

CAPÍTULO 2

MECANISMOS BÁSICOS DE PROPAGACIÓN

2.1 Reflexión.

Son producidas en cosas grandes, tanto móviles como estacionarios. El tamaño de dichos objetos debe ser de varias longitudes de onda a la frecuencia de trabajo y de superficies planas.

Dichos objetos de gran tamaño, en frecuencias de VHF o más altas, se pueden comportar como reflectores de las capas ionizadas de la alta atmósfera. Otros ejemplos de reflectores son las grandes acumulaciones de agua, los límites entre las masas de aire de diferente temperatura y humedad de la baja atmósfera, e incluso los aviones, los edificios, las montañas y la superficie del planeta. [14]

Las reflexiones en la atmósfera permiten que existan las comunicaciones, es decir que tanto el receptor, como el transmisor deben apuntar hacia las superficies reflectantes y que la superficie no necesariamente debe estar ubicada en medio de ambos puntos en los que se encuentren cada uno. [14]

2.1.1 Ley de la reflexión.

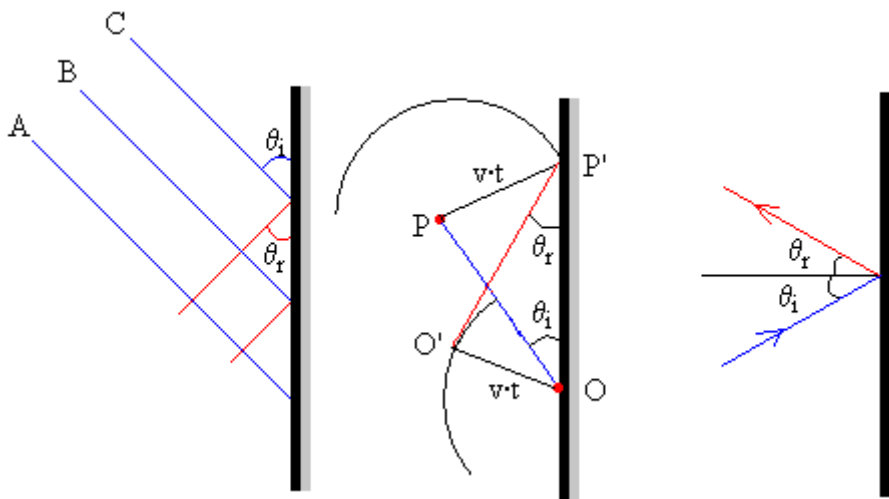


Figura 2.1 Ley de la Reflexión. [18]

En la parte izquierda de la figura 2.1, se muestra el aspecto de un frente de ondas que se refleja sobre una superficie plana. Si el ángulo que forma el frente incidente con la superficie reflectante es θ_i , se puede demostrar, aplicando el principio de Huygens, que el frente de ondas reflejado forma un ángulo θ_r tal que $\theta_i = \theta_r$.¹

¹ [18] Franco García, Ángel, "Física con ordenador", Página personal, Disponible en: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/snell/snell.htm> Octubre de 2003

Las posiciones del frente de ondas al cabo de un cierto tiempo t , se calculan trazando circunferencias de radio $v \cdot t$ con centro en las fuentes secundarias de ondas situadas en varios puntos del frente de onda inicial. [18]

Las ondas secundarias situadas junto al extremo superior A se propagarán sin obstáculo, su envolvente dará lugar a un nuevo frente de ondas paralelo al inicial y situado a una distancia $v \cdot t$. Las ondas secundarias producidas en el extremo inferior del frente de ondas chocan contra la superficie reflectante, invirtiendo el sentido de su propagación. La envolvente de las ondas secundarias reflejadas da lugar a la parte del frente de ondas reflejado. El frente de ondas completo en el instante t tiene la forma de una línea quebrada. [18]

Si se toma la fuente de ondas secundarias P , de la porción OP del frente de ondas incidente y se traza la recta perpendicular PP' , tal que $PP' = v \cdot t$. Con centro en O se traza una circunferencia de radio $v \cdot t$ y luego el segmento $P'O'$ que es tangente a dicha circunferencia. Este segmento, es la porción del frente de ondas reflejado. De la igualdad de los triángulos OPP' y $OO'P'$ se concluye que el ángulo θ_i es igual al ángulo θ_r . [18]

Si se trazan las rectas perpendiculares (denominadas rayos) a los frentes de onda incidente y reflejado, se concluye, que el ángulo de incidencia θ_i formado por el rayo incidente y la normal a la superficie reflectante, es igual al ángulo de reflexión θ_r formado por el rayo reflejado y dicha normal. [18]

2.2 Refracción.

Debido a las diferentes densidades de las capas de la atmósfera, las ondas electromagnéticas pueden sufrir una desviación en su trayecto, sobre todo cuando atraviesan estas capas con cierto ángulo.

“La desviación de la trayectoria es proporcional al índice de refracción, que es el cociente entre la velocidad de propagación en el vacío y la velocidad de propagación en el medio atravesado. En la ecuación 2.1 se muestra cómo calcular el índice de refracción”:²

$$\text{Índice de refractividad} = \frac{\text{velocidad de propagación en el vacío}}{\text{Velocidad de propagación en el medio}}$$

Ecuación

2.1

Como ya se mencionó, las ondas de radio pasan por las diversas capas de la atmósfera. Si los índices de refracción de cada una de las capas son muy diferentes, se produce una reflexión total. De este modo, las frecuencias de VHF y superiores son las más propensas a una desviación en su trayectoria.

El tipo de propagación en las bandas de UHF y SHF es por línea de vista e intervienen un gran cantidad de factores, esto se vera a detalle en el capítulo 4 de este documento. El término línea de vista no significa una línea recta de transmisión, ya que la estructura de la atmósfera terrestre es tal que

² Hernan Javier Selva, “Propagación en VHF”, Página personal, Disponible en: <http://www.lw8die.santoslugares.com/propagacion.htm> Abril, 2003.

su índice de refracción varía con la altura, lo que causa una especie de curvatura en la trayectoria de transmisión. [14]

El término línea de vista (Line of Sight -LOS) se refiere a que la onda es captada por el receptor directamente desde el transmisor. Este tipo de onda solo se recibe dentro del horizonte visual, de ahí el nombre.

2.2.1 Ley de Snell de la refracción.

“Si se considera un frente de ondas que se acerca a la superficie de separación de dos medios de distintas propiedades, teniendo que en el primer medio la velocidad de propagación de las ondas es v_1 y en el segundo medio es v_2 , se puede determinar, aplicando el principio de Huygens, la forma del frente de onda un tiempo posterior t .”³

En el lado izquierdo de la figura 2.2 se puede ver el frente de ondas que se refracta en la superficie de separación de dos medios, cuando el frente de ondas incidente entra en contacto con el segundo medio, las fuentes de ondas secundarias situadas en el frente de ondas incidente, producen ondas que se propagan en todas las direcciones con velocidad v_1 en el primer medio y con velocidad v_2 en el segundo medio. La envolvente de las circunferencias trazadas nos da la forma del frente de ondas después del tiempo t , una línea quebrada formada por la parte del frente de ondas que se propaga en el primer medio y el frente de ondas refractado que se propaga en el segundo. [18]

³ Franco, op. cit.

El frente de ondas incidente forma un ángulo θ_1 con la superficie de separación, y frente de ondas refractado forma un ángulo θ_2 con dicha superficie. En la parte central de la figura 2.2, se establece la relación entre estos dos ángulos.

La ley de Snell de la refracción se expresa en términos del índice de refracción de la siguiente manera: [14]

$$n_1 \cdot \text{sen} \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen} \theta_2$$

Ecuación

2.2

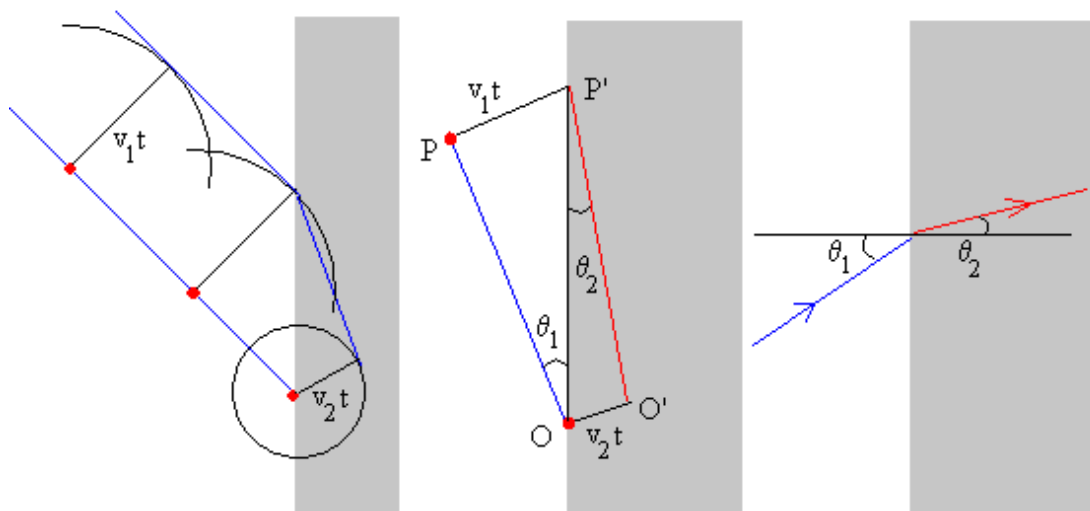


Figura 2.2 Ley de Snell. [18]

- En el triángulo rectángulo OPP' se tiene que

- $v_1 \cdot t = |OP'| \cdot \text{sen} \theta_1$

Ecuación

2.3

- En el triángulo rectángulo $OO'P'$ tenemos que

$$\bullet \quad v_2 \cdot t = |OP'| \cdot \sin \theta_2 \quad \text{Ecuación}$$

2.4

- La relación entre los ángulos θ_1 y θ_2 es:

$$\frac{v_1}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{\sin \theta_2} \quad \text{Ecuación 2. 5}$$

Para que se de una Reflexión total se tienen que cumplir las siguientes condiciones: [18]

- Si $v_1 > v_2$ el ángulo $\theta_1 > \theta_2$ el rayo refractado se acerca a la normal.
- Si $v_1 < v_2$ el ángulo $\theta_1 < \theta_2$ el rayo refractado se aleja de la normal.

En este segundo caso, para un ángulo límite θ_c el ángulo de refracción es $\theta_2 = \pi / 2$.

$$\sin \theta_c = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{Ecuación 2. 6}$$

El ángulo límite es aquél ángulo incidente para el cual el rayo refractado emerge tangente a la superficie de separación entre los dos medios. [18]

Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, el seno del ángulo de refracción resulta mayor que la unidad. Esto indica, que las ondas que inciden con un ángulo mayor que el límite no pasan al segundo medio, sino que son reflejados totalmente en la superficie de separación. [18]

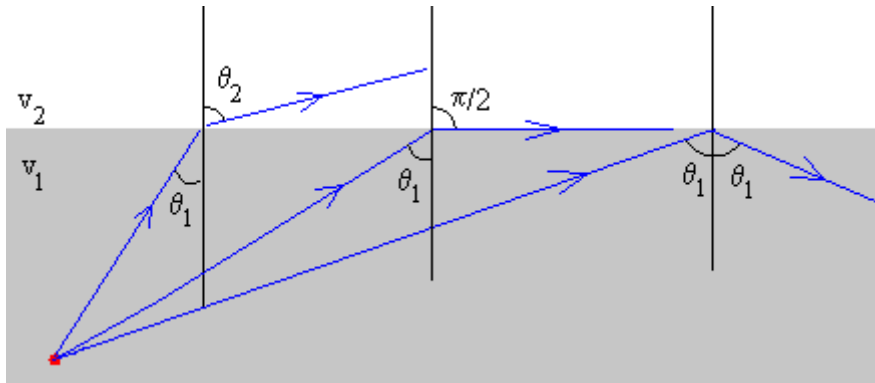


Figura 2.3. Reflexión total. [18]

En la figura 2.3, observamos que a medida que se incrementa el ángulo de incidencia θ_1 el ángulo de refracción aumenta hasta que se hace igual a $\pi/2$. Si se vuelve a incrementar el ángulo de incidencia, la onda incidente se refleja en el primer medio.

2.2.2 Refracción en enlaces con línea de vista.

Las ondas electromagnéticas se refractan cuando pasan de un material con un índice de refracción diferente al del otro. En la atmósfera terrestre el índice de refracción decrece de manera gradual a medida que aumenta la altura. El efecto que estas variaciones causan en las ondas es una curvatura conforme viajan del transmisor al receptor. Esta curvatura varía según los cambios en temperatura, presión y humedad. Bajo condiciones normales de propagación, es decir que las variaciones en el índice de refracción sean graduales, el efecto de curvatura sobre la trayectoria la aleja de la superficie terrestre, permitiendo la línea de vista. En otro caso, los incrementos en el índice de refracción

provocan que la trayectoria sea curvada hacia la superficie de la tierra, lo que provocaría obstrucciones por la superficie de la tierra o vegetación. [8]

Existe un factor que describe la cantidad de curvatura en la trayectoria, es el factor k , también llamado factor de radio efectivo terrestre. Su valor está en función del radio terrestre (a , 6370 km) y del gradiente de refractividad por kilómetro con respecto a la altura (dN/dh), expresado en N-unidades/km. A su vez, la refractividad está relacionada con el índice de refracción de la siguiente forma [8]:

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (1.1) \quad \text{Ecuación 2.7}$$

La relación entre estos parámetros y el factor k viene dada por la ecuación 1.2:

$$k = 1/[1 + a \cdot (dN/dh) \times 10^{-6}] \quad (1.2) \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Cuando el valor de $dN/dh > -39$ N-unidades/km, se dice que la onda es “subrefractada” ($0 < k < 4/3$). Cuando $dN/dh < -39$ N-unidades/km, la onda es “superrefractada” ($4/3 < k < \infty$). Cuando $dN/dh = -39$ N-unidades/km, se dice que la onda está en condiciones de $k = 4/3$, que es el valor para una atmósfera estándar, ya que de acuerdo a valores experimentales se encontró que éste era el valor medio. De manera que el factor k multiplicado por el radio terrestre da el radio ficticio de la Tierra. En la figura 2.4 se esquematiza la variación en la curvatura de la onda para varios valores del factor k [8].

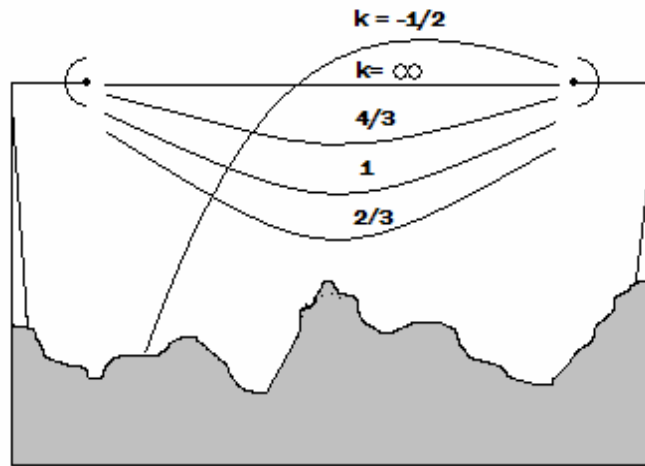


Figura 2.4 Variación en la trayectoria para diferentes factores k. [8]

“En condiciones de atmósfera estándar el valor del factor k varía desde 1.2 en áreas elevadas secas y 4/3 en las promedio, hasta 2 y 3 en áreas húmedas o costas. Cuando $k = \infty$, la onda es curvada a la misma razón de la curvatura de la tierra, de ahí que parezca línea recta. Si el valor de k es menor a 1, la curvatura del rayo se va hacia arriba, lejos de la superficie terrestre, lo que haría parecer como un aumento en la protuberancia terrestre lo cual obstruiría la trayectoria del enlace. Existe una manera de determinar la protuberancia terrestre en cualquier punto, en función del factor k, y es mediante la ecuación” (1.3):⁴

$$h = (4/51) \cdot d_1 \cdot d_2 / k \quad \text{metros} \quad (1.3) \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde: d_1 y d_2 son las distancias en kilómetros al inicio y al final del trayecto respectivamente.

⁴ Solís Trápala, Karen. “Análisis y diseño de enlaces punto a punto vía microondas terrestres”, UDLAP, Tesis presentada en Primavera 2003

Así, puede verse que para que el enlace se efectúe con línea de vista es necesario que no se vea obstruido por los efectos de la protuberancia terrestre en función del factor k , ni por ningún obstáculo en un área cercana a la línea de vista. Esta área cercana está definida como la primera zona de Fresnel. [8]

2.3 Dispersión.

La dispersión se lleva a cabo cuando las ondas de radio atraviesan alguna masa de electrones o pequeñas gotas de agua en espacios adecuadamente grandes. Es así por ejemplo, como la refracción puede causar la dispersión. Este fenómeno es muy parecido al que se observa cuando la irradiación de la luz intenta penetrar en la niebla.

Una atmósfera ideal sería aquella que partiera de valores máximos de densidad y de conducción en las zonas bajas hasta llegar a una densidad prácticamente nula y sin humedad en las zonas altas.

Sin embargo, en la práctica, estas condiciones no se dan nunca. Lo normal es que en el aire de la troposfera se den zonas de turbulencias (masas cambiantes de nubosidad) y estratos más o menos paralelos de diferente

temperatura y concentración de humedad, lo que permite alcanzar en casos especiales distancias importantes.

Las diferentes elevaciones del terreno sobre las masas de aire que las rodean, hacen que no existan capas uniformes, ni que estas sean similares en temperatura y humedad, lo que conlleva una dispersión de las ondas que llegan a ellas. [14]

A este tipo de propagación se le conoce como propagación por dispersión. La dispersión se aprovecha muy poco en las zonas montañosas pero resulta de gran utilidad sobre grandes llanuras o áreas marítimas, en donde los estratos son más estables, y sobre todo a frecuencias de cientos o miles de megahertz. [14]

Las comunicaciones por dispersión resultan útiles en la transmisión de señales de televisión o telefonía utilizando grandes potencias y antenas direccionales. Con las señales de VHF, UHF y SHF se puede llegar a distancias mayores que el alcance visual pero perdiendo estabilidad y recogiendo perturbaciones de tipo atmosférico. La lluvia, la nieve, las tormentas con descargas eléctricas, etc. ocasionan importantes variaciones en la propagación de las ondas de este tipo. [14]

Los objetos como postes de luz, árboles tienden a dispersar la energía en todas direcciones, haciéndole llegar de esta manera energía adicional al receptor.

Como se mencionó anteriormente, las elevaciones del terreno influyen en la dispersión de las ondas, así como también influye en gran medida el tipo de superficie.

Las superficies planas que tienen dimensiones mayores a una λ se pueden modelar como superficies reflectivas, es decir, no dispersivas. Una superficie se considera lisa o plana si la diferencia entre su máxima y mínima perturbación:

$$h_p < h_c \quad \text{donde } h_c @ \lambda / 8 \text{ sen } \theta \quad \theta = \text{Ángulo de incidencia.}$$

2.4 Difracción.

El fenómeno de difracción se presenta cuando los frentes de onda se encuentran con algún obstáculo que entorpece parcialmente su propagación. La dirección de propagación de una onda, y por lo tanto la manera en que se propaga la energía, depende directamente de la forma del frente de onda. [14]

Lo anterior se refiere a que, cuando un obstáculo bloquea parte del frente de onda, se altera necesariamente la dirección de propagación del resto del frente y de la energía. Este fenómeno hace que pueda existir señal útil aun detrás de obstáculos.

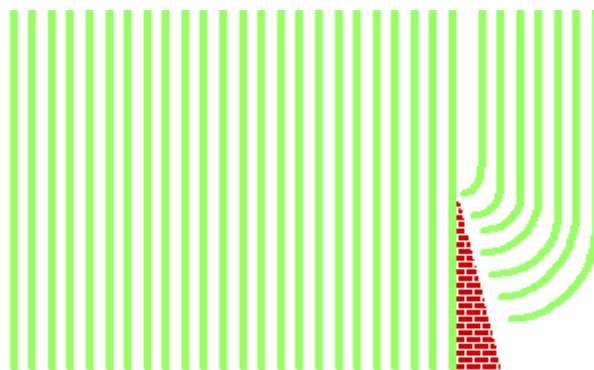


Figura 2.5 Difracción.

La explicación de este fenómeno proviene de la Teoría Ondulatoria que Christian Huygens desarrolló en el siglo XVII para la luz. Según el Principio de Huygens, cada punto del espacio que es atravesado por una onda puede ser considerado una fuente puntual de ondas en sí mismo.

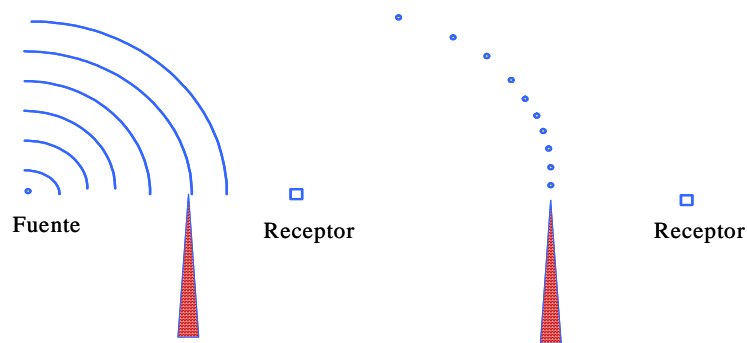


Figura 2.6 Principio de Huygens. [18]

Cuando existe un obstáculo en el camino de las ondas electromagnéticas la difracción (el esparcimiento de las ondas en los límites de la superficie) permite que un pequeño porcentaje de las ondas lleguen del otro lado de la obstrucción. Este fenómeno generalmente permite la recepción en zonas de "sombra de señal" detrás de montañas ó grandes edificaciones.

2.4.1 Principio de Huygens.

Aproximadamente en 1660 el físico danés Huygens propuso un mecanismo sencillo para trazar la propagación de ondas. Su construcción es aplicable a ondas mecánicas en un medio material [18].

Un frente de onda es una superficie que pasa por todos los puntos del medio alcanzados por el movimiento ondulatorio en el mismo momento. Se puede trazar una serie de líneas perpendiculares a los sucesivos frentes de onda, las cuales se denominan rayos y corresponden a las líneas de propagación de la onda. Así, la relación entre rayos y frente de ondas es similar a la de líneas de fuerza y superficies equipotenciales (con el mismo potencial o voltaje).

De hecho, según el teorema de Malus, el tiempo que separa puntos correspondientes de dos superficies de onda es el mismo para todos los pares de puntos correspondientes. [18]

Huygens visualizó un método para pasar de un frente de onda a otro. Cuando el movimiento ondulatorio alcanza los puntos que componen un frente de onda, cada partícula del frente se convierte en una fuente secundaria de ondas, que emite ondas secundarias (indicadas por semicircunferencias) que alcanzan la próxima capa de partículas del medio. Entonces estas partículas se ponen en movimiento, formando el subsiguiente frente de onda con la envolvente de estas semicircunferencias. El proceso se repite, resultando la propagación de la onda a través del medio. Esta representación de la propagación es muy razonable cuando la onda resulta de las vibraciones mecánicas de las partículas del medio, es decir una onda elástica pero no tendría significado físico en las ondas electromagnéticas donde no hay partículas que vibren [18].

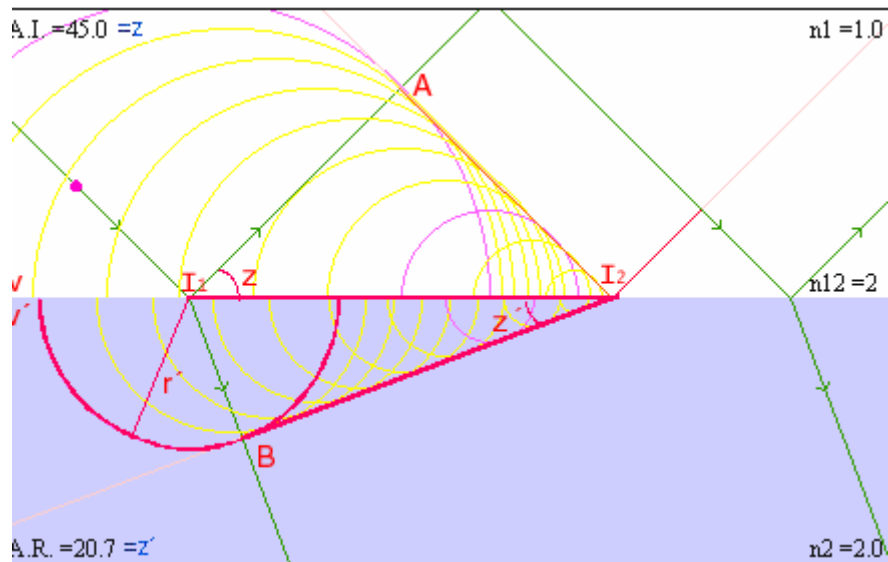


Figura 2.7. Principio de Huygens. [18]

“A partir del principio de Huygens puede demostrarse la ley de la refracción. Supongamos que un frente de onda avanza hacia la superficie refractante I_1I_2 que separa dos medios en los cuales las velocidades de la luz son v y v' . Si consideramos I_1 como emisor, en el tiempo Δt en que la perturbación llega de A a I_2 , la perturbación originada en I_1 habrá alcanzado la esfera de radio $r' = v'\Delta t$. En el mismo tiempo la perturbación correspondiente llega a todos los puntos de la envolvente BI_2 , y tomando los rayos normales a los frentes de onda, de la figura se deduce que:”⁵

Ecuación 2.10

$$\frac{AI_2}{I_1B} = \frac{\text{sen } z}{\text{sen } z'} = \frac{v\Delta t}{v'\Delta t} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$n_1 \text{sen } a_i = n_2 \text{sen } a_r$$

Ecuación

2.11

⁵ Franco, Ibidem.

Esto ha sido comprobado con la experiencia, y no solamente en cuanto a direcciones de propagación, sino también en que en el medio de mayor índice de refracción la velocidad es menor. Lo que se contraponen a lo que establecían Descartes y Newton.

2.5 Zonas de Fresnel.

Las zonas de Fresnel son elipsoides que rodean la trayectoria directa entre el transmisor y receptor. La primera zona de Fresnel, (la región que encierra a la primera elipsoide), contiene la mayor cantidad de potencia destinada al receptor.

“De existir un obstáculo en los límites de la primera zona de Fresnel, la onda reflejada tiende a cancelar la onda directa, dependiendo de las amplitudes relativas de cada onda. A efectos prácticos se considera propagación pura por línea de vista (sin atenuación por difracción) si no existen obstáculos dentro de la primera zona de Fresnel”⁶.

En la figura 2.8 se muestra la primera zona de Fresnel en un enlace punto a punto.

⁶ Deltoro Igual, Daniel, “Propagación en VHF,UHF y SHF”, Pagina personal, Disponible en: <http://club.telepolis.com/eb5bcf/propa.htm> Abril, 2003.

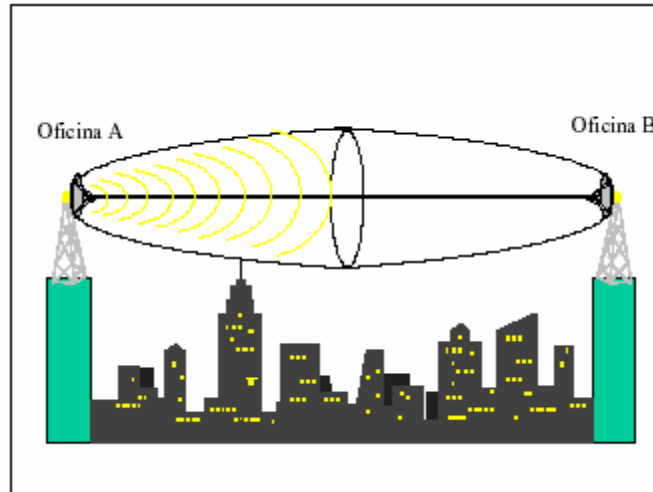


Figura 2.8. Primera zona de Fresnel. [9]

Las demás zonas de Fresnel (segunda, tercera, etc.) tienen mucho menor efecto en cuanto a pérdidas por difracción debido a su contenido de potencia de la señal. El radio del conjunto de elipsoides varía a lo largo de la trayectoria y está dado por: [13]

$$F_n = [n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2 / (d_1 + d_2)]^{1/2} = [n \cdot \lambda \cdot d_1 \cdot d_2 / d]^{1/2} \quad (1.4) \text{ Ecuación}$$

2.12

Donde:

n : Número entero que caracteriza la elipsoide correspondiente.

λ : Longitud de onda de la portadora

d_1 : Distancia desde una terminal al punto donde se desea calcular el radio de la zona de Fresnel.

d_2 : Distancia desde la otra terminal al punto donde se calcula el radio de la zona de Fresnel.

$$d = d_1 + d_2 \quad \text{Ecuación 2.13}$$

En la figura 2.9 se esquematizan los límites de las tres primeras zonas de Fresnel, los cuales se calculan con la ecuación anterior.

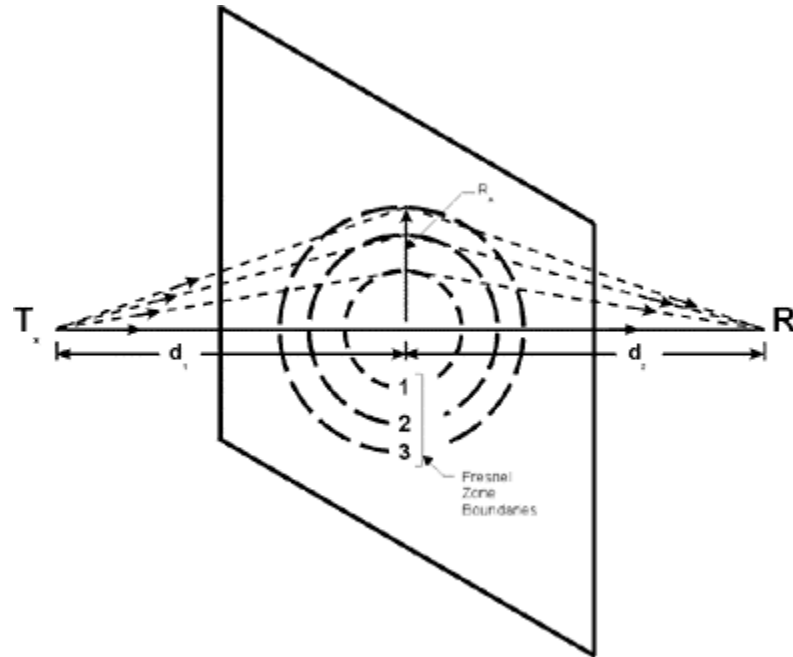


Figura 2.9 Límites de las primeras tres zonas de Fresnel. [9]

El radio de la primera zona de Fresnel F_1 está dado por: [13]

$$F_1 = 17.32[d_1 \cdot d_2 / (f \cdot d)]^{1/2} \text{ metros} \quad (1.5) \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde:

d_1 , d_2 y d están en kilómetros.

F está en GHz.

En la figura 1.15 se muestra un enlace, con la primera zona de Fresnel dibujada y delimitada por el radio 'R' correspondiente a cada punto a lo largo del trayecto.

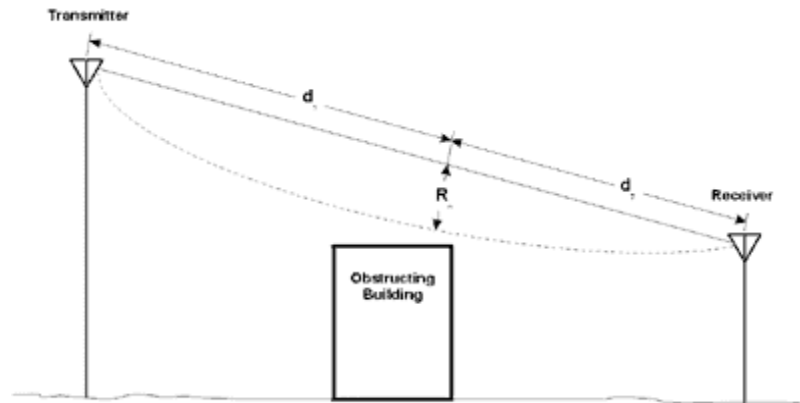


Figura 2.10 Primera zona de Fresnel.

Las pérdidas debidas a la difracción dependen del tipo de terreno que obstruya la primera zona de Fresnel, pero éste será parte del objetivo del siguiente capítulo.