional y no requieren de autorización para su uso, debiendo respetarse las condiciones y parámetros técnicos de emisión establecidas por el Ente Nacional de Comunicaciones en la Resolución N° 4653/19:

915 – 928 MHz

2400 – 2483.5 MHz

5150 – 5250 MHz

5250 – 5350 MHz

5470 – 5600 MHz

5650 – 5725 MHz

5725 – 5850 MHz

57000 – 71000 MHz

5.2.3. Microondas Satelital

Descripción física: Un satélite de comunicación es, en efecto, una estación que reenvía microondas. Se utiliza para vincular dos o más transmisores / receptores de microondas en tierra, conocidos como estaciones terrenas o estaciones terrestres. El satélite recibe transmisiones en una banda de frecuencia (enlace ascendente), amplifica o repite la señal y la transmite en otra banda de frecuencia (enlace descendente). Un solo satélite en órbita operará en varias bandas de frecuencias, llamadas canales de transponder, o simplemente transponder.

La figura 5.2.3.1 muestra de manera general dos configuraciones comunes para comunicación satelital. En el primero, el satélite se está utilizando para proporcionar un enlace punto a punto entre dos antenas terrestres distantes. En el segundo, el satélite proporciona comunicaciones entre un transmisor instalado en tierra y varios receptores terrestres.

Para que un satélite de comunicación funcione de manera efectiva, generalmente se requiere que permanezca estacionario con respecto a su posición sobre la Tierra. De lo contrario no estaría dentro de la línea de visión de sus estaciones terrenas en todo momento. Permanecer estacionario significa que el satélite debe tener un período de rotación igual al período de rotación de la Tierra. Esto ocurre a una altura de 35,863 km en el ecuador. Se denominan satélites geoestacionarios, y se encuentran en órbita sobre el ecuador terrestre a la misma velocidad de rotación de la tierra.

Dos satélites que usan la misma banda de frecuencia, si están lo suficientemente cerca, van a interferirse. Para evitar esto, los estándares actuales requieren un espacio de 4 ° (desplazamiento angular medido desde la Tierra) en la banda de 4/6 GHz y una separación de 3 ° en 12/14 GHz. Por lo tanto, el número de satélites posibles es bastante limitado.

Aplicaciones; Las siguientes son las aplicaciones más importantes para satélites:

- Distribución televisiva
- Transmisión telefónica de larga distancia
- Redes comerciales privadas
- Posicionamiento global

Debido a su naturaleza de transmisión, los satélites se adaptan bien a la distribución televisiva y se utilizan ampliamente en todo el mundo. En su uso tradicional, una red proporciona programación desde una ubicación central. Los programas se

transmiten al satélite y luego se transmiten hasta una serie de estaciones, que luego distribuyen los programas a los espectadores individuales.

Una red, el Public Broadcasting Service (PBS), distribuye su programación de televisión casi exclusivamente mediante el uso de canales satelitales. Otras redes comerciales también hacen un uso sustancial del satélite, con sistemas de televisión por cable recibiendo una proporción cada vez mayor de su programación de satélites. La aplicación más reciente de la tecnología satelital es la distribución de televisión directa desde el satélite al usuario doméstico (en Argentina Directv). El costo y el tamaño decrecientes de las antenas receptoras han hecho que DBS (Direct Broadcast Satellite) sea económicamente factible.

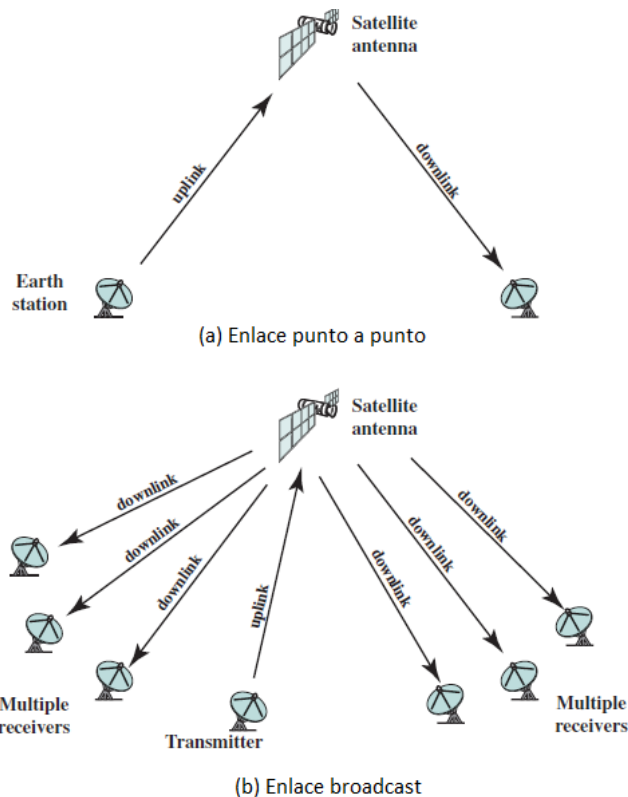


Figura 5.2.3.1: Tipos de enlaces satelitales

La transmisión satelital también se usa para enlaces punto a punto entre centrales telefónicas de las redes de telefonía pública. Es el medio óptimo para troncales internacionales de alto uso y es competitivo con los sistemas terrestres para muchos enlaces internacionales de larga distancia.

Hay numerosos negocios que se pueden hacer con la transmisión de datos a través de satélites. El proveedor del satélite puede dividir la capacidad total en varios canales y arrendarlos a usuarios comerciales individuales. Un usuario equipado con antenas en varios sitios puede usar un canal satelital para una red privada. Tradicionalmente, tales aplicaciones han sido bastante caras y limitadas a organizaciones más grandes con requisitos de gran volumen. Un desarrollo reciente constituye la apertura

de una terminal muy pequeña, conocida como VSAT (Terminal de Apertura Muy Pequeña, del inglés, Very Small Aperture Terminal), que proporciona una alternativa de bajo costo. La figura 5.2.3.2 representa una configuración típica de VSAT. Una serie de estaciones de abonado están equipadas con antenas VSAT de bajo costo. Usando una técnica específica, estas estaciones comparten un satélite con capacidad de transmisión utilizando una estación central terrestre. La estación central terrestre puede intercambiar mensajes con cada uno de los suscriptores y puede transmitir mensajes entre suscriptores.

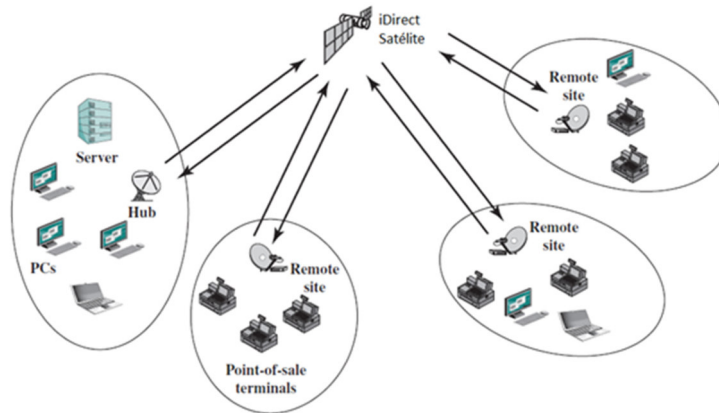


Figura 5.2.3.2: Tecnología satelital VSAT

Una aplicación final de satélites, que se ha generalizado, es digna de ser mencionada. El sistema de posicionamiento global Navstar, o GPS para abreviar, consta de tres segmentos o componentes:

- Una constelación de satélites (actualmente 24) que orbitan alrededor de 20,200 km arriba la superficie de la Tierra, que transmite un rango de señales en dos frecuencias en la parte de microondas que forman parte del espectro de radio. Fue concebido de manera que existan como mínimo 4 satélites visibles por encima del horizonte en cualquier punto de la superficie y en cualquier altura.
- El componente de control está constituido por 5 estaciones de rastreo distribuidas a lo largo del globo y una estación de control principal (MCS- Master Control Station). Este componente rastrea los satélites, actualiza sus posiciones orbitales y calibra y sincroniza sus relojes. Otra función importante es determinar las órbitas de cada satélite y prever su trayectoria durante las 24 horas siguientes. Esta información es enviada a cada satélite para después ser transmitida por este, informando al receptor local donde es posible encontrar el satélite.
- El componente del usuario incluye todos aquellos que usan un receptor GPS para recibir y convertir la señal GPS en posición, velocidad y tiempo. Incluye además todos los elementos necesarios en este proceso, como las antenas y el software de procesamiento.

Cada satélite transmite una secuencia de código digital única de 1s y 0s, precisamente cronometrado por un reloj atómico, que es recogido por la antena de un receptor GPS y coincide con la misma secuencia de código generada dentro del receptor.

Alineándose o haciendo coincidir las señales, el receptor determina cuánto tardan las señales en viajar desde el satélite al receptor. Estas medidas de tiempo se convierten a distancias usando la velocidad de la luz. Midiendo la distancia de cuatro o más satélites simultáneamente y conociendo las ubicaciones exactas de los satélites (incluidos en las señales transmitido por los satélites), el receptor puede determinar su latitud, longitud, y altura al tiempo que sincroniza su reloj con el estándar de hora GPS que también hace que el receptor sea un reloj preciso.

Características de transmisión: El rango de frecuencia óptimo para la transmisión por satélite está en el rango de 1 a 10 GHz. Por debajo de 1 GHz, hay un ruido significativo de fuentes naturales, incluido el ruido galáctico, solar y atmosférico, y la interferencia de varios dispositivos electrónicos. Por encima de 10 GHz, la señal es severamente atenuado por absorción atmosférica y precipitación.

La mayoría de los satélites que prestan servicio punto a punto en la actualidad utilizan un ancho de banda de frecuencia en el rango de 5.925 a 6.425 GHz para la transmisión de la Tierra al satélite (enlace ascendente) y un ancho de banda en el rango de 3.7 a 4.2 GHz para transmisión desde satélite a la Tierra (enlace descendente). Esta combinación se conoce como la banda de 4/6 GHz. Note que las frecuencias de enlace ascendente y enlace descendente difieren. Para funcionamiento continuo sin interferencia, un satélite no puede transmitir y recibir en la misma frecuencia. Así las señales recibidas de una estación terrestre en una frecuencia deben transmitirse de vuelta en otra.

La banda de 4/6 GHz está dentro de la zona óptima de 1 a 10 GHz, pero ha comenzado a saturarse. Otras frecuencias en ese rango no están disponibles debido a fuentes de interferencia que operan en esas frecuencias, generalmente microondas terrestre. Por lo tanto, se ha desarrollado la banda de 12/14 GHz (enlace ascendente: 14 a 14,5 GHz; enlace descendente: 11.7 a 12.2 GHz). En esta banda de frecuencia, los problemas de atenuación deben aun superarse. Sin embargo, se pueden utilizar receptores de estaciones terrenas más pequeños y baratos. Esta última banda también se saturará, y se proyecta el uso en los 20/30-GHz banda (enlace ascendente: 27,5 a 30,0 GHz; enlace descendente: 17,7 a 20,2 GHz). Esta banda experimenta problemas de atenuación aún mayores, pero permitirán un mayor ancho de banda (2500 MHz versus 500 MHz) e incluso receptores más pequeños y más baratos.

Se deben tener en cuenta varias propiedades de la comunicación satelital. Primero porque debido a las largas distancias involucradas, hay un retraso de propagación de aproximadamente una cuarta parte segundo desde la transmisión desde una estación terrena hasta la recepción por otra estación terrena.

Este retraso es notable en las conversaciones telefónicas ordinarias. También presenta problemas en las áreas de control de errores y control de flujo. En segundo lugar, el microondas satelital es una transmisión de broadcast. Muchas estaciones pueden transmitir al satélite, y también muchas pueden recibir una transmisión desde un satélite.

5.2.4. Radiodifusión

Descripción física: La principal diferencia entre la transmisión de radio y microondas es que el primero es omnidireccional y el segundo es direccional. Así la transmisión de radio no requiere antenas en forma de plato, y las antenas no necesitan estar rígidamente montado para una alineación precisa.

Aplicaciones: Radio es un término general utilizado para abarcar frecuencias en el rango de 3 kHz a 300 GHz. Se utiliza el término informal de radiodifusión para cubrir el VHF y parte de la banda UHF: 30 MHz a 1 GHz. Esta gama cubre radio FM y Televisión UHF y VHF. Este rango también se utiliza para una serie de aplicaciones en las redes de datos.

Características de transmisión: El rango de 30 MHz a 1 GHz es efectivo para comunicaciones de difusión. A diferencia del caso de las ondas electromagnéticas de baja frecuencia, la ionosfera es transparente a las ondas de radio por encima de 30 MHz. Así la transmisión se limita a la línea de visión y los transmisores distantes no interferirán entre sí debido a la reflexión de la atmósfera. A diferencia de las frecuencias más altas de la región de microondas, las ondas de radiodifusión son menos sensibles a la atenuación de la lluvia.

Al igual que con el microondas, la cantidad de atenuación debida a la distancia obedece Ecuación (5.1), esta es, $10 \log (4\pi/\lambda)^2$ dB. Debido a la longitud de onda más larga, las ondas de radio tienen relativamente menos atenuación.

Una fuente principal de deterioro para las ondas de radiodifusión es la interferencia multitrayecto. El reflejo de la tierra, el agua y los objetos naturales o hechos por el hombre pueden crear múltiples caminos entre antenas.

5.2.5. Infrarrojo

Las comunicaciones infrarrojas se logran utilizando transmisores / receptores (transceptores) que modulan la luz infrarroja no coherente⁸. Los transceptores deben estar dentro de la línea vista el uno al otro directamente o por reflejo de una superficie de color claro como el techo de una habitación.

Una diferencia importante entre la transmisión de infrarrojos y microondas es que el primero no penetra paredes. Por lo tanto, los problemas de seguridad e interferencia encontrado en sistemas de microondas no están presentes. Además, no hay problema de asignación de frecuencia con infrarrojos, porque no se requiere licencia.

⁸ Luz no coherente: luz de múltiples frecuencias y fase de vibración, la cual se ensancha, se dispersa, haciéndose menos intensa en un corto periodo de tiempo.

5.3. Propagación de la señal en medios no guiados

Una señal irradiada desde una antena viaja a lo largo de una de tres rutas: onda terrestre, onda espacial o línea de visión (LOS). La Tabla 5.3.1 muestra en qué rango de frecuencia predomina cada una. A continuación, se ofrece una descripción de cada modo.

Tabla 5.3.1: Rango de frecuencias, modo de propagación y uso típico de las señales

Banda	Rango de Frecuencias	Longitud de onda en el espacio libre	Características de la propagación	Uso Típico
ELF (extremely low frequency)	30 to 300 Hz	10,000 to 1000 km	Onda Terrestre	Frecuencias de líneas eléctricas, usado por sistemas de control
VF (voice frequency)	300 to 3000 Hz	1000 to 100 km	Onda Terrestre	Comunicación analógica en sistemas telefónico de abonados
VLF (very low frequency)	3 to 30 kHz	100 to 10 km	Onda Terrestre, baja atenuación día y noche, alto ruido atmosférico	Navegación de largo alcance, comuni-
LF (low frequency)	30 to 300 kHz	10 to 1 km	Onda Terrestre: poco menos confiable que VLF	Navegación de largo alcance; comunicación marina, balizas de radio
MF (medium frequency)	300 to 3000 kHz	1,000 to 100 m	Onda Terrestre, y de noche, Onda Espacial, atenuación baja en la noche y alta en el día.	Radio marítima; transmisión AM
HF (high frequency)	3 to 30 MHz	100 to 10 m	Onda Espacial: varía la calidad con la hora del día, estación y frec.	Radio amateur, comunicación militar
VHF (very high frequency)	30 to 300 MHz	10 to 1 m	Línea vista: dispersión debido a la inversión de temperatura, ruido cósmico	Televisión VHF; Transmisión FM y radio bidireccional, comunicación con aviones por AM y ayuda a la aeronavegación
UHF (ultra high frequency)	300 to 3000 MHz	100 to 10 cm	Línea vista, ruido cósmico	Televisión UHF; telefono celular; Radar; enlaces de microondas; sistemas de comunicaciones persona
SHF (super high frequency)	3 to 30 GHz	10 to 1 cm	Línea vista, atenuación por lluvia arriba de 10GHz, atenuación atmosférica oxígeno y vapor H ₂ O	Comunicación por satélite; Radar terrestre enlaces de microondas; bucle local inalámbrica
EHF (extremely high frequency)	30 to 300 GHz	10 to 1 mm	Línea vista, atenuación atmosférica debido oxígeno y vapor H ₂ O	Experimental, bucle radial inalámbrico, astronomía radial
Infrared	300 GHz to 400 THz	1 mm to 770 nm	Línea vista	LAN's infrarojos, aplicaciones de artefactos electrónicos
Visible light	400 to 900 THz	770 to 330 nm	Línea vista	Comunicación óptica

5.3.1. Propagación de la Onda Terrestre

La propagación de la onda de tierra (Figura 5.3.1.1(a)) sigue más o menos el contorno del Tierra y puede propagarse a distancias considerables, muy por encima del horizonte visual. Este tipo de propagación se encuentra en frecuencias de hasta aproximadamente 2 MHz. Varios factores explican la tendencia de la onda electromagnética en esta banda de frecuencia a seguir la curvatura de la Tierra. Un factor es que la onda electromagnética induce una corriente en la superficie de la Tierra, cuyo resultado es ralentizar el frente de onda cerca de la Tierra, causando que éste se incline hacia abajo y por lo tanto siga la curvatura de la Tierra. Otro factor es la difracción, que es el fenómeno relacionado con el comportamiento electromagnético de las ondas en presencia de obstáculos. Las ondas electromagnéticas en este rango de frecuencias se dispersan en la atmósfera tal manera que no penetran en la atmósfera superior. El ejemplo más conocido de comunicación de onda de tierra es la radio AM.

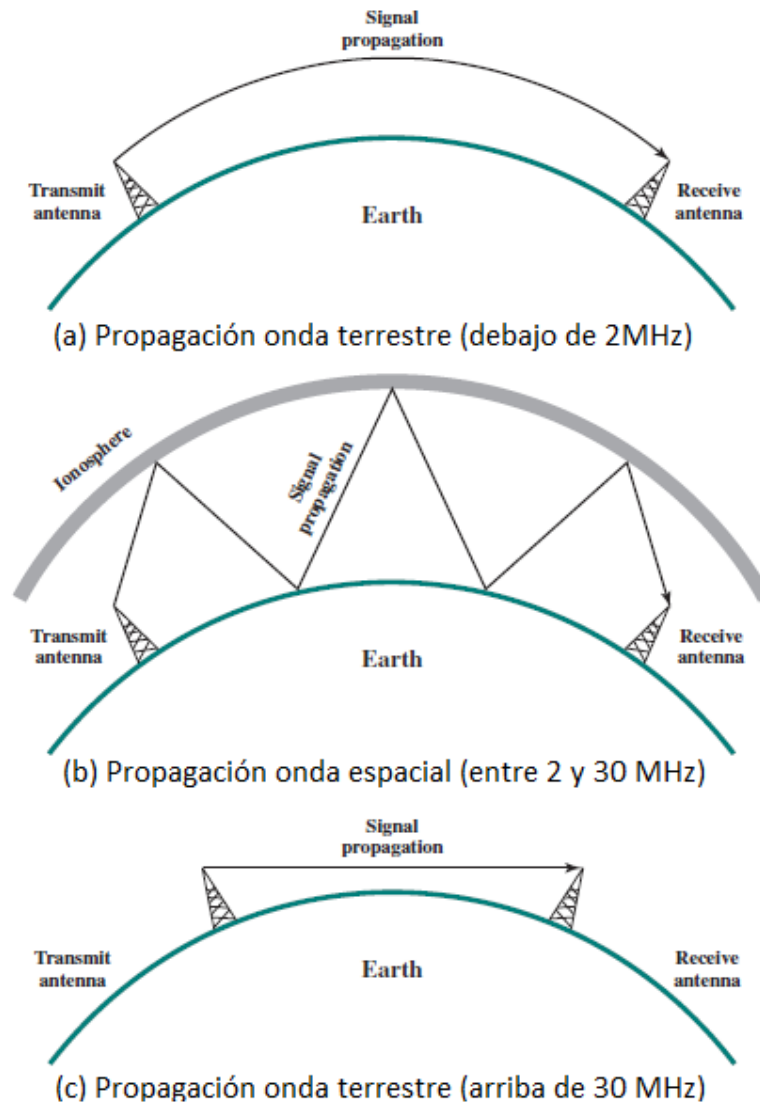


Figura 5.3.1.1: Modos de propagación inalámbrica

5.3.2. Propagación de la onda espacial

La propagación de ondas de cielo se utiliza para radioaficionados y transmisiones internacionales, como BBC y Voice of America. Con la propagación de la onda espacial, una señal generada por una antena ubicada en la tierra se refleja en la capa ionizada de la atmósfera superior (ionósfera) y vuelve a la Tierra. Aunque parece que la onda se refleja desde la ionósfera como esta fuera una superficie reflectante dura, en realidad el efecto es causado por el fenómeno de la refracción.

Una señal propagada por medio de una onda espacial puede viajar a través de varios saltos, rebotando en la ionósfera y volviendo a la tierra (Figura 5.3.1.1(b)). Con este modo de propagación, se puede recoger una señal a miles de kilómetros del transmisor.

5.3.3. Propagación de línea de visión

Por encima de 30 MHz, no funcionan los modos de propagación de onda terrestre ni espacial y la comunicación debe ser por línea vista (Figura 5.3.1.1(c)). Para comunicación satelital, una señal por encima de 30 MHz no se refleja en la ionosfera y, por lo tanto, se puede transmitir una señal entre una estación terrena y un satélite sobrepasando la línea del horizonte. Para la comunicación terrestre, las antenas del transmisor y el receptor deben estar dentro de una línea de visión “efectiva” entre sí. El término “efectiva” se utiliza porque las microondas están curvadas o refractadas por la atmósfera. El nivel de curvatura e incluso la dirección de la misma dependen de condiciones que no se analizan en las presentes notas. De todos modos, en general las microondas siguen la curvatura de la tierra, por lo tanto, se pueden propagar más allá de la línea de visión óptica.

Refracción: A continuación, una breve reseña sobre la refracción. La refracción ocurre porque la velocidad de una onda electromagnética es una función de la densidad del medio a través del cual viaja. En el vacío, una onda electromagnética (como la luz o una onda de radio) viaja a aproximadamente 3×10^8 m / s. Esta es la constante, “*c*”, comúnmente conocida como la velocidad de la luz, pero en realidad se refiere a la velocidad de la luz en el vacío. En aire, agua, vidrio y otros medios transparentes o parcialmente transparentes, las ondas electromagnéticas viajan a velocidades inferiores a “*c*”.

Cuando una onda electromagnética se mueve de un medio de una densidad a un medio de otra densidad, su velocidad cambia. El efecto es que la onda cambia la dirección de la misma, justo en el límite entre los dos medios. Cuando se mueve de un medio menos denso a uno más denso, la ola se dobla hacia el más medio más denso. Este fenómeno se observa fácilmente sumergiendo parcialmente un palo en agua. El índice de refracción, o índice de refracción, de un medio en relación con otro es el seno del ángulo de incidencia dividido por el seno del ángulo de refracción.

El índice de refracción también es igual a la relación de las velocidades respectivas en los dos medios de comunicación. El índice absoluto de refracción de un medio se calcula en comparación con el vacío. El índice de refracción varía con la longitud de onda, de modo que los efectos de la refracción difieren para señales con diferentes longitudes de onda.

Aunque se produce un cambio abrupto y único en la dirección a medida que se mueve una señal de un medio a otro, en caso de que la señal se mueva a través de un medio en el cual el índice de refracción cambia gradualmente, esto producirá una curva continua y gradual de la señal. En condiciones normales de propagación, el índice de refracción de la atmósfera disminuye con altura para que las ondas de radio viajen más lentamente cerca del suelo, en contraposición con lo que pasa en las alturas. El resultado es una ligera flexión de las ondas de radio hacia la Tierra.

Línea vista óptica y línea vista de radio: El término línea vista óptica se refiere a la propagación en línea recta de ondas de luz. El término línea de visión de radio, o línea

vista “efectiva”, se refiere a la propagación de ondas de radio dobladas por la curvatura de la tierra. Sin obstáculos intermedios, la línea vista óptica puede expresarse como:

$$d = 3.57 \sqrt{h}$$

donde d es la distancia entre una antena y el horizonte en kilómetros y h es la altura de la antena en metros. La línea vista de radio o “efectiva” al horizonte se expresa como:

$$d = 3.57 \sqrt{Kh}$$

donde K es un factor de ajuste para tener en cuenta la refracción. Una buena regla de oro es $K = 4/3$. Por lo tanto, la distancia máxima entre dos antenas para la propagación de línea vista “efectiva es $3.57\sqrt{Kh_1} + \sqrt{Kh_2}$, donde h_1 y h_2 son las alturas de las dos antenas.

Ejemplo: La distancia máxima entre dos antenas para transmisión línea vista “efectiva” si una antena tiene 100 m de altura y la otra está a nivel del suelo es:

$$d = 3.57 \sqrt{Kh} = 3.571133 = 41 \text{ km}$$

Ahora suponga que la antena receptora tiene 10 m de altura. Para lograr la misma distancia, ¿Qué altura debe tener la antena transmisora? El resultado es:

$$41 = 3.57 (\sqrt{Kh_1} + \sqrt{13.3})$$

$$\sqrt{Kh_1} = (41 / 3.57) - \sqrt{13.3}$$

$$h_1 = 7.842 / 1.33 = 46.2 \text{ m}$$

Esto supone un ahorro de más de 50 m en la altura de la antena transmisora. Este ejemplo ilustra el beneficio de elevar las antenas receptoras sobre el nivel del suelo para reducir la altura necesaria del transmisor.