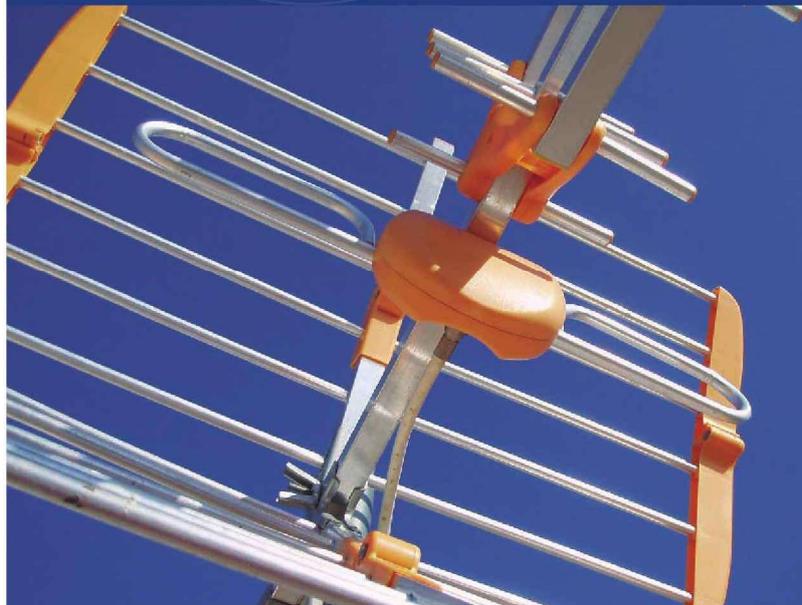


Determinación de las características de antenas de transmisión/recepción



Muy frecuentemente nos encontramos con grandes dificultades o la imposibilidad de conectar dos equipos en un sistema de telecomunicaciones empleando una instalación cableada que utilice fibra óptica o conductores eléctricos. Tal es el caso de equipos separados por grandes montañas, desiertos, océanos o el espacio exterior. A lo que se suma la ingente aparición de sistemas de comunicaciones móviles, como la imparable evolución del sector de la telefonía celular. En dichos casos, las comunicaciones inalámbricas y, en especial, las comunicaciones por radiofrecuencia, dan solución a estos problemas de comunicación. La forma en que las señales se propagan y la manera en la que conseguimos dirigir la radiación electromagnética con el uso de distintos tipos de antenas son los principales aspectos que se tratarán a lo largo de la presente unidad.

3

Contenidos

- 3.1. Propagación de las ondas electromagnéticas
- 3.2. Espectro electromagnético versus espacio radioeléctrico
- 3.3. Parámetros de las antenas
- 3.4. Tipos de antenas

Objetivos

- Conocer los principales conceptos relacionados con la propagación RF.
- Distinguir los diferentes modos de propagación, así como sus propiedades.
- Comprender el espacio radioeléctrico, su regulación y gestión.
- Introducir el concepto de antena y los conceptos que las caracterizan.

3.1. Propagación de las ondas electromagnéticas

Tal y como hemos visto, los sistemas de comunicaciones por radiofrecuencia emplean antenas de transmisión y recepción para enviar y recibir las señales que se propagan por el canal, es decir, el espacio radioeléctrico. A las señales que se propagan por este medio se las denomina **ondas electromagnéticas**.

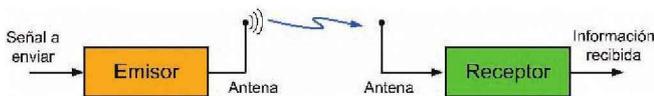


Figura 3.1. Esquema de un sistema de comunicaciones por radiofrecuencia.

En la actualidad podemos encontrar infinidad de sistemas de telecomunicación que utilizan el espacio radioeléctrico para enviar y recibir la información, emisoras de radio, televisión, sistemas de telefonía móvil, wifi, teléfonos inalámbricos, mandos de apertura y cierre de puertas de garaje, etcétera. Todos estos sistemas emplean antenas de transmisión y recepción.

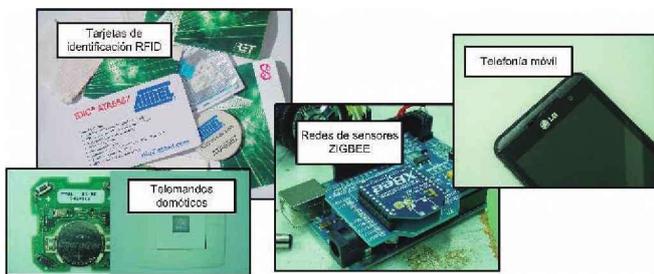


Figura 3.2. Fotografía de varios sistemas que emplean comunicaciones inalámbricas.

Antes de introducirnos en la teoría de las antenas, resulta preciso introducir una serie de conceptos previos en relación con las ondas electromagnéticas, su composición, forma de propagación, etcétera, lo cual trataremos en las siguientes líneas.

Cuando hablamos de **radiopropagación** o **propagación por radiofrecuencia (RF)** nos estamos refiriendo a la propagación de ondas electromagnéticas en el **espacio libre**, es decir, el vacío. Si bien es cierto que «espacio libre» es el «vacío», a menudo a la propagación de ondas electromagnéticas por la atmósfera terrestre también se la denomina **propagación por el espacio libre**, ya que la principal diferencia radica en que la atmósfera introduce pérdidas en la señal que no existen en el vacío, lo que viene a denominarse **absorción**.

Sabías que...

Las ondas de radiofrecuencia se propagan bien en medios dieléctricos, tales como el aire, pero no en conductores con pérdidas como el agua del océano o del mar.

Un **material dieléctrico** es un medio que es mal conductor de la electricidad y, además, si se le somete a un campo eléctrico externo puede establecerse en él un campo eléctrico interno (a diferencia de los materiales aislantes, donde esto último no sucede). Es decir, todos los dieléctricos pueden emplearse como aislantes pero no a la inversa.

Las ondas electromagnéticas fueron descubiertas por James Clerk Maxwell, considerado por muchos el padre de las telecomunicaciones, el cual demostró que estas se propagan por el vacío con una velocidad dada por la expresión:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

donde μ_0 es lo que se denomina **permeabilidad eléctrica en el vacío** y, ϵ_0 recibe el nombre de **permeabilidad magnética en el vacío**. Podría demostrarse que, si sustituimos los valores de μ_0 y ϵ_0 en la expresión anterior se obtiene un valor de 300.000 kilómetros/segundo, que coincide con la velocidad de la luz; esto es así porque la luz es también una onda electromagnética.

En las ondas electromagnéticas, la relación que existe entre el periodo (T), la frecuencia (f) y la longitud de onda (λ) viene dada por:

$$T = \frac{1}{f}$$

$$\lambda = c \cdot T$$

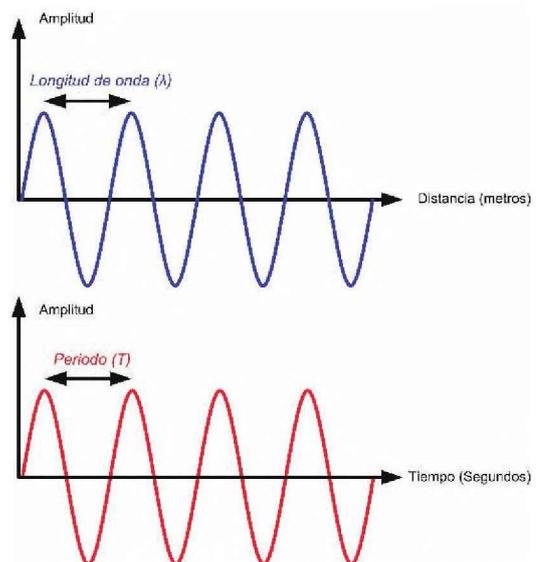


Figura 3.3. Representación del periodo y de la longitud de onda.

Nota

Las dimensiones de las antenas, tanto en transmisión como en recepción, están relacionadas con la longitud de onda de las señales para las que han sido diseñadas, como veremos más adelante.

Las ondas electromagnéticas están constituidas por un campo eléctrico (E) y un campo magnético (B) perpendiculares entre sí. Son ondas transversales, ya que los campos eléctrico y magnético son siempre perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, motivo por el cual también se las conoce como ondas electromagnéticas transversales o TEM.

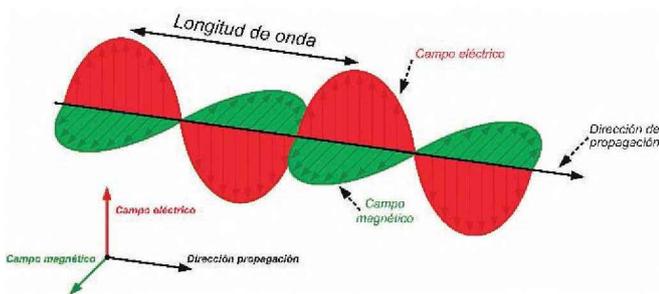


Figura 3.4. Propagación de una onda de radiofrecuencia y representación de sus campos eléctrico y magnético.

**Vocabulario**

Electromagnético transversal = TEM (*Transverse ElectroMagnetic*).

Sabías que...

Las ondas transversales son aquellas en las cuales cierta magnitud vectorial oscila en alguna dirección perpendicular a la dirección de propagación. En el caso de ondas mecánicas de desplazamiento, como las olas del mar, es más visual: se dice que la onda es transversal cuando la vibración de la materia o partículas afectadas por la onda se produce perpendicularmente a la dirección de propagación de la misma. Es decir, si una onda transversal se mueve en el plano X, sus oscilaciones estarán limitadas al plano Y-Z.

Las ondas de radio son, por tanto, ondas electromagnéticas, al igual que algunos casos particulares que nos resultan familiares, como las ondas de luz, los infrarrojos, los rayos ultravioleta, los rayos X o los rayos gamma, entre otros. Estas se propagan con una determinada energía emitida

desde la antena de transmisión y es recibida por el receptor empleando otra antena. Las características de la radiación, como la recepción o la captura de la señal, dependerán de las antenas empleadas, el medio de propagación y la distancia que las separa.

3.1.1. Concepto de polarización

Tal y como hemos visto, las ondas electromagnéticas están formadas por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. Se denomina **polarización** de una onda electromagnética plana a la orientación del campo eléctrico respecto de la superficie de propagación, es decir, el horizonte. Cuando la polarización permanece constante con la propagación de la onda, se dice que la polarización es lineal.

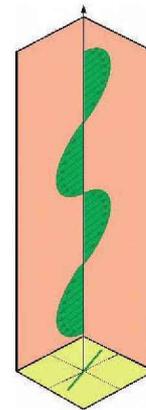


Figura 3.5. Onda electromagnética polarizada linealmente.

Decimos que una onda está polarizada verticalmente cuando el campo eléctrico se propaga vertical a la superficie terrestre. En cambio, si el campo eléctrico es paralelo a la superficie de propagación, se dice que la onda está polarizada horizontalmente.

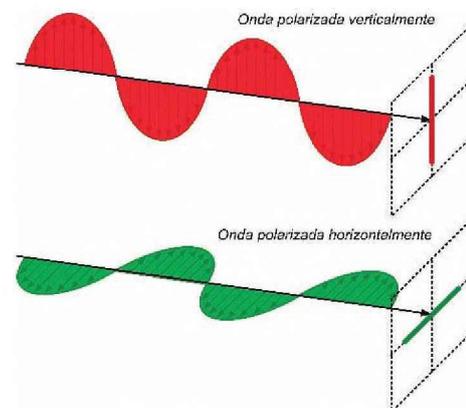


Figura 3.6. Ondas electromagnéticas con polarización vertical y horizontal.

También existen ondas con **polarización circular**, que son aquellas donde el vector de polarización gira 360 grados conforme la onda recorre por el espacio una longitud de onda, manteniendo una intensidad de campo constante en todos los ángulos.

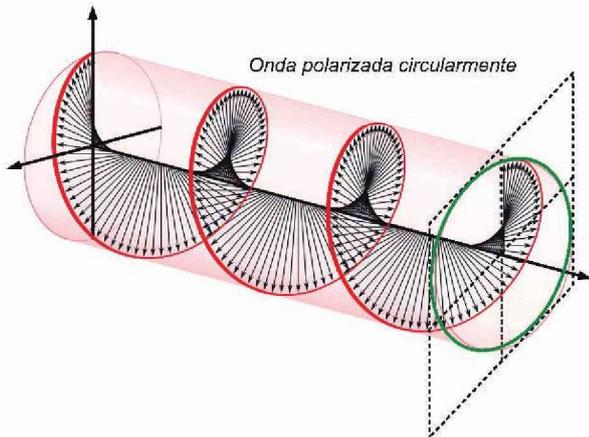


Figura 3.7. Onda con polarización circular.

Sabías que...

También existen las ondas con **polarización elíptica**, que es cuando la punta del vector de campo eléctrico describe una forma elíptica en un plano fijo cualquiera.

3.1.2. Concepto de rayo y frente de onda

El análisis de las ondas electromagnéticas requiere emplear métodos indirectos que nos permitan representarlas, al no ser visibles al ojo humano. Es por ello que se definen los conceptos de rayo y frente de onda, los cuales sirven para ilustrar el efecto de la propagación de estas a través del espacio. Por una parte, el concepto de **rayo** se emplea para ilustrar la dirección relativa de propagación de la onda, representada como una línea que seguiría la trayectoria de la onda electromagnética.

Sabías que...

Un rayo no representa, necesariamente, a una única onda electromagnética.

El concepto de **frente de onda**, por otra parte, representa una superficie de ondas electromagnéticas de fase constante, es decir, está formado por los puntos de igual fase de rayos procedentes de una misma fuente.

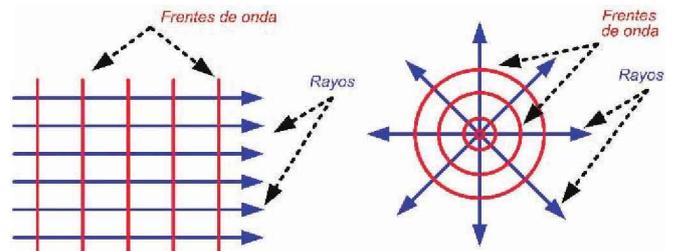


Figura 3.8. Representación de los rayos y frente de onda en ondas planas y esféricas.

Decimos que una onda es plana cuando su frente de onda se propaga en una única dirección a lo largo del espacio (como es el caso de las ondas producidas en lo muelles o cuerdas, por ejemplo). Entonces su frente de onda es plano y paralelo a la dirección de propagación.

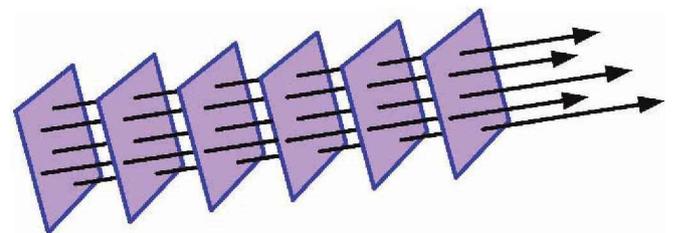


Figura 3.9. Ejemplo de onda plana.

Sin embargo, los frentes de onda son, por lo general, más complejos que los que presentan las ondas planas.

Se define el concepto de **fente isotrópica** como una fuente puntual desde la cual se propagan todos los rayos, es decir, es una fuente que radia uniformemente en todas las direcciones, tal y como se muestra en la Figura 3.10.

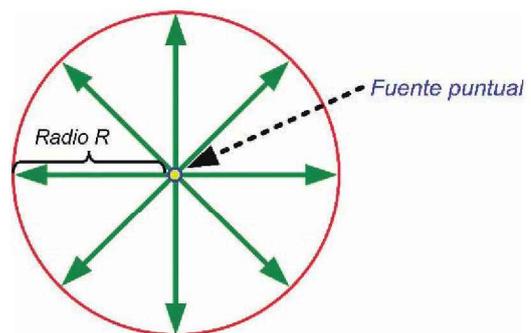


Figura 3.10. Representación de fuente isotrópica.

El frente de onda producido por una fuente isotrópica a una determinada distancia se asemeja a una esfera; no obstante, cuando nos encontramos lejos de la fuente puntual, del foco, los rayos contenidos dentro de una pequeña sección de la esfera que forma el frente de onda, se asemejan a un frente de ondas plano, es decir, son

casi paralelos entre sí. A mayor distancia, más fiel es dicha aproximación, por lo que es frecuente emplear esta simplificación.

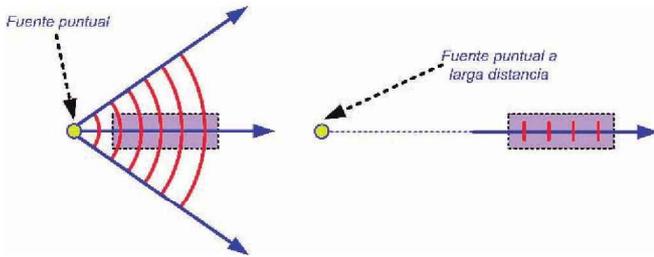


Figura 3.11. Simplificación del frente de ondas circular a un frente plano a larga distancia.

3.1.3. Densidad de potencia e intensidad de campo

La densidad de potencia se define como la cantidad de energía que atraviesa una superficie determinada en un instante de tiempo. En el caso de las ondas electromagnéticas, las cuales representan al flujo de energía en la dirección de propagación, la densidad de potencia puede definirse como el flujo de energía por unidad de tiempo y de superficie y viene expresada en vatios por metro cuadrado.

Por otra parte, también se definen las **intensidades de campo**, que son las intensidades de campo eléctrico (expresada en voltios por metro) y magnético (expresada en amperios por metro) que conforman una onda electromagnética.

La relación existente entre la densidad de potencia y las intensidades de campo viene dada por la siguiente expresión:

$$d_{potencia} = E \cdot H$$

donde $d_{potencia}$ es la densidad de potencia, E la intensidad de campo eléctrico y H la intensidad de campo magnético.

3.1.4. Impedancia característica del espacio libre

Las intensidades de campo magnético y eléctrico de una onda electromagnética en el espacio libre están relacionadas a través de lo que denominamos **impedancia característica**, la cual representa la oposición o resistencia del espacio libre o vacío.

En un medio sin pérdidas, la impedancia característica viene dada por la raíz cuadrada del cociente entre su permeabilidad magnética y su permisividad eléctrica, es decir:

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

Por lo que la densidad de potencia puede expresarse como (ley de ohm):

$$d_{potencia} = \frac{E^2}{Z_s}$$

Sustituyendo el valor de μ_0 y ϵ_0 en el vacío, puede demostrarse que la impedancia característica del espacio libre tiene un valor de 377 ohmios y la densidad de potencia puede expresarse como:

$$d_{potencia} = \frac{E^2}{377}$$

3.1.5. Vector de Pointing

También se define el **vector de Pointing** como el producto vectorial del vector campo eléctrico y el vector campo magnético:

$$\vec{S} = \vec{E} \wedge \vec{H}$$

Es un vector perpendicular al campo eléctrico y magnético, que apunta en la dirección de propagación y cuyo módulo representa la intensidad instantánea de la onda que fluye por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación.

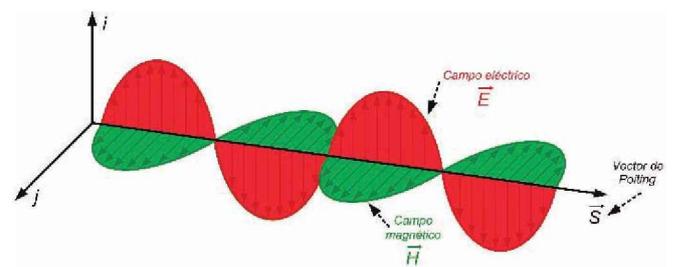


Figura 3.12. Representación de los vectores de campo eléctrico y magnético y del vector de Pointing.

3.1.6. Frente de onda esférico y ley del cuadrado inverso

Los frentes de onda esféricos son producidos por fuentes puntuales que radian la misma potencia en todas las direcciones, las cuales también reciben el nombre de radiadores isotrópicos.

Sabías que...

En el mundo real, no existen radiadores isotrópicos ideales; sin embargo, es frecuente aproximar el comportamiento de las antenas omnidireccionales al de los radiadores isotrópicos.

A una distancia determinada de la fuente isotrópica, R , el frente de onda conforma una esfera donde todos los puntos poseen la misma densidad de potencia.

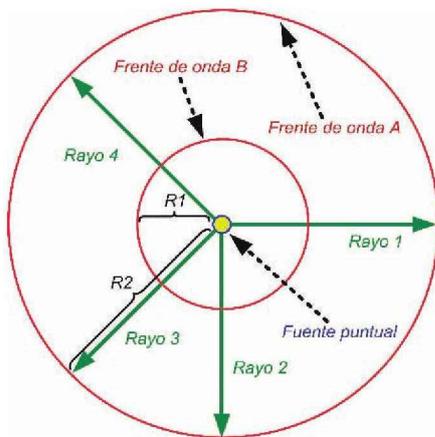


Figura 3.13. Frente de onda producido por una fuente isotrópica.

La potencia total radiada a dicha distancia estará, por tanto, uniformemente distribuida por toda la superficie de la esfera, por lo que podemos afirmar que la densidad de potencia (potencia por unidad de superficie) en cualquier punto de la esfera viene dada por el cociente entre la potencia radiada y la superficie de la misma, es decir:

$$d_{potencia} = \frac{P_{radiada}}{4\pi R^2}$$

donde $P_{radiada}$ es la potencia total radiada y R el radio de la esfera del frente de onda.

Recuerda que...

El área de una esfera de radio R se calcula como $4\pi R^2$.

En el espacio libre, la densidad de potencia podía ser expresada en función de su impedancia característica, por lo que, igualando obtenemos que la intensidad de campo eléctrico en cualquier punto de un frente de onda esférico, a una distancia R , generado por una fuente isotrópica, puede ser expresado como:

$$d_{potencia} = \frac{P_{radiada}}{4\pi R^2}$$

$$d_{potencia} = \frac{E^2}{377}$$

$$\frac{P_{radiada}}{4\pi R^2} = \frac{E^2}{377} \Rightarrow E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_{radiada}}}{R}$$

Podemos observar de la expresión de la densidad de potencia que, conforme nos alejamos de la fuente de la radiación, en ausencia de pérdidas, la potencia total se mantiene constante; sin embargo, debido al incremento de la superficie de la esfera con el cuadrado de la distancia, la densidad de potencia en un punto de la esfera disminuye con el cuadrado de la distancia. A esta propiedad se la conoce como **ley del cuadrado inverso**.

La relación entre las densidades de potencia de dos puntos cualesquiera situados a un radio R_a y R_b , vendrá dada por:

$$d_{potencia_a} = \frac{P_{radiada}}{4\pi R_a^2}$$

$$d_{potencia_b} = \frac{P_{radiada}}{4\pi R_b^2}$$

$$\frac{d_{potencia_a}}{d_{potencia_b}} = \frac{\frac{P_{radiada}}{4\pi R_a^2}}{\frac{P_{radiada}}{4\pi R_b^2}} = \frac{R_b^2}{R_a^2} \Rightarrow \frac{d_{potencia_a}}{d_{potencia_b}} = \left(\frac{R_b}{R_a}\right)^2$$

3.1.7. Atenuación versus absorción

Las ondas electromagnéticas, cuando se propagan por el vacío, no tienen pérdida de energía; su potencia total radiada es constante. Sin embargo, tal y como hemos visto, los rayos tienden a dispersarse y esto implica una disminución en la densidad de potencia; a ese fenómeno se le conoce por el nombre de **atenuación**.

Por otra parte, podemos introducir el concepto de **absorción**, asociado a las pérdidas que las ondas electromagnéticas sí sufren al propagarse por la atmósfera, ya que esta dista mucho de ser totalmente ideal, y contiene elementos, obstáculos y partículas que absorben la potencia radiada, traduciéndose esto en pérdidas.

Nota

El fenómeno de absorción tiene lugar en la atmósfera debido a las partículas y a los elementos que absorben la energía electromagnética, no existiendo fuera de ella (el espacio, por ejemplo).

Atenuación

Tal y como hemos podido estudiar con la ley del cuadrado inverso, la densidad de potencia tiende a dispersarse y su magnitud a reducirse con el cuadrado de la distancia a la fuente de irradiación. Esta reducción en la densidad de potencia es lo que denominamos atenuación, implicando que, si bien la densidad de potencia se reduce, la potencia total irradiada no se pierde ni se disipa, simplemente se redistribuye en un área mayor conforme se aleja del foco isotrópico.

A efectos de recepción, la disminución de densidad de potencia en un área se observa como una reducción en la potencia, por lo que a la atenuación también se la denomina **atenuación de la onda** o **atenuación espacial de la onda**, enfatizando el fenómeno de dispersión esférica de la misma.

Sabías que...

La atenuación de las ondas, es decir, la pérdida en la densidad de potencia, suele expresarse empleando el decibelio (dB), que es una magnitud logarítmica, tal que:

$$a(dB) = 10 \log \left(\frac{d_{potencia\ b}}{d_{potencia\ a}} \right)$$

Absorción

En el caso de ondas que se propagan por la atmósfera terrestre, estas están sometidas a un fenómeno adicional que se denomina **absorción**, que viene a referirse a la absorción de potencia que la onda experimenta debido a diversas partículas presentes en la atmósfera, que produce una pérdida efectiva de la potencia y, por tanto, una reducción en la magnitud de los campos eléctrico y magnético que constituyen la onda.

Esta absorción de la onda puede describirse empleando la Ley de Ohm, siendo modelada como una **resistencia**, por lo que la pérdida de potencia puede expresarse como:

$$P = I^2 R$$

Recuerda que...

La atenuación de la onda debida a las partículas de la atmósfera es una función de la frecuencia de la misma, siendo generalmente despreciable para frecuencias inferiores a los 10 Ghz.

En general, el fenómeno de absorción puede considerarse despreciable para frecuencias inferiores a los 10 Ghz. En la Figura 3.14 se muestra un gráfico de la absorción debida al oxígeno y al vapor de agua presentes en la atmósfera frente a la frecuencia. Como podemos observar, la absorción es más manifiesta a determinadas frecuencias, reduciéndose en otras.

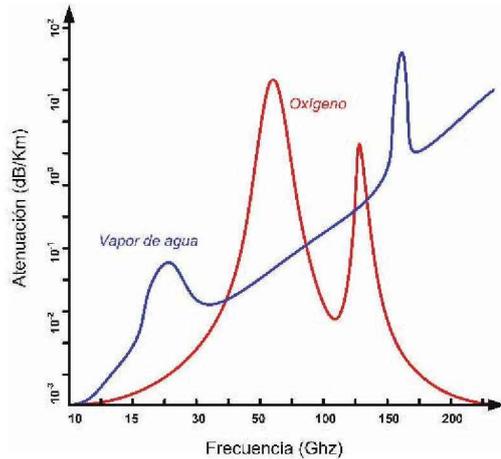


Figura 3.14. Representación de la absorción atmosférica debida al oxígeno y al vapor de agua frente a la frecuencia.

El grado de absorción de un medio se representa empleando el **coeficiente de absorción**, η , de tal manera que, si bien la atenuación de onda al desplazarse de un punto R_a a un punto R_b dependía del cociente de distancias, R_b/R_a , la absorción se debe a la diferencia de estas y se expresa como:

$$Absorción = \eta(R_b - R_a)$$

Sabías que...

La absorción es mucho más manifiesta en días lluviosos o nublados. Además, dadas las no homogeneidades de la atmósfera, supone un complicado fenómeno a tener en cuenta a la hora de diseñar sistemas de comunicación radioeléctricos.

3.1.8. Reflexión, difracción, refracción e interferencia de las ondas de radio

La forma en que las ondas se propagan por la atmósfera puede ser diferente de su comportamiento en el espacio libre debido a diversos fenómenos ópticos como son la reflexión, la refracción, la difracción o la interferencia. A continuación explicamos cómo afectan a los frentes de ondas y los rayos cada uno de estos fenómenos.

Refracción

El fenómeno de refracción se produce cuando una onda que transcurre por un medio atraviesa otro medio con distinta velocidad de propagación, o lo que es lo mismo, distinta densidad. En tal caso, se produce un cambio en la dirección de la onda que, en función de la relación de densidades entre los medios, será mayor o menor. En la Figura 3.15 se muestra un ejemplo de un frente de ondas en el que el primer medio es menos denso que el segundo.

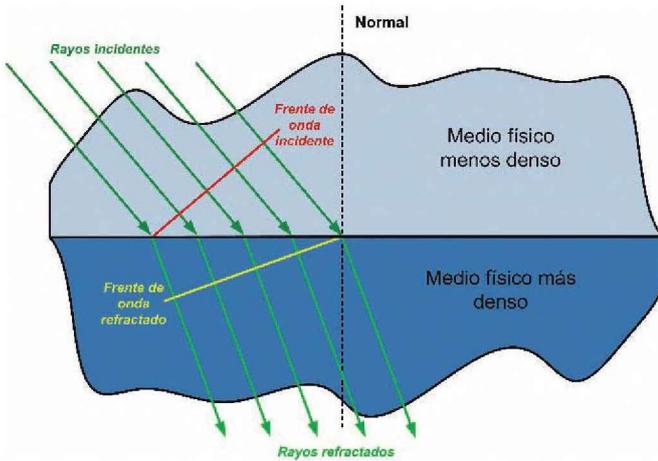


Figura 3.15. Ejemplo de refracción de un medio menos denso a un medio más denso.

Definimos la «normal» como una línea imaginaria perpendicular a la interfaz entre los dos medios, como podemos observar en la Figura 3.15. Cuando se atraviesa un medio menos denso a otro más denso, los rayos de la onda se inclinan hacia la normal. En el caso contrario, los rayos se alejarían de la normal. Así, por ejemplo, cuando observamos un vaso de agua donde hemos introducido una pajita, como se muestra en la Figura 3.16, al ser el agua más densa que el aire, la luz se refracta y vemos la pajita «quebrada».

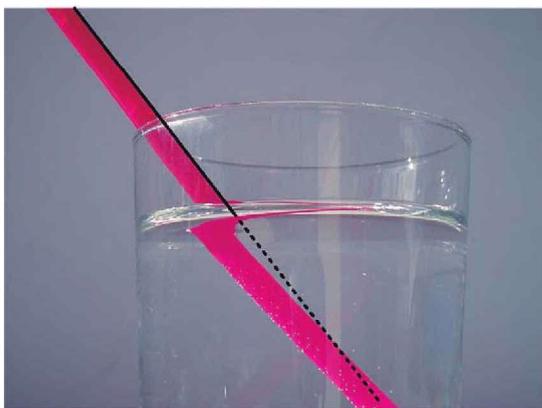


Figura 3.16. Ejemplo de refracción sobre un vaso de agua.

Se definen, a su vez, los **ángulos de incidencia y refracción** como los ángulos que forman la onda incidente con la normal y el que forma la onda reflejada con la normal, respectivamente.

Cuando una onda se propaga por un medio que presenta una densidad que varía gradualmente (tiene un gradiente de densidad) perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, también se produce el fenómeno de refracción, tal y como se muestra en la Figura 3.17.

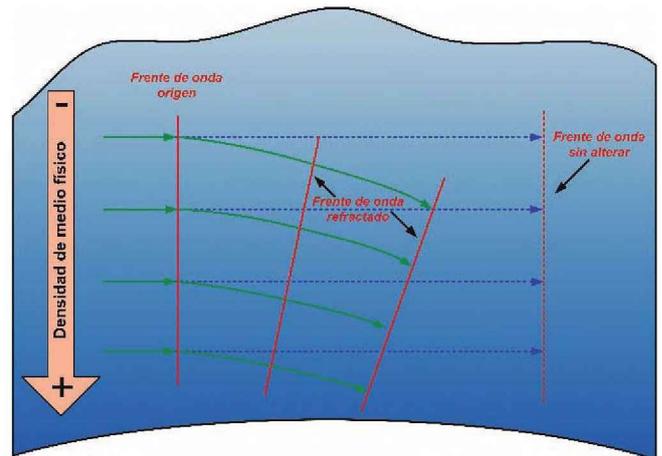


Figura 3.17. Ejemplo de refracción en un medio con gradiente de densidad.

Reflexión

Otro fenómeno que podemos encontrar en la atmósfera es la reflexión, que se produce cuando una onda colisiona con la interfaz de dos medios y la totalidad o parte de la onda es «reflejada» al medio original. Cuando la onda es reflejada completamente, las velocidades de las ondas incidente y reflejada son iguales y los ángulos de incidencia y reflexión también; no obstante, no siempre sucede esto, por lo que resulta conveniente definir el **coeficiente de reflexión**, que es la relación existente entre la intensidad del campo eléctrico de la onda incidente y el de la onda reflejada.

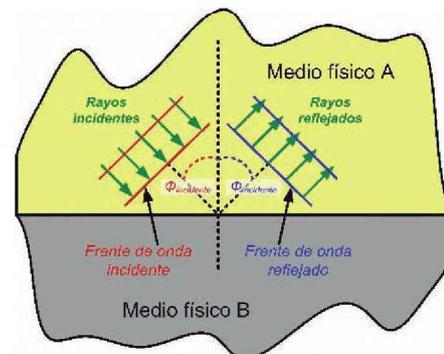


Figura 3.18. Ejemplo de onda totalmente reflejada.

Difracción

La difracción es un fenómeno que se produce en las ondas al encontrarse con un obstáculo o una «rendija» y que se manifiesta como una redistribución o modulación de la energía dentro de un frente de onda.

Los fenómenos de reflexión y refracción se producen cuando las dimensiones de las superficies son mucho mayores que la longitud de onda de los rayos incidentes. Cuando esto no sucede, es decir, las dimensiones de la superficie u obstáculos son del orden de magnitud de la longitud de onda de la señal, puede producirse la difracción y los análisis geométricos empleados con la reflexión y refracción no pueden aplicarse.

Para entender entonces el fenómeno de difracción de una onda hay que recurrir al **principio de Huygens**, según el cual todo punto sobre un frente de onda esférico puede ser, a su vez, considerado como una fuente secundaria de ondas electromagnéticas o, en otras palabras, un frente de onda puede ser considerado como una sucesión de emisiones puntuales de frentes de onda.

En el caso de estar teóricamente en presencia de un frente de ondas formado por un plano infinito, como se muestra en la Figura 3.19, en cada frente de ondas puede considerarse que cada fuente puntual secundaria (P_1 , P_2 , etcétera) irradia en todas direcciones. Al ser ideal e infinito, las irradiaciones secundarias que se producen en un sentido distinto al del rayo (perpendicular al frente), se anulan entre sí, de tal manera que el frente de ondas se propaga en línea recta.

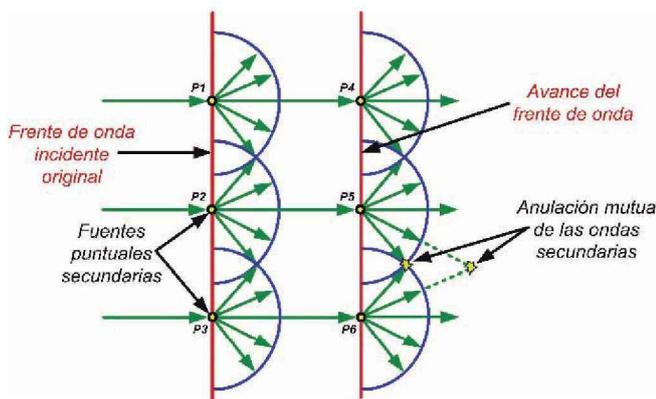


Figura 3.19. Esquematación del principio de Huygens.

Sin embargo, cuando estamos en presencia de obstáculos, el comportamiento varía. Por ejemplo, cuando el frente de onda se encuentra con un obstáculo plano con una pequeña abertura, las irradiaciones de las fuentes puntuales secundarias que atraviesan la abertura dejan de anularse totalmente, de tal modo que el frente de onda se «dispersa» o reparte hacia afuera; a este fenómeno se le conoce con el nombre de **difracción** (véase la Figura 3.20).

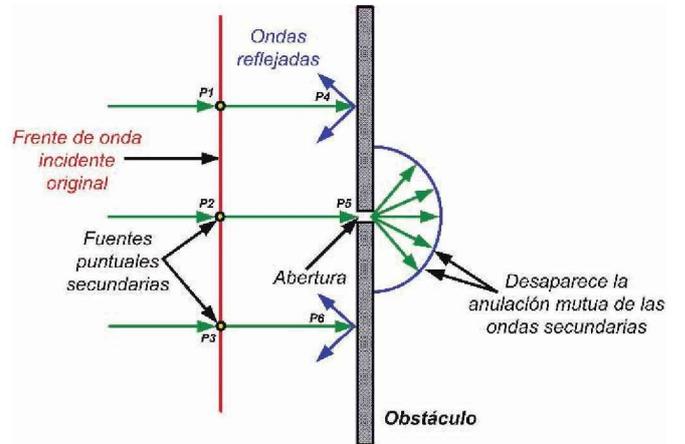


Figura 3.20. Difracción de un frente de onda plano y finito.

Finalmente, el fenómeno de difracción explica por qué las ondas pueden sortear esquinas de obstáculos, pues la anulación de las irradiaciones en este caso será parcial, permitiendo que las ondas secundarias se propaguen entorno a las aristas del obstáculo, hacia lo que se conoce como **zona de sombra**.

Recuerda que...

El fenómeno de **zona de sombra** puede apreciarse cuando abrimos la puerta de una habitación oscura y observamos cómo la parte trasera de la puerta se ve iluminada por la luz que entra desde el exterior.

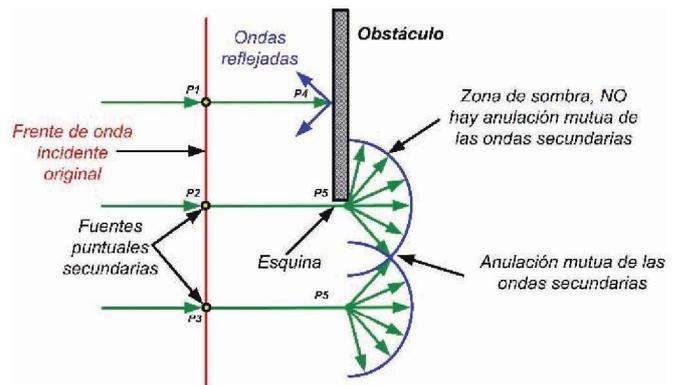


Figura 3.21. Fenómeno de difracción en la esquina de un obstáculo.

Interferencia

La interferencia tiene lugar cuando dos o más ondas electromagnéticas coinciden en el espacio y tiempo, superponiéndose para formar una onda resultante que puede tener mayor o menor amplitud y que, por lo general, produce un efecto indeseado en las comunicaciones, degradándolas.

Muchos autores consideran la difracción e interferencia como fenómenos indisolubles, al sostener que la difracción es un caso particular de interferencia. Citando a uno de los físicos más importantes del siglo XX, Richard Feynman: «Nadie ha sido capaz de definir de manera satisfactoria la diferencia entre interferencia y difracción, simplemente es una cuestión de uso, sin diferencias físicas sustantivas».



Vocabulario

La cita de Richard Feynman, estadounidense, en su idioma natal: «No-one has ever been able to define the difference between interference and diffraction satisfactorily. It is just a question of usage, and there is no specific, important physical difference between them».

3.1.9. Propagación de ondas electromagnéticas

Cuando las ondas de radiofrecuencia se propagan por la atmósfera terrestre se ven afectadas por las propiedades de la misma y de la Tierra.

Sabías que...

Las ondas de radiofrecuencia, cuando se propagan por la atmósfera terrestre, reciben el nombre de **ondas terrestres** y, a las comunicaciones que se producen entre dos o más puntos lejanos de la atmósfera, las denominamos **comunicaciones terrestres**.

Si bien es cierto que, en condiciones ideales, en el espacio vacío las ondas de radiofrecuencia se propagan en línea recta, cuando estas se propagan por la atmósfera se ven sometidas a las propiedades de la misma, sufriendo los fenómenos de reflexión, refracción, difracción e interferencia, dependiendo de muy diversos factores, como la capa de la atmósfera en la que la comunicación tiene lugar, la frecuencia de la transmisión, la distancia, si es un día lluvioso o soleado, si es de día o de noche, etcétera.

Es por ello que no existe una única forma de transmitir las ondas terrestres por la atmósfera, sino que podemos encontrar diversos **modos de propagación** de las mismas. En resumen, podemos afirmar que existen fundamentalmente tres modos de propagación de las ondas electromagnéticas en la atmósfera terrestre:

- Onda terrestre.
- Onda espacial.
- Ondas celestes o ionosféricas.

En general, podemos afirmar que, en todos los sistemas de radiocomunicación existen los tres modos de propagación; sin embargo, algunos son despreciables frente al tipo de terreno (distancia, visibilidad, etcétera) y la frecuencia empleada para la señal de radiofrecuencia.

Las ondas terrestres se propagan mejor a frecuencias inferiores a 1,5 Mhz, ya que conforme aumentamos la frecuencia, las pérdidas en el suelo se incrementan también. A mayores frecuencias se suelen emplear ondas celestes, y a muy elevadas frecuencias, las ondas espaciales, como veremos. En la Figura 3.22 se muestran los distintos modos de propagación entre dos antenas.

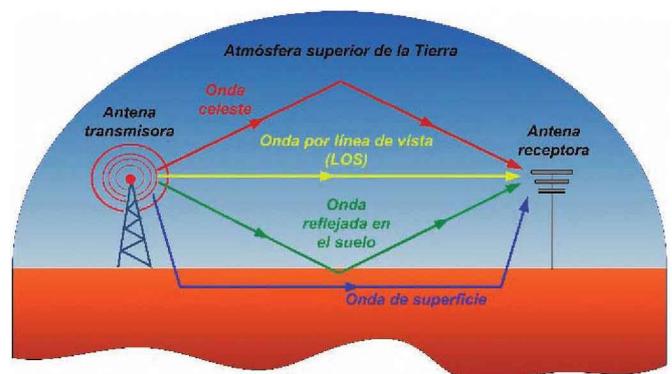


Figura 3.22. Ejemplo de modos de propagación de las ondas de radiofrecuencia.

Propagación por ondas terrestres

Las ondas terrestres son ondas electromagnéticas que viajan por la superficie de la Tierra, por lo que también reciben el nombre de **ondas superficiales**. Las ondas superficiales deben ser ondas polarizadas verticalmente; esto es así porque en el caso de disponer de polarización horizontal, el campo eléctrico de las mismas entraría en «cortocircuito» con la superficie de la Tierra, ya que esta es conductiva.

La superficie de la Tierra introduce pérdidas (por resistencia y dieléctrico), lo que supone que las ondas terrestres se atenúen en su propagación con la distancia. Además, la atmósfera terrestre dispone de un **gradiente de densidad**, concepto que hemos visto, siendo menos densa conforme nos alejamos de la superficie de la Tierra, por lo que el frente de onda se inclina progresivamente, en torno a la superficie de la Tierra, quedando cerca de esta, tal y como se muestra en las Figuras 3.23 y 3.24.

El fenómeno de **gradiente de densidad** de la atmósfera nos permitirá que el frente de onda se propague más allá del horizonte visible entre dos puntos, pudiendo, en teoría, rodear la Tierra en su totalidad si transmitimos con la suficiente potencia; sin embargo, debemos tener cuidado en la elección del terreno y de la frecuencia sobre la que la onda

terrestre se va a propagar, pues puede llegar a «inclinarse» en exceso y absorberse por la superficie de la Tierra.

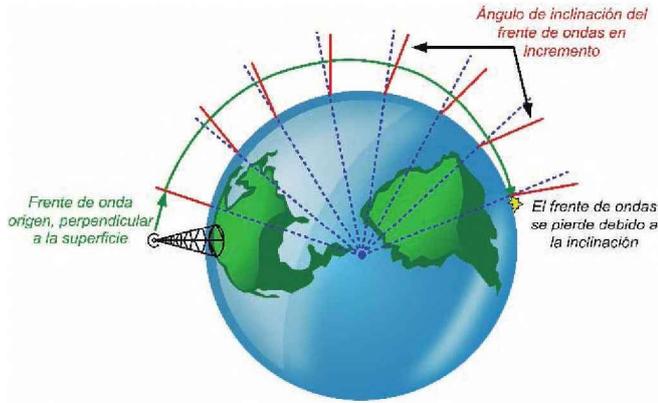


Figura 3.23. Propagación de ondas terrestres.

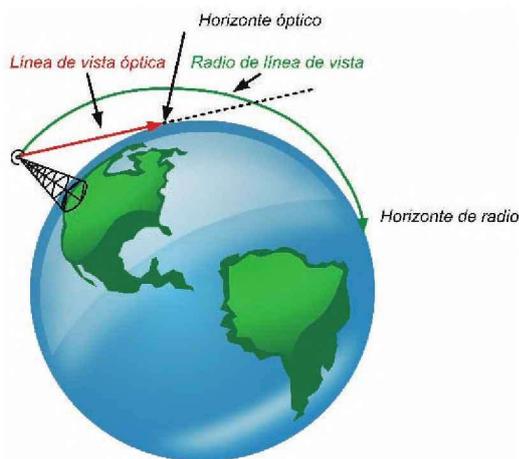


Figura 3.24. Detalle de propagación terrestre por encima de la línea de horizonte.

En general, las ondas terrestres se propagan mucho mejor sobre medios como el océano o el mar (agua salada) que sobre superficies desérticas.

Sabías que...

Las comunicaciones marítimas entre barcos o un barco y tierra y los sistemas de radionavegación emplean frecuentemente ondas terrestres a una frecuencia de apenas unos 15 KHz.

En resumen, podríamos afirmar que las principales bondades de las comunicaciones por ondas terrestres son que es posible su utilización para comunicar dos puntos de la Tierra, bajo las condiciones adecuadas, y que se ven poco afectadas por la variabilidad de las condiciones atmosféricas.

Por el contrario, requieren la utilización de antenas muy grandes, lo cual se debe, como veremos más adelante, a la baja frecuencia que emplean; la potencia que se requiere para transmitir estas señales es muy alta y la variabilidad del terreno dificulta el cálculo de las pérdidas que se introducen en la propagación.

Recuerda que...

Las ondas superficiales se propagan a través de la Tierra sobre la superficie de la misma, siguiendo su curvatura, alcanzando distancias superiores al horizonte óptico.

Es frecuente la utilización de antenas de tipo **monopolo vertical**, apoyadas sobre la tierra, con alturas de hasta 200 metros, y con polarización vertical. Las distancias, para la banda de LF (30–300 KHz), llegan hasta los 2000 kilómetros, reduciéndose a apenas los 50 kilómetros para la banda de HF (3–30 Mhz).

Propagación por ondas espaciales

La propagación por ondas espaciales es aquella comprendida en los kilómetros inferiores de la atmósfera terrestre y está formada por la superposición de ondas directas y ondas reflejadas, tal y como se muestra en la Figura 3.25.

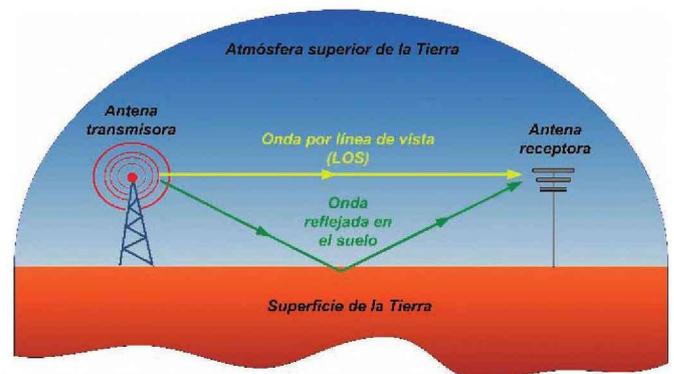


Figura 3.25. Esquema de propagación por ondas espaciales.



Vocabulario

Línea de vista = *Line of Sight*, por lo que a la transmisión por línea de vista también se la conoce como transmisión LOS.

Las ondas directas son aquellas que viajan directamente entre las antenas del transmisor y del receptor, lo que se denomina **transmisión de línea vista**, y está limitada esencialmente por la curvatura de la Tierra, que presenta a las ondas

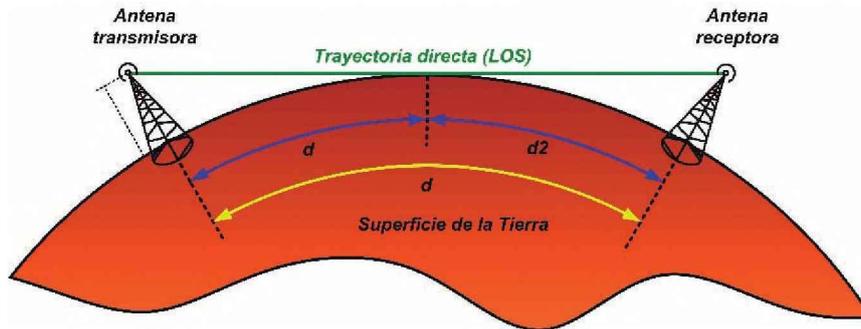


Figura 3.26. Detalle del horizonte de radio de ondas espaciales.

directas espaciales un horizonte que se conoce como **horizonte de radio** que es un poco mayor que el horizonte óptico (debido al gradiente de densidad que produce refracción), siendo aproximadamente cuatro tercios el horizonte óptico.

Cuando deseamos aumentar el horizonte de radio, basta con aumentar la altura de las antenas, colocándolas sobre torres o grandes edificios o en la cima de montañas, por ejemplo.

Por otra parte, no olvidemos que también tenemos las ondas reflejadas, que son las ondas que se reflejan en el suelo entre el transmisor y el receptor. Por lo que la intensidad de campo que llega a la antena del receptor dependerá, por una parte, de la distancia entre emisor y receptor (afectada por la atenuación y absorción), y por otra de que ambas ondas, la directa y la reflejada, lleguen en fase o no (interferencia).

Sabías que...

Existe un modo de propagación especial conocido como **propagación por conductos** que, dadas unas condiciones especiales en la atmósfera terrestre, provoca que las ondas electromagnéticas queden atrapadas entre ella y la superficie de la Tierra, actuando como un «conducto», lo que permite la propagación de la onda electromagnética a grandes distancias.

Propagación por ondas celestes o ionosféricas

Las ondas celestes o ionosféricas son aquellas que se radian formando un ángulo relativamente grande respecto al horizonte o superficie de la Tierra. Se dirigen hacia la atmósfera, donde son reflejadas o refractadas hacia la superficie de la Tierra por la ionosfera, que se encuentra a una distancia de entre 50 y 400 kilómetros, por lo que también se las conoce como **ondas ionosféricas** (véase la Figura 3.28).

La ionosfera absorbe una gran cantidad de radiación solar, lo que produce que las moléculas del aire se ionicen y se produzcan **electrones libres**, lo que conlleva a que la constante dieléctrica de la ionosfera se reduzca, aumentando la velocidad de propagación y propiciando que las ondas de radio se «desvíen», es decir, se produce un fenómeno de refracción. A mayor densidad de iones, mayor es el fenómeno de refracción. A medida que la frecuencia de las ondas de radio aumenta, la radiación electromagnética es capaz de penetrar más profundamente en la ionosfera.

Recuerda que...

A medida que la frecuencia de las ondas de radio aumenta, la radiación electromagnética es capaz de penetrar más profundamente en la ionosfera.

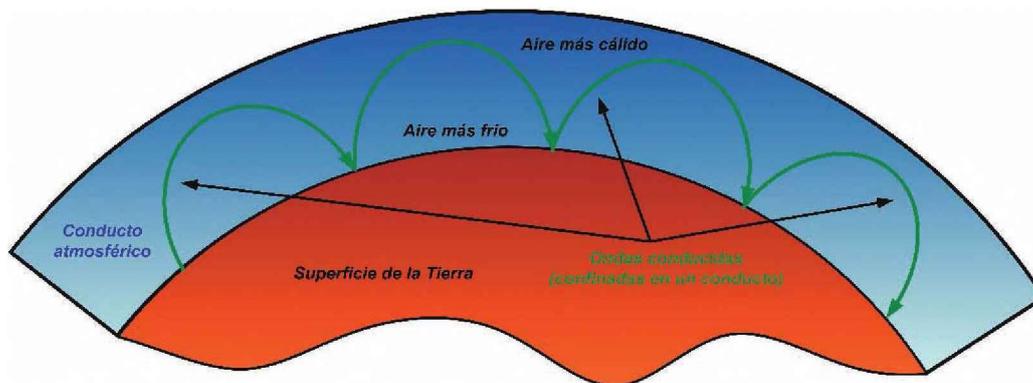


Figura 3.27. Ejemplo de propagación por conductos atmosféricos.

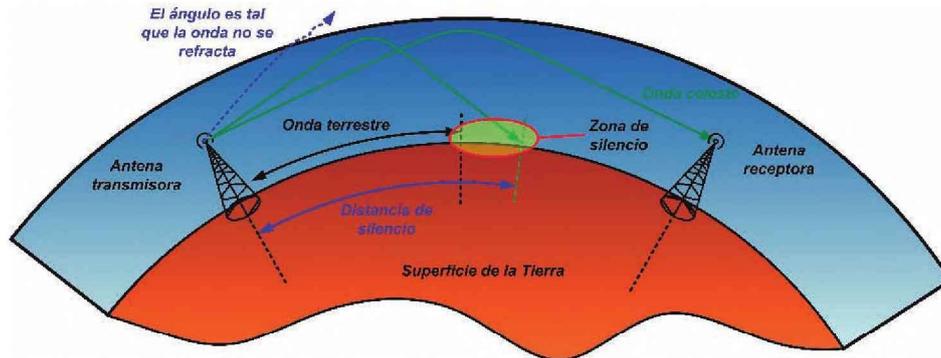


Figura 3.28. Irradiación de ondas celestes o ionosféricas.

La ionosfera está, a su vez, estratificada en capas, D, E y F (F1 y F2), situadas en distintas localizaciones, como se muestra en la Figura 3.29. Veamos algunas propiedades de las mismas:

- **Capa D.** Es la capa inferior, situada entre los 50 y los 100 kilómetros de distancia sobre la Tierra. Al ser la capa más lejana al Sol es la que presenta menos densidad de ionización, teniendo una escasa influencia sobre la dirección de propagación de las ondas. Además, su densidad de ionización depende de la posición del Sol, por lo que por la noche esta capa «desaparece». La capa D refleja las ondas VLF (3–30 KHz) y LF (30–300 KHz) y absorbe las ondas MF (300–3000 KHz) y HF (3–30 Mhz).

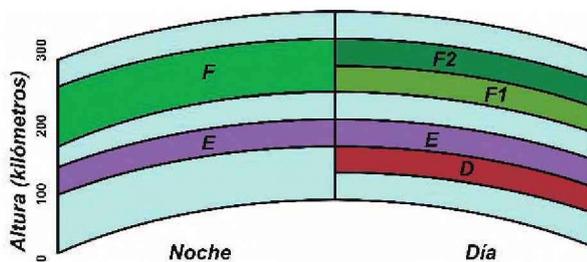


Figura 3.29. Capas de la ionosfera.

Sabías que...

Las ondas de muy alta frecuencia, VHZ, de 30 a 300 Mhz, pueden llegar a penetrar hasta los 70-100 kilómetros y son empleadas en las comunicaciones tierra-aire de corto alcance, apenas unos cientos de kilómetros, y en las comunicaciones marinas. En el rango de los 300 a 3000 Mhz, las ondas de radio no son reflejadas por la ionosfera, escapando al exterior (si no son absorbidas por pérdida de potencia), por lo que su recepción se limita a la línea de horizonte, siendo empleadas en aplicaciones de telefonía móvil, televisión y frecuencia modulada. Si deseamos aumentar el alcance empleando estas frecuencias, tendremos que hacer uso de satélites como elementos intermedios de retransmisión.

Nota

VLC: muy baja frecuencia, de 3 a 30 KHz.
 LF: baja frecuencia, de 30 a 300 KHz.
 MF: frecuencia media, de 300 KHz a 3 Mhz.
 HF: alta frecuencia, de 3 a 30 Mhz.

- **Capa E.** Se encuentra comprendida entre los 100 y los 140 kilómetros. También ve afectada su densidad de ionización en función del Sol, prácticamente desapareciendo durante la noche, como la capa D. Es una capa que propicia la propagación de las ondas de MF (es decir, las refleja) y refleja un poco las de HF durante las horas de mayor densidad de ionización.

Sabías que...

A la capa E también se la conoce como capa de Kennelly-Heaviside, por sus descubridores.

- **Capa F.** Está compuesta por dos subcapas, F1 y F2, durante el día, las cuales se combinan en una única capa, F, por la noche. La capa F1 se caracteriza por su elevado coeficiente de absorción, atenuando las ondas de HF; sin embargo, la mayoría de las ondas la atraviesan hasta alcanzar la capa F2, siendo reflejadas hacia la superficie de la Tierra.

Recuerda que...

Las ondas reflejadas por la ionosfera alcanzan la superficie de la Tierra únicamente a determinadas distancias del transmisor, distancia que dependerá, fundamentalmente, de la frecuencia utilizada, del ángulo de reflexión y de la «profundidad de penetración».

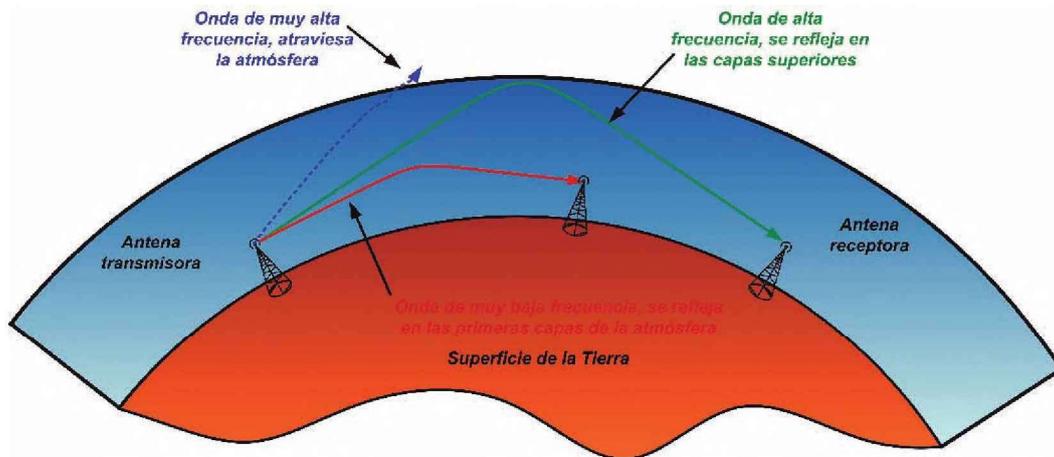


Figura 3.30. Propagación de ondas ionosféricas en función de la frecuencia.

■ ■ ■ Propagación vía satélite

Cuando se trabaja con ondas de un rango de frecuencias muy elevado, superiores a 30 Mhz, las ondas terrestres son rápidamente atenuadas, precisándose que exista visibilidad radioeléctrica entre las antenas del emisor y del receptor, para lo cual se emplea el rayo directo. Como se precisa visibilidad directa, es frecuente colocar repetidores en la superficie de la Tierra o bien en el espacio, es decir, empleando satélites, en cuyo caso decimos que estamos frente a un sistema de propagación vía satélite.

La propagación por el espacio, entonces, emplea como retransmisor o repetidor satélites en lugar del fenómeno de refracción atmosférica, ya que para el rango de frecuencias de VHF (30–300 Mhz) y superiores, la ionosfera se hace «transparente», de tal manera que las señales emitidas por la antena del transmisor son recibidas por un satélite en el espacio que la reenvía al receptor nuevamente, incrementando la distancia que puede cubrirse.

Gracias a la utilización de los satélites, es posible realizar enlaces de gran distancia con frecuencias que van desde los 30 Mhz hasta varios gigahercios, permitiendo una gran direccionalidad y pudiendo «alumbrar» zonas específicas. En la Tabla 3.1 especificamos algunas de las bandas de comunicación utilizadas en las comunicaciones por satélite.

Tabla 3.1. Algunas bandas de comunicación utilizadas en las comunicaciones por satélite

Banda	Rango de frecuencias ascendentes (GHz)	Rango de frecuencias descendentes (GHz)
C	5,925 - 6,425	3,7 - 4,2
Ku	14,0 - 14,5	11,7 - 12,2
Ka	27,5 - 30,5	17,7 - 21,7

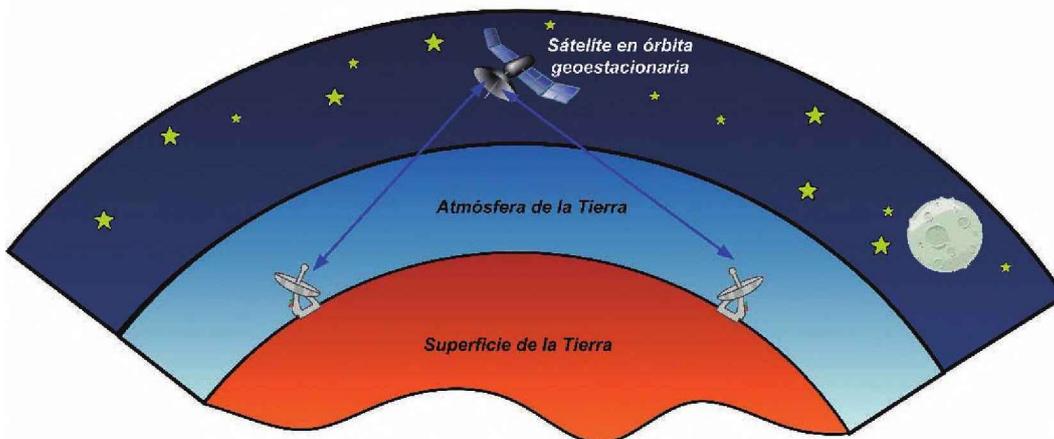


Figura 3.31. Esquema de comunicación vía satélite.