

Propagación Básica de las Ondas Electromagnéticas.

Características del Medio.

La transferencia de energía en un medio depende de ciertas propiedades electromagnéticas de éste, así como de propiedades similares del medio circundante. De esta forma, la transferencia de ondas electromagnéticas dependerá en diversos grados de las propiedades del terreno sobre el cual tiene lugar la transmisión.

Estas propiedades están definidas por los siguientes parámetros.

1.- Constante Dieléctrica ϵ , (permitividad), es la capacidad de un medio para almacenar energía electrostática. Un dieléctrico es un material no conductor, esto es, un aislante. Buenos dieléctricos son el aire, hule, vidrio y mica por ejemplo. La constante dieléctrica para el vacío es igual a 8.854×10^{-12} farad / metro.

2.- Permeabilidad μ , es la medida de la superioridad de un material comparado con el vacío, para servir como trayectoria para líneas de fuerza magnética. Los materiales ferromagnéticos como el hierro, acero, níquel y cobalto poseen altas permeabilidades. Por otro lado sustancias diamagnéticas como el cobre, latón y bismuto tienen permeabilidades comparables a la del espacio libre. El valor de μ para el vacío es de $4\pi \times 10^{-7}$ henry / metro.

3.- Conductividad σ , es la medida de la habilidad de un medio para conducir corriente eléctrica. Todos los metales puros son conductores, teniendo algunos mejor conductividad que otros. La conductividad es el recíproco de la resistividad y se mide en siemens (mhos).

Velocidad en el medio.

Mientras que en el vacío la conductividad vale cero, ϵ y μ nunca valen cero. La velocidad de la onda electromagnética en cualquier medio está dada por:

$$v = 1 / \text{raíz} (\mu \epsilon) \text{ metros /segundo}$$

Ya que los valores de μ y ϵ son esencialmente iguales para el aire y el vacío, la velocidad de las ondas electromagnéticas a través de ambos materiales es aproximadamente 3×10^8 metros / segundo, o 186 000 millas / segundo. Este valor puede ser empleado para todas las ondas electromagnéticas a través de cualquiera de estos dos medios sin error apreciable.

FRENTES DE ONDA

La antena más simple es el punto teórico denominado radiador isotrópico. En una radiación sin obstrucciones, al cabo de un segundo, una onda radiada por esta antena tendrá la superficie de una esfera con un radio igual a 3×10^8 metros. Esta superficie se denomina frente de onda. De acuerdo a Christian Huygens, un frente de onda se considera constituido por un número infinito de radiadores isotrópicos, cada uno de ellos radiando siempre en dirección contraria a la fuente.

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

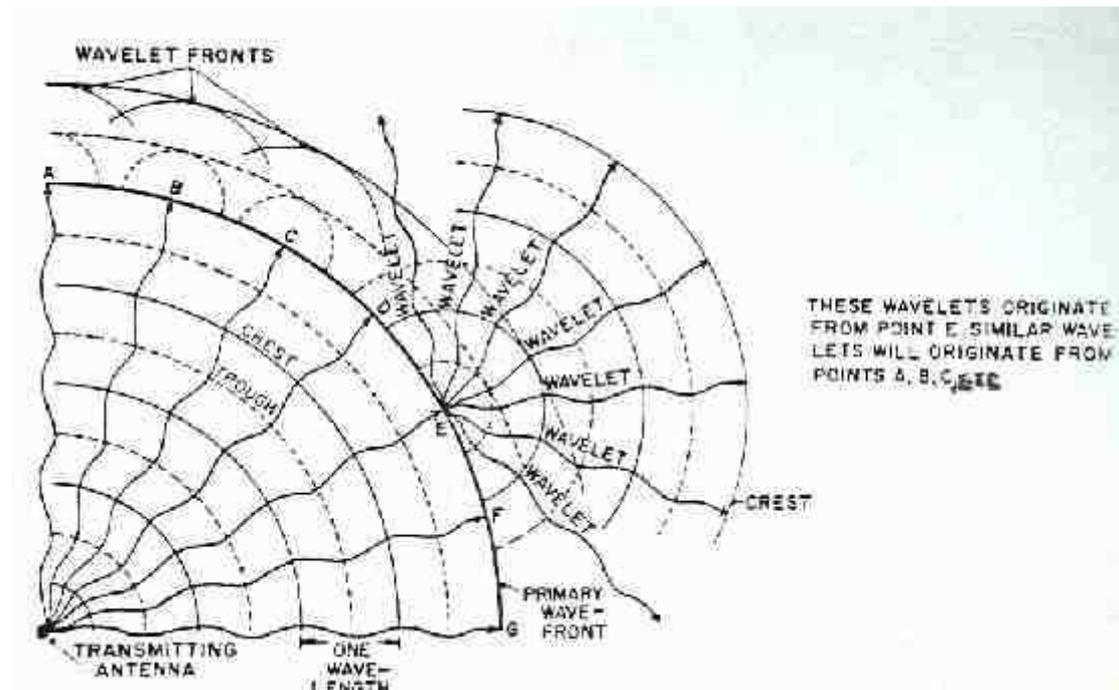


Figura 1. Principio de Huygens.

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN.

Al estudiar los cambios que ocurren en un frente de onda mientras este avanza a través de un medio de una sola densidad, es posible predecir los efectos que se producirían cuando la onda encuentra un medio de densidad diferente, el cual puede reflejar, refractar o absorber energía. El comportamiento de la onda al llegar a una superficie reflejante se puede determinar mediante una adaptación de la construcción de Huygens. En la figura 2 se muestra una onda electromagnética reflejándose en algún lugar del terreno entre las antenas transmisora y receptora. Una observación más cercana en el punto de reflexión muestra el frente AB llegando a la superficie del terreno, a través del cual no puede penetrar. Si no hubiera existido esta superficie la onda hubiera avanzado sin cambio en su dirección, y en cierto intervalo de tiempo hubiera alcanzado la posición A' B, sin embargo la presencia de la superficie de la Tierra causa un cambio en la dirección del frente de onda ilustrado por la línea gruesa AOB. La línea OB representa el frente de onda incidente, y la línea AO, el frente de onda reflejado. El ángulo i (incidente) y el ángulo r (reflejado) son iguales y están en el mismo plano.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

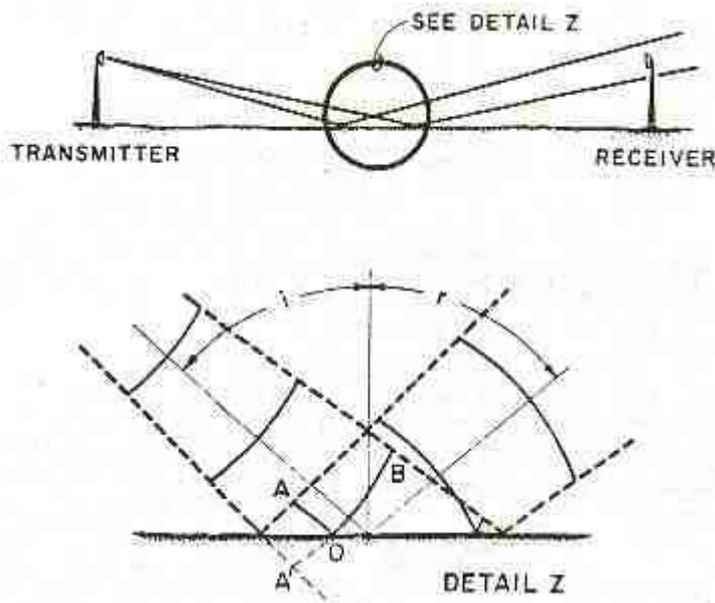


Figura 2. Onda reflejada en el terreno.

Por la importancia de la transferencia de energía electromagnética en el caso de la propagación de las ondas, es conveniente expresar la relación de la energía de las ondas incidente y reflejada por la relación llamada coeficiente de reflexión, el cual se define como la raíz de la relación de potencias que se encuentra dividiendo la energía reflejada por segundo que deja una superficie reflejante, entre la energía por segundo incidente a la misma superficie. Si ambas energías son iguales, el coeficiente de reflexión vale 1 y existe una reflexión perfecta. Si la energía reflejada es menor que la incidente la diferencia es, ya sea disipada en la superficie o parcialmente disipada y parcialmente permitida a través de la superficie en la forma de un rayo refractado.

Por ejemplo, cuando una onda llega a una nube la mayor parte de la energía será transmitida a través de ella, sin embargo, debido a varias partículas en la nube, una porción de la onda será devuelta por reflexión y otra parte será absorbida dentro de la misma nube, esto es, será convertida en calor.

La parte de la onda que pasa a través de la nube será refractada (cambiará su dirección) si las propiedades electromagnéticas de la nube difieren de las del aire circundante. De hecho y en general, cuando una onda encuentra cualquier medio cuyas propiedades difieren de aquellas del medio del cual procede, tendrán lugar simultáneamente los fenómenos de reflexión y de refracción.

En la figura 3 se ilustra una onda la cual es refractada en una masa de aire con una densidad mayor que el aire circundante. En aras de la simplicidad se muestra que toda la acción tiene lugar en la interfaz entre la masa de aire y la atmósfera envolvente; en realidad la refracción ocurre gradualmente ya que no existe una frontera claramente definida entre las dos masas de aire. Como la masa de aire con la cual se encuentra la onda es más densa, la onda disminuye su velocidad y en consecuencia, se flexiona.

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

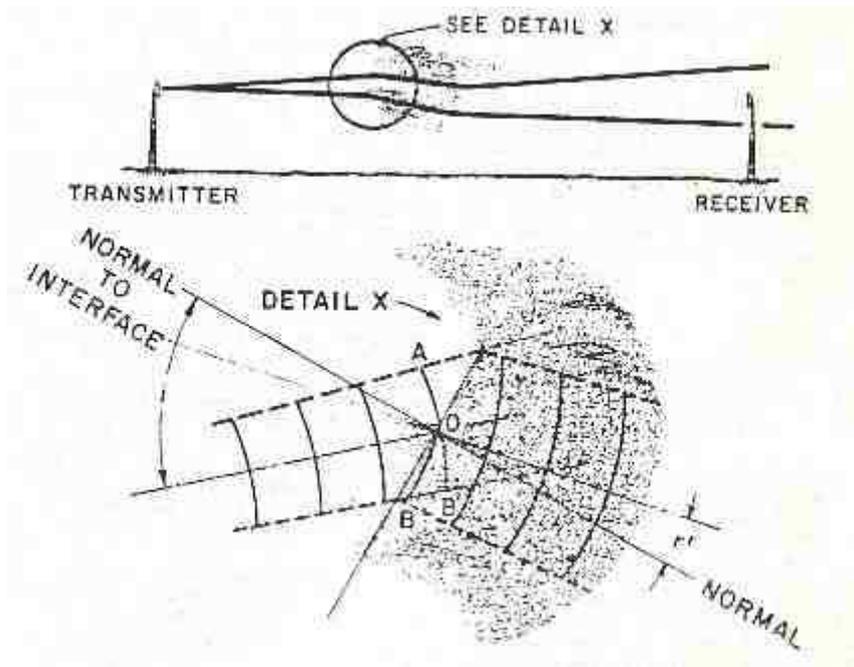


Figura 3. Onda Refractada.

Si la masa de aire no estuviera presente, el punto B del frente AOB habría avanzado hasta B' a una velocidad uniforme, sin embargo, como la velocidad de la onda disminuye al entrar en la masa de aire, la línea OB representa la nueva dirección del frente de onda, y el ángulo r' formado respecto de la normal se denomina ángulo de refracción.

Si la densidad de la masa de aire encontrada fuera menor que la del aire circundante, la onda sería refractada hacia arriba. Por lo tanto una onda es refractada hacia la normal cuando su velocidad se ve reducida, y alejada de la normal cuando su velocidad se incrementa.

Consecuentemente, la ley de refracción establece que una onda incidente viajando en forma inclinada de un medio a otro, experimenta un cambio en dirección si la velocidad de la onda en un medio es diferente de su velocidad en el otro.

El astrónomo y matemático Willebrod Snell descubrió que la relación entre los senos de los ángulos incidente y refractado es igual a la relación de las respectivas velocidades de las ondas en estos medios, y además es constante para los dos medios en particular. Expresada matemáticamente, la Ley de Snell establece:

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Donde n es el coeficiente de refracción del segundo medio respecto al primero.

El índice de refracción absoluto de una sustancia se toma respecto al vacío, y es prácticamente el mismo valor que el índice respecto al aire. El cambio del índice de refracción determina la trayectoria de una onda electromagnética a través de la atmósfera.

REFRACCIÓN

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

las ondas radiarán de nuevo en todas direcciones desde una multitud de centros elementales de radiación en el horizonte de la Tierra, al recibir una onda de energía incidente. La difracción electromagnética es, por lo tanto, la flexión de las ondas al rozar la superficie de la Tierra o cualquier otro obstáculo involucrado en la trayectoria. En la figura 4 se muestra la difracción de las ondas electromagnéticas hacia la región de sombra por detrás del pico de una montaña.

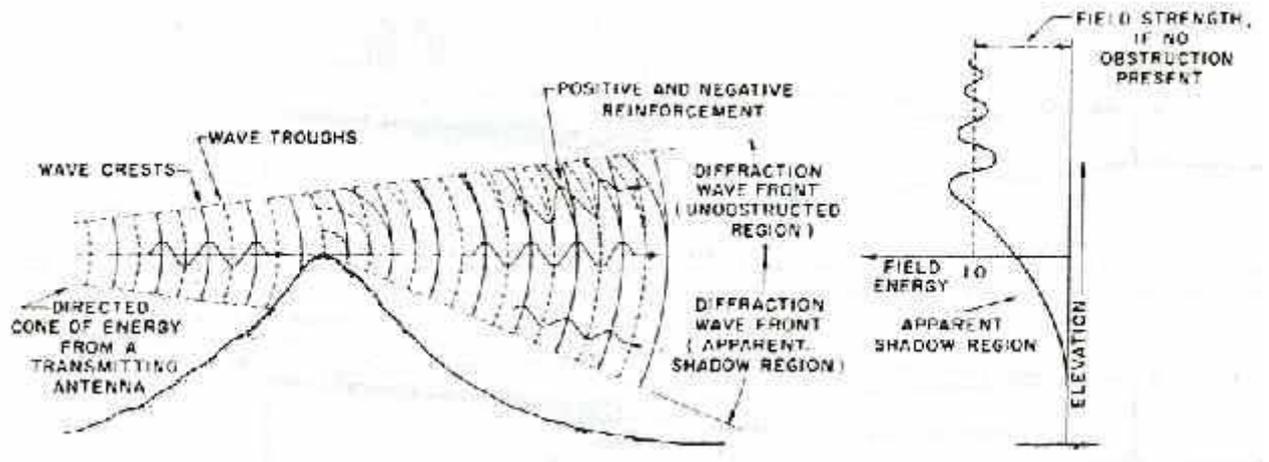


Figura 4. Difracción.

INTERFERENCIA DE ONDAS, FRESNEL.

Cada frente de ondas progresando de una fuente transmisora a un punto receptor, consiste de un número infinito de fuentes secundarias. Luego entonces, incluso en el caso simple de energía transmitiéndose de un punto a otro en el espacio libre, hay un número infinito de trayectorias a considerar; cada una de ellas originándose de una fuente secundaria en el frente de onda progresivo. Algunas de estas trayectorias se muestran.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

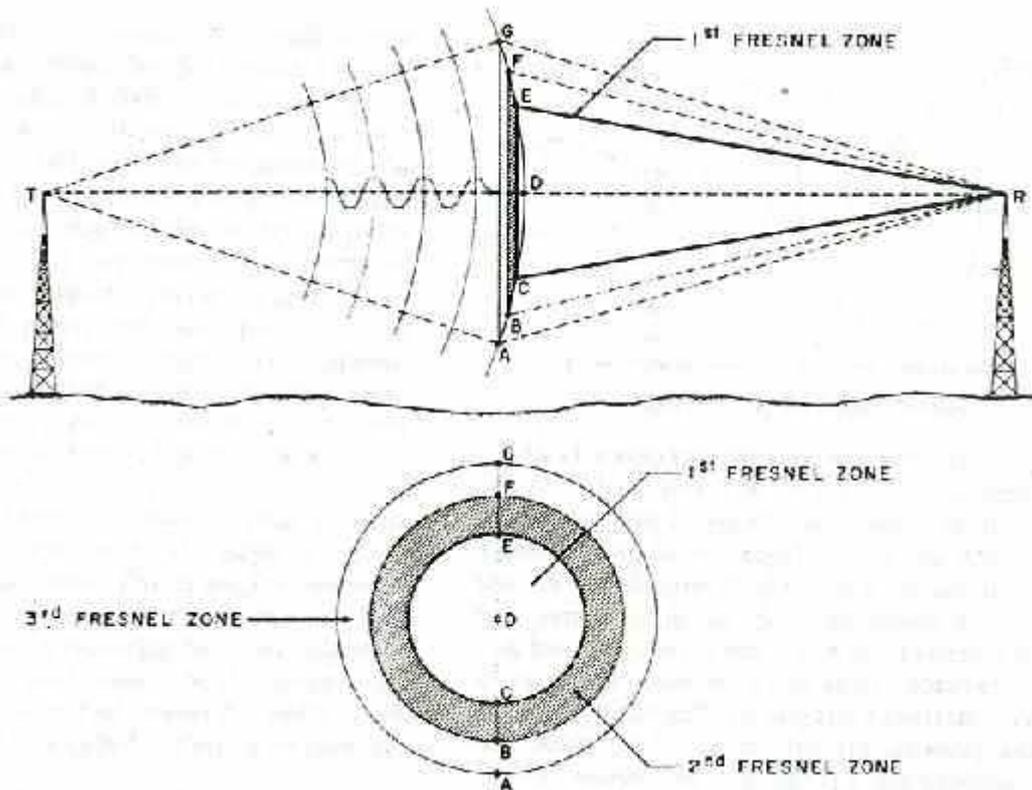


Figura 5. Zonas de Fresnel.

En la figura 5, el frente de onda descrito por el arco AG es un segmento particular del haz de energía que está siendo emitido por la antena transmisora. Los puntos desde A hasta G son designados como fuentes secundarias, conocidos como centros de radiación de Huygens. Los radios de los círculos cuyos diámetros son descritos por los puntos AG, BF y CE se escogen de modo que la longitud de la trayectoria total desde T hasta R, vía cada círculo sea $n \lambda / 2$ mayor que la trayectoria más corta TDR, donde n es un entero.

Por lo tanto, la distancia ER es mayor por media longitud de onda que la distancia DR, y la distancia FR es mayor que la distancia ER por la misma magnitud. Las regiones circulares delimitadas por estos radios son llamadas Zonas de Fresnel, y no son iguales, sino que disminuyen en energía proporcionalmente a la distancia de la zona central, denominada primera zona de Fresnel.

El campo contribuyente de cada una de estas zonas en el punto R es alternadamente positivo y negativo, determinado por las diferencias en la longitud de las trayectorias de las ondas secundarias. El campo total recibido en R es por lo tanto la suma vectorial de todos los campos incidentes.

Por ejemplo, consideremos la onda que llega a R desde la fuente secundaria C. Como la longitud de la trayectoria CR es media longitud de onda mayor que la trayectoria directa DR, la onda que llega desde el punto C estará fuera de fase respecto de la onda directa, y su

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

obstrucciones en la trayectoria, para obtener la máxima intensidad de campo.

El área de la primera zona de Fresnel depende la distancia entre las antenas y de la frecuencia empleada. El radio de cualquier zona de Fresnel en un punto P a lo largo de la trayectoria de transmisión se puede encontrar mediante la expresión:

$$r_n = \text{raíz} [n (d_1 d_2 / d) \lambda]$$

donde:

n = número de la zona de Fresnel.

d1 = Distancia del tx al punto.

d2 = Distancia del rx al punto.

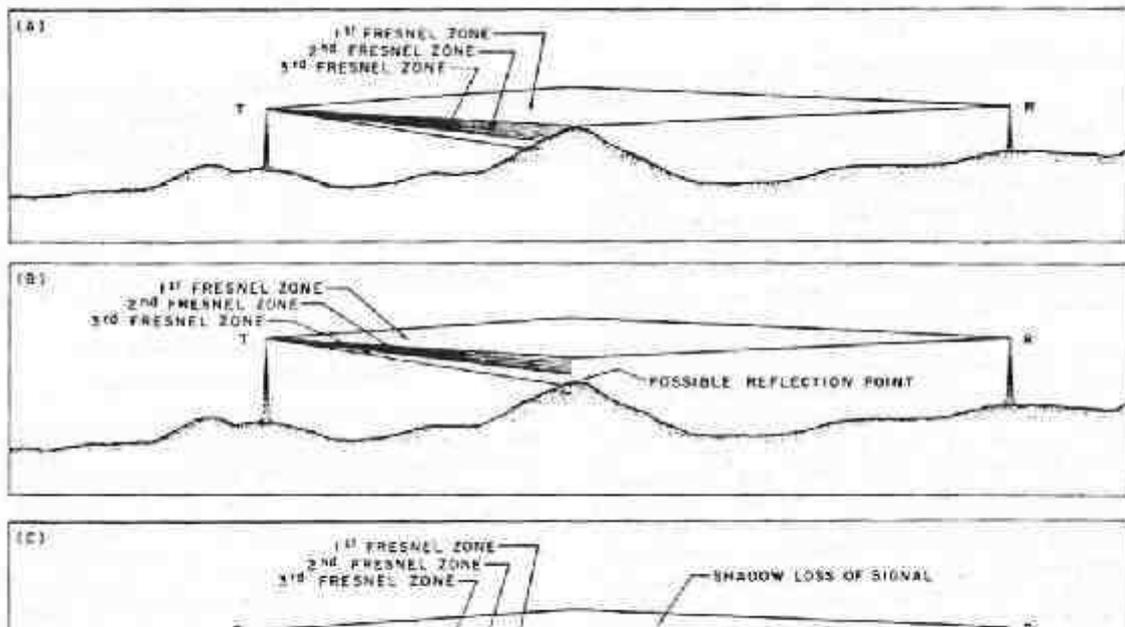
d = Distancia total entre el tx y el rx.

l = Longitud de onda empleada.

(En esta expresión debe haber congruencia en las unidades, por ejemplo: todo en metros)

El claro (clearance) óptimo de Fresnel realmente ocurre cuando el borde de una obstrucción se localiza ligeramente dentro de la primera zona de Fresnel. Esta ligera penetración provoca reforzamiento ya que la onda reflejada es media longitud de onda mayor que la onda directa, pero también cambiada en fase 180 grados en el punto de reflexión. La onda reflejada llega en fase con la onda directa incrementando efectivamente la intensidad de campo en la antena receptora.

El claro óptimo se ilustra en la figura 6A. Cuando existe un claro mayor (6B) puede ocurrir desvanecimiento por trayectorias múltiples, provocado por las ondas de la segunda y cuarta zonas de Fresnel reflejándose en la superficie del obstáculo. Un claro menor (6C) puede provocar una pérdida de potencia por sombra, dependiendo del grado de obstrucción, debida a múltiples reflexiones desde el lado obstruido de la primera zona de Fresnel.



**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

ZONAS DE REFLEXIÓN EN EL TERRENO.

Cuando una onda de radio incide en la superficie del terreno, no se refleja realmente en un punto, sino en un área de cierto tamaño. Esta área de reflexión puede ser suficientemente grande para incluir varias zonas de Fresnel, o estar constituida por una elevación que incluya solo una parte de la primera zona.

Para el primer caso, las zonas de Fresnel resultantes, formadas en la superficie reflejante toman la forma mostrada en la figura 7A. Estas zonas elípticas son similares a las que se formarían en un plano oblicuo colocado entre el transmisor y el receptor en el espacio libre (fig 7B).

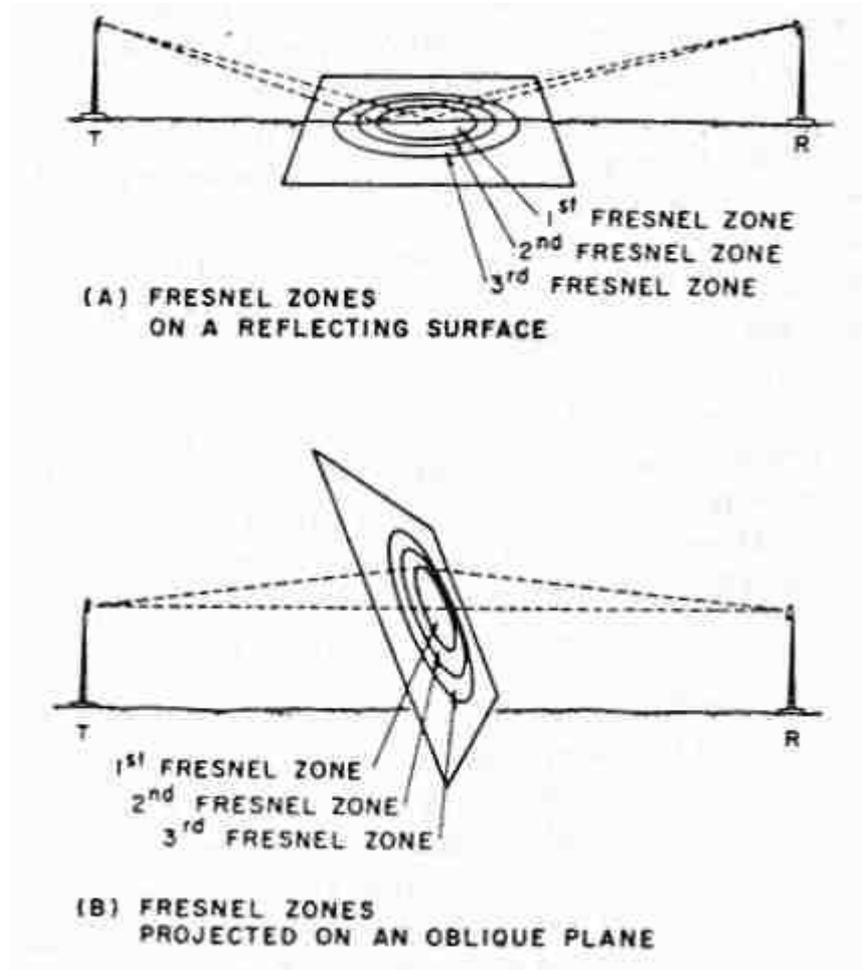


Figura 7. Zonas de Fresnel por Reflexión en el Terreno.

Las zonas de Fresnel por reflexión en el terreno son simplemente una imagen proyectada de las zonas en el espacio libre en el plano de reflexión y se pueden determinar por la misma geometría que la que se usa para las zonas en el espacio libre. El significado de las zonas por reflexión en el terreno es similar a aquella de las zonas en el espacio libre, sin embargo, al ser reflejadas las ondas en el terreno, generalmente son alteradas en fase, dependiendo de la

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

fase respecto de la onda directa en la antena receptora y en consecuencia provocarán interferencia destructiva.

El patrón de radiación de una antena cerca de una superficie reflejante tal como el suelo difiere del patrón en el espacio libre. Ya que las trayectorias directa y reflejada no tendrán la misma longitud física, y debido al cambio de fase en la reflexión, las dos ondas pueden llegar a la antena receptora con cualquier relación de fase. Esta relación causará ya sea un incremento o un decremento de la intensidad de campo en el receptor y producirán el efecto de distintos lóbulos y nulos en el patrón de radiación pues los dos rayos se suman vectorialmente en recepción.

TRANSMISIÓN EN EL ESPACIO LIBRE.

De acuerdo con el IRE (Institute of Radio Engineers), la transmisión en el espacio libre es la radiación electromagnética sobre una línea recta en el vacío o en una atmósfera ideal, siendo suficientemente removidos todos los obstáculos que pudieran afectar dicha onda de cualquier manera. En este caso, solo la onda directa propagada desde una antena transmisora será efectiva en la antena receptora, y la intensidad de campo presente en cualquier punto del espacio es llamada comúnmente intensidad en el espacio libre, E_0 , el cual es un estándar conveniente para ser referenciado.

Las fluctuaciones de ondas de alta frecuencia propagándose por la parte baja de la atmósfera pueden, ocasionalmente, elevarse respecto al valor de intensidad de campo en el espacio libre, pero el promedio de los valores debido a tales fluctuaciones siempre se encontrará por debajo del valor definido.

La potencia recibida, debida a la intensidad de campo en el espacio libre depende solamente de la cantidad de potencia transmitida y de la distancia sobre la cual se propaga la onda, y está dada por la siguiente expresión:

$$P_r = P_t G_t G_r \lambda^2 / (4 \pi d)^2$$

donde:

P_r , P_t = Potencia en las terminales de la antena receptora y transmisora. [watts]

G_r , G_t = Ganancia de potencia de las antenas receptora y transmisora, respectivamente.

d = Distancia entre las antenas [metros]

λ = Longitud de onda [metros]

En la fórmula anterior se presuponen orientadas correctamente ambas antenas para máxima potencia, y la antena receptora correctamente acoplada a su equipo receptor.

Patrón de Radiación.

Se emplea para determinar la dirección de máxima radiación o máxima respuesta. El patrón de una antena transmisora es un diagrama que indica la intensidad de campo radiado, en todas direcciones, bajo las condiciones reales de operación. En el caso de una antena receptora indica la respuesta de la antena a una señal de intensidad uniforme que llega desde todas direcciones. Tales patrones se pueden trazar en términos de intensidad de campo [volt / metro], o en términos de potencia [watt / metro]. Pueden mostrar directividades relativas basadas en porcentajes de la potencia y no en la magnitud absoluta del campo, estos son patrones llamados relativos.

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

Un medio que no es un dieléctrico perfecto se denomina disipativo. Cuando la onda electromagnética se propaga en un medio disipativo, ocurren pérdidas por calor, que se agregan a la atenuación de la energía de la onda. En la atmósfera terrestre y en frecuencias arriba de unos 10 GHz, la precipitación y el vapor de agua son dos factores que pueden provocar una atenuación significativa de la energía, debida a la absorción.

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA.

Es el valor de la oposición total al flujo de energía de campo electromagnético, que ofrece un medio de transmisión. Se mide en Ohms. La impedancia característica del espacio libre está dada por:

$$Z_0 = \text{raíz} (\mu_0 / \epsilon_0) = 377 \text{ Ohms.}$$

μ_0 y ϵ_0 = permeabilidad y constante dieléctrica del vacío

La impedancia característica del espacio libre también expresa la relación entre los campos eléctrico y magnético asociados, esto es:

$$Z_0 = E / H = 377 \text{ Ohms.}$$

Esto es, para ondas electromagnéticas en una atmósfera normal sin obstrucciones, el campo eléctrico en Volts / metro en cualquier punto del espacio es numéricamente, 377 veces mayor que el valor del campo magnético en Amperes / metro asociado, en el mismo punto del espacio.

VALOR Q

Es la figura de mérito, que debe tener un valor numérico grande para un medio de ondas eficiente. Está dada por:

$$Q = \omega \epsilon / \sigma$$

ω = frecuencia empleada, en radianes / seg. = 2π veces la frecuencia en hertz

ϵ = constante dieléctrica del medio

σ = conductividad del medio.

La conductividad del aire seco es cero, luego entonces el valor Q de la atmósfera es infinito y por lo tanto se pueden propagar ondas de cualquier frecuencia. El término $\omega \epsilon$ es una medida de la corriente de desplazamiento, o la corriente perpendicular a la dirección de propagación, expresando la tasa de expansión y contracción a la cual cambia el campo. El término σ es una medida de la corriente de conducción, moviéndose en la dirección de propagación, la cual puede o no ser absorbida en forma de calor.

En los medios de ondas en general, existen las corrientes de desplazamiento y de conducción en virtud de un campo electromagnético. En un medio dieléctrico puro solo están presentes

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

- - -

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

transmitida; su dirección es la misma de propagación de la onda, ya que es perpendicular a ambos campos. El flujo de potencia de Poynting, $p = EH$ representa la cantidad absoluta de energía que cruza un área de un metro cuadrado cada segundo.

La expresión

$$P = E^2 / Z_0 = E^2 / 377$$

Representa la densidad de energía por cada metro cuadrado en cualquier punto del espacio entre las antenas tx y rx.

TRANSMISIÓN ATMOSFÉRICA.

La onda electromagnética que llega a la antena receptora se puede propagar en la forma de cualquiera de tres ondas diferentes, o por una combinación de ellas. Estas son:

- Onda de tierra (ground wave), que se propaga justo sobre el terreno.
- Onda ionosférica (sky wave), por medio de la ionosfera
- Onda troposférica, propagada por reflexión desde un lugar con un cambio abrupto en la constante dieléctrica, o su gradiente en la troposfera.

Onda de Tierra.

La onda de tierra incluye todas las ondas de radio excepto las de tx ionosférica o troposférica. Se logra casi siempre una mejor transmisión sobre el agua que sobre el terreno, y sobre suelos con alta conductividad en comparación con aquellos de conductividad baja. Dicha onda también puede ser refractada a causa de variaciones en la constante dieléctrica (la cual determina el índice de refracción) de la troposfera, incluyendo una condición conocida como ducto de superficie.

A frecuencias por debajo de unos 3 MHz se puede obtener propagación de la onda de tierra hasta unas 200 millas a causa de la difracción de la onda debajo del horizonte de radio. A frecuencias más altas prevalece más el efecto de la refracción que el de la difracción en cuanto a la propagación de la onda de tierra más allá del horizonte de la Tierra.

Onda ionosférica.

Puede ser empleada para comunicación a mayores distancias pues se puede reflejar en la ionosfera, retornando así a la Tierra hacia puntos remotos de la fuente transmisora. Generalmente mientras mayor es la frecuencia, menor es la reflexión en la ionosfera, y a frecuencias sobre 100 MHz solo una parte extremadamente pequeña de la señal es, si acaso, reflejada. El retorno en la ionosfera para tales frecuencias no ocurre a menudo y cuando sucede es errático en su naturaleza. Las frecuencias arriba de 100 MHz son afectadas, sin embargo, por la troposfera.

TROPOSFERA.

Se extiende por encima de la superficie de la Tierra hasta unas 6 millas y contiene casi todas las condiciones y cambios atmosféricos conocidos como "clima". Las capas ionizadas de aire ocurren raramente en la parte superior de la Troposfera y no ocurren en absoluto en la parte inferior. Por esta razón, las ondas devueltas desde la troposfera son casi siempre el resultado de cambios en las características atmosféricas, más bien que reflexión desde capas ionizadas. Una fuente de reflexión en la troposfera es una masa de aire con constante dieléctrica muy diferente de la del aire circundante. Las ondas así reflejadas se denominan ondas troposféricas

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**

Cartagena99

trayectoria. En este punto el rayo comienza a viajar de un medio más denso a uno más ligero, prosiguiendo con la trayectoria mostrada. El resultado es una trayectoria total curvada hacia abajo entre las antenas transmisora y receptora.

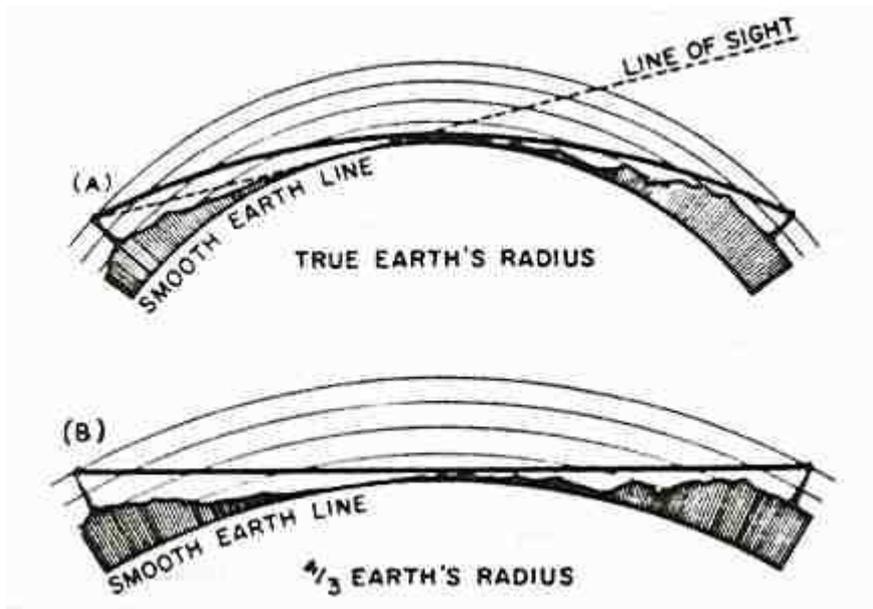


Figura 8. Refracción en una Atmósfera Estándar.

En la figura 8 se puede observar que tanto la trayectoria del rayo como la superficie de la Tierra son curvas. Los cálculos basados en tales curvas se pueden simplificar multiplicando el radio de la Tierra por una constante que provoque que el rayo de radio aparezca como una línea recta, como aparece en la figura 8 B.

Esta constante "k" depende de la tasa de cambio del índice de refracción del aire con la altura, el cual a su vez, depende de las condiciones del clima. El símbolo k varía entre 0.8 y 3.0; el valor correspondiente a las condiciones normalmente existentes en la atmósfera es de $4/3$.

La trayectoria real por la cual se propagan las ondas de radio se denomina trayectoria de radio, y el horizonte de radio es el punto en el cual dicha trayectoria es tangente a la Tierra.

Se ha encontrado que los valores de horizontes de radio y la atenuación en la trayectoria calculados basándose en $4/3$ veces el radio verdadero de la Tierra, concuerdan con los valores determinados por mediciones de intensidad de campo, y la mayoría de las expresiones de cálculo y nomogramas se basan en este radio.

Cartagena99

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70