

2.3 TRANSMISIÓN INALÁMBRICA

En nuestra era han surgido los adictos a la información: gente que necesita estar todo el tiempo en línea. Para estos usuarios móviles, el cable de par trenzado, el cable coaxial y la fibra óptica no son útiles. Ellos necesitan obtener datos para sus computadoras laptop, notebook, de bolsillo, de mano o de reloj pulsera sin estar limitados a la infraestructura de comunicaciones terrestre. Para estos usuarios, la comunicación inalámbrica es la respuesta. En las siguientes secciones veremos la comunicación inalámbrica en general, y veremos que tiene otras aplicaciones importantes además de proporcionar conectividad a los usuarios que desean navegar por Web desde la playa. Algunas personas creen que en el futuro sólo habrá dos clases de comunicación: de fibra óptica e inalámbrica. Todos los aparatos fijos (es decir, no móviles): computadoras, teléfonos, faxes, etcétera, se conectarán con fibra óptica; todos los aparatos móviles usarán comunicación inalámbrica. Sin embargo, la comunicación inalámbrica también tiene ventajas para los dispositivos fijos en ciertas circunstancias. Por ejemplo, si es difícil tender fibras hasta un edificio debido al terreno (montañas, selvas, pantanos, etcétera), podría ser preferible un sistema inalámbrico. Vale la pena mencionar que la comunicación digital inalámbrica moderna comenzó en las islas de Hawai, en donde partes considerablemente grandes del océano Pacífico separaban a los usuarios, y el sistema telefónico era inadecuado.

2.3.1 El espectro electromagnético

Cuando los electrones se mueven crean ondas electromagnéticas que se pueden propagar por el espacio libre (aun en el vacío). El físico británico James Clerk Maxwell predijo estas ondas en 1865 y el físico alemán Heinrich Hertz las observó en 1887. La cantidad de oscilaciones por segundo de una onda electromagnética es su frecuencia, f , y se mide en Hz (en honor a Heinrich Hertz). La distancia entre dos puntos máximos (o mínimos) consecutivos se llama longitud de onda y se designa de forma universal con la letra griega λ (lambda). Al conectarse una antena del tamaño apropiado a un circuito eléctrico, las ondas electromagnéticas pueden ser difundidas de manera eficiente y ser captadas por un receptor a cierta distancia. Toda la comunicación inalámbrica se basa en este principio. En el vacío, todas las ondas electromagnéticas viajan a la misma velocidad, no importa cuál sea su frecuencia. Esta velocidad, por lo general llamada velocidad de la luz, c , es de aproximadamente 3×10^8 m/seg o de un pie (30 cm) por nanosegundo. En el cobre o en la fibra óptica, la velocidad baja a casi $2/3$ de este valor y se vuelve ligeramente dependiente de la frecuencia. La velocidad de la luz es el límite máximo de velocidad. Ningún objeto o señal puede moverse más rápido que la luz. La relación fundamental entre f , λ y c (en el vacío) es:

$$\lambda f = c \quad (2-2)$$

Puesto que c es una constante, si conocemos el valor de f , podremos encontrar el de λ , y viceversa. Como regla general, cuando λ se expresa en metros y f en MHz, $\lambda f \approx 300$. Por ejemplo, las ondas de 100 MHz son de aproximadamente 3 metros de longitud, las de 1000 MHz son de 0.3 metros y las ondas de 0.1 metros de longitud tienen una frecuencia de 3000 MHz. En la figura 2-11 se muestra el espectro electromagnético. Las porciones de radio, microondas, infrarrojo y luz visible del espectro pueden servir para transmitir información modulando la amplitud, frecuencia o fase de las ondas. La luz ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma serían todavía mejores, debido a sus frecuencias más altas, pero son difíciles de producir y modular, no se propagan bien entre edificios y son peligrosos para los seres vivos. Las bandas que se listan en la parte inferior de la figura 2-11 son los nombres oficiales de la ITU y se basan en las longitudes de onda, de modo que la banda LF va de 1 a 10 km (aproximadamente 30 a 300 kHz). Los términos LF, MF y HF se refieren a las frecuencias baja, media y alta, respectivamente. Como podrá observar, cuando se asignaron los nombres, nadie esperaba que se sobrepasarían los 10 MHz, por lo que posteriormente a las bandas más altas se les nombró como bandas VHF (frecuencia muy alta), UHF (frecuencia ultraalta), EHF (frecuencia extremadamente alta) y THF (frecuencia tremendamente alta). No hay más nombres aparte de éstos, pero IHF, AHF y PHF (increíblemente alta frecuencia, asombrosamente alta frecuencia y prodigiosamente alta frecuencia) sonarían bien.

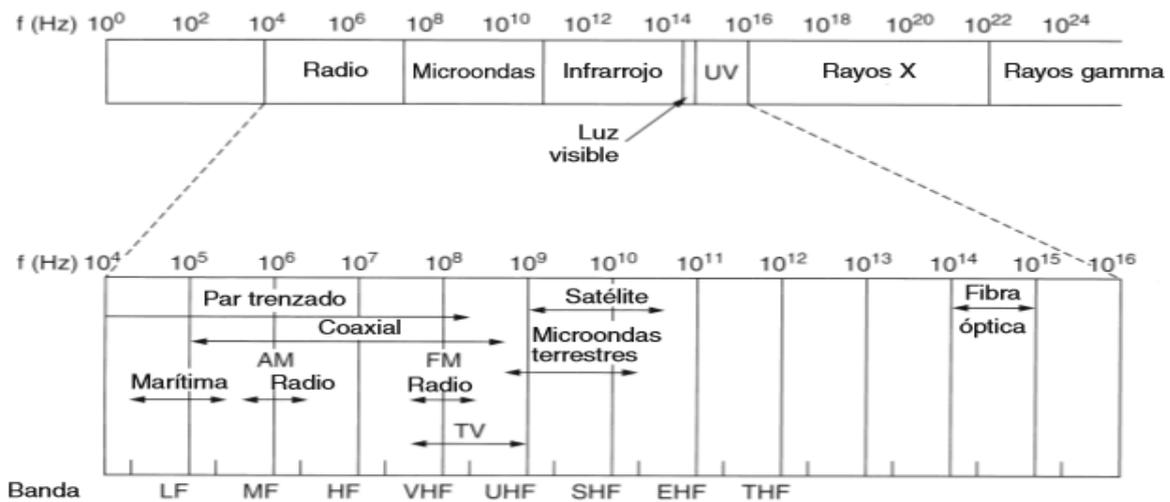


Figura 2-11. El espectro electromagnético y sus usos para comunicaciones.

La cantidad de información que puede transportar una onda electromagnética se relaciona con su ancho de banda. Con la tecnología actual, es posible codificar unos cuantos bits por hertz a frecuencias bajas, pero a frecuencias altas el número puede llegar hasta 8, de modo que un cable coaxial con un ancho de banda de 750 MHz puede transportar varios gigabits/seg. La figura 2-11 debe dejar en claro ahora por qué a la gente de redes le gusta tanto la fibra óptica. Si resolvemos la ecuación (2-2) para f y la diferenciamos con respecto a λ , obtenemos

$$\frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2}$$

Si ahora usamos diferencias finitas en lugar de diferenciales y sólo consideramos los valores absolutos, obtenemos

$$\Delta f = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

Por lo tanto, dado el ancho de una banda de longitud de onda, $\Delta\lambda$, podemos calcular la banda de frecuencia correspondiente, Δf , y a partir de ella, la tasa de datos que puede producir la banda. Cuanto más ancha sea ésta, mayor será la tasa de datos. Por ejemplo, considere la banda de 1.30 micras de la figura 2-6. Aquí tenemos $\lambda=1.3 \times 10^{-6}$ y $\Delta\lambda = 0.17 \times 10^{-6}$, de manera que Δf es de aproximadamente 30 THz. A 8 bits/Hz, obtenemos 240 Tbps. La mayoría de las transmisiones ocupa una banda de frecuencias estrecha (es decir, $\Delta f/f \ll 1$) a fin de obtener la mejor recepción (muchos watts/Hz). Sin embargo, en algunos casos se utiliza una banda ancha, con dos variaciones. En el espectro disperso con salto de frecuencia, el transmisor salta de frecuencia en frecuencia cientos de veces por segundo. Es popular en la comunicación militar debido a que de esta manera es difícil detectar las transmisiones y casi imposible intervenirlas. Ofrece buena resistencia al desvanecimiento por múltiples trayectorias debido a que la señal directa siempre llega primero al receptor. Las señales reflejadas siguen una trayectoria más larga y llegan más tarde. Para ese entonces, tal vez el receptor ya haya cambiado de frecuencia y no acepte señales de la frecuencia anterior, con lo que se elimina la interferencia entre las señales directas y reflejadas. En años recientes, esta técnica también se ha aplicado comercialmente —por ejemplo, tanto 802.11 como Bluetooth la utilizan. Como nota curiosa, la atractiva austriaca Hedy Lamarr, la primera mujer que apareció desnuda en una película cinematográfica (el filme checoslovaco Extase de 1933), colaboró en la invención de esta técnica. Su primer

esposo, un fabricante de armamento, le comentó lo fácil que era bloquear las señales de radio, las cuales en ese entonces se utilizaban para controlar los torpedos. Cuando descubrió que su esposo estaba vendiendo armas a Hitler, se horrorizó y se disfrazó de criada para escapar de él rumbo a Hollywood para continuar su carrera como actriz de cine. En su tiempo libre, inventó el salto de frecuencia para ayudar a los aliados en la guerra. Su diseño utilizaba 88 frecuencias, el número de teclas (y frecuencias) de un piano. Por su invento, ella y el compositor de música George Antheil, su amigo, recibieron la patente 2,292,387 de Estados Unidos. Sin embargo, no pudieron convencer a la Marina de Estados Unidos de que su invento era útil y, por lo tanto, nunca recibieron regalías. Años después de que la patente expirara, su invento cobró popularidad. El otro tipo de espectro disperso, el espectro disperso de secuencia directa —el cual dispersa la señal a través una banda de frecuencia ancha—, está ganando popularidad en el mundo comercial. En particular, algunos teléfonos móviles de segunda generación lo utilizan, y dominará en los de tercera generación, gracias a su buena eficiencia espectral, inmunidad al ruido y otras propiedades. Algunas LANs inalámbricas también lo utilizan. Posteriormente volveremos al tema del espectro disperso. Si desea ver una historia fascinante y detallada de las comunicaciones por espectro disperso, vea (Scholtz, 1982). Por el momento, supondremos que todas las transmisiones utilizan una banda de frecuencia estrecha. Ahora veremos cómo se emplean las distintas partes del espectro electromagnético de la figura 2-11, comenzando por la radio.

2.3.2 Radiotransmisión

Las ondas de radio son fáciles de generar, pueden viajar distancias largas y penetrar edificios sin problemas, y por ello su uso está muy generalizado en la comunicación, tanto en interiores como en exteriores. Las ondas de radio también son omnidireccionales, lo que significa que viajan en todas direcciones a partir de la fuente, por lo que no es necesario que el transmisor y el receptor se encuentren alineados físicamente. En ocasiones la radio omnidireccional es buena, y en otras no lo es tanto. En la década de 1970, General Motors decidió equipar sus Cadillacs nuevos con frenos antibloqueo controlados por computadora. Cuando el conductor pisaba el pedal del freno, la computadora accionaba los frenos de manera intermitente en lugar de bloquearlos firmemente. Un buen día, un oficial que patrullaba las carreteras de Ohio encendió su nuevo radio móvil para llamar a su cuartel general y, de repente, el Cadillac que iba junto a él empezó a comportarse de manera muy extraña. El oficial le indicó al conductor que se detuviera a un lado del camino y, cuando lo hizo, el conductor alegó que él nada había hecho y que el carro se había vuelto loco. Con el tiempo empezó a surgir un patrón: los Cadillacs ocasionalmente se comportaban de manera muy extraña, pero sólo en las principales carreteras de Ohio y sólo cuando alguna patrulla de caminos estaba cerca. Durante mucho tiempo General Motors no pudo comprender por qué los Cadillacs funcionaban bien en todos los demás estados e incluso en los caminos secundarios de Ohio. Después de una búsqueda intensa descubrieron que el cableado de los Cadillacs constituía una excelente antena para la frecuencia que usaba el nuevo sistema de radio de las patrullas de caminos de Ohio. Las propiedades de las ondas de radio dependen de la frecuencia. A bajas frecuencias, esas ondas cruzan bien casi cualquier obstáculo, pero la potencia se reduce de manera drástica a medida que se aleja de la fuente, aproximadamente en proporción a $1/r^2$ en el aire. A frecuencias altas, las ondas de radio tienden a viajar en línea recta y a rebotar en los obstáculos. También son absorbidas por la lluvia. En todas las frecuencias, las ondas de radio están sujetas a interferencia por los motores y otros equipos eléctricos. Por la capacidad del radio de viajar largas distancias, la interferencia entre usuarios es un problema. Por esta razón, todos los gobiernos reglamentan estrictamente el uso de radiotransmisores, con una excepción, que veremos más adelante. En las bandas VLF, LF y MF las ondas de radio siguen la curvatura de la Tierra, como se ilustra en la figura 2-12(a). Estas ondas se pueden detectar quizá a 1000 km en las frecuencias más bajas, y a menos en frecuencias más altas. La difusión de radio AM usa la banda MF, y es por ello que las estaciones de radio AM de Boston no se pueden oír con facilidad en Nueva York. Las ondas de radio en estas bandas cruzan con facilidad los edificios, y es por ello que los radios portátiles funcionan en interiores. El problema principal al usar bandas para comunicación de datos es su ancho de banda bajo (vea la ecuación 2-3). En las bandas HF y VHF, las ondas a nivel del suelo tienden a ser absorbidas por la tierra. Sin embargo, las ondas que alcanzan la ionosfera, una capa de partículas cargadas que rodea a la Tierra a una altura de 100 a 500 km, se refractan y se envían de regreso a nuestro planeta, como se muestra en la figura 2-12(b). En ciertas condiciones

atmosféricas, las señales pueden rebotar varias veces. Los operadores de radio aficionados usan estas bandas para conversar a larga distancia. El ejército se comunica también en las bandas HF y VHF.

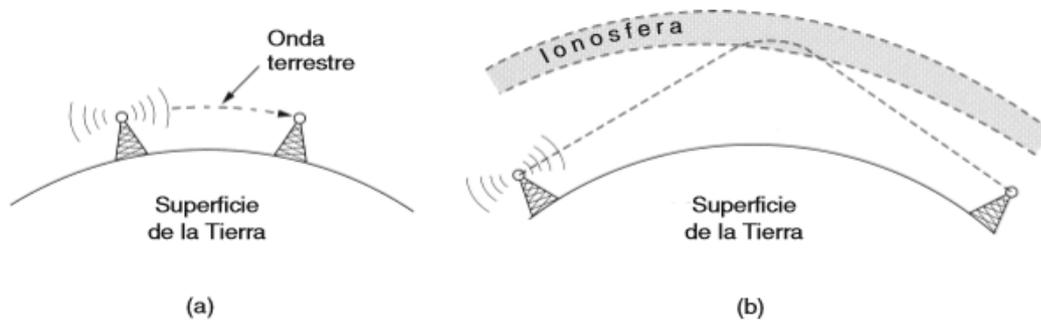


Figura 2-12. (a) En las bandas VLF, LF y MF, las ondas de radio siguen la curvatura de la Tierra. (b) En la banda HF las ondas rebotan en la ionosfera.

2.3.3 Transmisión por microondas

Por encima de los 100 MHz las ondas viajan en línea recta y, por lo tanto, se pueden enfocar en un haz estrecho. Concentrar toda la energía en un haz pequeño con una antena parabólica (como el tan familiar plato de televisión por satélite) produce una relación señal a ruido mucho más alta, pero las antenas transmisora y receptora deben estar bien alineadas entre sí. Además, esta direccionalidad permite que varios transmisores alineados en una fila se comuniquen sin interferencia con varios receptores en fila, siempre y cuando se sigan algunas reglas de espaciado. Antes de la fibra óptica, estas microondas formaron durante décadas el corazón del sistema de transmisión telefónica de larga distancia. De hecho, MCI, uno de los primeros competidores de AT&T después de que esta compañía fue desregularizada, construyó todo su sistema utilizando las comunicaciones mediante microondas que iban de torre en torre ubicadas a decenas de kilómetros una de la otra. Incluso el nombre de la compañía reflejó esto (MCI son las siglas de Microwave Communications, Inc.).

Tiempo después, MCI adoptó la fibra y se fusionó con WorldCom. Ya que las microondas viajan en línea recta, si las torres están muy separadas, partes de la Tierra estorbarán (piense en un enlace de San Francisco a Ámsterdam). Como consecuencia, se necesitan repetidores periódicos. Cuanto más altas sean las torres, más separadas pueden estar. La distancia entre los repetidores se eleva en forma muy aproximada con la raíz cuadrada de la altura de las torres. Con torres de 100 m de altura, los repetidores pueden estar separados a 80 km de distancia. A diferencia de las ondas de radio a frecuencias más bajas, las microondas no atraviesan bien los edificios. Además, aun cuando el haz puede estar bien enfocado en el transmisor, hay cierta divergencia en el espacio. Algunas ondas pueden refractarse en las capas atmosféricas más bajas y tardar un poco más en llegar que las ondas directas. Las ondas diferidas pueden llegar fuera de fase con la onda directa y cancelar así la señal. Este efecto se llama desvanecimiento por múltiples trayectorias y con frecuencia es un problema serio que depende del clima y de la frecuencia. Algunos operadores mantienen 10% de sus canales inactivos como repuesto para activarlos cuando el desvanecimiento por múltiples trayectorias cancela en forma temporal alguna banda de frecuencia.

La creciente demanda de espectro obliga a los operadores a usar frecuencias más altas. Las bandas de hasta 10 GHz ahora son de uso rutinario, pero con las de aproximadamente 4 GHz surge un problema: son absorbidas por el agua. Estas ondas sólo tienen unos centímetros de longitud y la lluvia las absorbe. Este efecto sería útil si se quisiera construir un enorme horno de microondas externo para rostizar a los pájaros que pasen por ahí, pero para la comunicación es un problema grave. Al igual que con el desvanecimiento por múltiples trayectorias, la única solución es interrumpir los enlaces afectados por la lluvia y enrutar la comunicación por otra trayectoria. En resumen, la comunicación por microondas se utiliza tanto para la comunicación telefónica de larga distancia, los teléfonos celulares, la distribución de la televisión, etcétera, que el espectro se ha vuelto muy escaso. Esta tecnología tiene varias ventajas significativas respecto a la fibra. La principal es que no se necesita derecho de paso; basta con comprar un terreno pequeño cada 50

km y construir en él una torre de microondas para saltarse el sistema telefónico y comunicarse en forma directa. Así es como MCI logró establecerse tan rápidamente como una compañía nueva telefónica de larga distancia. (Sprint siguió un camino totalmente diferente: la fundó el ferrocarril Southern Pacific Railroad, que ya poseía una gran cantidad de derechos de paso, limitándose a enterrar la fibra junto a las vías.) Las microondas también son relativamente baratas. Erigir dos torres sencillas (podrían ser simplemente postes grandes con cables de retén) y poner antenas en cada una puede costar menos que enterrar 50 km de fibra a través de un área urbana congestionada o sobre una montaña, y también puede ser más económico que rentar la fibra de la compañía de teléfonos, en especial si ésta aún no ha recuperado por completo la inversión hecha por el cobre que quitó cuando instaló la fibra.

2.3.4 Ondas infrarrojas y milimétricas

Las ondas infrarrojas y milimétricas no guiadas se usan mucho para la comunicación de corto alcance. Todos los controles remotos de los televisores, grabadoras de vídeo y estéreos utilizan comunicación infrarroja. Estos controles son relativamente direccionales, económicos y fáciles de

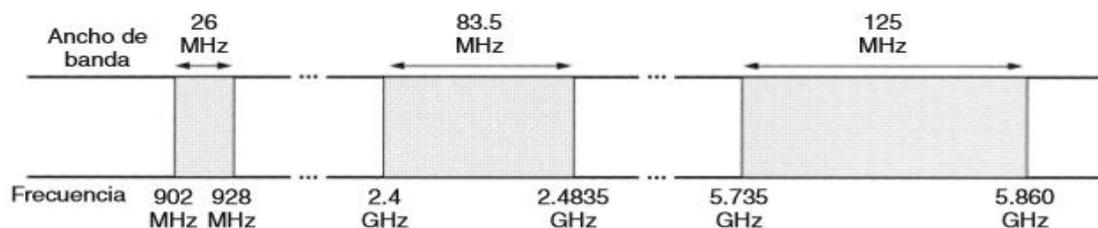


Figura 2-13. Las bandas ISM de Estados Unidos.

construir, pero tienen un inconveniente importante: no atraviesan los objetos sólidos (párese entre su televisor y su control remoto y vea si todavía funciona). En general, conforme pasamos de la radio de onda larga hacia la luz visible, las ondas se comportan cada vez más como la luz y cada vez menos como la radio. Por otro lado, el hecho de que las ondas infrarrojas no atraviesen bien las paredes sólidas también es una ventaja. Esto significa que un sistema infrarrojo en un cuarto de un edificio no interferirá con un sistema similar en cuartos adyacentes. Por esta razón, la seguridad de estos sistemas contra el espionaje es mejor que la de los sistemas de radio.

Además, no es necesario obtener licencia del gobierno para operar un sistema infrarrojo, en contraste con los sistemas de radio, que deben tener licencia afuera de las bandas ISM. La comunicación infrarroja tiene un uso limitado en el escritorio; por ejemplo, para conectar computadoras portátiles e impresoras, aunque no es un protagonista principal en el juego de la comunicación

2.3.5 Transmisión por ondas de luz

La señalización óptica sin guías se ha utilizado durante siglos. Paul Revere utilizó señalización óptica binaria desde la Iglesia Old North justo antes de su famoso viaje. Una aplicación más moderna es conectar las LANs de dos edificios por medio de láseres montados en sus azoteas. La señalización óptica coherente con láseres es inherentemente unidireccional, de modo que cada edificio necesita su propio láser y su propio fotodetector. Este esquema ofrece un ancho de banda muy alto y un costo muy bajo. También es relativamente fácil de instalar y, a diferencia de las microondas, no requiere una licencia de la FCC. Sin embargo, la ventaja del láser, un haz muy estrecho, aquí también es una debilidad. Apuntar un rayo láser de 1 mm de anchura a un blanco del tamaño de la punta de un alfiler a 500 m de distancia requiere la puntería de una Annie Oakley moderna. Por lo general, se añaden lentes al sistema para desenfocar ligeramente el rayo.

Una desventaja es que los rayos láser no pueden penetrar la lluvia ni la niebla densa, pero normalmente funcionan bien en días soleados. Sin embargo, en una ocasión el autor asistió a una conferencia en un moderno hotel de Europa en el que los organizadores tuvieron la atención de proporcionar un salón lleno

de terminales para que los asistentes leyeran su correo electrónico durante las presentaciones aburridas. Puesto que la PTT local no estaba dispuesta a instalar un gran número de líneas telefónicas sólo para tres días, los organizadores colocaron un láser en el techo, lo apuntaron al edificio de ciencias de la computación de su universidad, el cual está a unos cuantos kilómetros de allí; lo probaron la noche anterior a la conferencia y funcionó a la perfección. A las 9 a.m. del siguiente día, que era brillante y soleado, el enlace falló por completo y permaneció caído todo el día. Esa noche los organizadores volvieron a probar con mucho cuidado el enlace y de nuevo funcionó a la perfección. El patrón se repitió durante dos días más de forma idéntica.

Después de la conferencia, los organizadores descubrieron el problema. Durante el día, el calor del sol causaba corrientes de convección que se elevaban desde el techo del edificio, como se muestra en la figura 2-14. Este aire turbulento desviaba el rayo y lo hacía danzar alrededor del detector. Una “vista” atmosférica como ésta hace titilar a las estrellas (y es la razón por la cual los astrónomos ponen sus telescopios en las cimas de las montañas, para quedar tan arriba en la atmósfera como sea posible). Este fenómeno es también la causa del aspecto trémulo de las carreteras en un día caluroso y de las imágenes ondulantes cuando se mira sobre un radiador caliente.

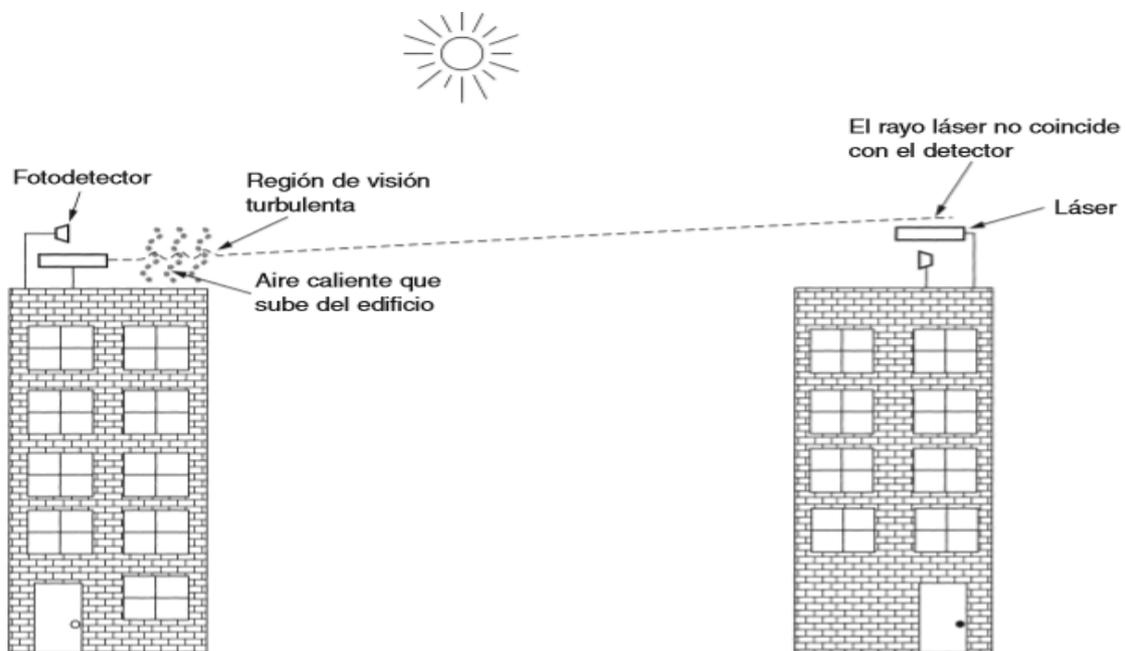


Figura 2-14. Las corrientes de convección pueden interferir los sistemas de comunicación por láser. Aquí se ilustra un sistema bidireccional con dos láseres.