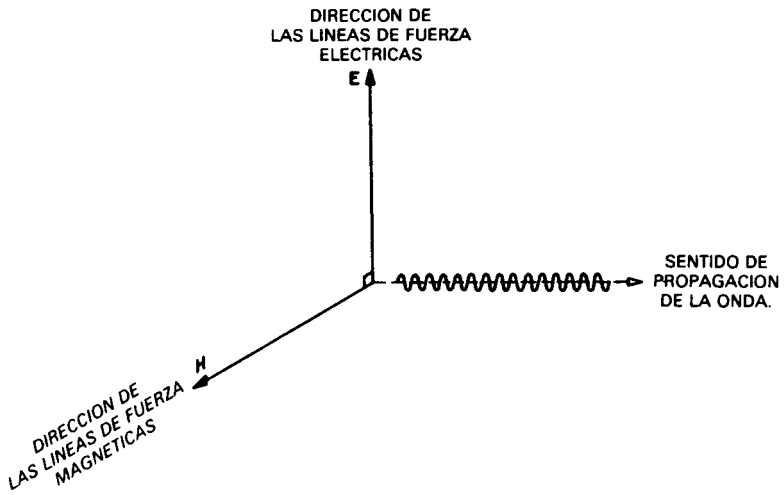
Capítulo 1.- **PROPAGACIÓN**

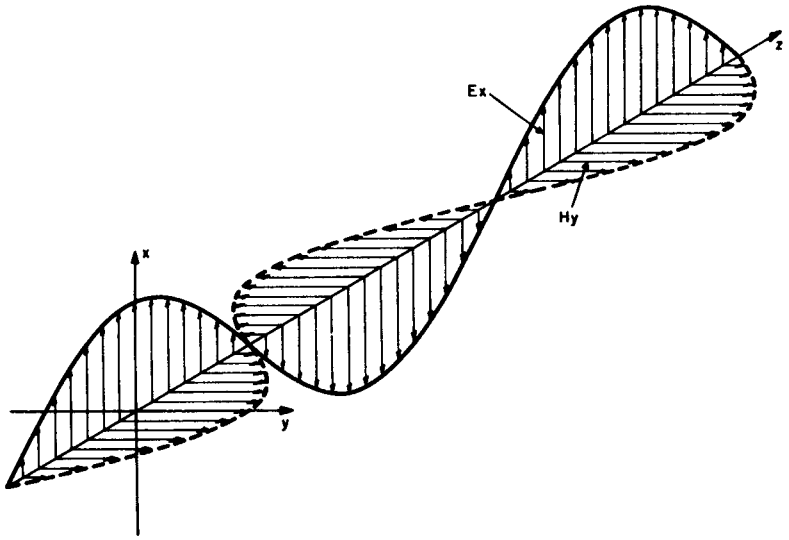
1.1.- ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Una onda electromagnética es producida por la existencia de un campo eléctrico y otro magnético perpendiculares entre si y variables en el tiempo. Las ondas electromagnéticas se desplazan a la velocidad de las luz (3.10^8 m/s), en la dirección perpendicular al plano formado por ambos campos.

Un campo es una región del espacio en la que se manifiesta la acción de determinadas fuerzas: eléctricas, en un campo eléctrico, y magnéticas, en uno magnético.



Si consideramos que la variación de dichos campos es senoidal, en el sistema de ejes cartesianos (x,y,z), el campo eléctrico *Ex* varía de forma senoidal en el plano *x,z*, el campo magnético *Hy* varía de igual forma en el plano *y,z,* y la onda se desplaza en la dirección del eje *z*.



Los campos eléctrico y magnético se anulan en ciertos momentos y son máximos en otros; cuando una onda se propaga por el espacio, los campos eléctrico y magnético se desplazan en el sentido del eje *z*, formando un plano que se denomina **frente de ondas**.

1.2.- PROPIEDADES ÓPTICAS DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

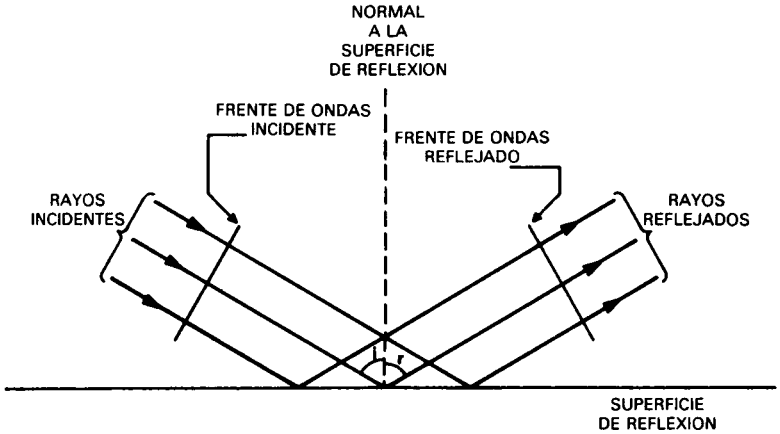
Una onda electromagnética se propaga en línea recta en el seno de un medio homogéneo; su velocidad de propagación en el vacío es de 3.10^8 m/s, por tanto en un medio cualquiera diferente que tenga un índice de refracción *n* se propagará a la velocidad de:

$$v = \frac{c}{n} \quad \text{(m/s)}$$

En la atmósfera terrestre n es muy próximo a la unidad y podemos afirmar que la velocidad de propagación de una onda es constante e igual a *c*.

La propagación de una onda electromagnética puede verse sometida a efectos de reflexión, refracción y difracción, cumpliendo en estos casos las leyes generales de la óptica.

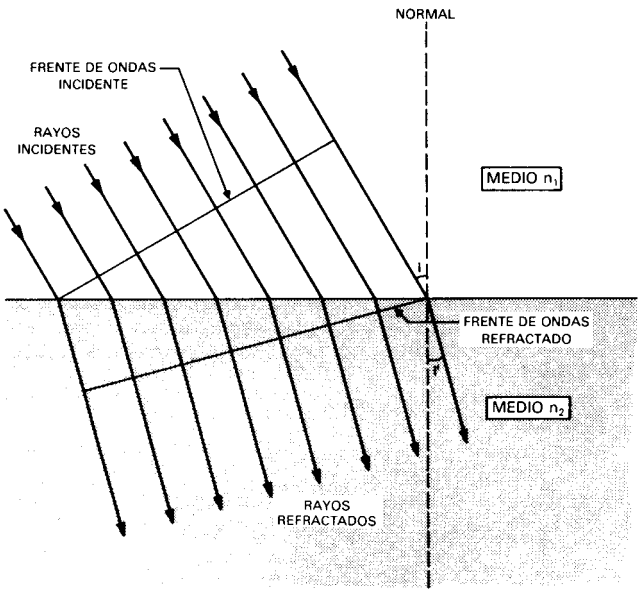
Existe reflexión cuando una onda incide sobre una superficie metálica, el suelo o cualquier tipo de obstáculo. En este caso, se cumple que el ángulo de incidencia de la onda con la normal a la superficie reflectora, es igual al ángulo de reflexión de la onda con la normal.



Existirá refracción cuando la onda pase de un medio a otro que tenga un índice de refracción de valor parecido al primero.

Así, la onda electromagnética se refractará cuando ésta pase del aire al agua o atraviese diferentes capas atmosféricas que tengan distinto grado de humedad.

Siempre que exista una refracción de la onda electromagnética, tendremos una reflexión de energía sobre la superficie de separación, por lo cual, la energía de la onda refractada será menor que la de la incidente.

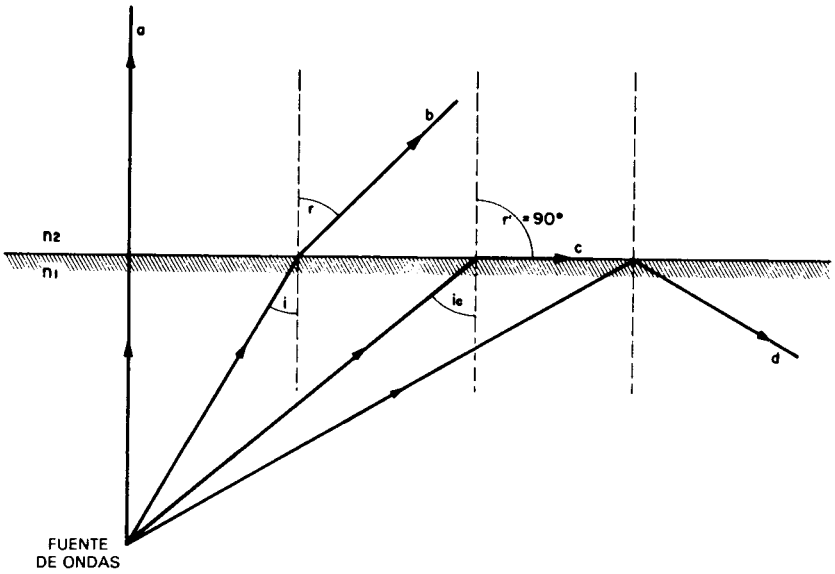


La ley de Snell rige los fenómenos de refracción. Esta establece que la relación entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción es igual a la relación inversa de los índices de refracción de ambos medios.

$$\frac{sen\ i}{sen\ i'} = \frac{n_2}{n_1}$$

Por lo tanto el ángulo de refracción es inferior al de incidencia cuando se pasa de un medio con un índice de refracción menor a otro de índice mayor. Por ejemplo cuando una onda procedente del aire (n = 1) penetra en el agua (n = 1,33)

Cuando n_1 es mayor que n_2, el ángulo de refracción es superior al de incidencia, por tanto existirá un ángulo límite de incidencia, para el cual la refracción será paralela a la superficie de separación de ambos medios. Cuando el ángulo de incidencia sea mayor que este ángulo límite, ya no existirá el fenómeno de refracción, sino que tendremos una reflexión total.



En figura anterior se presentan varios casos posibles de refracción y reflexión en función del ángulo de incidencia.

➢ onda incidente perpendicular a la superficie de separación (a)

➢ onda incidente cuyo ángulo de incidencia es:

inferior al ángulo límite (b)

igual al ángulo límite (c)

superior al ángulo límite (d)

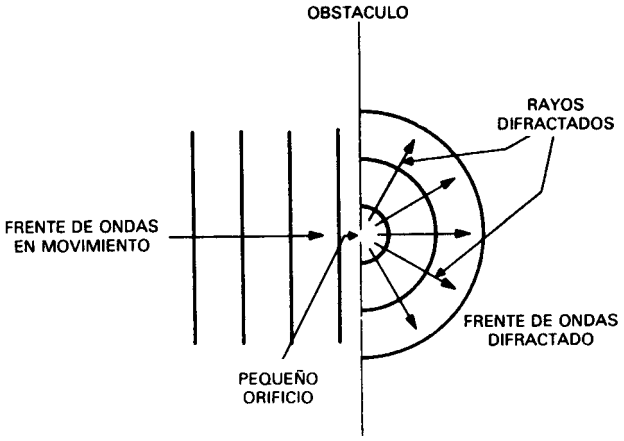
Por ejemplo, para el caso de una onda incidente pasa del agua al aire, el valor del ángulo límite será:

$$\frac{sen\ i_c}{sen\ 90} = \frac{1}{1{,}33} = 0{,}75$$

$$sen\ i_c = 0{,}75$$

Por tanto, el valor del ángulo límite será de $i_c = 48^o$

Existirá difracción cuando un frente de onda incida sobre un obstáculo en el que exista un pequeño orificio. Podríamos esperar que la onda que atravesara el orificio continuase en línea recta, pero de hecho la onda se dispersa en todas las direcciones como se muestra en la siguiente figura.



Huygens explicó el fenómeno de difracción deduciendo que cada punto de una onda electromagnética podía ser considerado como una fuente de ondas que se propagaban en todas direcciones; que un frente de ondas se desplace en una sola dirección, se debe a que todas las fuentes secundarias se anulan entre sí, excepto en la dirección de la onda determinada por la fuente original.

Otro fenómeno asociado con los fenómenos ondulatorios, es la interferencia que se produce cuando dos fuentes idénticas radian en un determinado entorno. Debido a la variación senoidal de los campos eléctrico y magnético, la suma resultante de dos ondas puede ser mayor, menor e incluso nula, dependiendo de la fase con que dicha suma se produzca. De aquí que podemos tener zonas donde la onda pueda desaparecer y otras en las cuales su valor se vea reforzado. La

existencia de estas zonas o franjas tendrá su importancia en la propagación de las ondas de alta frecuencia.

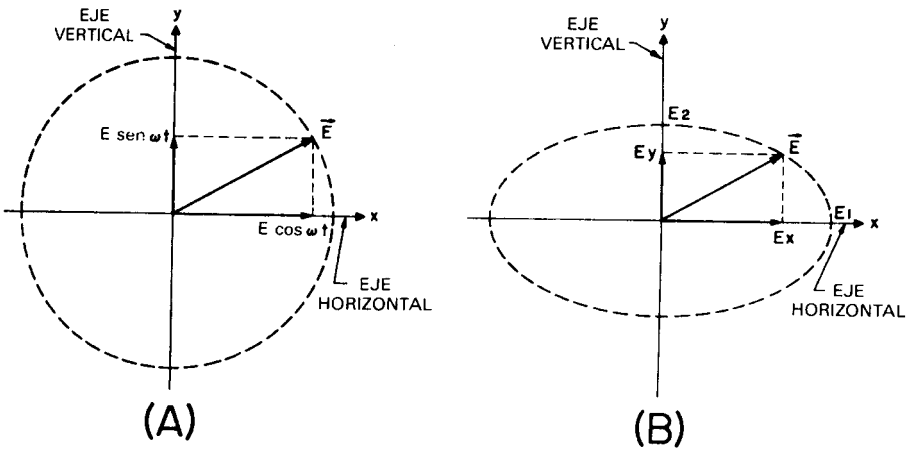
1.3.- CARACTERÍSTICAS DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Una onda electromagnética se caracteriza por su potencia, su polarización y su frecuencia.

a) **Potencia de radiación:**
Una onda electromagnética es una forma de energía, energía de radiación, que será mayor cuanto mayores sean las intensidades de los campos eléctrico y magnético. Es normal hablar de dos conceptos, potencia radiada por una fuente y densidad de potencia existente alrededor de la misma.

b) Polarización de una onda:
Las ondas electromagnéticas están polarizadas de forma que al propagarse las oscilaciones de los campos eléctrico y magnéticos , se mantienen en un plano determinado para cada uno. La polarización viene dada por la posición del plano de variación del campo eléctrico. Algunas transmisiones se producen con polarización horizontal: el campo eléctrico varía en un plano paralelo al suelo; otras están polarizadas verticalmente e incluso nos podemos encontrar con ondas polarizadas de forma circular o elíptica. Estos dos últimos modos de polarización se producen cuando el campo eléctrico varía alternativamente en los planos horizontal y vertical.

Para obtener una polarización circular sería necesario hacer variar un campo eléctrico de intensidad constante, como se puede apreciar en la siguiente figura:



Las componentes horizontal y vertical del campo eléctrico *E* son respectivamente:

$$Ex = E \cos wt$$
$$Ey = E \operatorname{sen} wt$$

siendo *w* la pulsación del campo eléctrico.

Del mismo modo, las componentes horizontal y vertical de una onda con polarización elíptica serían:

$$E_X = E_l \cos w\, t$$

$$E_Y = E_2 \operatorname{sen} w\, t$$

La resultante de los campos horizontal y vertical E_X y E_Y es una elipse de ejes E_1 y E_2, cuya expresión matemática, en forma canónica, viene dada por:

$$\frac{Ex^2}{E_1{}^2} + \frac{Ey^2}{E_2{}^2} = 1$$

En el caso de una polarización circular, las componentes vertical y horizontal del campo eléctrico constituyen un círculo de radio E, cuya expresión matemática es:

$$E_X^2 + E_Y^2 = E^2$$

La reflexión de una onda con polarización circular o elíptica sobre objetos esféricos o gotas de agua se produce con un cambio en el sentido de giro de la polarización; esto permite la localización mediante ciertas técnicas de radar de algunos objetos reflectantes sumergidos en niebla o lluvia (un avión o un barco en el agua).

c) Frecuencia y longitud de onda:

Las ondas electromagnéticas se designan por su frecuencia o su longitud de onda.
La frecuencia de una onda electromagnética es la frecuencia de los campos eléctrico y magnético que la componen, es decir, el número de ciclos llevados a cabo en un segundo por el campo eléctrico o magnético.

La longitud de onda λ se define como el camino recorrido por una onda después de un tiempo T igual al período de oscilación. Como las ondas electromagnéticas se propagan con una velocidad constante e igual a c, la longitud de onda será:

$$\lambda = c\, T$$

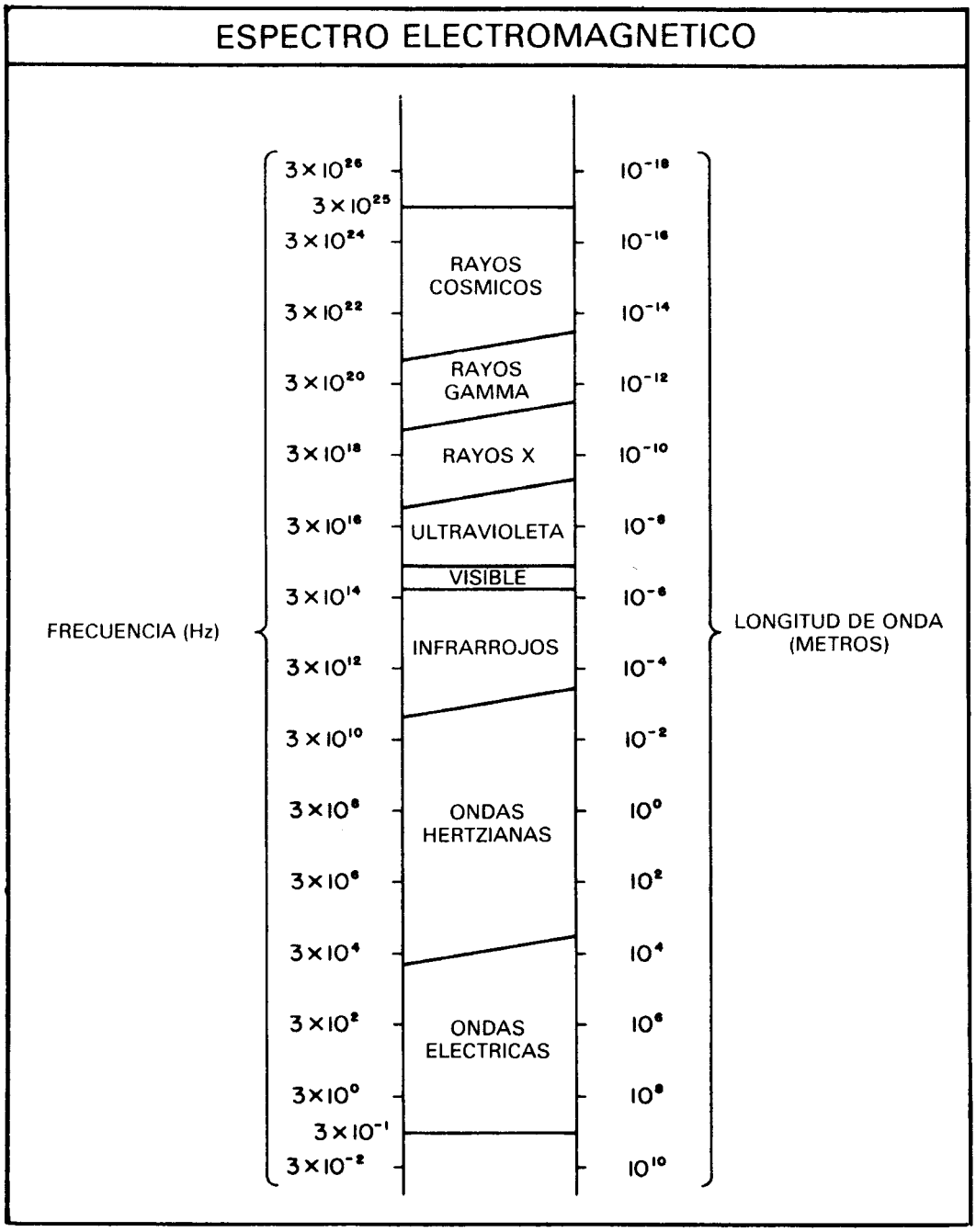
Siendo la frecuencia el número de oscilaciones por segundo, tendremos:

$$f = 1 / T$$

$$\lambda = c / f$$

1.4.- ESPECTRO DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

El espectro se encuentra dividido en grupos atendiendo a la frecuencia o longitud de onda.



ESPECTRO DE LAS ONDAS HERTZIANAS				
FRECUENCIA	**LONGITUD DE ONDA**	**DENOMINACION METRICA**	**DENOMINACION NORMAL**	**ABREVIATURA INTERNACIONAL**
10 KHz a 30 KHz	30 Km a 10 Km	ONDAS MIRIAMETRICAS	FRECUENCIAS MUY BAJAS Very Low Frequencies	VLF
30 KHz a 300 KHz	10 Km a 1 Km	ONDAS KILOMETRICAS	FRECUENCIAS BAJAS Low Frequencies	LF
300 KHz a 3 MHz	1 Km a 100 m	ONDAS HECTOMETRICAS	FRECUENCIAS MEDIAS Medium Frequencies	MF
3 MHz a 30 MHz	100 m a 10 m	ONDAS DECAMETRICAS	FRECUENCIAS ALTAS High Frequencies	HF
30 MHz a 300 MHz	10 m a 1 m	ONDAS METRICAS	FRECUENCIAS MUY ALTAS Very High Frequencies	VHF
300 MHz a 3 GHz	1 m a 10 cm	ONDAS DECIMETRICAS	FRECUENCIAS ULTRA ALTAS Ultra High Frequencies	UHF
3 GHz a 30 GHz	10 cm a 1 cm	ONDAS CENTIMETRICAS	HIPERFRECUENCIAS Super High Frequencies	SHF
30 GHz a 300 GHz	1 cm a 1 mm	ONDAS MILIMETRICAS	Frecuencias Extremadamente Altas Extremely High Frequencies	EHF

1.5.- MODALIDADES DE PROPAGACIÓN PARA LAS DIFERENTES BANDAS DE FRECUENCIA

Banda	***Modo de propagación***	***Alcance típico***	***Tiempo de disponibilidad***	***Utilización típica***
VLF	Guía ondas tierra ionosfera		Todas horas	Radionavegación. Servicio móvil marítimo.
LF	Onda de superficie	>1.000 km (sobre agua)	Todas horas	Frecuencias patrón
MF	Onda de superficie Onda ionosférica	Distancias cortas (<100 km) Distancias largas (> 500 km, sujeta a desvanecimiento)	Todas horas Noche	Radiodifusión Radiodifusión
HF	Onda ionosférica (3-8 Mhz) (3-12 Mhz) (6-25 Mhz) Onda superficie (3-30 Mhz)	<300 km >500 km >500 km Distancias cortas (<100 km)	Día Noche Día Todas horas	Servicio fijo. Servicios móviles. Radiodifusión
VHF	Onda espacial (troposférica) Dispersión ionosférica (f < 50 MHz)	Visión directa (50 km) 2.000 km	Todas horas	Servicios móviles. Radiodifusión sonora y TV. Radionavegación. Servicio fijo
UHF	Onda espacial (troposférica) Dispersión troposférica (f > 500 MHz)	Visión directa (40 km) 600 km		Servicio fijo (Radioenlaces). Servicios móviles. Radiodifusión TV. Radiolocalización. Servicio fijo.
SHF	Onda espacial (troposférica)	Visión directa (40 km)		Servicio fijo (Radioenlaces terrenales). Telecomunicación y radiodifusión por satélite. Radionavegación

1.6.- RUIDOS EN LAS COMUNICACIONES

Las emisiones electromagnéticas van siempre acompañadas de parásitos o ruidos que producen perturbaciones sobre las mismas. De hecho, la presencia de estos ruidos puede originar serios problemas en las comunicaciones.

Los ruidos electromagnéticos son ondas cuya frecuencia e incluso el momento de su aparición son impredecibles. Se mezclan con las emisiones electromagnéticas limitando considerablemente su alcance debido a que si bien su potencia es generalmente débil, cuando la señal transmitida se ha atenuado (recordemos que la potencia disminuye con la distancia) hasta alcanzar órdenes de magnitud similares a los de la potencia del ruido, éste enmascara la señal haciendo imposible su detección.

El origen de los ruidos electromagnéticos es diverso: cósmico, atmosférico, industrial. Existen además otros tipos de ruidos presentes en todo tipo de circuito eléctrico, cuyas frecuencias y amplitudes pueden ser muy variables.

Los ruidos cósmicos son radiaciones provenientes de diferentes estrellas. El sol es un emisor de ruidos nada despreciables, sobre todo durante las tormentas solares, cuya duración puede variar entre algunos segundos y algunos días.

Los ruidos atmosféricos provienen de las tormentas eléctricas. La media de tormentas que se producen sobre la tierra es del orden de cien por segundo y la presencia de estos ruidos dependerá de la estación del año, y del lugar geográfico. Estos ruidos producen perturbaciones especialmente en las ondas corta y media; su influencia es insignificante por encima de los 50 MHz.

Los ruidos de origen industrial son debidos principalmente al encendido de automóviles, fluorescentes, motores eléctricos de gran potencia. Su frecuencia está por debajo de las empleadas por los radares.

Una de las hipótesis generalmente aceptadas a fin de facilitar los cálculos concernientes al diseño de un receptor es la existencia de un ruido blanco. Un ruido blanco es aquel en el que cualquier frecuencia tiene idéntica probabilidad de aparición, y en el que, además, todas las frecuencias tienen igual amplitud.

A las limitaciones creadas por los ruidos se añade otro inconveniente, la absorción atmosférica. Por encima de los 10 GHz, la atmósfera absorbe ciertas frecuencias porque la energía electromagnética se transfiere a los átomos y moléculas de la atmósfera en forma de vibraciones y ligero calentamiento.

1.7.- EFECTOS DE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS

Una radiación electromagnética puede ejercer diversas influencias sobre el organismo humano en función de la frecuencia y de la potencia emitida, así como del tiempo de exposición del organismo a dicha radiación.

Los rayos luminosos excitan la retina del ojo provocando una sensación que se transmite por

los nervios ópticos al cerebro en el cual es convertida en una imagen. El calor provoca la emisión de rayos infrarrojos. Debido a esta propiedad, es posible detectar la presencia de organismos vivos en la oscuridad. La imagen sobre una película sensible a los rayos infrarrojos varía en intensidad según la temperatura de los diferentes objetos.

Los rayos ultravioleta broncean la piel y son creados artificialmente con lámparas solares.

La energía transportada por una onda es proporcional a la frecuencia. Los rayos X son muy penetrantes y se utilizan en radiografía. Los rayos cósmicos presentan un peligro nada despreciable para las naves espaciales. Se utilizan ondas de SHF, que son mucho menos penetrantes, en los hornos de microondas para recalentar los alimentos.

Una radiación electromagnética potente de alta frecuencia puede perjudicar nuestro organismo si está sometido a la misma durante un tiempo prolongado. Las radiaciones aumentan la temperatura de las células epidérmicas y nuestro organismo reacciona provocando una circulación sanguínea más intensa para disminuir su temperatura.

Existen unas tablas en las que se determinan las normas óptimas de energía radiada en los centros emisores y estaciones de radar. De forma general una densidad de potencia de 1 mW/m^2 se considera inofensiva, aún estando sometido a la misma de forma continua. Sin embargo, una densidad de potencia de 10 mW/m^2 se puede soportar cuando el tiempo de exposición es muy corto.

La presencia de una radiación electromagnética potente puede originar la explosión de la gasolina cuando está en contacto con el aire, por eso se recomienda no efectuar ninguna transmisión desde un vehículo cuando se está repostando.

Las radiaciones de gran potencia podrían introducir una corriente suficientemente elevada para disparar un detonador eléctrico.

2.- PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS DE RADIO (RADIOPROPAGACION)

Las ondas de radio se propagan desde una antena transmisora a una receptora de diversas formas en función de su frecuencia: siguiendo la superficie terrestre, a través de la atmósfera o por reflexiones sobre medios reflectores naturales o artificiales.

La propagación de las ondas a través de los medios reales puede estudiarse a partir de las ecuaciones de Maxwell, analizando las soluciones compatibles con las condiciones de contorno que imponga el medio. Sin embargo, tal estudio riguroso es a veces impracticable y en todo caso muy complejo, por lo que para la predicción de pérdidas de propagación se utilizan modelos simplificados basados en la óptica geométrica. Cuando tales modelos dejan de ser válidos se acude a expresiones empíricas o curvas de propagación normalizadas obtenidas a partir de mediciones.

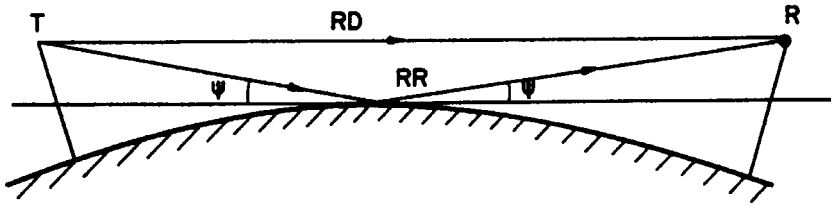
Las características de propagación de una onda dependen de la situación del trayecto de propagación respecto a los obstáculos (suelo, colinas, edificios, vegetación), de las características eléctricas del terreno (constante dieléctrica, conductividad), de propiedades físicas del medio (intensidad de precipitaciones, absorción por gases y vapores) y de la frecuencia y polarización

de la onda.

Se estudiarán a continuación los diferentes modos de propagación en función de las características eléctricas del medio y de la frecuencia y se presentarán métodos básicos de predicción de la pérdida básica de propagación.

2.1.- INFLUENCIA DEL TERRENO

Cuando el transmisor y el receptor están situados sobre la superficie terrestre y existe visibilidad directa (mutua) entre ambos, se modela la propagación mediante un rayo directo y otro reflejado en el suelo



Dependiendo de la naturaleza del terreno, la frecuencia y la polarización de la onda, puede haber también una componente de onda superficie.

La expresión general del campo recibido, en estas condiciones viene dada mediante la llamada «ecuación general de la propagación»:

$$e = e_0 [1 + R \cdot exp(-j\Delta) + (1 - R) \cdot A \cdot exp(-j\Delta)]$$

donde:

e: intensidad de campo en recepción en las condiciones reales.

e_0: intensidad de campo en condiciones de espacio libre.

El primer término del paréntesis representa la componente de onda directa, el segundo la onda reflejada en el suelo y el tercero la onda superficie; Δ es el ángulo de desfasamiento entre la componente directa y reflejada, R el coeficiente de reflexión en el suelo y A un término atenuación de la onda de superficie.

Los términos del paréntesis son complejos, por lo que también lo es el campo recibido "e". La atenuación en exceso será:

$$L_{ex} = 20\log\frac{e_0}{|e|} = 20\log\frac{1}{\left|1+\left[R+\left(1-R\right)\cdot A\right]\exp\left(-j\Delta\right)\right|}$$

El ángulo Δ es:

$$\Delta = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda}$$

donde Δl es la diferencia de recorridos entre el rayo reflejado y el rayo directo y λ, la longitud de onda.

El coeficiente de reflexión complejo R, se especifica en términos de su módulo y fase

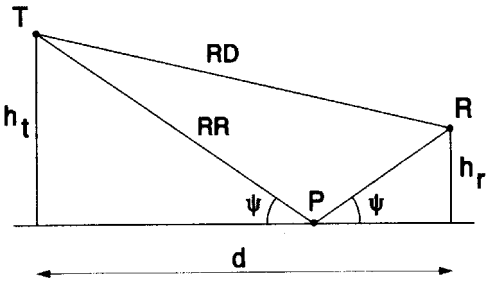
$$R = |R| e^{-j\beta}$$

Tanto R como β son función de la frecuencia, polarización, características eléctricas del suelo y ángulo de incidencia ψ. Para distancias grandes y alturas de antenas reducidas, el ángulo de incidencia ψ es muy pequeño, en cuyo caso $\beta \approx \pi$ y $R = -1$. Como, además, los recorridos de los rayos directo y reflejado son sensiblemente iguales, $\Delta l = \Delta = 0$, por lo que estos rayos se cancelan entre sí, resultando que la componente del campo es la debida a la onda de superficie. De hecho la propagación por onda de superficie es una modalidad útil cuando las alturas de las antenas son pequeñas en comparación con la longitud de onda, están próximas al suelo y la frecuencia es inferior a unos 10 Mhz.

Para frecuencias mayores, en cambio, el factor de atenuación de la onda de superficie se hace muy grande. Ahora ya no se cancelan las componentes de la onda espacial y entonces adquiere importancia el efecto del rayo reflejado.

2.2.- MODELO DE PROPAGACIÓN DE TIERRA PLANA

El modelo de Tierra plana, es aplicable a distancias cortas (< 10 Km) para las que puede despreciarse la curvatura terrestre y con terreno liso.



En esta figura se representa un esquema de rayos correspondiente a este modelo cuyos parámetros asociados son: h_t y h_r alturas de las antenas transmisora y receptora, respectivamente; d, distancia y ψ, ángulo de incidencia.

Del dibujo anterior podemos deducir:

Punto de reflexión:

$$\frac{d_1}{h_1} = \frac{d}{h_1 + h_2} \qquad \frac{d_2}{h_2} = \frac{d}{h_1 + h_2}$$

Ángulo de incidencia:

$$\Psi = tg^{-1}\left(\frac{h_t + h_r}{d}\right)$$

Diferencia de trayectos

$$\Delta l = TPR - TR = \left[d^2 + (h_t + h_r)^2\right]^{1/2} - \left[d^2 + (h_t - h_r)^2\right]^{1/2} \approx \frac{2h_t h_r}{d}$$

Diferencia de fase

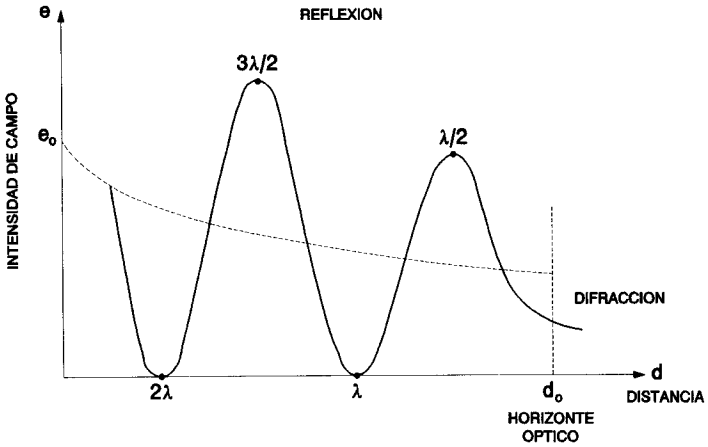
$$\Delta = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

El valor del campo "*e* " lo podremos obtener a partir de la ecuación general de la propagación expresada en el apartado anterior.

Si consideramos que no existe onda de superficie y que la altura de las antenas es despreciable frente a la distancia entre antenas con lo cual el ángulo de incidencia ψ se puede considerar despreciable resulta una expresión como la que sigue:

$$e = 2e_0 \cdot \left|sen\frac{\Delta}{2}\right| = 2e_0 \cdot \left|sen\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right|$$

Si nos fijamos en el valor del campo obtenido se puede observar que tenemos el valor del campo en el especio libre e_0 multiplicado por el módulo de una función seno, de esto se puede deducir que el campo *e* variará de forma oscilatoria alrededor del valor del campo en el espacio libre. Estas variaciones reflejan el hecho físico del refuerzo o cancelación del campo, según que las ondas incidente o reflejadas se sumen en concordancia o en oposición de fase. Este hecho se representa en la siguiente figura para un valor fijo de h_t y h_r y d variable.



Se observa gráficamente que a medida que aumenta la distancia el valor del campo va disminuyendo. Así para $d = 12h_t h_r/\lambda$, el valor de $e = e_0$ y para distancias superiores $e < e_0$. Con estas distancias es con las que se trabajan habitualmente por lo que el valor del campo, dado que el argumento del seno es muy pequeño, se puede expresar como sigue:

$$e = e_0 \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

Esta fórmula es la que habitualmente se utiliza para la propagación en condiciones de tierra plana.

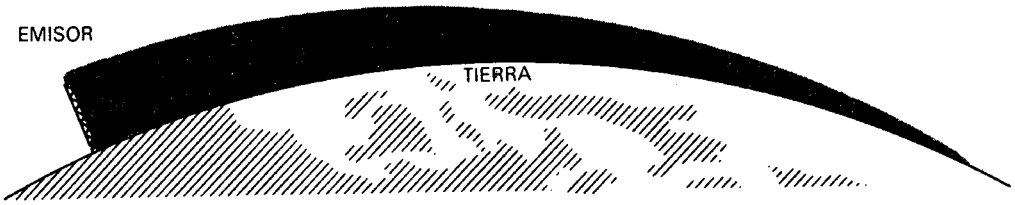
En estas condiciones las pérdidas básicas de propagación serán:

$$l_b = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \cdot \left(\frac{e_0}{e}\right)^2 = \frac{d^4}{(h_t h_r)^2}$$

2.3.- PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE

La onda de superficie es el modo de propagación dominante en frecuencias bajas, entre 10 KHz y 10 MHz, para alturas de antenas pequeñas, aunque habrá de ser tenida en cuenta hasta frecuencias de 150 Mhz para alturas de antenas pequeñas y polarización vertical. Además , entre 3 MHz y 10 MHz la propagación tiene lugar, también por onda ionosférica.

La onda de superficie solamente presenta alcances útiles con polarización vertical, ya que toda componente horizontal queda rápidamente absorbida por el suelo. El alcance depende de la naturaleza del suelo, de la frecuencia y, por supuesto, de la potencia de emisión.



La onda de superficie rodea los obstáculos y se va curvando por efecto de la difracción, que es muy intensa en estas frecuencias. Como consecuencia de ello, se ve poco afectada por la curvatura de la Tierra. El efecto favorable de la difracción para la propagación se reduce al aumentar la frecuencia. Como en ese caso también crecen las pérdidas, el alcance disminuye.

Un factor muy importante a tener en cuenta a la hora de calcular el alcance de las ondas de superficie es el tipo de suelo por el que se propaga. Concretamente lo que se debe tener en cuenta es la conductividad de éste. Para una misma potencia transmitida el alcance es mucho mayor sobre el mar que sobre terrenos áridos.

Para estas gamas de frecuencias y las alturas de antenas utilizadas, la ecuación de propagación se queda:

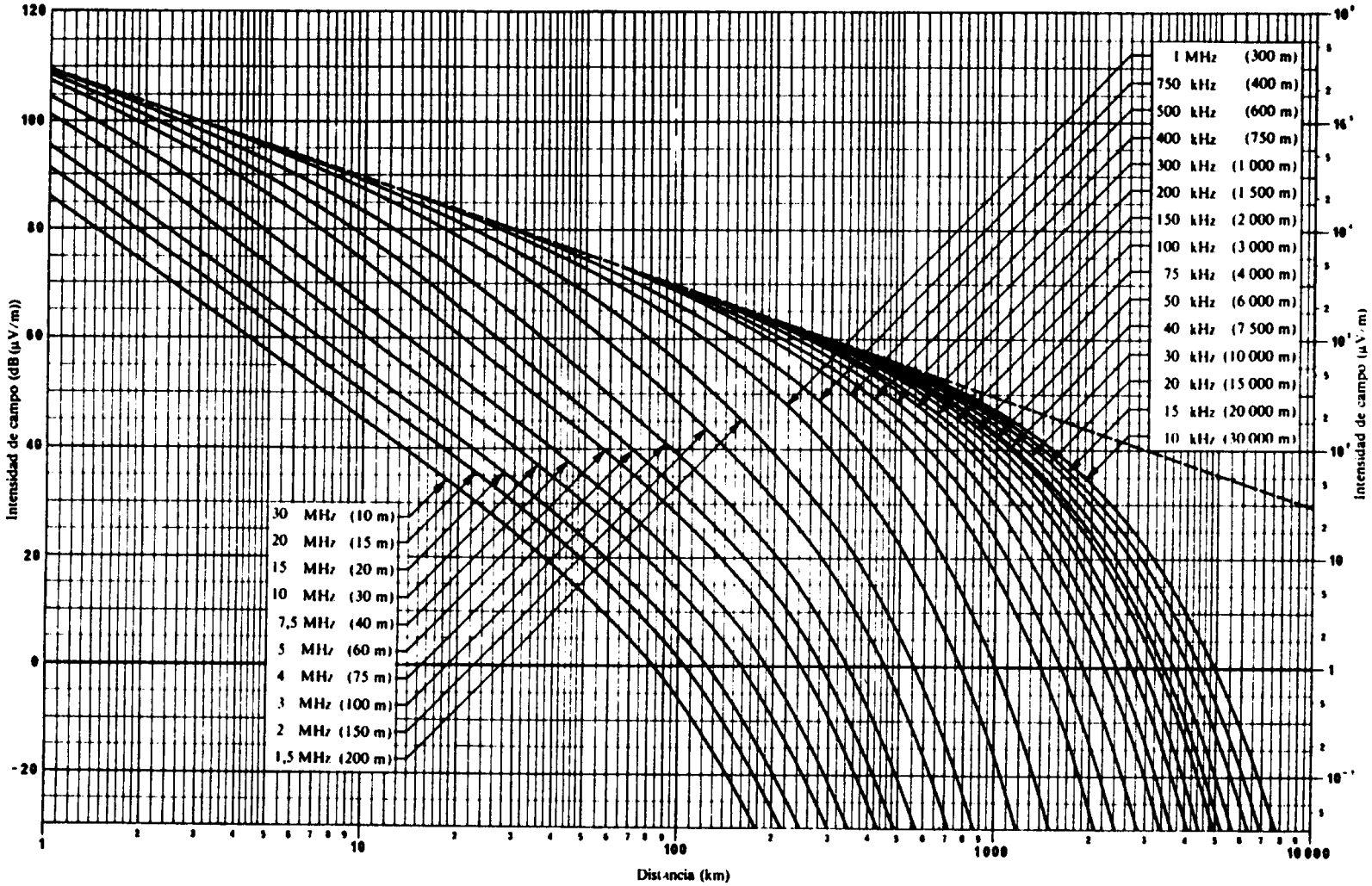
$$e = 2 \quad a\ eo$$

Siendo *a* factor de atenuación. El cálculo de *a* es una tarea compleja, por lo que en la práctica se facilitan curvas de variación de la intensidad de campo *E* (dBμ) en función de la distancia, para una potencia radiada normalizada y diferentes tipos de terreno, tomando como parámetro la frecuencia.

Como las antenas utilizadas en las radiocomunicaciones por onda de superficie son monopolos, las curvas se han normalizado para una PRA de 1 KW.

En la Rec. UIT-R 368, se ofrece una colección completa de curvas de propagación por onda de superficie. Cada familia de curvas está asociada a un tipo de suelo (ε_r, σ) determinado y cada curva de la familia corresponde a una frecuencia dada. Las curvas proporcionan la intensidad del campo en dBμ en función de la distancia.

En la siguiente figura se representa una de estas curvas.



Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra, $\sigma = 3 \times 10^{-2}$ S/m, $\varepsilon = 30$

– – – – Inversa de la distancia

Figura 3.6.

2.4.- TRANSMISIÓN POR REFLEXIÓN IONOSFÉRICA

La atmósfera que nos rodea es una masa gaseosa cuya densidad disminuye con la altura; se divide en tres capas principales: la troposfera, la estratosfera y la ionosfera.

La troposfera se extiende desde la superficie terrestre hasta una altura aproximada de 10 Km, y se caracteriza porque la temperatura disminuye con la altura; en esta capa es donde se producen las perturbaciones meteorológicas.

La estratosfera, con menos perturbaciones y con una temperatura uniforme, llega hasta unos 50 kilómetros.

La ionosfera es una región ionizada que se forma al incidir los rayos ultravioletas, α, β, γ procedentes del Sol, así como por las ondas cósmicas, sobre las moléculas de la alta atmósfera, produciéndose iones y electrones libres. Esta zona se extiende entre los 60 y 500 km sobre la superficie terrestre, aunque se concentra en varias capas en las cuales la ionización alcanza valores máximos relativos

La energía radiada por el Sol es suficiente para disociar en iones positivos y negativos las moléculas del aire, siendo esta ionización mucho más importante durante el día que durante la noche. Esta capa conductora sirve de espejo reflector a las ondas electromagnéticas que sobre ella inciden y puede considerarse como un repetidor pasivo para las ondas. Es un repetidor natural, invulnerable, accesible desde cualquier punto de la Tierra y de utilización gratuita.

En las bandas de frecuencias comprendidas entre 1,5 y 30 MHz y para distancias superiores a unos 100 km, puede producirse la propagación de ondas de radio mediante reflexiones sobre estas capas ionizadas que circundan la Tierra.

La propagación por reflexión ionosférica es un mecanismo selectivo en frecuencia. Por debajo de 1,5 MHz existe una intensa absorción de las ondas por la ionosfera, de manera que prácticamente apenas progresan. Por encima de 30 MHz, las ondas atraviesan la ionosfera y salen al espacio. Como la banda 3-30 MHz es la de ondas decamétricas, también se denomina a los enlaces que utilizan la propagación ionosférica sistemas de radiocomunicaciones por ondas decamétricas o, abreviadamente, sistemas HF.

Desde el descubrimiento de estas características de la ionosfera hasta nuestros días han surgido otras posibilidades derivadas del uso de repetidores artificiales activos, como los satélites, que permiten el logro de una mayor calidad en los enlaces radio. Sin embargo, los satélites son costosos, pueden ser neutralizados o destruidos y su capacidad de circuitos es limitada. Requieren, además, terminales terrenos especializados y onerosos.

Por el contrario, las radiocomunicaciones por ondas decamétricas son posibles con equipos terminales de bajo costo y potencias moderadas. Pueden establecerse radioenlaces entre cualesquiera puntos de la superficie terrestre, lo que es muy ventajoso en situaciones de emergencia en que no se dispone de infraestructura de red de telecomunicaciones.

La utilización de la ionosfera para las radiocomunicaciones tiene también algunos inconvenientes que afectan al diseño de los enlaces, entre los que cabe destacar:

- el carácter aleatorio de la estructura de la ionosfera y la densidad de ionización, que incide sobre las posibles frecuencias de trabajo;
- la presencia de ruido, sobre todo el de tipo natural, de gran intensidad en estas bandas;
- la existencia de elevados niveles de interferencia, debidos a los numerosos usuarios de las bandas, en especial las emisoras de radiodifusión que utilizan potencias elevadas;
- el desvanecimiento debido a la propagación multitrayecto;
- los valores reducidos de las frecuencias, que imposibilitan las transmisiones de banda ancha.

La variabilidad de la ionosfera tiene una influencia directa sobre la frecuencia de trabajo de un enlace, la cual ha de elegirse en función del comportamiento previsto de la ionosfera. Por ello, los equipos disponen de varias frecuencias que suelen cambiar con el tiempo para un enlace determinado.

En una circunstancia determinada de época, hora y lugar, la gama de frecuencias utilizables para un enlace ionosférico entre dos puntos está limitada por dos frecuencias: una mínima denominada LUF (Lowest Usable Frequency) y otra máxima, designada por MUF (Maximum Usable Frequency). Por debajo de la LUF, la absorción es tan intensa que la señal puede quedar enmascarada por el ruido y, por encima de la MUF, la onda atraviesa la ionosfera y no es reflejada a la tierra.

En consecuencia, la frecuencia de explotación de un circuito ionosférico deberá elegirse dentro del intervalo anterior y respetando las atribuciones del Reglamento de Radiocomunicaciones para el servicio en cuestión. La selección de las frecuencias de trabajo constituye uno de los aspectos más importantes para establecer circuitos de radiocomunicaciones ionosféricas fiables y eficientes.

La variabilidad de la ionosfera influye también en la pérdida de propagación, sobre todo a través de la absorción ionosférica, desviación y desenfoque del haz radioeléctrico, lo cual se traduce en una variabilidad de la señal recibida, por lo que habrá que formular especificaciones de fiabilidad de las frecuencias y circuitos.

El cálculo de los circuitos ionosféricos comprende el conjunto de actividades necesarias para obtener los parámetros de explotación. Se procede para ello siguiendo tres etapas básicas:

1) Predicción de frecuencias

En esta fase, se determinan las frecuencias máximas utilizables y la probabilidad de existencia de circuito ionosférico para las frecuencias disponibles, eligiéndose las más idóneas.

Estos cálculos se suelen hacer con una antelación de hasta 6 meses.
Se utilizan métodos manuales o informáticos basados en trayectografía de rayos y modelos de capas ionosféricas.

2) Cálculo de la pérdida básica de propagación

Se evalúa la pérdida teniendo presentes los diversos mecanismos disipativos. Como los sistemas HF están limitados por interferencia y ruido, el umbral de funcionamiento viene determinado por la intensidad de campo utilizable.

3) Cálculo de la relación señal/ruido (S/N)

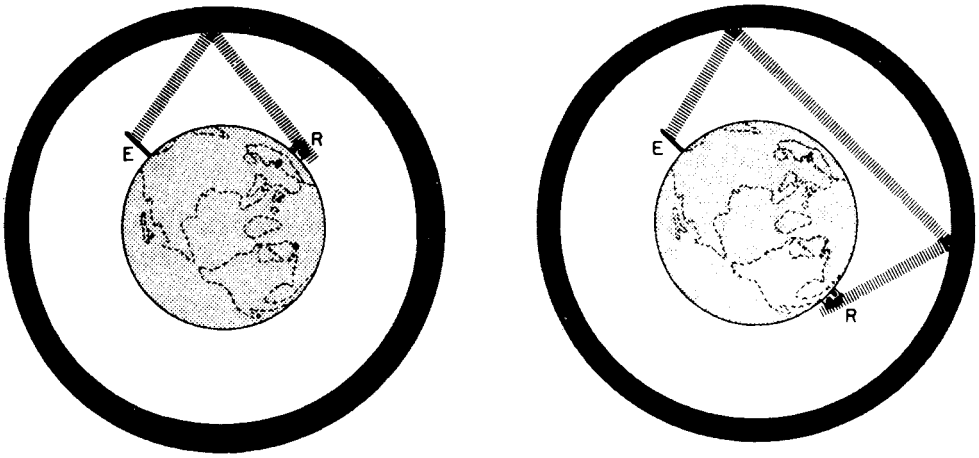
Se determina la S/N prevista y se compara con la S/N de explotación recomendada por el UIT-R.

4) Cálculo de la fiabilidad

Se evalúan la fiabilidad del propio circuito ionosférico y la probabilidad de que la S/N real supere el valor objetivo, combinándose para obtener una cifra de fiabilidad global.

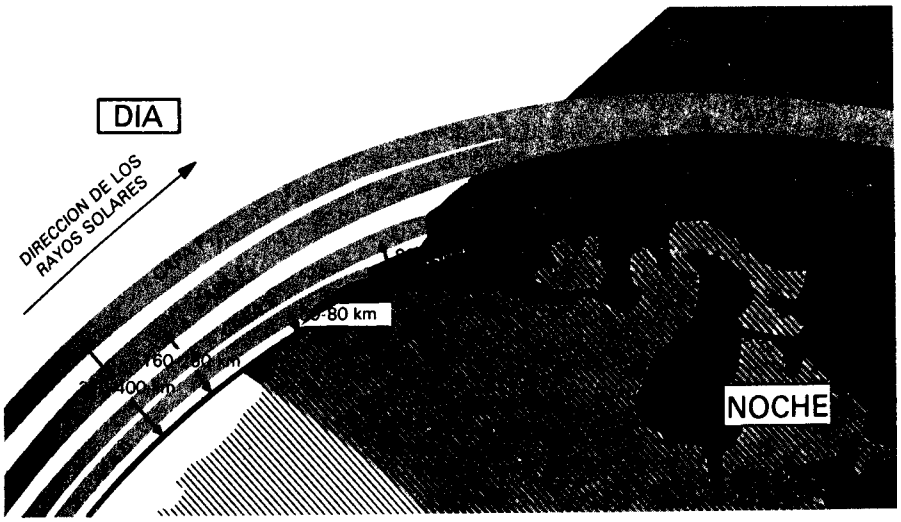
2.4.1.- CARACTERÍSTICAS DE LA IONOSFERA

La onda emitida hacia la ionosfera es reflejada por ésta, volviendo a la tierra a distancias considerables. Puede incluso originarse una doble reflexión, lo que aumenta considerablemente su alcance.



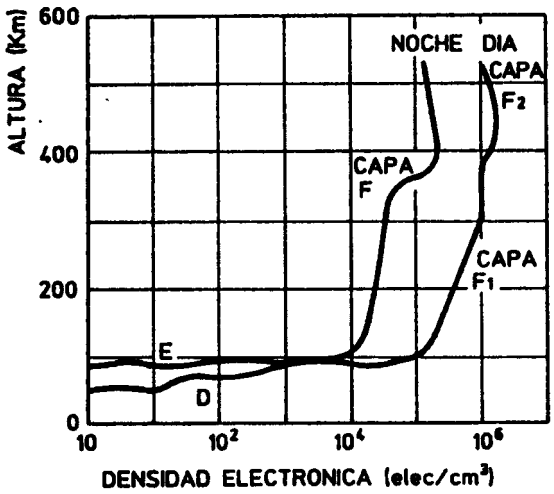
Este fenómeno se explica porque el índice de refracción de la atmósfera decrece con la altura y la onda electromagnética pasa de un medio de índice mayor a otro de menor y será reflejada o refractada en función de su ángulo de incidencia con la ionosfera.

La ionosfera se subdivide en subcapas de alturas diferentes, denominadas: D, E, F_1 y F_2, y que podemos ver en la siguiente figura.



Como consecuencia de las variaciones de la radiación solar, la distribución de la densidad de ionización (medida en electrones/cm^3) varía en función de diversos factores, tales como la hora, el mes, el año y la situación geográfica del lugar.

Si se representa la densidad electrónica en función de la altura, se obtienen los llamados perfiles de ionización o de densidad. En la siguiente figura se ilustra un ejemplo.



Se observa que para las capas D y E la densidad electrónica varía muy rápidamente con la altura. Por el contrario, para las capas F_1 y F_2, la densidad presenta menor variación con la altura hasta alcanzar un máximo, tras el cual se produce un decrecimiento.

Las características generales de las capas ionosféricas son las siguientes:

Capa D: Está situada entre 60 y 90 km aproximadamente y existe sólo durante el día. Su densidad de ionización varía en función del ángulo cenital del Sol. Refleja las frecuencias bajas y atenúa, por absorción parcial, las frecuencias medias y altas.

Capa E: Situada entre 90 - 130 km, se caracteriza por una gran regularidad en su formación y comportamiento. Su densidad de ionización se corresponde también con el ángulo cenital del Sol. Su altura depende de la estación del año. Es importante para la propagación HF diurna a distancias inferiores a 1.600 km y nocturna a distancias superiores a 1.600 km. En alturas de unos 100 - 120 km se encuentra a veces una capa de gran ionización denominada *Es (E* esporádica), que puede provocar la aparición de interferencias.

Capa F_1: Situada entre 150 - 250 km, existe principalmente durante las horas del día, siendo máximo su efecto a mediodía. Ocasionalmente, puede ser la capa reflectora para transmisión HF, pero lo normal es que las ondas de incidencia oblicua que atraviesan la capa E también pasen a través de la capa F_1 y sean reflejadas por la F_2, por lo que la F_1 introduce una atenuación por absorción, pudiendo influir en el alcance por modificación de la trayectoria del rayo.

Capa F_2: Situada entre 300-450 km, es la principal capa reflectora para las radiocomunicaciones HF a larga distancia. La altura y densidad de la ionización presentan una variación diaria, estacional y con el ciclo de actividad solar. De noche la capa F_1 se une con la F_2 a una altura de unos 300 km.

2.5.- INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACION

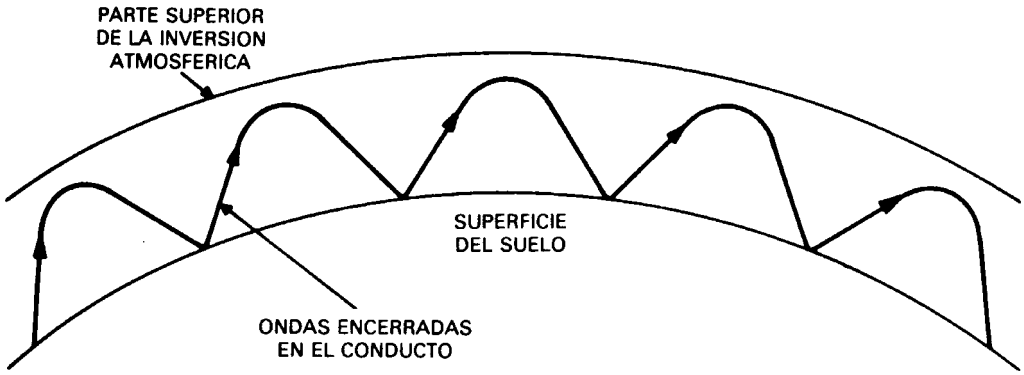
Para frecuencias superiores a unos 30 MHz, dejan de ser utilizables los modos de propagación por onda de superficie y por onda ionosférica. Las radiocomunicaciones se efectúan a través de las capas bajas de la atmósfera terrestre, en la región denominada troposfera, entre antenas elevadas varias longitudes de onda sobre el suelo. Es necesario conocer la trayectoria de la onda en estos casos y sobre todo su posición relativa respecto de los accidentes del terreno, puesto que éstos pueden interceptar el rayo, produciendo una atenuación importante.

A este tipo de propagación también se le conoce como ondas de espacio o directas, debido a que se propagan en línea recta y necesitan que exista visibilidad entre la antena emisora y la receptora. Al no ser plana la superficie de la tierra, el alcance de las ondas que se propagan por este modo, es limitado.

Un fenómeno bastante extraño que aparece en la propagación de onda espacial, es la súper refracción o modos de propagación por trayectos múltiples.

La propagación de esta onda es generalmente en línea recta; un cambio de índice de refracción de la atmósfera, podría alterar esta trayectoria y esto sucede cuando existen inversiones de temperatura. En ciertas condiciones atmosféricas, una capa de aire caliente puede permanecer encima de una masa de aire frío, este fenómeno aparece a menudo sobre los océanos y especialmente en las zonas subtropicales. En estas condiciones hay un cambio brusco en el índice de refracción que provoca la curvatura de la onda hacia el suelo, de modo similar a como sucedía en la reflexión ionosférica.

Este fenómeno puede degenerar en la formación de conductos troposféricos. Una onda encerrada en un conducto puede tener un alcance superior al previsto, con la posibilidad de producir interferencias.



Super-refracción por inversión atmosférica.

Las ondas que viajan por la troposfera experimentan una refracción a causa de la no uniformidad de las capas atmosféricas, que se manifiesta como una variación del índice de refracción con la altura. Como consecuencia de la refracción, la trayectoria del rayo es curvilínea, lo cual, en radioenlaces terrenales, puede influir sobre el efecto de los obstáculos del terreno y en los radioenlaces espaciales afecta a la puntería de la antena hacia el satélite.

Los gases y vapores atmosféricos, principalmente el oxígeno y el vapor de agua, producen una absorción de la energía electromagnética, lo que se traduce en una atenuación adicional para las señales. Este efecto se manifiesta por encima de unos 10 GHz. Lo mismo sucede con las precipitaciones, sobre todo la lluvia y, en ciertos casos, con las nubes y niebla.

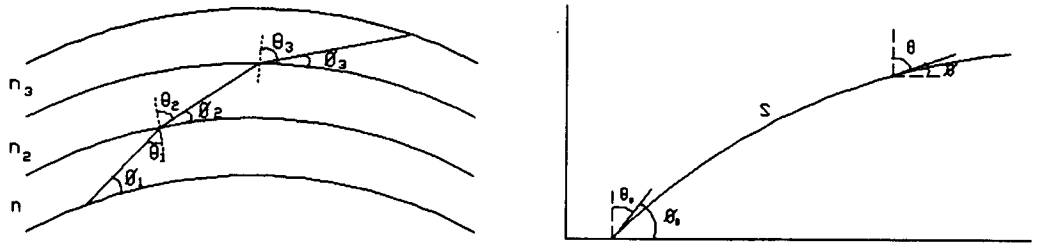
Las absorciones atmosférica y por lluvia producen, además, un aumento en la temperatura de ruido de la antena receptora y una despolarización de la señal.

Por último, también tienen lugar en la troposfera efectos de dispersión, de forma que «iluminando» una zona de la troposfera con una radiación potente pueden aprovecharse componentes de dispersión para constituir un enlace radio. Evidentemente, la dispersión produce también trayectos interferentes.

Las radiocomunicaciones por la troposfera tienen un alcance del orden de la distancia de visión óptica entre las antenas. Más allá de esta distancia, llamada horizonte óptico, pueden lograrse enlaces, pero con pérdidas adicionales por difracción. Si la distancia es aún mayor, todavía es posible la comunicación utilizando la dispersión troposférica. Sin embargo, hoy día este tipo de enlaces apenas se utiliza. No obstante, deben tenerse en cuenta en los estudios de interferencias. Como el mecanismo básico regulador de la propagación troposférica es la refracción, comenzaremos estudiándolo a partir del índice de refracción.

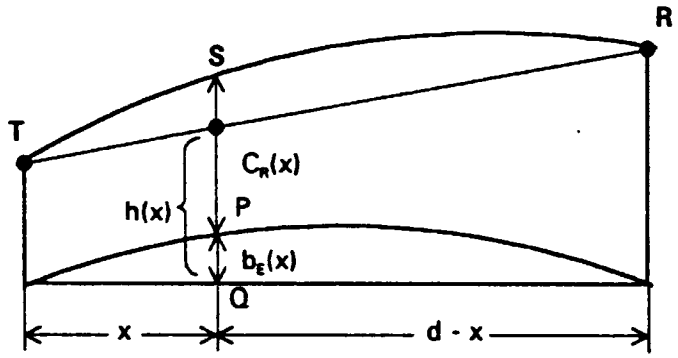
2.5.1.- Curvatura de los rayos y geometría del trayecto

El indice de refracción de la atmósfera no es constante, sino que varía a medida que nos separamos de la superficie terrestre. Debido a esto los rayos electromagnéticos que serían rectilíneos en el vacío o en una atmósfera homogénea, se curvan a medida que se alejan del suelo por efecto de la refracción.



Para estudiar analíticamente la influencia de la refractividad sobre el trayecto radioeléctrico, se utiliza el modelo de la figura siguiente en el que, para mayor sencillez, consideramos una superficie terrestre lisa.

La curvatura de un rayo electromagnético con relación a la de la tierra vendrá dada por la diferencia de curvaturas.



Sean R_0 el radio terrestre y R el radio de curvatura del trayecto. Se denomina protuberancia de la Tierra "b_E" a la elevación de la superficie terrestre sobre una línea horizontal que une los pies de las antenas T y R. Su valor para un punto genérico P situado a x km. del transmisor, es:

$$b_E(x) = \frac{x \cdot (d - x)}{2R_0}$$

Se denomina protuberancia del rayo a la flecha $b_R(x)$ entre el rayo y la cuerda que une T con R. Se tiene:

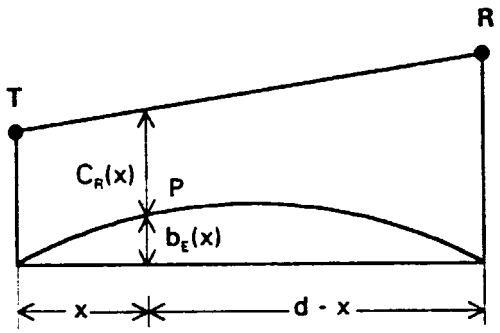
$$b_R(x) = \frac{x \cdot (d - x)}{2R}$$

Se denomina despejamiento para un punto S del trayecto, a la distancia vertical PS entre ese punto y la superficie terrestre. Llamando $C_R(x)$ *al* despejamiento, se tiene:

$$C_R(x) = b_R(x) + h(x) - b_E(x) = h(x) + \frac{x(d - x)}{2}\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right)$$

donde *h(x)* es la ordenada de la recta TR correspondiente a la abscisa *x*.

El cálculo del despejamiento $C_R(x)$ puede también efectuarse considerando que el rayo es rectilíneo y que la tierra tiene una curvatura modificada, caracterizada por un radio k · Ro. Este convenio tiene la ventaja de que permite dibujar el trayecto como una línea recta. A la Tierra con radio k · Ro se le llama «Tierra ficticia» y el parámetro k se denomina factor de modificación del radio terrestre. En el siguiente dibujo se observa esta modificación



La protuberancia terrestre es ahora igual a:

$$b_E(x) = \frac{x(d - x)}{2kR_0}$$

y por lo tanto el despejamiento ahora lo podemos expresar como:

$$C_R(x) = h(x) - b_E(x) = h(x) - \frac{x(d - x)}{2kR_0}$$

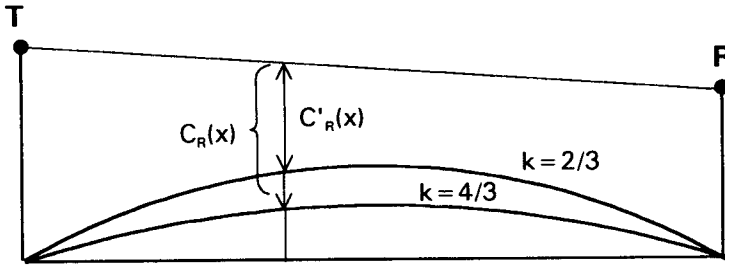
Si igualamos las dos ecuaciones utilizadas para el despejamiento (caso de tierra curva y rayo curvo con caso de tierra ficticia)

$$\frac{1}{kR_0} = \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R}$$

Se obtiene que la curvatura de la tierra ficticia es igual a la diferencia entre la curvatura del rayo y la curvatura de la Tierra real.

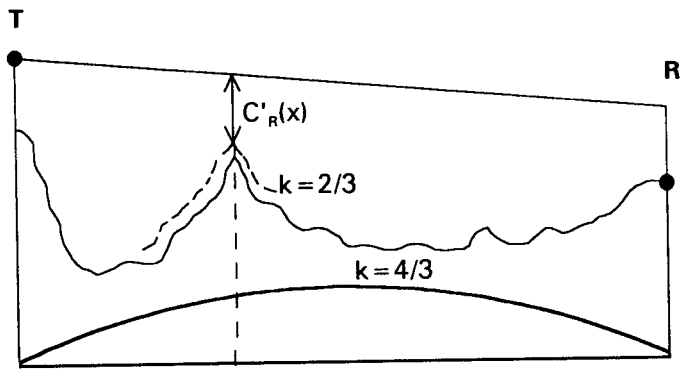
El valor de k está relacionado con el índice de refracción de los rayos en la atmósfera, así en climas templados k= 4/3, lo que supone que la tierra es un poco más plana que en la realidad para la propagación troposférica. Esto ocurre siempre que k>1 e implica mayores alcances. Cuando k<1, la tierra ficticia es más curva que la real con lo que las condiciones de propagación son menos favorables, osea, el alcance es menor que para la tierra real.

Lo que realmente nos interesa es como afecta el valor de k al despejamiento. Esto lo podemos deducir de las ecuaciones anteriores. Si k disminuye, también lo hace el despejamiento ya que la disminución de k equivale a un aumento aparente de la protuberancia de la tierra, lo que equivale a la disminución del despejamiento. En el siguiente dibujo queda ilustrado lo que se acaba de comentar.



Como se puede apreciar cuando k aumenta sucede todo lo contrario.

Cuando el terreno entre las antenas T y R no es liso, sino que tiene un perfil determinado, las variaciones de k también producen una variación de las alturas del perfil con la consiguiente influencia en el despejamiento, como era de suponer. Esto lo podemos apreciar en el siguiente gráfico.



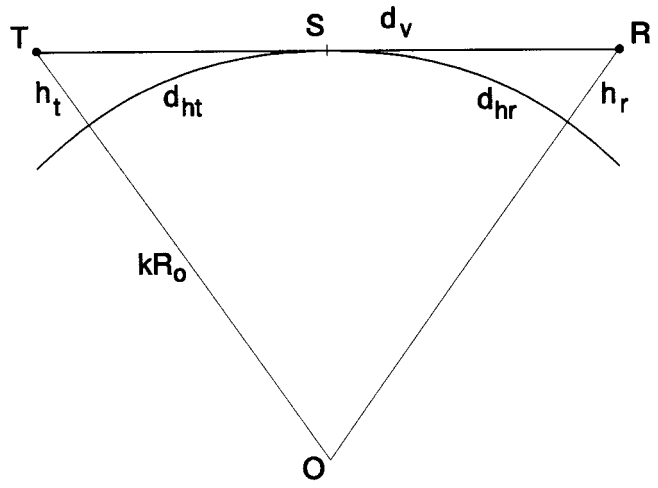
2.6.- MODELO DE TIERRA CURVA

Se aplica este modelo cuando la longitud del enlace es del orden de la distancia de visibilidad radioeléctrica o mayor. Se considera una trayectoria rectilínea y una Tierra ficticia de radio kRo.

Supondremos una Tierra lisa como sucede en propagación sobre mar, grandes lagos o llanuras con terreno muy poco ondulado.

2.6.1.- Distancia de visibilidad

Se llama distancia de horizonte de una antena a la distancia entre el pie de la antena y el punto S de tangencia con la superficie terrestre de un rayo trazado desde la antena. Se llama distancia de visibilidad radioeléctrica para dos antenas a la suma de sus distancias de horizonte



La distancia de horizonte del transmisor se obtiene mediante la relación:

$$(kRo + h_t)^2 = d_{ht}^2 + (kR_0)^2$$

Desarrollando y simplificando, queda

$$d_{ht}^2 \approx 2\, kR_0\, h_t$$

Efectuando un cambio de unidades y sustituyendo el valor del radio terrestre R_0, queda:

$$d_{ht}(km) = 3{,}57\sqrt{kh_t(m)}$$

Análogamente:

$$d_{hr}(km) = 3{,}57\sqrt{kh_t(m)}$$

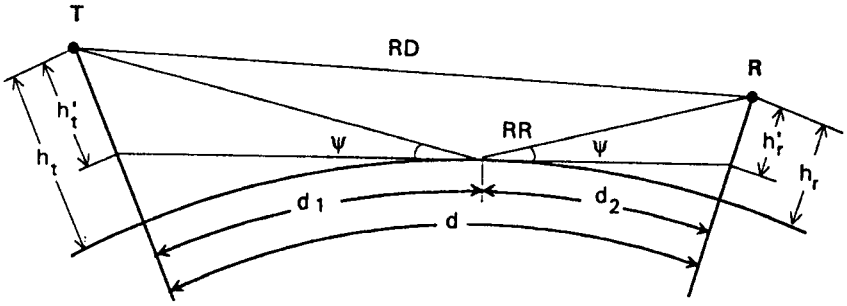
Luego la distancia de visibilidad es:

$$d_v = d_{ht} + d_{hr} = 3{,}57\left(\sqrt{kh_t} + \sqrt{kh_r}\right)$$

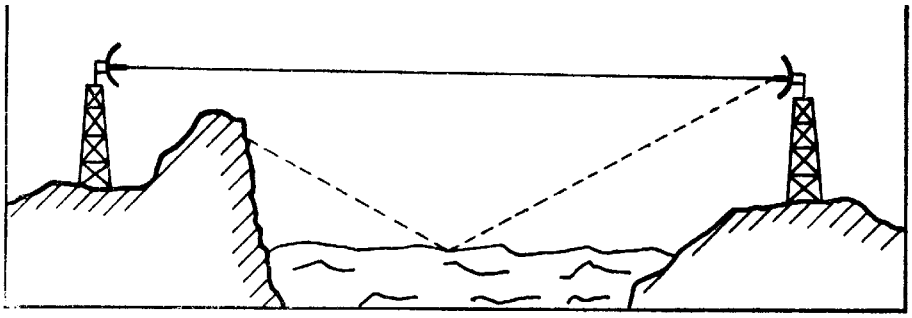
2.6.2. Modelo de reflexión

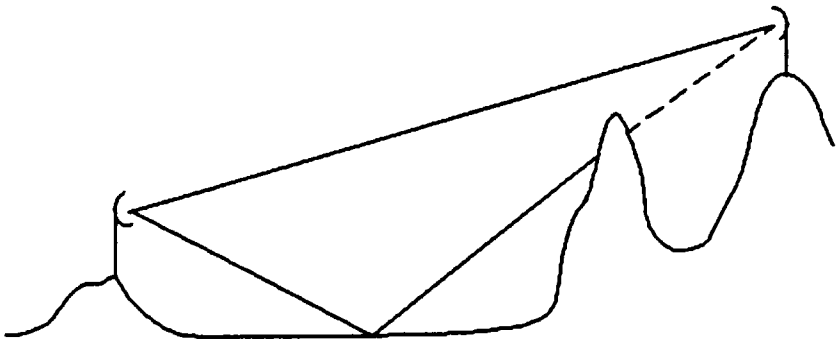
El modelo de propagación por reflexión para tierra curva es aplicable cuando la longitud de enlace es inferior a d_v.

En la siguiente figura se representa un trayecto de propagación por reflexión sobre Tierra curva. La atenuación de propagación depende, como en el caso de Tierra plana, de la interferencia entre el rayo directo y el rayo reflejado.



En este caso la energía recibida puede ser superior o inferior a la del rayo directo, dependiendo de la diferencia de caminos o diferencia de fase, que será función de la altura de las antenas. Se podría pensar en variar las alturas de las antena para que fuera siempre superior, pero esta no es una solución ya que la refracción de la atmósfera modifica el trayecto de los rayos y por tanto también la diferencia de caminos, es decir, la diferencia de fase entre el rayo directo y el rayo reflejado no es constante, sino que varía con el tiempo, por lo tanto la mejor solución será evitar la reflexiones, y una buena forma de conseguirlo es interponer un obstáculo en el camino del rayo reflejado como se muestra en la siguiente figura.



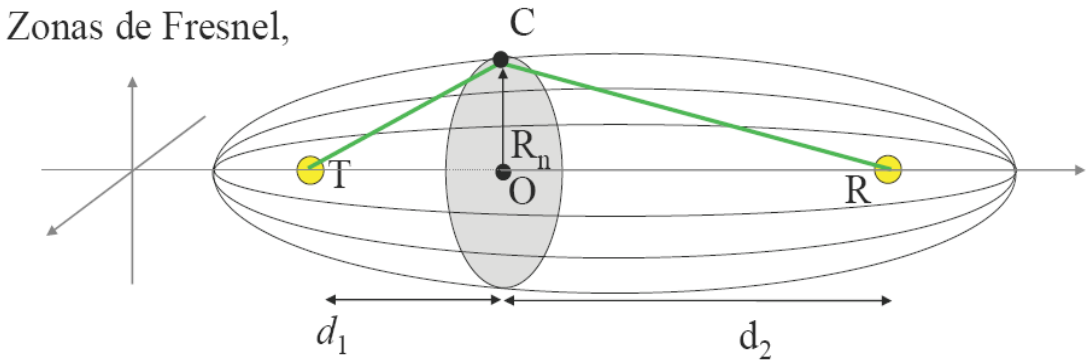


2.7.- PROPAGACIÓN POR DIFRACCIÓN

2.7.1.- Zonas de Fresnel

Para hacer un estudio de la difracción se utiliza generalmente el concepto de las zonas de Fresnel que se define como sigue:

Dado un radioenlace como el de la figura, en cada punto O de la trayectoria recta que une al transmisor con el receptor, podemos trazar el lugar geométrico de los puntos cuya suma de caminos al transmisor T y receptor R sea un múltiplo de λ/2 mayor que la trayectoria directa.



Al lugar encerrado por los caminos de los diferentes múltiplos de λ/2 se les denomina zonas de Fresnel, y al radio asociado al círculo correspondiente se le denomina radio de la zona de Fresnel correspondiente.

Así la diferencia de caminos para una zona de radio *Rn* será:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d}}$$

En unidades prácticas resulta:

$$R_n = 548\sqrt{\frac{n d_1 d_2}{f d}}$$

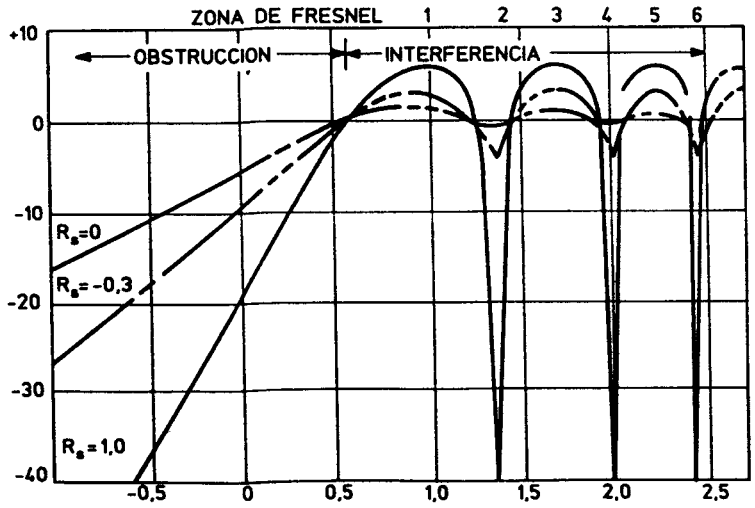
donde:

Rn: Radio de la n-sima zona de Fresnel (m).
f: Frecuencia (Mhz).
d_1: Distancia del transmisor al plano considerado (km).
d_2: Distancia del plano considerado al receptor (km).

Las zonas de Fresnel son elipsoides concéntricos formados por la revolución de la anterior alrededor del eje TR. Sus focos son los puntos T y R y el n-simo elipsoide es el lugar geométrico de la zona n. Las secciones de los elipsoides normales al trayecto de propagación TR, son círculos concéntricos.

Puede estudiarse la variación del campo *e* recibido en *R* cuando se suprime (por ejemplo mediante un diafragma) la contribución al mismo de diversas zonas de Fresnel, desde un punto determinado situado a la distancia d_1 del transmisor.

Si llevamos en ordenadas la atenuación de campo A_E (dB) = 20 log *(eo/e)* y en abscisas el cociente r/R_1, entre la apertura del diafragma y el radio de la primera zona de Fresnel, se obtienen las siguientes curvas.



R = COEFICIENTE REFLEXION
ABCISAS: MARGEN S/OBSTACULOS/RADIO 1ª ZONA FRESNEL

Observando detenidamente estas curvas se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. El campo varía en forma oscilatoria alrededor de su valor en espacio libre *eo* (atenuación 0 dB).
2. Cuando la apertura del diafragma es $r = 0{,}577R_1$, el campo es igual al de espacio libre.
3. Puede lograrse una ganancia teórica de 6 dB $(e = 2eo)$ para $r = R_1$
4. En algunos casos, aun cuando existe visibilidad, resulta $e = 0$ (atenuación infinita).

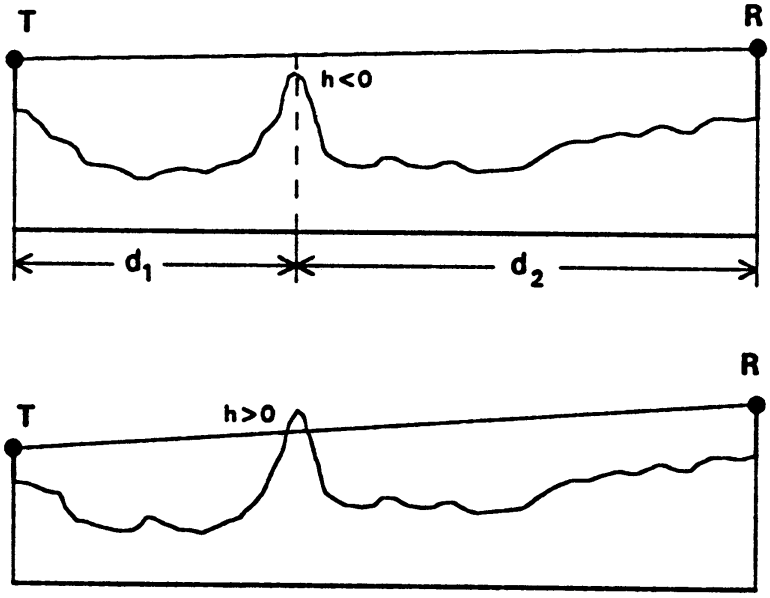
Las propiedades 3) y 4) se deben a que, en el primer caso, las componentes de la onda se suman en fase en el receptor y en el segundo, lo hacen en oposición de fase.

Se aplican estos principios a la propagación troposférica cuando el trayecto de la onda pasa cerca de un obstáculo o, incluso, está obstruido por uno o más obstáculos, como pueden ser la protuberancia de la Tierra, accidentes del terreno, árboles, edificios, etc.

El análisis de la influencia de los obstáculos se realiza mediante los elipsoides de Fresnel, considerándose que la propagación se efectúa en condiciones de visibilidad directa si no existe ningún, obstáculo dentro del primer elipsoide. Debido al carácter oscilatorio del campo, es innecesario que el trayecto pase muy por encima de los obstáculos. Basta trabajar en el entorno de la primera zona de Fresnel, por lo que utilizaremos como parámetro de referencia el radio R_1, haciendo $n = 1$

$$R_1 = 548\sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}}$$

Cuando el rayo pasa cerca de un obstáculo o es interceptado por éste, experimenta una pérdida debida a la difracción. Se llama «despejamiento» a la distancia *h* entre el rayo y el obstáculo.



El UIT-R considera, por convenio, $h > 0$ cuando hay interceptación del rayo y $h < 0$ cuando

el rayo pasa por encima del obstáculo. Se trabaja en la práctica con el «despejamiento normalizado» h/R_1. La zona correspondiente a la propagación por difracción es la comprendida entre $-0,6 \leq h/R_1 \leq \infty$. En radioenlaces suele trabajarse en la gama

$$-0,6 \leq h/R_1 \leq 0,5$$

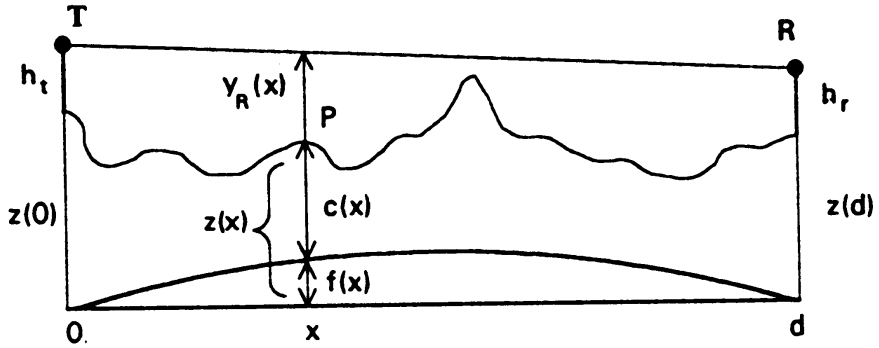
Para evaluar el despejamiento y la consiguiente atenuación por difracción, debe representarse el perfil del terreno sobre una tierra de radio *kRo* y procederse a un análisis del número, situación e influencia de los obstáculos.

2.8.- REPRESENTACIÓN DE PERFILES

La representación de los perfiles del terreno se efectúa llevando las cotas de los puntos sobre una línea de base o «curva de altura cero» parabólica, que representa la curvatura de la Tierra ficticia con radio *kRo*. La ordenada de esta curva, para la abscisa genérica x, se denomina «*flecha*» y equivale a la protuberancia de la Tierra calculada en apartados anteriores. Llamándola ahora *f(x)*
tenemos que:

$$f(x) = bE(x) = \frac{x \cdot (d - x)}{2kRo}$$

En la siguiente figura se ha representado un perfil genérico.



La altura *z(x)*, sobre la horizontal de un punto genérico del terreno *P* a distancia *x* del transmisor, es igual a su cota geográfica *c(x)* más la flecha *f(x)*:

$$z(x) = c(x) + f(x)$$

Si h_t y h_r, son las alturas de los mástiles soporte de las antenas, como en los extremos la flecha es cero, se tiene:

$$z(0) = c(0) + h_t$$

$$z(d) = c(d) + h_r$$

Si llamamos $Y_R(x)$ a la ordenada de la recta *TR* que representa al rayo, el despejamiento, en un punto arbitrario de abscisa *x*, es:

$$h(x) = z(x) - y_R(x)$$

Como la flecha es función de *k*, al variar este parámetro cuando lo haga el gradiente de la refractividad, también variará la flecha y, por lo tanto, en la misma cuantía, el despejamiento Si llamamos Δh y Δf a estas variaciones, se tiene:

$$\Delta h(x) = \Delta f(x) = \frac{x \cdot (d - x)}{2Ro}\left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1}\right)$$

Si $k_2 < k_1$, Δf es positivo y el despeñamiento se reduce en el valor Δh(x).

Tradicionalmente, los perfiles se representan a partir de datos obtenidos manualmente de mapas topográficos. Es muy frecuente la utilización de mapas de escala 1:50.000. Se van obteniendo los pares distancia-cota por intersección entre la línea que une las ubicaciones del transmisor y receptor y las curvas de nivel del terreno, que para la escala anterior, tienen una equidistancia de 20 m.

Aunque esta tarea es sencilla, resulta tediosa y consume mucho tiempo, sobre todo en las primeras fases del proyecto de una red, que requieren el análisis y evaluación de múltiples emplazamientos posibles para ubicar estaciones, hasta llegar a la topología de red más conveniente.

Para solventar estos problemas, se han desarrollado procedimientos de digitalización de mapas topográficos que permiten la obtención por ordenador de perfiles radioeléctricos y posterior cálculo, tanto de las pérdidas de propagación, como de contornos equiseñal, con una precisión adecuada a las necesidades de radiocomunicaciones.

La automatización del trazado de perfiles requiere, en consecuencia, disponer de una amplia base de datos topográficos obtenidos mediante muestreo de los mapas.

La escala de mapa de base que parece más conveniente para la obtención de datos, es 1:25.000.

2.9.- DIFRACCIÓN EN OBSTÁCULOS

Para la valoración, en primera aproximación, de las pérdidas por difracción en obstáculos, se idealiza la forma de éstos, asimilándolos a una arista o cuña de espesor despreciable (arista aguda o «filo de cuchillo») o a una arista gruesa y redondeada, con un cierto radio de curvatura en la cima.

La predicción de las pérdidas se efectúa por separado, según se trate de obstáculos aislados o múltiples.

2.9.1. Obstáculo aislado

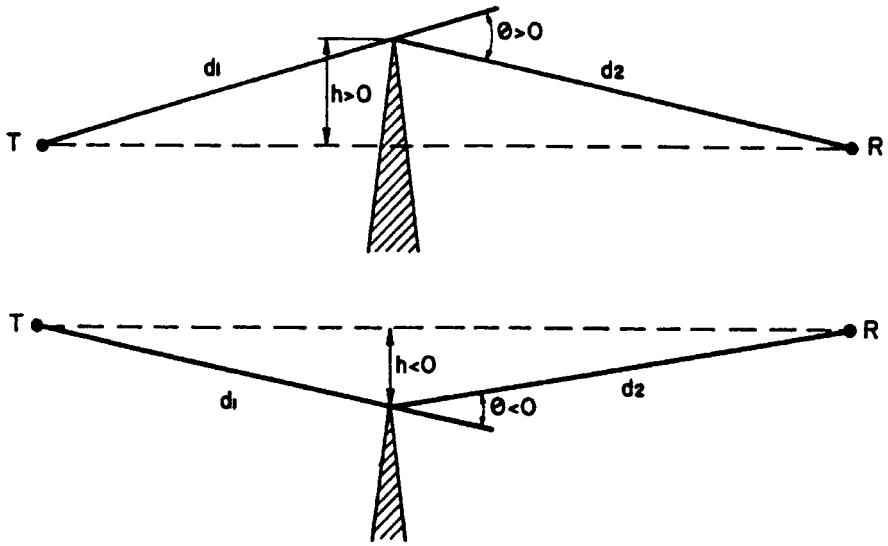
El modelo de obstáculo aislado resulta aplicable a los trayectos que, salvo esta obstrucción, son de visibilidad directa. Sea h el despejamiento. Obsérvese que habrá pérdidas por difracción aunque el rayo pase por encima del obstáculo si - $0{,}6\ R_1 < h < 0$ (despejamiento insuficiente).

El cálculo de la pérdida lo haremos siguiendo la metodología de la Rec. UIT-R 526, que distingue dos casos de obstáculo aislado, a saber: obstáculo agudo y obstáculo redondeado.

Obstáculo agudo

Un obstáculo agudo o en forma de arista en el trayecto, solamente bloquea una parte de la energía radioeléctrica, el resto será objeto de difracción en torno al obstáculo de forma que se reciben señales incluso en la zona de sombra que queda debajo de la incidencia rasante.

En la siguiente figura se ilustran los parámetros geométricos básicos para el estudio del obstáculo agudo, que son: despejamiento h, distancias d_1, d_2 a los extremos del enlace y el ángulo de difracción θ.



La Rec.526 proporciona valores de la atenuación en función del parámetro adimensional v definido como:

$$v = h\left[\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)\right]^{1/2} = \theta\left[\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}\right]^{1/2}$$

v tiene el mismo signo que h. Es fácil comprobar que v es igual a $\sqrt{2}$ veces el despejamiento normalizado h/R_1, donde R_1 es el radio de la primera zona de Fresnel. Expresando v en unidades usuales resulta:

$$v = 2{,}58 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{f \cdot d}{d_1 d_2}} \cdot h$$

***h* en m, *d*, d_1, d_2 en Km y *f* en MHz**

Para el cálculo de la atenuación de difracción debida a un obstáculo agudo se dispone de unas curvas como la de la figura siguiente en las que a partir del valor de *v* obtenemos el valor de la atenuación.

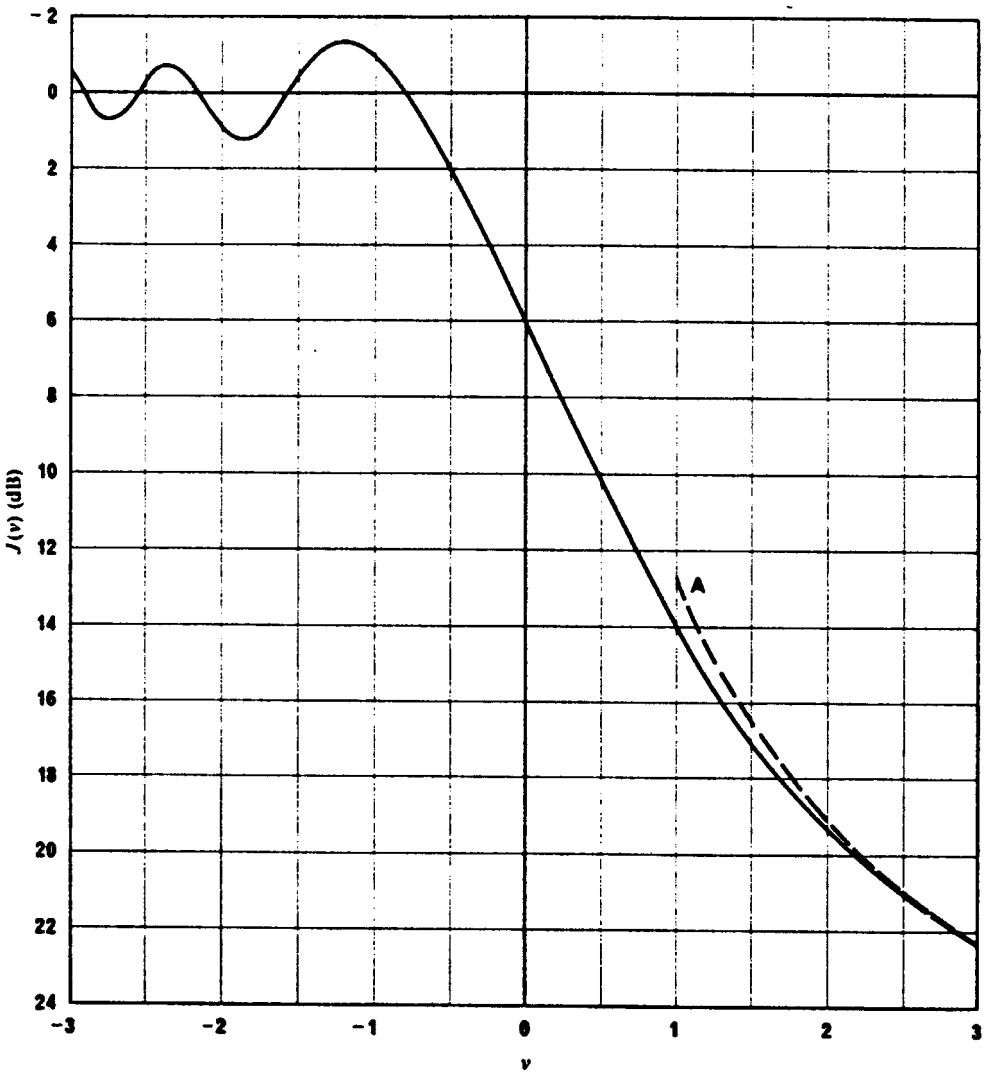
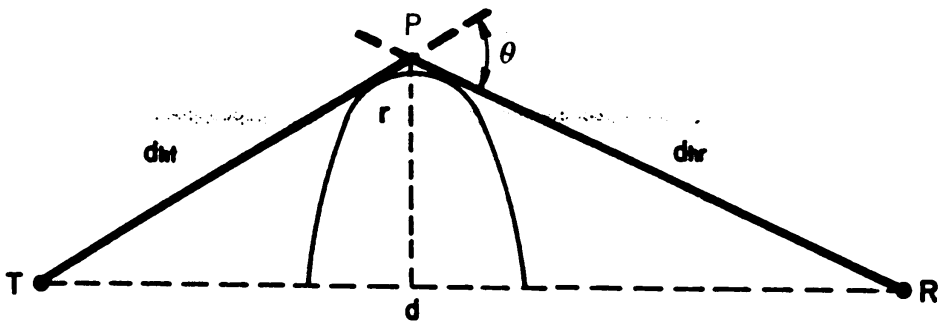


FIGURA 7 – ***Difracción en una arista en filo de cuchillo – Pérdida de transmisión con relación al espacio libre***

Curva A: Asíntota: $J(v) = 13 + 20 \log v$

Obstáculos redondeados

La geometría de un obstáculo redondeado se puede representar como sigue



Los parámetros geométricos que intervienen en el cálculo de la difracción en este caso, son los siguientes:

1. Longitud del enlace, *d*.
2. Distancias del transmisor y receptor a sus horizontes respectivos: d_{ht} y d_{hr} en km.
3. Alturas de los puntos de horizonte z_{ht} y z_{hr}, en m.
4. Ángulo de difracción: θ, en mrad.
5. Radio de curvatura del obstáculo: *r*, en km.
6. Altura *h* del punto *P* de intersección de las visuales trazadas desde *T* y *R* a sus respectivos horizontes, con respecto a la línea *TR*.

Para la aplicación de las fórmulas de difracción sobre obstáculo redondeado hay que evaluar *r* y *h*. Suponemos conocidas las alturas de las antenas transmisora y receptora sobre el nivel del mar, z(0) *y* z(d). Sea, además, *R = k Ro (k,* factor de corrección del radio terrestre Ro).

El radio de curvatura del obstáculo se estima mediante la expresión:

$$r(km) = \frac{d - d_{ht} - d_{hr}}{\theta} \cdot 10^3$$

donde θ es el ángulo de difracción:

$$\theta(mrad) = \frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} + \frac{z_{hr} - z(d)}{d_{hr}}$$

La altura h se calcula como sigue:

$$h = x_p\left(\frac{z_{ht} - z(0)}{d_{ht}} - \frac{z(d) - z(0)}{d}\right)$$

donde x_p es la abscisa del punto *P*, dada por:

$$x_p = \frac{d \cdot \beta}{\theta}$$

donde el ángulo β (mrad) es:

$$\beta(mrad) = \frac{z(d) - z(0)}{d} - \frac{z(d) - z_{hr}}{d_{hr}}$$

Los parámetros radioeléctricos para el cálculo de la difracción son:

$$m = 0{,}45708 \frac{d_{ht} + d_{hr}}{d_{ht} \cdot d_{hr}} \cdot r^{2/3} \cdot f^{-1/3}$$

$$n = 4{,}787 \cdot 10^{-3} \cdot h \cdot f^{2/3} \cdot r^{-1/3}$$

En la primera ecuación (en la que calculamos el valor de *m*), puede sustituirse d_{ht} y d_{hr} por $d_1 = x_p$ y $d_2 = d - x_p$ respectivamente.

Una vez calculados estos parámetros, la atenuación por difracción en obstáculo redondeado viene dada por la siguiente ecuación:

$$A = L_D(v) + T(m,n)$$

donde $L_D(v)$ se obtiene (igual que se hacía con obstáculo agudo) en la gráfica anterior a partir del valor de *v* de la ecuación siguiente:

$$v = 2{,}58 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{f \cdot d}{d_1 d_2}} \cdot h$$

y T(m,n) se calcula como sigue:

a) Para $m \cdot n \leq 4$

$$T(m,n) = 7{,}2 \cdot m^{1/2} - (2 - 12{,}5n)m + 3{,}6m^{3/2} - 0{,}8m^2$$

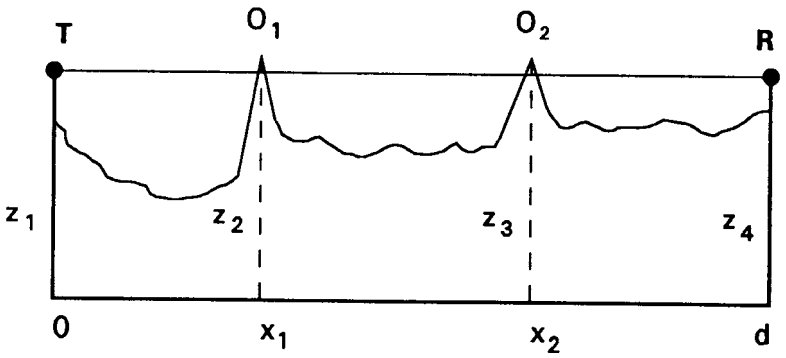
b) Para $m \cdot n > 4$

$$T(m,n) = -6 - 20\log(m,n) + 7{,}2 \cdot m^{1/2} - (2 - 17 \cdot n)m + 3{,}6m^{3/2} - 0{,}8m^2$$

2.9.2.- Dos obstáculos aislados

En la figura siguiente se representa la geometría general del modelo, con la siguiente notación:

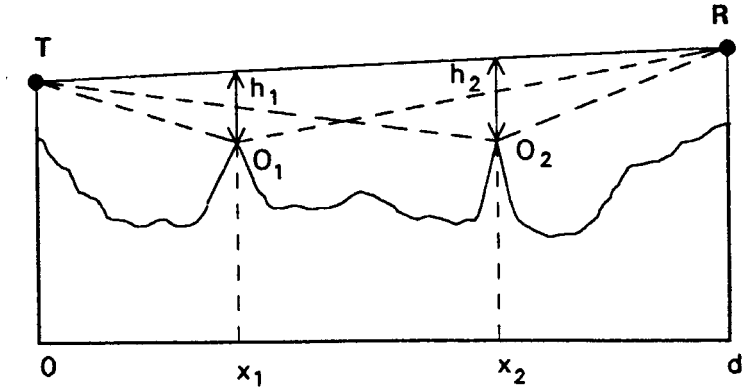
$z_1 = z(0)$: Altura absoluta de la antena transmisora.
$z_2 = z(x_1)$: Altura del obstáculo O_1.
$z_3 = z(x_2)$: Altura del obstáculo O_2.
$z_4 = z(d)$: Altura absoluta de la antena receptora.
x_1: Distancia del transmisor al obstáculo O_1.
x_2: Distancia del transmisor al obstáculo O_2.



El cálculo riguroso de la atenuación para dos obstáculos aislados se realiza mediante una integral doble de Fresnel, expresable en forma de desarrollos en serie. En la práctica, se utilizan métodos pseudoempíricos simples y con aproximación suficiente para las aplicaciones. De entre los diversos modelos propuestos hemos seleccionado tres que son los que, en general, proporcionan resultados más acordes con las mediciones. La elección de los modelos se basa en la situación del rayo *TR* respecto a los obstáculos. A continuación se indican los tres casos posibles y los modelos aplicables a cada uno.

Método EMP

Se aplica este método cuando el rayo TR no corta a ningún obstáculo, sino que existe despejamiento insuficiente en ambos, esto es, para cada obstáculo se cumple que $-0,7 \leq \nu \leq 0$



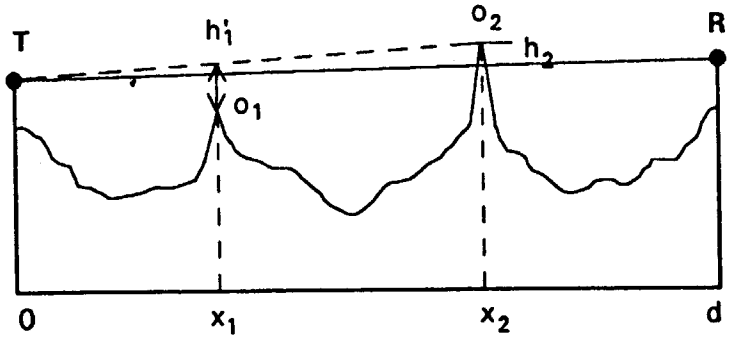
En este caso la atenuación por difracción es igual a la suma de las pérdidas producidas por cada obstáculo por separado.

$$L_D = L_D\,(T\,O_1\,R) + L_D\,(T\,O_2\,R) = L_D\,(v_1) + L_D\,(v_2)$$

Calculándose v_1 y v_2 para las alturas (negativas) h_1 y h_2.

Método Wilkerson

Resulta aplicable cuando el rayo corta a un obstáculo y existe despejamiento insuficiente en el otro



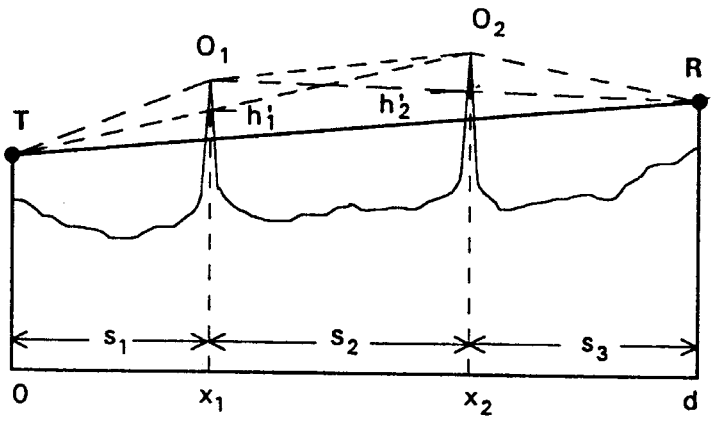
Sea, por ejemplo, O_2 el obstáculo que intercepta el rayo. La atenuación por difracción es igual a la pérdida producida por O_2 en el vano completo TR más la pérdida debida a O_1, en el subvano TO_2.

$$L_D = L_D\,(T\,O_2\,R) + L_D\,(T\,O_1\,O_2) = L_D\,(v_2) + L_D\,(v'_1)$$

Donde v_2 se calcula para la altura h_2 y v'_1 corresponde a h'_1 en el subvano TO_2

Método Epstein-Peterson

Se utiliza este método cuando el rayo corta a los dos obstáculos. No obstante, si los rayos $O_1\,R$ o $T\,O_2$ no cortan al otro obstáculo, se aplica el método Wilkerson.



La atenuación por difracción es igual a la pérdida en el sub-vano $T\,O_1\,O_2$, interceptado por O_1 con altura h'_1 más la pérdida en el subvano $O_1\,O_2\,R$ interceptado por O_2 con altura h'_2, más un término de

corrección.

$$L_D = L_D\,(T\,O_1\,O_2\,) + L_D\,(\,O_1\,O_2\,R) + Lc = L_D\,(v'_1) + L_D\,(v'_2) + Lc$$

Calculándose v'_1 y v'_2 para h'_1 y h'_2 en O_1 y O_2, respectivamente. El término de corrección, propuesto por Millington, vale:

$$L_C = 10\log\frac{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3)}{S_2(S_1 + S_2 + S_3)}$$

y se aplica cuando $L_D\,(v'_1)$ y $L_D\,(v'_2)$ son del orden de 15 dB o mayores.

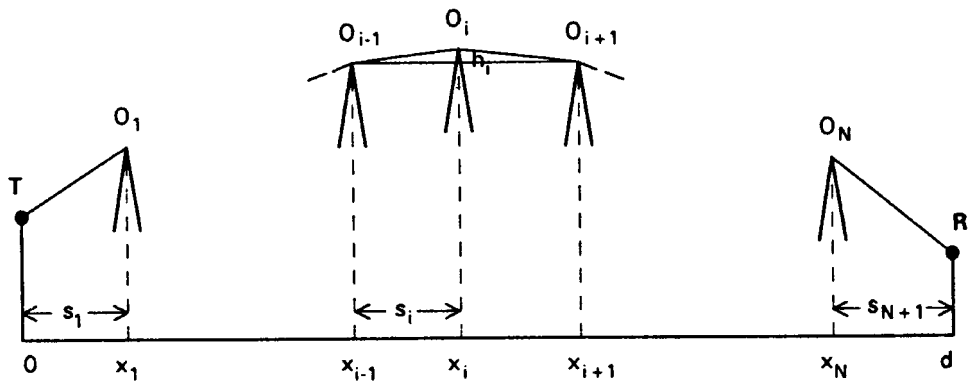
El método de Epstein & Peterson resulta apropiado cuando las pérdidas de cada obstáculo son similares. Si un obstáculo es claramente dominante, es más conveniente utilizar el método de Wilkerson anterior.

2.9.3.- Múltiples obstáculos

El método de tratamiento de múltiples obstáculos que propone la Rec. UIT-R PN. 526 es una extensión del de Epstein & Peterson. En la siguiente figura se presenta la geometría genérica del modelo, cuyos elementos son:

hi:	Altura del obstáculo *Oi*, respecto a la recta que une $O\,i\text{-}_1$ con Oi_{+1}.
xi:	Abscisa del obstáculo *Oi.*
$Si = xi\text{-}x_{\,i\text{-}1}$:	Distancia entre los obstáculos *Oi* y $O\,i\text{-}_1$
$S_1 = x_1$:	Distancia del transmisor al primer obstáculo.
$S_{N+1} = d - x_N$	Distancia del último obstáculo al receptor.

Para el cálculo de la atenuación, se determina el llamado «polígono funicular», que es una poligonal cuyos vértices son *T*, *R* y los obstáculos dominantes. Se llama así porque es la forma que adoptaría un hilo tenso apoyado en el perfil y fijado a *T* y a *R*.



La atenuación por difracción viene- dada por:

$$L_D = \sum_{i=1}^{N} L_D(v_i) + \sum_{i=1}^{j} L_{sd}(v'_i) - 20\log C_N$$

donde

$$v_i = 2{,}58 \cdot 10^{-3} \cdot h_i \sqrt{f \frac{S_i + S_{i+1}}{S_i \cdot S_{i+1}}}$$

L_{sd} *(v´i)* es la pérdida debida a obstáculos que en el subvano $O\,i\text{-}_1\ \ Oi\ \ Oi_{+1}$. queden por debajo de la línea $Oi\text{-}_1\ \ Oi_{+1}$. con despejamiento insuficiente. Sólo se tendrá en cuenta un único obstáculo, el que tenga el parámetro "*v´*" menos negativo.

El factor de corrección C_N viene dado por:

$$C_N = \left[\frac{S_2 \cdots S_N \cdot (S_1 + S_2 + \cdots + S_{N+1})}{(S_1 + S_2)(S_2 + S_3) \cdots (S_N + S_{N+1})} \right]$$

2.10.- DIFRACCIÓN SOBRE TIERRA ESFÉRICA

Se produce esta modalidad de propagación cuando el rayo discurre por encima de un terreno liso o muy poco ondulado (llanuras, mar, lagos), con despejamiento insuficiente o incluso alguna obstrucción por la redondez de la Tierra.

A continuación se expone el método de cálculo de la atenuación por difracción sobre Tierra esférica, según la Rec. UIT-PN. 526.

La atenuación por difracción se formula como la suma (en dB) de un término que depende de la distancia, de las características del terreno y de la polarización de la onda, y otros dos que son función, respectivamente, de las alturas de antenas *ht* y *hr,* del transmisor y receptor.

La influencia del terreno y la polarización se tiene en cuenta mediante un factor normalizado de admitancia de superficie K, definido como sigue:

Para polarización horizontal.-

$$K_H = 0{,}36\left(R \cdot f\right)^{-1/3} \cdot \left[(\varepsilon_r - 1)^2 + \left(18.000\sigma / f\right)^2\right]^{-1/4}$$

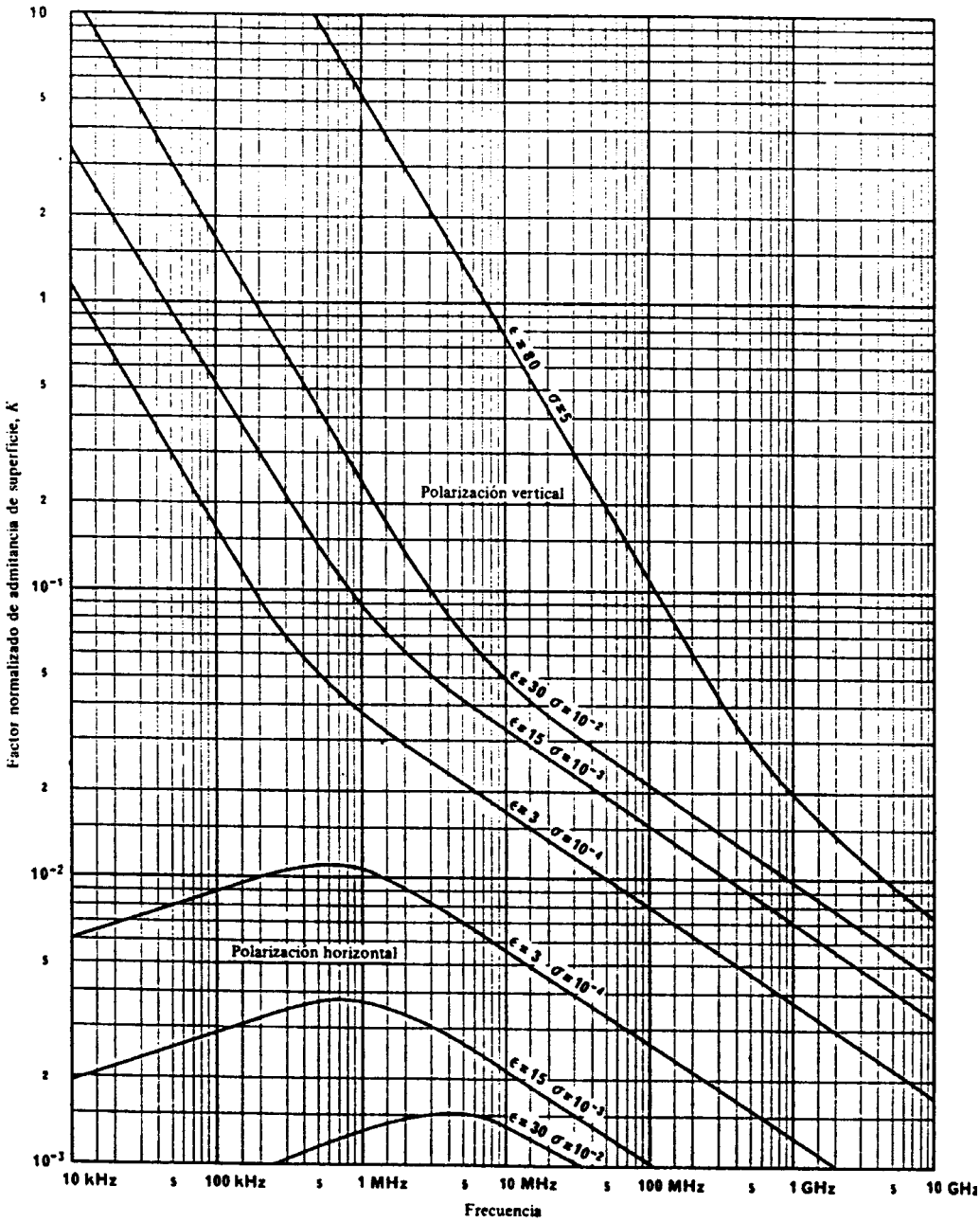
Para polarización vertical.-

$$K_V = K_H\left[\varepsilon_r^2 + \left(18.000\sigma / f\right)^2\right]^{1/2}$$

donde

R = kRO: *(k,* factor de modificación del radio terrestre R_0).
εr: Permitividad eléctrica relativa del terreno.
σ*(S/m):* Conductividad eléctrica del terreno.

Las curvas que se presentan a continuación pertenecen a la (Rec. 526) y en ella se representan valores de *K*.



Para K < 10^{-3}, puede despreciarse la influencia del terreno.
La pérdida en exceso, o atenuación de campo es:

$$L_D = 20\log\left(\frac{e_0}{e}\right) = -F(X) - G(Y_1) - G(Y_2)$$

donde:

$$X = 2{,}2 \cdot \beta \cdot f^{1/3} \cdot R^{-2/3} \cdot d$$

$$Y = 9{,}6 \cdot 10^{-3} \beta \cdot f^{2/3} \cdot R^{-1/3} \cdot h$$

siendo *d* la distancia (km) y *h* la altura de las antenas (h_t, para Y_1 y h_r, para Y2), en m.

El parámetro β se calcula como sigue:

$$\beta = \frac{1 + 1{,}6K^2 + 0{,}75K^4}{1 + 4{,}5K^2 + 1{,}35K^4}$$

Con polarización horizontal, para todas las frecuencias, y polarización vertical para $f > 20$ MHz sobre tierra o $f > 300$ MHz sobre mar, se toma β=1

El término de distancia F(X) es:

$$F(X) = 10\log\left(4\pi X + 2^{4/3} / X + 1/X^2\right) - 17{,}6 \cdot X \qquad X < 1{,}2$$

$$F(X) = 11 + 10\log(X) - 17{,}6X \qquad X > 1{,}2$$

y el término de ganancia de altura viene dado por:

$$G(Y) = 17{,}6(Y - 1{,}1)^{1/2} - 5\log(Y - 1{,}1) - 8 \qquad Y > 2$$

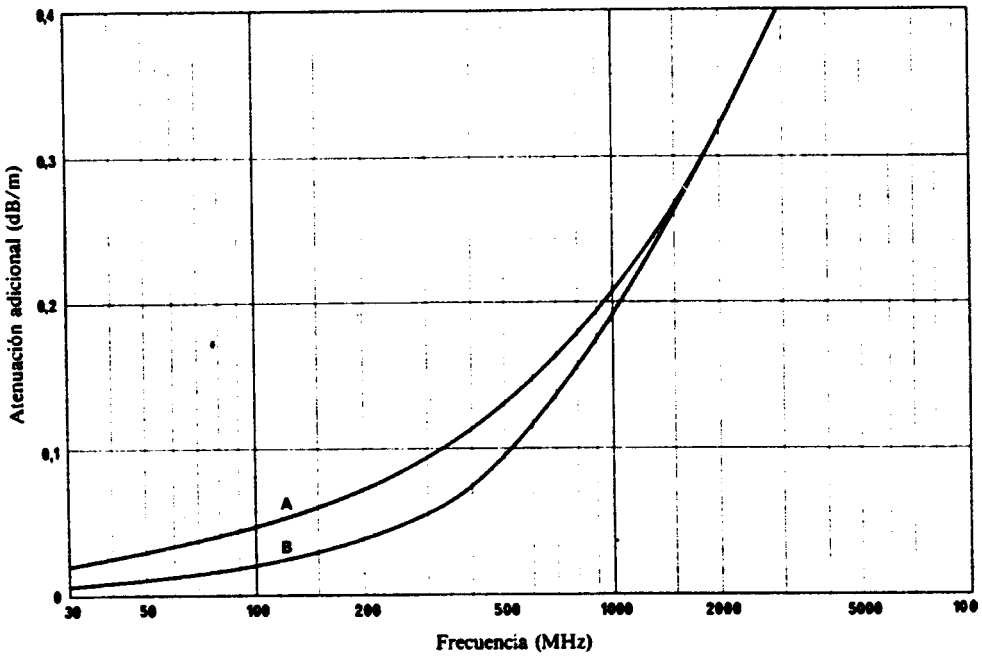
$$G(Y) = 20\log(Y + 0{,}1Y^3) \qquad 10K < Y < 2$$

$$G(Y) = 2 + 20\log K + 9\log(Y/K)[\log(Y/K) + 1] \qquad K/10 < Y < 10K$$

$$G(Y) = 2 + 20\log K \qquad Y < K/10$$

2.11.- ATENUACIÓN POR VEGETACIÓN

Cuando el receptor de un sistema de radiocomunicación se encuentra en el interior de un terreno boscoso, hay una pérdida adicional por penetración de las ondas a través de la vegetación. Para su evaluación, la Rec. UIT-R 833 facilita las curvas de la siguiente figura, que proporciona la atenuación específica, o atenuación por unidad de longitud, en función de la frecuencia y de la polarización. Las curvas representan un promedio aproximado para todos los tipos de bosque, en frecuencias de hasta 3.000 MHz. Cuando la atenuación adicional es alta (por ejemplo, superior a 30 dB), debe considerarse la posibilidad de difracción, en obstáculo agudo o el modelo de tierra esférica.



A: Polarización vertical
B: Polarización horizontal

2.12.- ATENUACIÓN POR GASES Y VAPORES ATMOSFÉRICOS

Para trayectos troposféricos, las moléculas de O_2 y H_2O absorben energía electromagnética, produciendo una atenuación que puede ser muy elevada en ciertas frecuencias. Es atenuación adicional sólo tiene importancia en frecuencias superiores a 10 Ghz.

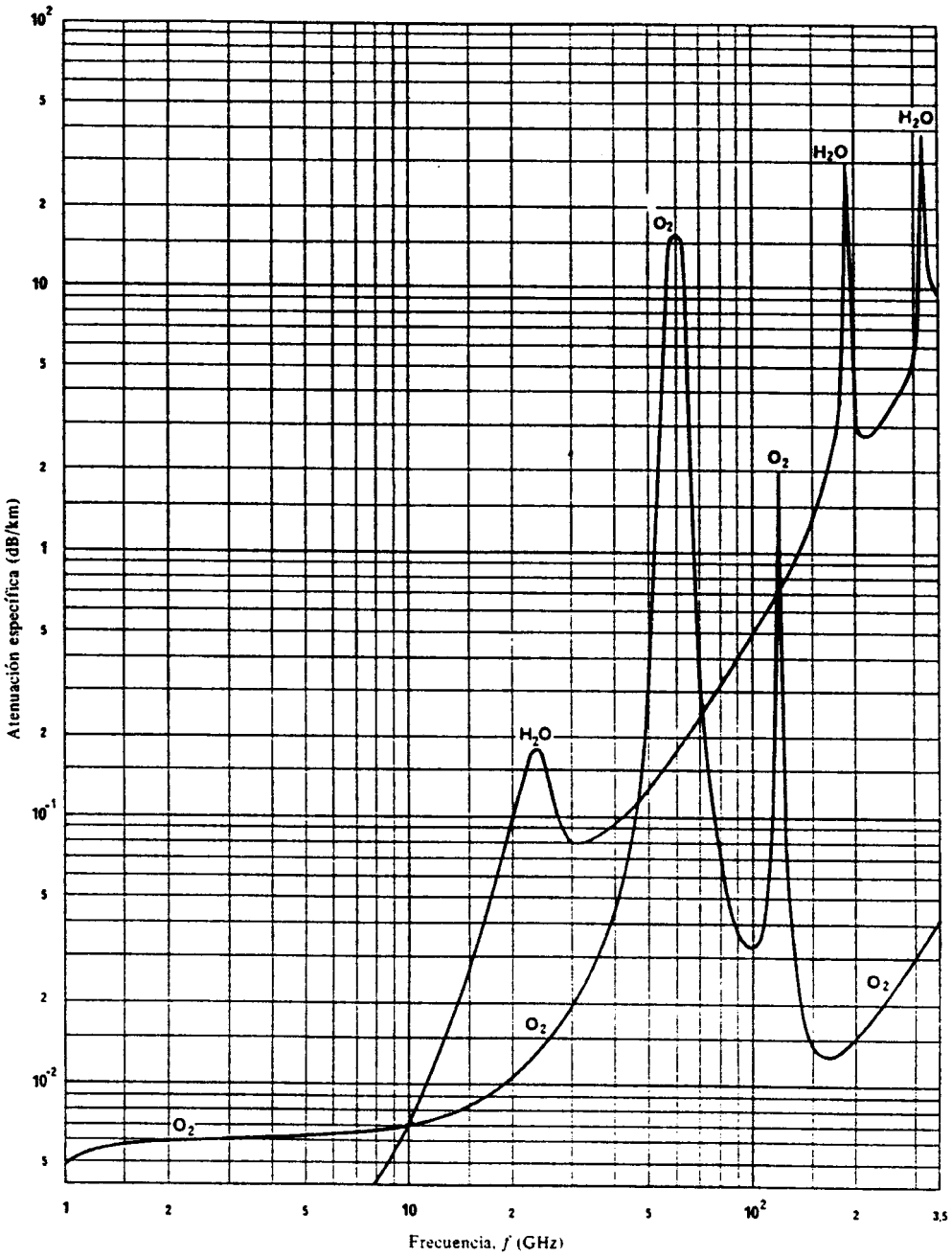
En los trayectos poco inclinados, próximos al suelo, la atenuación debida a estos efectos se calcula mediante la expresión:

$$Aa = \gamma a \cdot d$$

donde γa es la atenuación específica (dB/km) y d, la distancia. El parámetro γa se desglosa en dos:

$$\gamma a = \gamma_0 + \gamma_w$$

donde γ_0 y γ_w son las atenuaciones específicas para el oxígeno y el vapor de agua, respectivamente, y se han representado en la figura siguiente. En la que se observa que tanto O_2 como el H_2O presentan crestas de elevada atenuación que corresponden a las frecuencias de resonancia molecular. Entre estas crestas aparecen «ventanas espectrales» dentro de las cuales se utilizan las frecuencias en los radioenlaces del servicio fijo. En ocasiones, cuando se desea una radiocomunicación local, de muy corto alcance, puede ésta efectuarse en las frecuencias de las crestas de atenuación, a fin de evitar que la señal se propague lejos y pueda causar interferencias.



2.13.- ATENUACIÓN POR LLUVIA

En los radioenlaces troposféricos y por satélite, existe también una componente de atenuación debida a la absorción y dispersión por hidrometeoros (lluvia, nieve, granizo). En general, para los cálculos de disponibilidad de radioenlaces, sólo es necesario evaluar la atenuación por lluvia excedida durante porcentajes de tiempo pequeños, y para frecuencias superiores a unos 6 GHz.

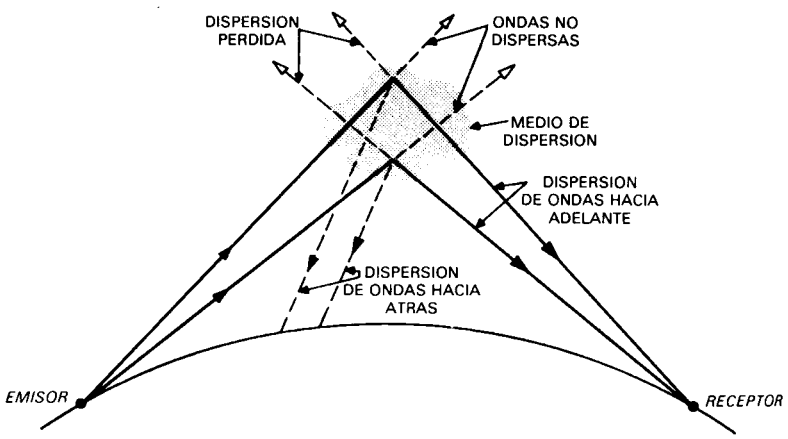
La Rec. UIT-R 530, establece el procedimiento a seguir para evaluar la atenuación por lluvia.

La lluvia además de atenuar la señal, produce un efecto de despolarización sobre la misma, que se traduce en una degradación de la discriminación por polarización cruzada (XPD). Ello puede provocar un aumento de la interferencia cocanal, sobre todo en radioenlaces que trabajan con las dos polarizaciones en una misma frecuencia.

2.14.- PROPAGACIÓN POR DISPERSIÓN TROPOSFÉRICA

La propagación por dispersión troposférica constituye una modalidad de transmisión en frecuencias superiores a unos 100 MHz que se produce como consecuencia de efectos dispersivos ocasionados por irregularidades troposféricas, los cuales provocan la vuelta a tierra de energía radioeléctrica lanzada hacia la troposfera, pudiendo, de este modo, conseguirse un alcance superior al horizonte radioeléctrico. Se ha comprobado que, para distancias iguales a las de horizonte y superiores, los mecanismos de propagación son la difracción y la dispersión. Sin embargo, la atenuación por difracción aumenta muy rápidamente cuando lo hace la distancia, por lo que mucho más allá del horizonte sólo queda como posible mecanismo la dispersión.

No parece existir todavía una teoría firme que explique esta modalidad de propagación. Se ha supuesto que la dispersión tiene lugar en el llamado «volumen común» formado por la intersección de los haces de las antenas de transmisión y recepción.



La necesidad de establecer radiocomunicaciones a distancias superiores al horizonte, por ejemplo para salvar zonas boscosas, brazos de mar, o regiones carentes de infraestructuras a través de las cuales no es posible el establecimiento de sistemas de transmisión por línea, determinó la realización de los llamados «radioenlaces troposféricos» o «radioenlaces transhorizonte». Tales radioenlaces presentan la ventaja de poder interconectar puntos separados en las condiciones anteriores, pero tienen el inconveniente de que requieren una potencia de transmisión muy alta, a causa de la elevada pérdida de propagación asociada a este mecanismo. Además, experimentan intensos desvanecimientos por propagación multitrayecto, siendo necesario para combatirlos el empleo de la recepción por diversidad. Hoy día los radioenlaces troposféricos van siendo sustituidos por enlaces vía satélite, mucho más estables y de mayor calidad.

Es conveniente disponer de métodos de predicción de la pérdida por dispersión troposférica tanto para la planificación de radioenlaces transhorizonte como, sobre todo, para la evaluación de interferencias de señales propagadas mediante este mecanismo. El tema está ampliamente desarrollado en la Rec. UIT-R 617.

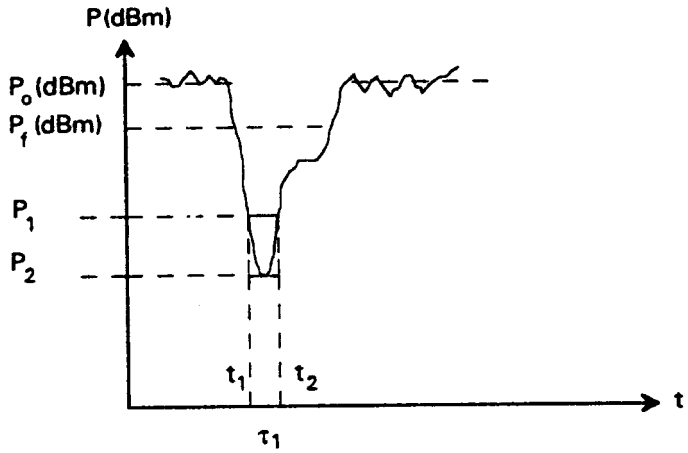
2.15.- DESVANECIMIENTO

La propagación de las señales radioeléctricas a través de diversos medios está sujeta a la variabilidad de las características físicas de estos medios. Por ello, la pérdida básica de propagación es una variable aleatoria. Supuesto invariable con el tiempo el valor medio de la potencia transmitida, la variabilidad de la pérdida básica implica que la potencia recibida sea también variable. Se denomina, en general, potencia recibida nominal al valor mediano de la potencia recibida y suele ser uno de los objetivos de diseño de los sistemas de radiocomunicaciones.

Se conoce con el nombre de desvanecimiento a toda disminución de la potencia recibida de señal con relación a su valor nominal. La diferencia entre este nivel nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimiento se llama profundidad de desvanecimiento y se expresa en dB. Al intervalo de tiempo que media entre la disminución y la recuperación del nivel nominal, se le llama duración del desvanecimiento.

En la siguiente figura se aclara la terminología utilizada. Se observan pequeñas variaciones aleatorias de la señal en torno al valor nominal de potencia P_0(dBm). Ocasionalmente, hay un desvanecimiento intenso y, en ese caso, en su entorno el valor mediano de la potencia es P_f(dBm), que es inferior a Po. Se llama depresión de la mediana o depresión de Pearson a esta disminución del valor mediano que acompaña a los desvanecimientos intensos. En el instante t_1 el valor de la potencia es P_1 (dBm). La profundidad de desvanecimiento F_1 es igual a P_0 - P_1 (dB). Para $t > t_1$, el nivel de señal sigue disminuyendo. El nivel mínimo es P_2 y corresponde a la profundidad $F_1 = P_0 - P_2$. Seguidamente, el nivel de la señal se recupera y en el instante t_2 alcanza nuevamente el valor P1. En consecuencia, la duración del desvanecimiento F_1 es:

$$\tau_1 = t_2 - t_1$$



La expresión cuantitativa del desvanecimiento puede hacerse, alternativamente, en términos de la tensión de envolvente de la señal. Si llamamos *r* a tal tensión, se tiene:

$$F_1 = P_0 - P_1 = 20\log\frac{r_0}{r_1}$$

2.15.1. Clasificación de los desvanecimientos

Hay diversos criterios para la clasificación de los desvanecimientos. En la Tabla siguiente se ofrece una posible clasificación según diversas características.

Característica	*Tipo de desvanecimiento*	
Profundidad	Profundo	Muy profundo
Duración	Lento	Rápido
Característica espectral	Plano	Selectivo
Mecanismo de producción	Factor k	Multitrayecto
Distribución probabilística	Gaussiano	Rayleigh, Rice
Dependencia temporal	Continuado	Puntual

Se han dispuesto las distintas clases de desvanecimientos en dos columnas. Dentro de cada columna hay cierta coherencia, esto es, un desvanecimiento muy profundo suele ser selectivo, se produce por interferencia multitrayecto y se modela mediante una distribución Rayleigh.

Un desvanecimiento es plano, cuando la caída de nivel afecta por igual a todas las componentes del espectro de una portadora modulada. En cambio, los desvanecimientos selectivos producen distorsión en el espectro de la señal modulada, al afectar de modo diferente a unas frecuencias y a otras.

Ello provoca, a su vez, una degradación en la seiíal demodulada. Por este motivo, es necesario dotar a ciertos sistemas de radiocomunicaciones de contramedidas protectoras de los desvanecimientos selectivos.

Se llaman desvanecimientos de «potencia», o de «factor k-», a los producidos por variaciones del índice de refracción troposférica que, al aumentar la curvatura aparente de la Tierra, reducen el margen libre de obstáculos, pudiendo, incluso, llegar a convertir un trayecto con visibilidad directa en otro obstruido. Este tipo de desvanecimientos suele ser lento, con duración larga y profundidades de hasta unos 6 dB.

Como el radio de Fresnel depende de la frecuencia, este desvanecimiento también variará con la frecuencia, pero a gran escala, es decir, de una banda a otra, pero no dentro de la misma banda. Se trata, pues, de un desvanecimiento plano.

También puede producirse este desvanecimiento por mecanismos de superrefracción y formación de conductos que desenfocan el haz radioeléctrico.

Las variaciones de nivel correspondientes a estos desvanecimientos se modelan mediante distribuciones gaussianas o expresiones empíricas.

Los desvanecimientos de factor k pueden controlarse mediante una elección adecuada de las alturas de antenas.

Los desvanecimientos multitrayecto se originan por la aparición de varios caminos de propagación entre el transmisor y el receptor, de forma que se produce una interferencia entre el rayo directo y los que alcanzan la antena receptora con diversos ángulos, tras recorrer otros trayectos de propagación. La señal resultante es la suma de una componente prácticamente constante (señal directa) y otras componentes de amplitudes variables y fases aleatorias, dando una resultante que puede tener una amplitud variable en función de las amplitudes y fases instantáneas de las componentes.

En condiciones «normales» de propagación, suele estar presente otro desvanecimiento de pequeña intensidad, originado por irregularidades en la troposfera, denominado «centelleo», y que se modela mediante una distribución gaussiana.