

## Tema 3: Propagación de ondas en medio natural

- 3.1 Influencia del medio en la propagación
  - 3.2 Mecanismos de propagación
  - 3.3 Propagación por onda de superficie
  - 3.4 Propagación por onda ionosférica
  - 3.5 Propagación por onda de espacio
- 

### 3.1 Influencia del medio en la propagación.

El suelo, la troposfera y la ionosfera son responsables de que el modelo ideal de propagación en espacio libre, descrito en la ecuación de Friis, no sea correcto en la mayoría de los casos reales. La orografía del suelo y sus características morfológicas, que condicionan sus propiedades eléctricas, afectan a la propagación de las ondas electromagnéticas. Por ejemplo, a bajas frecuencias (por debajo de MF), la Tierra se comporta como buen conductor, excitándose una onda de superficie que se adapta a la orografía del terreno y transporta los campos electromagnéticos mucho más allá de la zona de visibilidad directa. A más alta frecuencia, la atenuación de este mecanismo es muy elevada y es necesario elevar las antenas respecto al suelo. En este caso, la comunicación se establece normalmente como suma de una onda directa y otra reflejada en el suelo, que interfieren entre sí.

La concentración no uniforme de gases en la troposfera, que típicamente es mayor a menor altura, produce una curvatura de los rayos debido al cambio del índice de refracción del medio con la altura. Por otra parte en las bandas de microondas se produce una atenuación adicional en las moléculas de los gases que constituyen la atmósfera. Además, el agua en forma de vapor de agua, o de hidrometeoros como lluvia, niebla, nieve, etc, produce atenuaciones adicionales en la propagación y cierta despolarización.

Finalmente, la presencia de la ionosfera, capa de la atmósfera entre unos 60 y 400 km, refleja las ondas de frecuencias bajas (VLF y LF), refracta a frecuencias de MF y HF, y despolariza la onda en las bandas de VHF y UHF.

De lo antes dicho, la evaluación de la potencia recibida ya no puede realizarse empleando únicamente la Fórmula de Friis. Esta fórmula debe corregirse introduciendo en ella diversos factores de atenuación correspondientes a cada uno de los fenómenos de propagación. Estos factores presentan además una dificultad puesto que el entorno es, al menos, parcialmente desconocido, y además, varía con el tiempo y con el espacio. De ellos se obtiene generalmente un valor medio y una desviación típica, lo que permite valorar la potencia o el campo recibido de modo estadístico. En los modelos que se presentan a continuación se estudia la fenomenología de los diversos mecanismos, dando una buena estimación de los valores medios. Los modelos más realistas que contemplan las variaciones temporales responden a modelos estadísticos obtenidos a partir de medidas.

En el modelo de propagación en espacio libre, donde las antenas se suponían aisladas y situadas en el vacío, la densidad de potencia incidente sobre la antena receptora es (3.1), tal como vimos en el capítulo anterior:

$$\langle S \rangle = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi d^2} \quad (3.1)$$

donde  $d$  es la distancia al transmisor, y el producto de potencia transmitida por ganancia la PIRE del transmisor. El campo incidente sobre la antena receptora se puede escribir en función de la densidad de potencia, y despejando podemos obtener el campo eléctrico en dicha situación:

$$\langle S \rangle = \frac{|E|^2}{240\pi} \Rightarrow |E| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} \quad (3.2)$$

Cuando nos encontramos en una situación de espacio real, el campo incidente no es exactamente el que señala la expresión (3.2). Hay que modificarlo con un factor que va a depender del entorno, que se denomina factor de atenuación de campo.

$$|E| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} F_c \quad (3.3)$$

Para el cálculo de la potencia recibida, en condiciones de espacio libre se aplicaba la fórmula de Friis. En condiciones de propagación en un entorno real hay que incluir un factor de potencia  $F_p$ , que multiplica a la potencia recibida, obtenida a partir de la fórmula de Friis en espacio libre. Este factor de potencia es el módulo al cuadrado del factor de campo.

$$\langle S \rangle = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi d^2} F_p \Rightarrow F_p = |F_c|^2 \quad (3.4)$$

### 3.2 Mecanismos de propagación

La banda de frecuencia de trabajo va a definir los mecanismos de propagación de ondas que hay que considerar a la hora de analizar un canal de radio. Del mismo modo van a diferir las aplicaciones a las que se puede dar servicio en cada una de las bandas, tal como se vio en el Apartado 1.2.

En la banda de muy bajas frecuencias VLF (3 kHz – 30 kHz) tanto el suelo como la ionosfera se comportan como buenos conductores. La distancia que separa al suelo de la ionosfera (entre 60 y 100 km) es comparable con la longitud de onda en dicha banda (entre 100 km a 3 kHz y 10 km a 30 kHz). La propagación de ondas se puede modelar como una guía esférica con pérdidas. Las aplicaciones para las que se emplea este mecanismo de propagación son comunicaciones a larga distancia (navales y submarinas) o aquellas que deseen cobertura global (telegrafía naval, ayuda a la navegación ...) Las antenas que se utilizan son verticales, eléctricamente pequeñas, aunque de dimensiones físicas muy grandes.

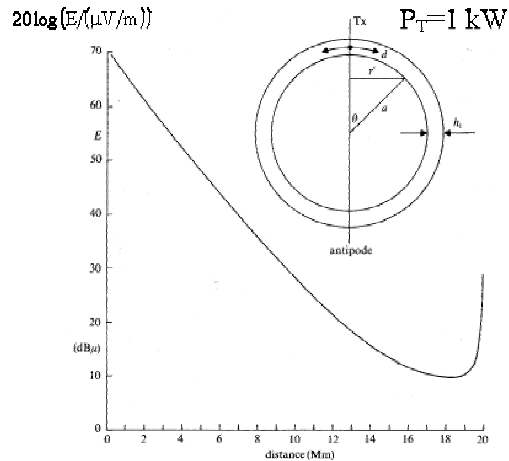


Figura 3.1: Variación del Campo eléctrico con la distancia para VLF

A las frecuencias de LF (30 kHz – 300 kHz) y MF (300 kHz – 3 MHz) se produce la propagación mediante onda de tierra u **onda de superficie**. Esta onda se propaga en la discontinuidad tierra – aire debido a las corrientes inducidas en la Tierra. Este modo sólo propaga la polarización vertical, porque la polarización horizontal se atenúa muy rápidamente debido al carácter conductor de la superficie de la tierra en estas frecuencias. El alcance que se obtiene varía con la frecuencia, la potencia transmitida y el tipo de suelo (tierra seca, húmeda, mar ..) En LF se pueden conseguir alcances de hasta unos 2000 km, en MF de hasta unos 300 km, mientras que ya en frecuencias más altas como HF, apenas se llega a los 50 km. Las aplicaciones más importantes son los sistemas de comunicaciones navales y los sistemas de radiodifusión (LF y onda media en AM). Las antenas que se utilizan habitualmente son monopolos verticales con alturas entre 50 y 200 m que radian polarización vertical.

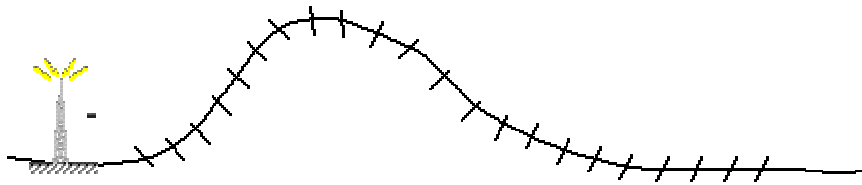


Figura 3.2: Propagación por onda de tierra

En las bandas de MF (300 kHz – 3 MHz) y HF (3 MHz –30 MHz) la ionosfera “refleja” las ondas radioeléctricas, haciendo que éstas retornen a la tierra. Este mecanismo se denomina **reflexión ionosférica**<sup>1</sup>. Los enlaces radio transoceánicos de Marconi sugirieron a Heaviside y Kennelly la existencia de esta capa ionizada en la atmósfera que reflejaba las ondas enviadas al espacio. En dichos enlaces estas ondas llegaban al mar y se reflejaban de nuevo, y de este modo, en varios saltos, se conseguía cruzar el océano. El alcance que se consigue para un solo salto depende de la frecuencia, la hora del día y de la dirección de apuntamiento de la antena. En MF, durante la noche, es de hasta unos 2000 km mientras que en HF se pueden alcanzar hasta 4000 km tanto de día como de noche. Este mecanismo de propagación lo utilizan los radioaficionados, comunicaciones navales y, antes de existir los satélites eran el medio más utilizado para comunicaciones de voz, punto a punto y a largas distancias. Se utilizan antenas elevadas con polarizaciones horizontales y verticales como abanicos logperiódicos, antenas rómbicas ...

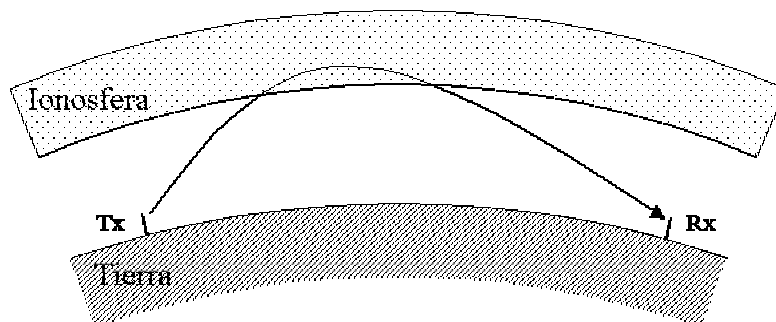


Figura 3.3: Propagación por onda ionosférica

Para las frecuencias de VHF (30 MHz – 300 MHz) y superiores el mecanismo de propagación es el de **onda de espacio**. En estas frecuencias la ionosfera se hace transparente y los mecanismos de propagación se ven afectados por la influencia del suelo (mediante reflexiones o difracciones) y por la troposfera (mediante los procesos de refracción, atenuación y dispersión). El alcance es muy variable: en VHF y UHF la difracción permite alcances algo más allá del horizonte visible, mientras que a frecuencias superiores los radioenlaces punto a punto necesitan visión directa, por lo que la distancia se reduce a algunas decenas de km (el valor depende de la frecuencia y las alturas de las antenas). En comunicaciones vía satélite se puede llegar hasta 36000 km (satélites

---

<sup>1</sup> Realmente el mecanismo es de refracción y no de reflexión.

geostacionarios) y en aplicaciones de observación de espacio profundo hasta millones de km. La propagación por onda de espacio es el mecanismo que se utiliza en la mayoría de los sistemas de comunicaciones: radiodifusión de FM y TV, telefonía móvil, radioenlaces fijos, radiocomunicaciones vía satélite, sistemas radar ... Las antenas que se emplean son elevadas y directivas, como yagis, bocinas, arrays, reflectores ... En la Figura 3.4 se presentan varios mecanismos de propagación por onda de espacio. El más común es el radioenlace terrenal, donde hay que tener en cuenta los efectos del suelo (reflexión y difracción) y los efectos de la troposfera (atenuación y refracción). En los enlaces vía satélite el nivel de señal recibido es muy bajo, por lo que es importante escoger frecuencias suficientemente altas para que la ionosfera sea transparente. Además hay que considerar los efectos de la atenuación troposférica.

Por último, hay un mecanismo de propagación, denominado dispersión troposférica, que aprovecha el fenómeno de dispersión de la onda electromagnética debida a las irregularidades dieléctricas de la troposfera asociadas a variaciones de densidad y temperatura de gas. Con este mecanismo se conseguían alcances bastante mayores que la visión directa, pero su poca estabilidad y la necesidad de muy altas potencias transmitidas lo han dejado prácticamente en desuso, aunque sigue siendo utilizado por los radares transhorizonte.

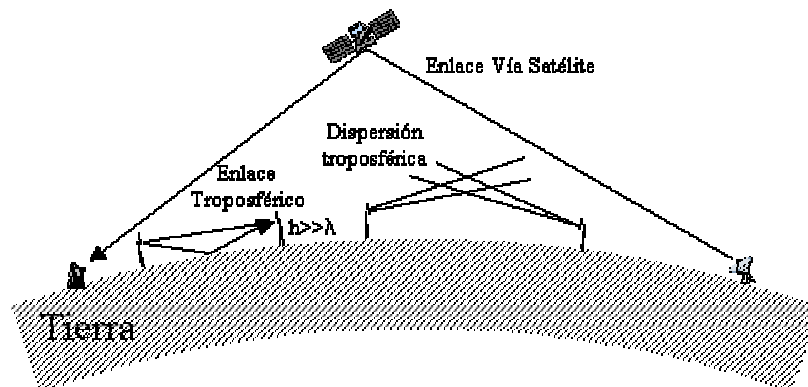


Figura 3.4: Mecanismos de propagación por onda de espacio

### 3.3 Propagación por onda de superficie

Los primeros modelos de onda de superficie fueron propuestos por A. Sommerfeld en 1909, aunque fueron Shuleikin y Van der Pol los que aplicaron estos trabajos a la ingeniería de comunicaciones. Posteriormente Burrows, Norton y Wait contribuyeron decisivamente para configurar los modelos de Onda de Tierra. En general estos modelos suponen una tierra lisa y de características eléctricas uniformes, lo que implica una longitud de onda mucho mayor que las posibles discontinuidades. Además se suponen que tanto la antena transmisora como la antena receptora se encuentran muy próximas a la superficie terrestre de modo que:

- Una onda de superficie se propaga en la discontinuidad tierra – aire. La componente vertical se propaga sobre la superficie sin apenas pérdidas, mientras que la componente horizontal se atenúa por el efecto de la conductividad del suelo. La atenuación por absorción es tanto mayor cuanto menor sea la conductividad del suelo. Además de la atenuación por absorción se produce una atenuación por la dispersión de la energía.

- La onda de espacio compuesta por el rayo directo y del rayo reflejado en el suelo se anula a nivel del suelo, ya que el coeficiente de reflexión en el suelo es prácticamente igual a  $-1$  y los caminos de ambos rayos son prácticamente iguales.

La propagación de estas señales depende fundamentalmente de la frecuencia y del tipo de suelo. La caracterización correcta del suelo es fundamental para una correcta predicción de la propagación mediante onda de superficie. El suelo se caracteriza como un dieléctrico con pérdidas definido por los parámetros de permitividad relativa y conductividad (Tabla 3.1). En función de estos valores y de la frecuencia predominan corrientes de desplazamiento o de conducción, y el suelo se asemeja más a un dieléctrico o a un conductor.

Tipo de suelo	$\epsilon_r$	$\sigma$ (mS/m)
Agua de mar	80	4000
Agua dulce	80	5
Tierra húmeda	15-30	5-20
Suelo rocoso	7	1-5
Tierra seca	4	1-10

Tabla 3.1: Caracterización del suelo

Para el cálculo del alcance mediante este mecanismo de propagación se emplea un modelo aproximado de tierra plana, válido para distancias cortas, y un modelo de tierra esférica para distancias largas. A continuación veremos ambos modelos:

**Modelo de tierra plana:**

Esta modelo simple supone una propagación de espacio libre afectada por un factor de atenuación de campo eléctrico  $F_e$ , tal como aparece en la Expresión (3.3). Las antenas que se utilizan son monopolos sobre tierra, la cual se modela mediante un plano conductor. En el Tema 4 se realizará un análisis de estos elementos radiantes mediante teoría de imágenes. Para este modelo, y a efectos prácticos, basta con conocer la directividad de las mismas, que depende de su longitud:

- Monopolo corto (longitudes mucho menores  $\lambda$ ) sobre tierra  $D_0 = 3$  (4.77 dBi)
- Monopolo de longitud  $\lambda/4$  sobre tierra  $D_0 = 3.28$  (5.16 dBi) El factor de atenuación de campo  $F_e$  (3.5) se calcula a partir de una variable  $p$  denominada distancia

numérica (3.6), que depende de la distancia, de la frecuencia (o longitud de onda) y de la conductividad del suelo.

$$F_e = \frac{2 + 0.3p}{2 + p + 0.6p^2} \quad (3.5)$$

$$p \approx \frac{\pi d}{60\lambda^2 \sigma} \quad (3.6)$$

Para distancias suficientemente grandes ( $p \gg 1$ ), el factor de atenuación de campo tiende a la Expresión (3.7) con lo que se tiene que el campo eléctrico varía como  $1/d^2$ :

$$p \gg 1 \Rightarrow F_e \approx \frac{1}{2p} \quad (3.7)$$

La validez de este modelo se extiende hasta la distancia en la que la difracción asociada a la curvatura de la Tierra cobra importancia (3.8)

$$d_{\max} \text{ (km)} = \frac{100}{\sqrt[3]{f \text{ (MHz)}}} \quad (3.8)$$

### **Modelo de tierra esférica:**

Para distancias mayores es necesario contar con los fenómenos asociados a la difracción que produce la curvatura de la Tierra. Para ello la UIT-R proporciona gráficas que modelan la intensidad de campo producida por una antena transmisora, de tipo monopolo corto con potencia radiada de 1 kW, en función de la frecuencia, la distancia y el tipo de terreno. En las Figuras 3.5 y 3.6 se presentan las gráficas para dos tipos de terreno: tierra seca y mar. Se puede observar que el alcance que se obtiene sobre el mar es mucho mayor del que se obtiene sobre tierra seca para las mismas condiciones.

Para otro tipo de antenas u otra potencia de transmisión hay que realizar una transformación de los valores leídos en la carta a valores reales de campo. Esta transformación pasa por la relación entre la PIRE realmente utilizada y la PIRE del caso de referencia. Este valor de PIRE de referencia es 3 kW (1 kW de potencia radiada por un monopolo corto, con directividad igual a 3).

$$E = E_{\text{carta}} \sqrt{\frac{P_{\text{rad}} \text{ (kW)} \cdot D_o}{3}} \quad (3.9)$$

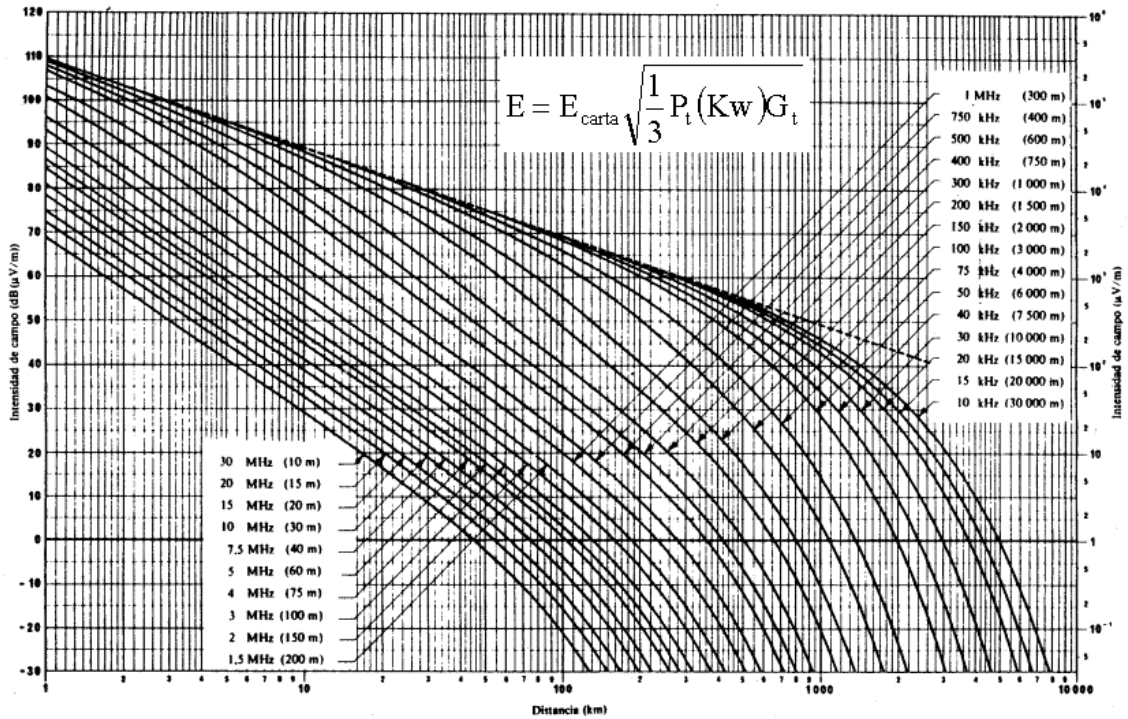


Figura 3.5: Intensidad de la onda de superficie en tierra seca.  $P_{\text{radiada}} = 1 \text{ kW}$ . Monopolo corto

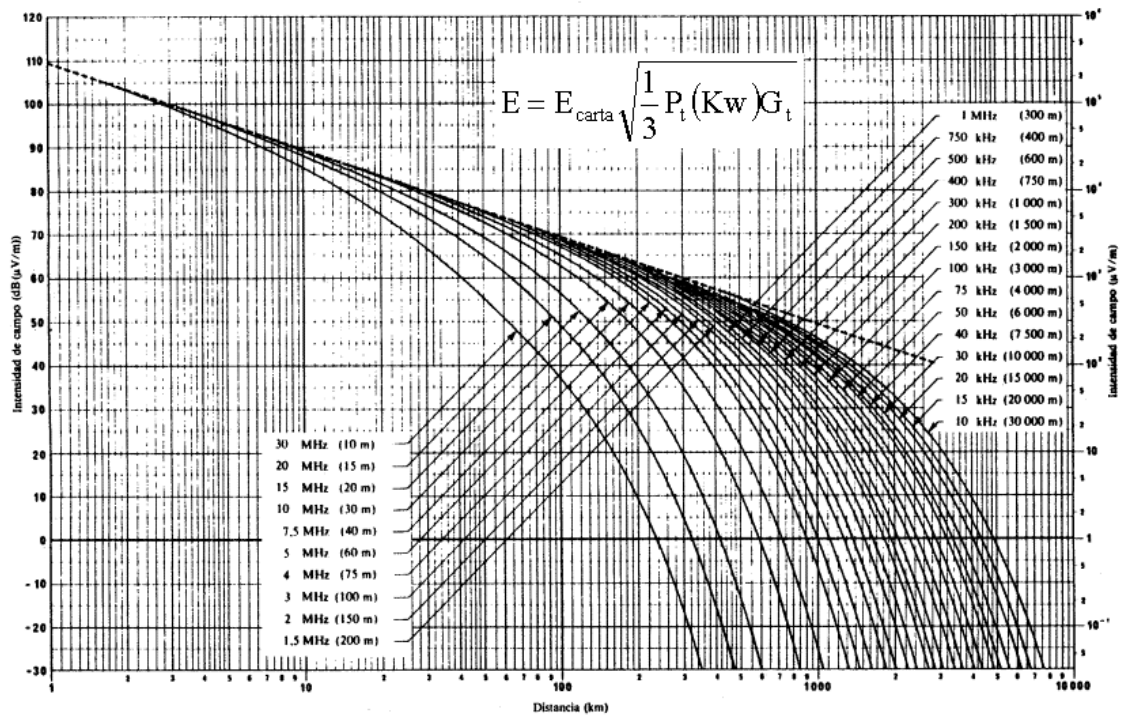


Figura 3.6: Intensidad de la onda de superficie en mar.  $P_{\text{radiada}} = 1 \text{ kW}$ . Monopolo corto.



Las conclusiones principales que se obtienen para la propagación por onda de superficie, tras examinar los gráficos anteriores, son:

- Mientras la antena transmisora sea eléctricamente corta (monopolo corto) la amplitud de los campos no depende de la altura real de la antena.
- En regiones próximas a la antena el campo decae como  $1/d$ .
- En regiones intermedias el campo decrece como  $1/d^2$
- A grandes distancias de la antena transmisora, donde la curvatura de la Tierra se hace importante, el campo decrece de forma exponencial.
- El alcance depende del tipo de terreno, siendo mayor en zonas húmedas que en secas.
- El alcance, para una sensibilidad dada, es menor cuanto mayor es la frecuencia. Por encima de MF el alcance sobre tierra es muy reducido.

---

### Ejemplo 3.1: Propagación por onda de superficie

Empleando las cartas de la UIT-R, obtenga la distancia a la que se alcanza un campo de  $100 \mu\text{V/m}$  eficaces transmitiendo con un mástil de 75 m que a 1 MHz radia una potencia de 91.5 kW.

- Sobre la superficie del mar
- Sobre tierra seca

Para resolver el ejercicio se utilizan las gráficas de las Figuras 3.5 y 3.6 para la frecuencia de 1MHz. Conocemos que el campo eléctrico de  $100 \mu\text{V/m}$ , se consigue radiando 91.5 kW con una antena de longitud igual a 75 metros, que corresponde a un monopolo de longitud  $\lambda/4$ . Para dicha longitud, la directividad del monopolo es 3.28, con lo que la PIRE es:

$$\text{PIRE} = P_{\text{rad}} \cdot D_o = 91.5 \cdot 3.28 = 300 \text{ kW}$$

Por lo tanto, tendremos que buscar el valor de ordenadas en sendas cartas de:

$$20 \log E_{\text{carta}} = 20 \log \frac{100 \mu\text{V/m}}{\sqrt{\frac{300}{3}}} = 20 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$$

obteniendo:

- En la gráfica de **tierra seca un alcance de 100 km**
  - En la gráfica de **mar un alcance de 1100 km**
-

### 3.4 Propagación por onda ionosférica

La ionosfera es la región de las capas altas de la atmósfera (60 a 400 km de altura) que, debido a su ionización, refleja las señales radioeléctricas hasta las frecuencias de 30 MHz. En el año 1902, Kennelly y Heaviside postularon la existencia de esta capa, relacionándola como la responsable de la reflexión de las ondas electromagnéticas que hacían posibles las comunicaciones telegráficas de largas distancias, que Marconi había establecido en 1901 entre Gales y Terranova. Sin embargo, no fue hasta 1925 cuando se realizaron medidas directas que confirmaron la existencia de la ionosfera. Appleton y Barnett, mediante una transmisión vertical, determinaron la altura de reflexión de la onda en la ionosfera.

La ionización, o presencia de electrones libres, se produce fundamentalmente por las radiaciones solares en las bandas de ultravioletas y de rayos X, por los rayos cósmicos y por los meteoritos. Esto hace que la densidad de electrones varíe según la hora del día, la estación del año y los ciclos de manchas solares (con periodicidad de 11 años).

#### Capas de la ionosfera:

La densidad de electrones también varía con la altura al suelo, presentando una serie de máximos relativos que permiten dividir la ionosfera en una serie de capas. En la Figura 3.7 se presenta la densidad de electrones libres con la altura, tanto para el día como para la noche.

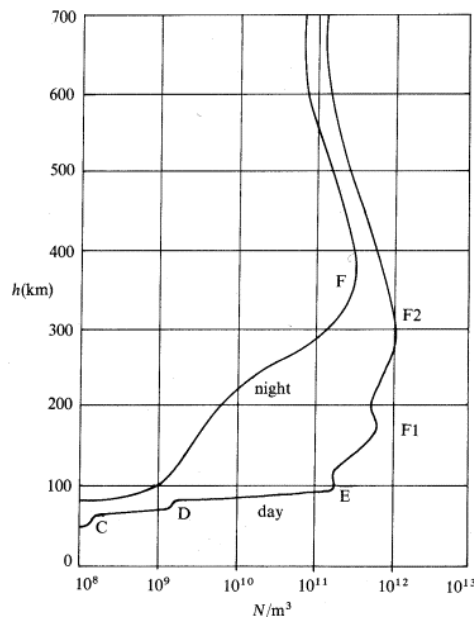


Figura 3.7: Densidad de electrones libres con la altura. Capas de la ionosfera.

La primera capa es la **capa D**. Es una zona de baja densidad electrónica comparada con la molecular, que se produce entre los 60 y los 90 km. Esta capa decrece rápidamente tras la puesta de sol y su **efecto más importante es la atenuación en la banda MF** (Figura

3.8). Este efecto hace que las señales en esta banda durante el día lleguen a Tierra muy atenuadas.

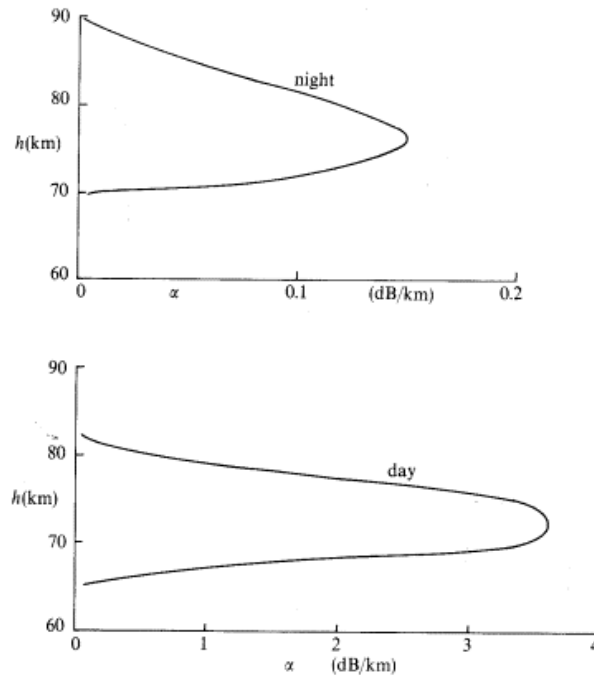


Figura 3.8: Atenuación de la capa D a 1 MHz, de noche y día

La **capa E** está localizada entre 90 y 130 km. Aparece fundamentalmente de día, y muy tenuemente por la noche, reflejando las frecuencias de MF. En determinadas situaciones y de día, aparece una capa E esporádica, situada entre 90 y 150 km, haciendo que la atenuación sea mayor.

La capa más importante, donde se produce principalmente la reflexión ionosférica, es la **capa F**. Se extiende desde los 150 hasta los 400 km, y de día se desdobra en dos **capas F1 y F2**.

### Propagación en la ionosfera: modelo de plasma y rotación de Faraday

La propagación de las ondas electromagnéticas en la ionosfera se modela como la propagación en un plasma simple, definida como una región del vacío que contiene electrones libres en la que se puede despreciar el movimiento térmico de los mismos. La frecuencia de colisiones  $\nu$  entre un electrón y las distintas partículas (átomos, moléculas, iones ...) es función de la densidad molecular  $N_p$ . La velocidad de un electrón, sometido a las fuerzas del campo electromagnético, se puede obtener igualando las fuerzas eléctricas y mecánicas a las que está sometido.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} + \nu m \vec{v} = \vec{F}_{\text{eléctrica}} + \vec{F}_{\text{magnética}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_{\text{eléctrica}} = -e\vec{E} \\ \vec{F}_{\text{magnética}} = -e\vec{v} \times \mu_0 \left( \vec{H}_0 + \frac{\hat{r} \times \vec{E}}{\eta} \right) \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Despreciando el efecto del campo magnético terrestre, para simplificar el modelo, y teniendo en cuenta que la fuerza eléctrica es mucho mayor que la fuerza magnética se obtiene:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{H}_0 \equiv 0 \\ |e\vec{E}| \gg \left| e\vec{v} \times \frac{1}{c} (\hat{r} \times \vec{E}) \right| \end{array} \right\} \Rightarrow m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - \nu m \vec{v} \quad (3.11)$$

En régimen permanente sinusoidal, la velocidad compleja  $\nu$ , despejando, resulta:

$$\vec{v} = \frac{-e\vec{E}}{m(\nu + j\omega)} \quad (3.12)$$

de modo que la corriente eléctrica de conducción en un plasma de  $N$  electrones/m<sup>3</sup> vale:

$$\vec{J} = -Ne\vec{v} = \frac{Ne^2}{m(\nu + j\omega)} \vec{E} \quad (3.13)$$

Sustituyendo esta corriente en la ley de Ampere, se puede definir una permitividad relativa equivalente y una conductividad equivalente, que permiten modelar la propagación en el plasma, cuyos valores aproximados cuando  $\omega \gg \nu$  son:

$$\epsilon_{\text{eq}} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{req}} \Rightarrow \epsilon_{\text{req}} = 1 - 80.8 \frac{N}{f^2} \quad (3.14)$$

$$\text{Índice de refracción:} \quad n = \sqrt{\epsilon_{\text{req}}} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{\text{eq}} = 2.82 \cdot 10^{-8} \frac{N\nu}{\omega^2} \quad (3.16)$$

En condiciones de plasma de bajas pérdidas se puede definir un coeficiente de propagación definido por una constante de fase  $\beta$  y una constante de atenuación  $\alpha$ , que dependen de los parámetros anteriores.

$$\alpha = 1.16 \cdot 10^{-3} \frac{N\nu}{f^2} \text{ dB/km} \quad (3.17)$$

$$\beta = \beta_0 \sqrt{\epsilon_{\text{req}}} \quad (3.18)$$

Nótese que la atenuación es proporcional a la frecuencia de colisiones, que a su vez es proporcional a la densidad de partículas (mayor en la capa D). Asimismo, la atenuación es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, de modo que, aunque es muy elevada en la capa D durante el día en onda media (MF), se reduce considerablemente en HF.

Para una densidad de electrones dada, la permitividad equivalente hace que la constante de propagación presente una frecuencia de corte ( $f_c$ ), por debajo de la cual la onda se hace evanescente reflejándose su energía.

$$f_c = \sqrt{80.8N} \quad (3.19)$$

Además, la ionosfera se comporta como un medio dispersivo: las velocidades de fase y de grupo son funciones de la frecuencia y la altura, desde el momento en que el índice de refracción  $n$  lo es. Esto implica que sólo se pueda utilizar estos mecanismos de propagación para la transmisión de señales de banda estrecha (telegrafía, telefonía, radiodifusión AM ...)

$$\begin{aligned} v_f &= \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{req}}}} = \frac{c}{n} > c \\ v_g &= \frac{d\omega}{d\beta} = c\sqrt{\epsilon_{\text{req}}} = c \cdot n < c \end{aligned} \quad (3.20)$$

Por otra parte, la presencia del campo magnético terrestre imprime un movimiento de rotación a los electrones. Si se tiene en cuenta este efecto giratorio de los electrones, la constante dieléctrica compleja toma dos posibles valores. Esto hace que cuando la onda incide en la ionosfera se descomponga en dos rayos, denominados ordinario y extraordinario, asociados cada uno a una constante de propagación diferente. Cada uno de ellos sigue una trayectoria diferente con velocidades de fase y de grupo diferentes, dando lugar en recepción a una combinación de las dos señales desfasadas entre ellas, que produce en general una rotación (variable en el tiempo) de la polarización del campo recibido respecto de la del campo incidente. Esta rotación recibe el nombre de Rotación de Faraday.

La rotación de Faraday no sólo tiene importancia en la banda de propagación ionosférica sino que hay que tenerla en cuenta en las bandas utilizadas para comunicaciones por satélite. En estas frecuencias, el efecto sobre una onda linealmente polarizada que atraviesa la ionosfera se puede analizar descomponiéndola en dos polarizaciones circulares ortogonales. El campo eléctrico de estas polarizaciones hace rotar a los electrones a izquierdas y derechas respectivamente, de forma que la rotación giroscópica del campo magnético en un caso se suma y en el otro se resta, dando lugar a dos constantes de propagación diferentes para ambas polarizaciones circulares. De este modo a la salida de la ionosfera una polarización circular está desfasada respecto de la otra dando lugar a que la polarización lineal esté rotada un determinado ángulo respecto a la posición que ocupaba a la entrada de la ionosfera. El ángulo de rotación es tanto menor cuanto mayor es la frecuencia. Para frecuencias superiores a 10 GHz la rotación es totalmente despreciable (inferior a 1°), sin embargo en las bandas de VHF y UHF puede tener valores

considerables que son impredecibles. Este es el motivo por el que a estas frecuencias es necesario emplear polarización circular en las comunicaciones tierra - satélite.

**Modelo de refracción ionosférica:**

En la ionosfera el índice de refracción disminuye con la altura, puesto que la densidad de electrones aumenta. Si se considera un modelo de ionosfera estratificado en planos paralelos (Figura 3.9), y consideramos un rayo incidente procedente de la Tierra, éste se curva en la ionosfera según un ángulo que resulta de la aplicación de la Ley de Snell.

$$n_0 \text{sen} \phi_0 = n_1 \text{sen} \phi_1 = \dots = n_i \text{sen} \phi_i \tag{3.21}$$

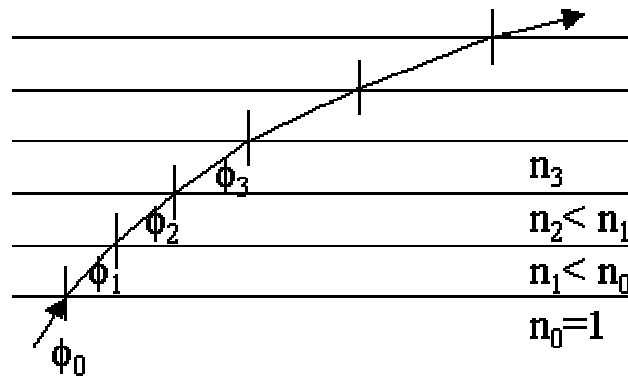


Figura 3.9: Modelo estratificado de ionosfera

Se producirá retorno a tierra siempre y cuando el rayo alcance la horizontal, es decir si  $\phi_i = 90^\circ$ . Considerando que el índice de refracción en Tierra es  $n_0 = 1$ , esa situación se produce para un índice de refracción en la ionosfera dado por:

$$n_i = \sqrt{1 - 80.8 \frac{N}{f^2}} = \text{sen} \phi_0 \tag{3.22}$$

En el caso de incidencia vertical tenemos que  $\phi_0 = 0^\circ$ , con lo que se producirá el retorno (“reflexión”) siempre y cuando se alcance un punto de la ionosfera donde  $n_i = 0$ . Esto ocurrirá dentro de cada capa para aquellas frecuencias inferiores a la denominada **frecuencia crítica de la capa** (frecuencia de corte del plasma para  $N_{max}$  en la capa), ya que para dichas frecuencias siempre existirá un  $N$  donde se cumpla que  $n_i = 0$ .

$$f_c = \sqrt{80.8 N_{max}} \approx 9 \sqrt{N_{max}} \Rightarrow f_{cE} \leq f_{cF1} \leq f_{cF2} \tag{3.23}$$

Cuando la incidencia no es vertical, la frecuencia máxima que retorna de cada capa depende del ángulo de incidencia  $\phi_0$ . A partir de la Expresión (3.22), y sustituyendo el valor de la frecuencia crítica (3.23) se obtiene el valor de dicha frecuencia, denominada **frecuencia máxima utilizable** o MUF.

$$\text{MUF}_i(\phi_o) = f_{c,i} \sec(\phi_o) \quad (3.24)$$

La frecuencia más elevada que retorna a la Tierra, reflejándose en la capa de F2 se obtiene calculando el valor de la MUF para una onda radiada rasante con la Tierra (elevación  $\Delta=0^\circ$ ). Este valor es aproximadamente 30 MHz y por encima de esta frecuencia el mecanismo de propagación ionosférica ya no se puede utilizar. La energía incidente con cualquier ángulo se escapa hacia el espacio exterior.

**Ionogramas:**

Para incidencia vertical se define la **altura virtual** como la del punto ideal en que se produciría la reflexión para el mismo tiempo de propagación si la velocidad fuera constante e igual a la de la luz en el vacío. Se mide utilizando radares pulsados de frecuencia variable que miden el tiempo de propagación  $\tau$  que tarda la señal en ir y volver, con emisiones verticales:

$$h_v(f) = \frac{\tau(f) \cdot c}{2} \quad (3.25)$$

Un **ionograma** representa la variación de la altura virtual con la frecuencia. Las frecuencias críticas de cada capa se producen en los máximos del ionograma. En la Figura 3.10 se presenta un ionograma, donde se desdobra en rayo ordinario del rayo extraordinario (línea de puntos), debido a la anisotropía que imprime el campo magnético terrestre a la ionosfera.

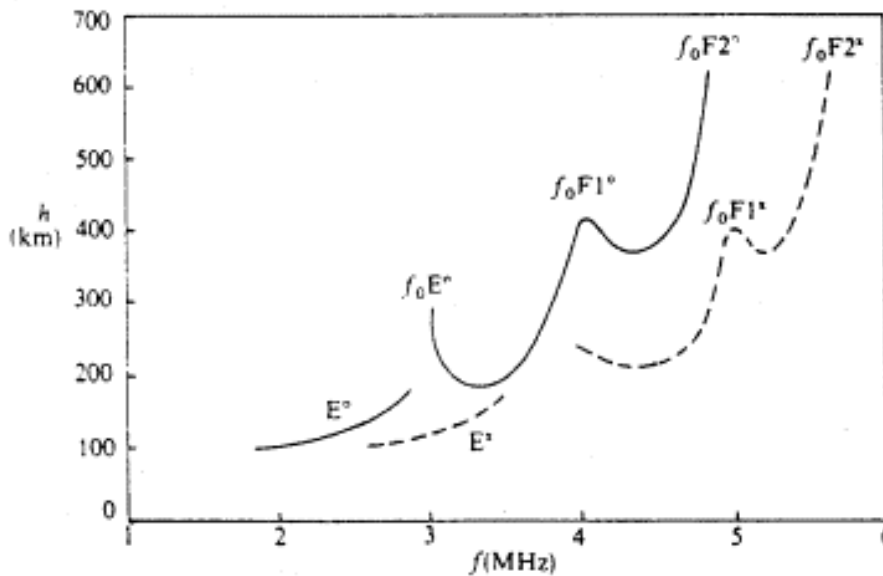
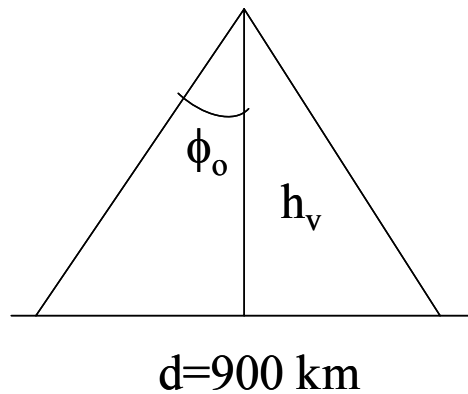


Figura 3.10: Ionograma

**Ejemplo 3.2: Propagación por onda ionosférica. Ionogramas.**

A partir del ionograma de la figura para el rayo ordinario, y considerando un modelo de tierra plana, calcule la MUF de un enlace ionosférico de 900 Km de alcance que utiliza la capa E.

En la Figura 3.10 (línea continua para el rayo ordinaria) la frecuencia crítica de la capa E es 2.8 MHz, que corresponde a una altura virtual de 170 km. La MUF cumple la Ley de la secante, con lo que se tiene:



$$MUF = f_c \cdot \sec \phi_o = 2.8 \text{ MHz} \cdot \frac{\sqrt{(d/2)^2 + h_v^2}}{h_v} = 7.9 \text{ MHz}$$

**Modelo de propagación ionosférica para Tierra Plana:**

Para realizar estudios de alcance aproximado se consideran la Tierra y la ionosfera estratificadas en capas planas. Aplicando la Ley de la secante, se puede calcular el alcance, definiendo una **altura virtual**  $h_v$  de una emisión a una frecuencia  $f$  y con un ángulo de incidencia  $\phi_o$  como aquella que le correspondería a una frecuencia  $f_v$  con incidencia vertical:

$$f = f_v \sec(\phi_o) \tag{3.26}$$

$$h_v(f, \phi_o) = h_v(f / \sec(\phi_o), 0) = h_{v, \text{ionograma}}(f / \sec(\phi_o)) \tag{3.27}$$

En la Figura 3.11 se muestran las distintas dimensiones. El límite de este modelo se encuentra para un ángulo máximo de incidencia de 74°, que corresponde al ángulo de elevación  $\Delta=0^\circ$ , rasante con la Tierra.



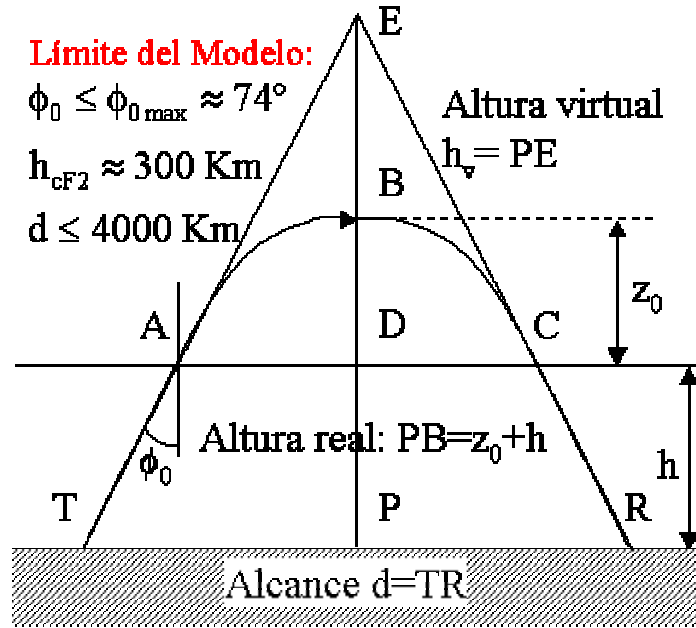


Figura 3.11: Cálculo del alcance

La relación entre el alcance y la máxima frecuencia utilizable se obtiene aplicando la Ley de la secante al esquema de la Figura 3.11.

$$MUF_1(\phi_o) = f_{c,i} \sec(\phi_o) \Rightarrow MUF(d) = f_{c,i} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h_v}\right)^2} \quad (3.28)$$

En comunicaciones no se suele trabajar con la máxima frecuencia utilizable, sino que se deja un margen de guarda para garantizar la estabilidad de la comunicación y se trabaja a la denominada **frecuencia óptima de trabajo**. Esta frecuencia corresponde con el 85% de la *MUF*. Sin embargo, tampoco interesa trabajar en frecuencias muy inferiores porque aumentaría la atenuación y el nivel de ruido atmosférico.

Cuando se precisan alcances medios o cortos, se suele trabajar por debajo de la frecuencia crítica de la capa *F2*. De este modo se asegura cobertura en toda la zona alrededor de la estación transmisora. En este caso, hay zonas de la cobertura donde llegan señales por onda de superficie y por onda ionosférica. Uno de los problemas que puede darse es que la interferencia entre ambas señales produzca unos desvanecimientos muy fuertes.

Cuando se requieren grandes distancias de cobertura, es necesario trabajar por encima de dicha frecuencia crítica. Esto hace que aparezcan zonas de sombra. El límite de la zona de sombra se obtiene, a partir de la altura virtual  $h_v$  de la capa *F2* y del ángulo  $\phi_{o,min}$  aplicando la Ley de la secante para la frecuencia de emisión

$$f_{emision} = f_{c,F2} \sec(\phi_{o,min}) \quad (3.29)$$

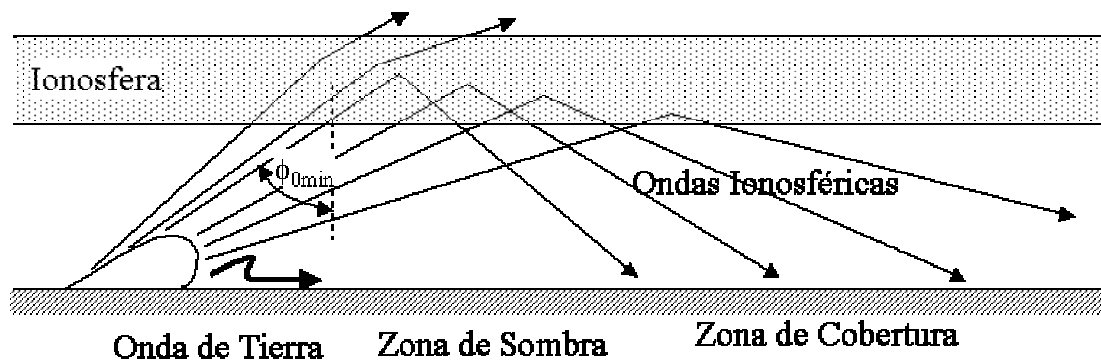


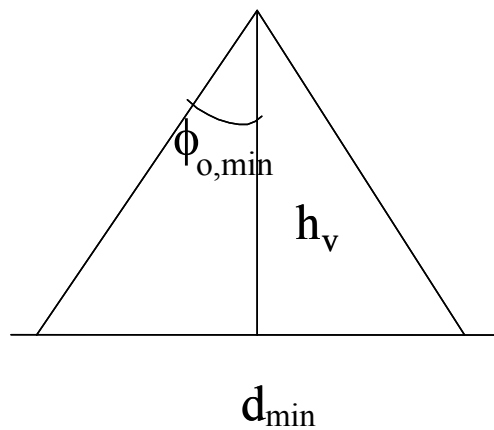
Figura 3.12: Zona de sombra y zona de cobertura

**Ejemplo 3.3: Propagación por onda ionosférica: alcance**

Calcule el alcance mínimo a 10 MHz de un enlace ionosférico a través de la capa F, cuya frecuencia crítica es de 6 MHz y la altura virtual es de 350 km.

Conocida la frecuencia de emisión y la frecuencia crítica de la capa, se puede calcular el ángulo mínimo de transmisión, que corresponde con el alcance mínimo.

$$f_{emision} = f_{c,F2} \sec(\phi_{o,min}) \Rightarrow \sec(\phi_{o,min}) = \frac{f_{emision}}{f_c} = 1.67 \Rightarrow \phi_{o,min} = 53.13^\circ$$



A partir de dicho ángulo  $\phi_{o,min}$  se puede calcular el alcance mínimo (Figura 3.12) como:

$$\tan \phi_{o,min} = \frac{d_{min}/2}{h_v} \Rightarrow d = 2h_v \tan \phi_{o,min} = 933 \text{ km}$$

### 3.5 Propagación por onda de espacio

En frecuencias de VHF y superiores se consideran aquellos mecanismos de propagación en los que la contribución más importante proviene de la combinación del rayo de visión directa (propagación en espacio libre), del rayo reflejado en la superficie terrestre y del rayo difractado por las irregularidades del terreno, o por la propia curvatura de la Tierra. En la mayoría de los casos, sobre todo en las bandas de microondas, se requiere enlace visual entre las antenas con lo que se limita el alcance a la línea del horizonte. En este apartado se estudiarán los fenómenos de reflexión, difracción, junto con los fenómenos debidos a la presencia de la troposfera: atenuación y refracción troposférica.

#### Efecto del suelo: reflexión en la Tierra

El modelo más simple para calcular los coeficientes de reflexión considera una tierra plana, unos rayos ideales y una superficie de reflexión caracterizada por su permitividad relativa  $\epsilon_r$  y su conductividad  $\sigma$ . Los coeficientes de reflexión dependen del tipo de suelo, del ángulo de incidencia y de la polarización de la onda. Cuando la distancia entre las antenas es muy grande comparada con la altura de las mismas (situación habitual) el ángulo de incidencia  $\psi$  tiende a  $0^\circ$ . En ese caso los coeficientes de reflexión para ambas polarizaciones tiende a  $-1$ , que es el valor usual en tierra plana. En situaciones donde no se puede considerar tierra plana, como en reflexiones suelos irregulares y rugosos, se aplican factores de corrección que dependen de la altura eléctrica de los mismos y del ángulo de incidencia. Estos factores hacen que, habitualmente, el módulo del coeficiente de reflexión sea menor que la unidad.

En radioenlaces terrestres (Figura 3.13), la señal que llega al receptor es la suma del rayo directo y del rayo reflejado. Como la distancia entre antenas  $d$  es muy grande comparada con las alturas  $h_T$  y  $h_R$ ,  $\psi$  tiende a 0 y la variación entre los caminos recorridos  $R_1$  y  $R_2$  por ambos rayos va a ser muy pequeña. Por ello, la atenuación de ambos caminos va a ser prácticamente la misma, existiendo únicamente una variación en la fase entre las señales que llegan al receptor. Además en este caso, las antenas tienen prácticamente la misma ganancia para ambos rayos. Según la fase con la que se sumen ambas señales (asumiendo un coeficiente de reflexión igual a  $-1$ ) tendremos una ganancia de 6 dB (suma en fase) con respecto a la propagación del rayo directo, o un nulo de campo (suma en oposición de fase), como indica la Figura 3.14

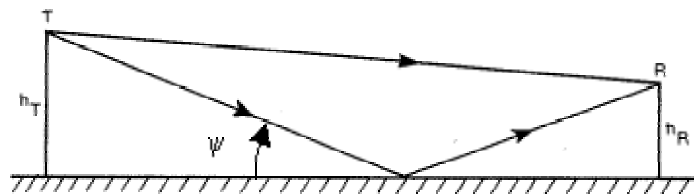


Figura 3.13: Rayo directo + Rayo reflejado

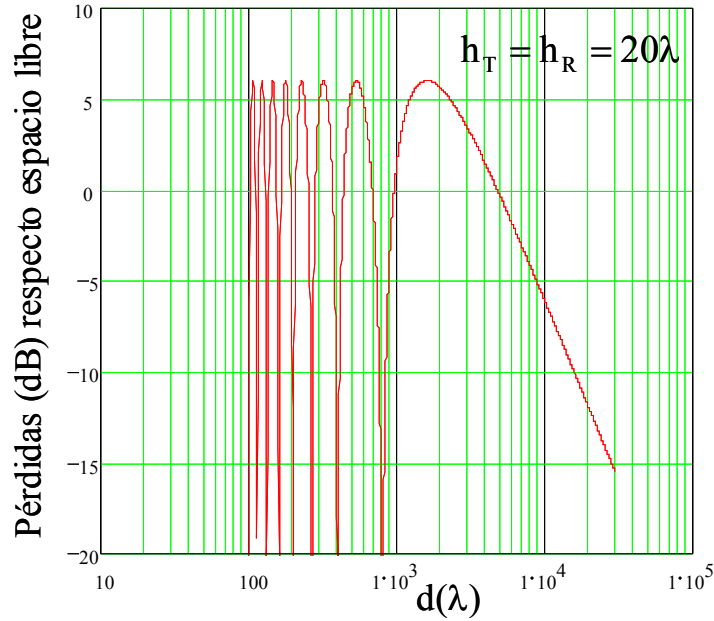


Figura 3.14: Pérdidas respecto al espacio libre por la combinación de rayo directo y reflejado

Para un coeficiente de reflexión cualquiera tendremos la siguiente expresión del campo en el receptor, donde se ha considerado que la atenuación por caminos es la misma para ambos rayos, y las variaciones se encuentran en el coeficiente de reflexión  $\rho$  y en la fase debida a la diferencia de caminos  $\Delta\phi$ . Esta fase depende de la diferencia de caminos  $\Delta R = R_2 - R_1$ , y de la longitud de onda.

$$E_{rx} = E_d + E_r = E_d (1 + \rho \cdot \exp(-j\Delta\phi)) = E_d \left( 1 + \rho \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R\right) \right) \quad (3.30)$$

Asumiendo un coeficiente de reflexión en el suelo igual a  $-1$ , la expresión anterior se puede simplificar. El módulo del campo recibido es entonces:

$$|E_{rx}| = 2|E_d| \operatorname{sen}\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = 2|E_d| \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\Delta R}{2}\right) = 2|E_d| \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right) \quad (3.31)$$

donde se ha aplicado  $\Delta R = \frac{2h_T h_R}{d}$ , que es cierto cuando la distancia entre las antenas es

mucho mayor que la altura de las mismas. Notar que en las expresiones anteriores no se utilizan directamente las alturas de las antenas, sino los valores de alturas efectivas, donde se considera la altura respecto al punto de reflexión. Es habitual que las antenas se sitúen en promontorios, y la altura física de las torres sea muy inferior a dichas alturas efectivas.

En (3.31), cuando el argumento del seno se hace muy pequeño, éste se hace igual a su argumento y se observa que el módulo del campo recibido varía de forma inversa al cuadrado de la distancia, producto de la distancia que aparece en la fórmula y de la variación propia del rayo directo según aparece en la Fórmula de Friis. Esto significa que la potencia variará de forma inversamente proporcional a la distancia elevado a cuatro, en lugar de la distancia al cuadrado tal como lo hace el rayo directo (espacio libre). En la Figura 3.14 este comportamiento se da en la parte derecha de la gráfica. Para esta zona la Fórmula de Friis, considerando adaptación de impedancias y polarización, se reduce a:

$$\frac{P_{rx}}{P_{tx}} \approx \frac{(h_T h_R)^2}{d^4} G_T G_R \quad (3.32)$$

Se ve que elevar las antenas lo más posible, además de aumentar la visibilidad, reduce las pérdidas de propagación. Por el contrario, si la antena receptora se sitúa muy próxima al suelo la potencia recibida tiende a cero. En distancias más cortas aparecen fuertes fluctuaciones del campo recibido, debido a la suma del rayo directo y del rayo reflejado.

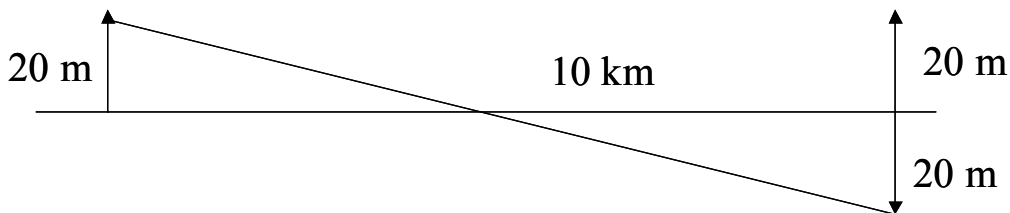
### Ejemplo 3.4: Reflexión en el suelo

Considere un radioenlace a 5.625 GHz de corto alcance ( $d = 10 \text{ Km}$ ) sobre una llanura que utiliza como antenas pequeños reflectores, de unas  $20\lambda$  de diámetro, situados sobre sendas torres de 20 metros de alto. Considerando que el coeficiente de reflexión es igual a  $\rho = -0.5$ , calcule en cuanto cambia la amplitud del campo incidente sobre la antena receptora respecto al caso en que la propagación fuera en espacio libre.

El campo total será la suma del campo directo y el campo reflejado en el suelo. Para antenas de este tamaño, y con esta distancia y alturas de antenas la ganancia de las antenas es igual para el rayo directo que para el rayo reflejado. Del mismo modo la amplitud del campo de ambos rayos no varía, variando únicamente la fase. Por lo tanto el campo será:

$$\vec{E} = \vec{E}_d + \vec{E}_r = \vec{E}_d \left( 1 + \rho \cdot e^{-jk_0 \Delta R} \right)$$

donde  $\rho = -0.5$  es el coeficiente de reflexión del suelo,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  es el número de onda y  $\Delta R$  es la diferencia de caminos entre los dos rayos. Esta diferencia de caminos corresponde a:



$$\Delta R(m) = \sqrt{10000^2 + 40^2} - 10000 \quad \text{y} \quad \lambda = c/f$$

Operando se tiene:  $\vec{E} = \vec{E}_d \left( 1 - 0.5 \cdot e^{-j3\pi} \right) = 1.5\vec{E}_d$ , por lo que la amplitud del campo varía:

$$20 \log 1.5 = \mathbf{3.5 \text{ dB}}$$
 (ganancia con respecto a espacio libre)

### Efecto del suelo: difracción por obstáculos

Cuando las ondas electromagnéticas inciden sobre un obstáculo se difractan. Este fenómeno permite explicar la presencia de ondas electromagnéticas detrás de irregularidades del terreno, como montañas, edificios, la propia curvatura de la Tierra..., aunque no exista estrictamente visibilidad directa entre transmisor y receptor. Sin embargo, las atenuaciones son muy superiores a las propias de espacio libre, con lo que la señal que llega al receptor es más débil.

El fenómeno de difracción de las ondas electromagnéticas es el mismo que se produce con las ondas de luz. En el análisis de la difracción hay que tener en cuenta el volumen que ocupa la onda, definiendo los elipsoides de Fresnel, con aquellos puntos  $C$  del espacio que cumplen que:  $TC+CR=TOR+n\lambda/2$ , siendo  $n$  un número natural ( $n=1,2, \dots$ ) (Figura 3.15). Las intersecciones de estos elipsoides con un plano  $P$ , situado sobre el obstáculo, definen las llamadas **zonas de Fresnel**. Desarrollando en serie las raíces cuadradas de las distancias  $TC$  y  $CR$ , y quedándose con los primeros términos se llega a:

$$r_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad d_1, d_2 \gg r_n \quad (3.33)$$

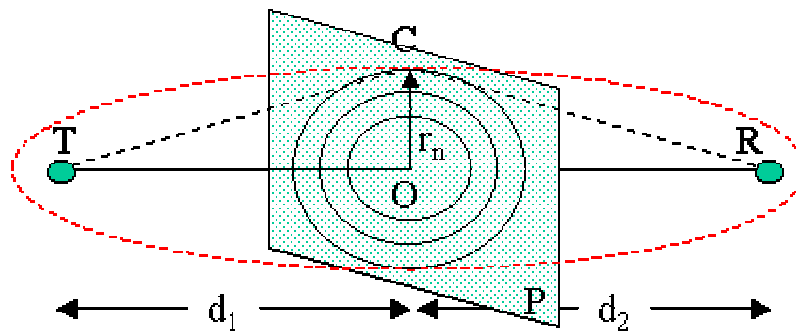


Figura 3.15: Elipsoides de Fresnel

El campo transmitido desde el punto  $T$ , genera unos campos eléctricos en el plano  $P$ . El campo recibido en el punto  $R$  se puede escribir, aplicando el Principio de Huygens, como la superposición de los campos provenientes de los puntos  $C$  de dicho plano  $P$ , es decir, de las fuentes secundarias elementales situadas en dicho plano. Cada contribución llegará con una fase proporcional al camino  $TCR$  recorrido. Tal como se han definido las

zonas de Fresnel, los campos de las distintas zonas se suman aproximadamente en fase entre sí. Además, la contribución de la segunda zona es de amplitud similar a la de la tercera, cancelándose entre sí, lo que sucede también con la cuarta y la quinta, y así sucesivamente. De este modo, el campo total en  $R$  se puede aproximar por la contribución de las fuentes de la primera zona de Fresnel. **Por ello, en sistemas de radiocomunicaciones es suficiente con dejar visible una zona de Fresnel sobre cada obstáculo para que el efecto de la difracción sea despreciable.**

Las pérdidas por difracción de obstáculos montañosos se modelan, según su forma, con la solución analítica producida por una cuña o por un obstáculo redondeado. En la Figura 3.16 se presenta el modelo de cuña y el campo recibido con respecto a la situación de espacio libre.

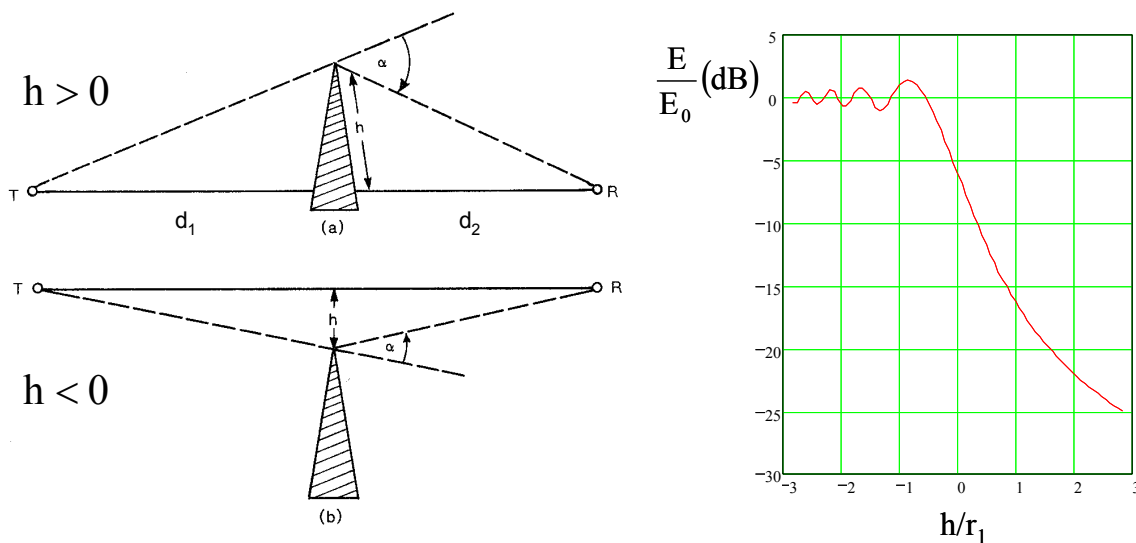


Figura 3.16: Difracción sobre un obstáculo en cuña. Campo recibido sobre espacio libre

En la Figura 3.16 se puede observar que en cuanto se libera una zona de Fresnel ( $h/r_1 = -1$ ) el efecto de la difracción es despreciable. De igual modo, en cuanto se oculta una zona de Fresnel ( $h/r_1 = 1$ ) el campo recibido está atenuado en más de 16 dB con respecto al de espacio libre. En la parte izquierda de la gráfica, el rizado del campo con respecto al espacio libre se debe a las contribuciones en fase o en oposición de fase de cada una de las zonas de Fresnel.

Cuando los obstáculos son redondeados la atenuación por filo se corrige añadiendo otros factores de pérdidas que tienen en cuenta el ángulo de visión, los radios de redondeo, las distancias del obstáculo a transmisor y receptor... Para el caso de la difracción producida por la curvatura de la Tierra, existen fórmulas y gráficas semiempíricas que, a partir de la distancia entre antenas y la altura de cada antena, calculan las pérdidas respecto al espacio libre. Del mismo modo, en un ambiente real, como el que puede darse en comunicaciones móviles, el suelo y los edificios producen reflexiones y difracciones múltiples. Existen modelos físicos que consideran una estructura dada de edificios y modelos estadísticos basados en medidas para predecir el campo recibido por el móvil en cada punto. Hoy día

hay datos estadísticos muy completos que permiten planificar entornos complejos en ambientes urbanos.

### **Efecto de la troposfera: atenuación**

Hasta aquí hemos visto dos efectos relacionados con el suelo. En estas frecuencias son también muy importantes ciertos fenómenos que tienen que ver con la presencia de la troposfera. El primero de ellos es la atenuación que producen los elementos de la misma: gases (agua y oxígeno) e hidrometeoros (lluvia, nieve, niebla...), que se hacen importante a partir de 3 GHz. Todas estas atenuaciones se presentan en curvas que proporciona la UIT-R de atenuaciones para trayectos horizontales próximos a Tierra.

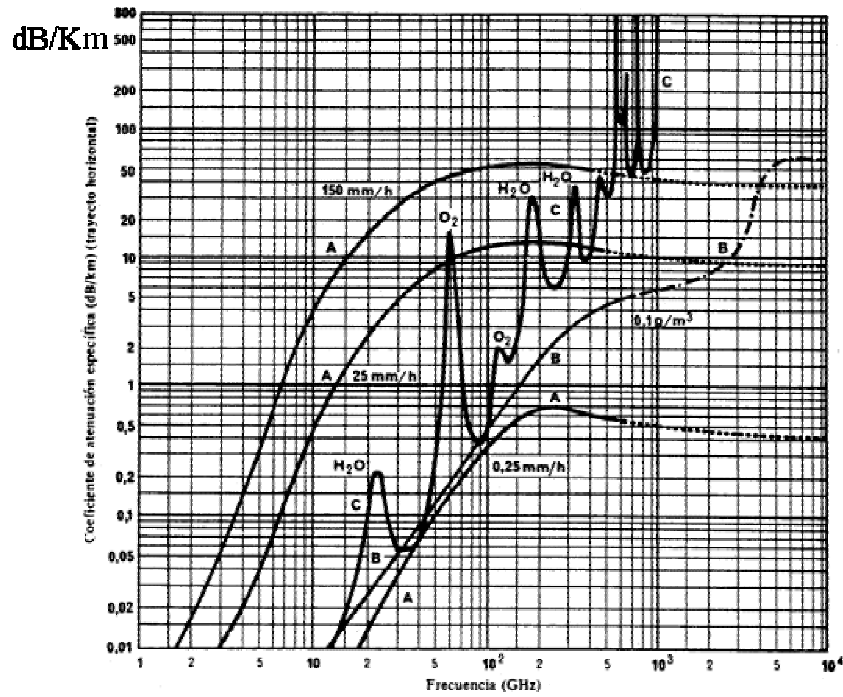
La atenuación por los gases moleculares (oxígeno y vapor de agua) se debe a la existencia de frecuencias de resonancia en la estructura electrónica de las diversas moléculas de la atmósfera. En estas frecuencias el gas absorbe energía y produce una fuerte atenuación. El nivel de atenuación dependerá, además de la frecuencia, de la concentración de gases, y por lo tanto de la altura. Por lo tanto, la atmósfera es selectiva en frecuencia, produciendo unos máximos y mínimos de atenuación. Para aplicaciones de radioenlaces se utilizan las ventanas de atenuación mínima, en torno a 35 GHz y 94 GHz. Para otras aplicaciones las fuertes atenuaciones permiten utilizar radiocomunicaciones de corto alcance casi indetectables, como el caso de comunicaciones militares seguras.

La atenuación por niebla se suele medir en función de la intensidad de la misma expresada en  $\text{g/m}^3$ . Presenta gran incidencia en las bandas de milimétricas, infrarrojos y superiores.

La atenuación por lluvia depende del tamaño de las gotas y de su deformación al caer, pero sobre todo de la cantidad global de agua en el aire. Debido a la dificultad de medir los primeros parámetros se expresa en función de la intensidad de lluvia medida en mm/h o litros/hora. La atenuación se produce por la disipación por efecto Joule debida al comportamiento del agua como dieléctrico con pérdidas, y a la dispersión de la energía en direcciones diferentes a la de propagación que producen las propias gotas. Esta atenuación varía con la frecuencia hasta unos 100 GHz y el UIT-R proporciona gráficas de atenuación en dB/km para distintos niveles de lluvia. A la hora de diseñar un radioenlace se consideran las estadísticas de lluvia en la zona, y se asegura un servicio fiable un porcentaje de tiempo dado (típicamente mayor del 99%).

En la Figura 3.17 se presenta una gráfica de atenuación por gases, lluvia y niebla donde se pueden observar las ventanas de atenuación. En la Figura 3.18 se presenta una gráfica con la atenuación debida a lluvia para distintas intensidades de agua en litros/h (o mm/h).





- A- Atenuación específica de la lluvia
- B- Atenuación específica de la niebla
- C- Atenuación por los componentes gaseosos

Figura 3.17: Atenuación en la troposfera

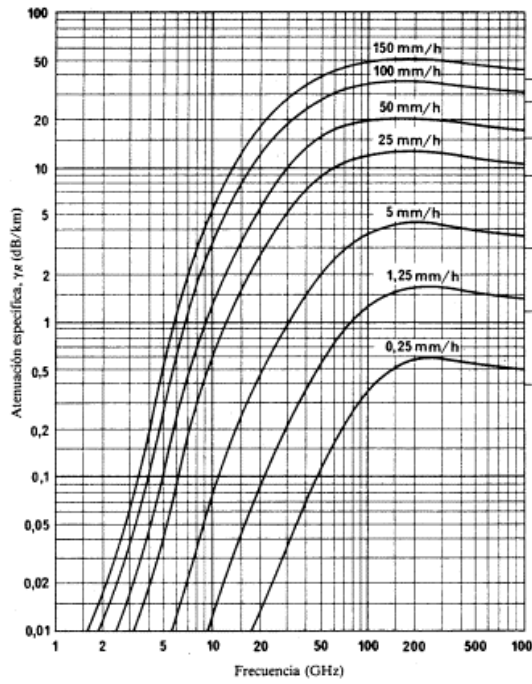


Figura 3.18: Atenuación en dB/km debida a lluvia

### Ejemplo 3.5: Atenuación por gases e hidrometeoros

Un radioenlace de 1.5 Km a 60 GHz utiliza sendas antenas parabólicas de 1 metro de diámetro, que poseen eficiencias de 0.7. La antena transmisora radia una potencia de 100 W hacia el horizonte. ¿Cuánto valen las pérdidas adicionales respecto del mismo radioenlace en condiciones de vacío (espacio libre) cuando el trayecto de propagación está bajo una lluvia de 25 mm/h de intensidad? Utilice las Figuras 3.17 y 3.18

La atenuación adicional se da por atenuación de gases y atenuación por lluvia en el trayecto de 1.5 km. En la gráfica de gases (Figura 3.17) a 60 GHz se tiene una atenuación adicional de 15 dB/km. En la gráfica de lluvia (Figura 3.18) de 25 mm/hora a 60 GHz se tiene una atenuación adicional de 10 dB/km

En total se tiene:  $(15+10)$  dB/km x 1.5 km = **37.5 dB**

---

### Efecto de la troposfera: refracción

El índice de refracción  $n = \sqrt{\epsilon_r}$  en la troposfera es muy próximo a la unidad, aunque su valor presenta una pequeña diferencia que depende de las condiciones atmosféricas de presión, humedad y temperatura.

$$n \approx 1 + \frac{77,6}{T} \left( P + \frac{4810 P_{\text{agua}}}{T} \right) 10^{-6} \quad (3.34)$$

Todas estas variables varían con la altura, por lo que el índice de refracción de la troposfera variará también con la altura. Por comodidad se suele trabajar con una variable modificada del índice de refracción denominada **coíndice**, que se define como:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (3.35)$$

En las capas bajas de la atmósfera, este coíndice varía linealmente con la altura. Por otra parte, las situaciones más normales son próximas a la de la Expresión (3.36), que corresponde a la atmósfera estándar definida por la UIT-R. En esta expresión  $h$  es la altura en km sobre el nivel del mar.

$$N(h) = 289 - 39h \quad (3.36)$$

Si aplicamos la Ley de Snell a una atmósfera como la anterior tenemos una situación como la de la Figura 3.19, donde el índice de refracción va disminuyendo con la altura, teniendo:

$$n_1 \text{sen}\phi_1 = n_2 \text{sen}\phi_2 = \dots = n_i \text{sen}\phi_i = \text{cte} \quad (3.37)$$

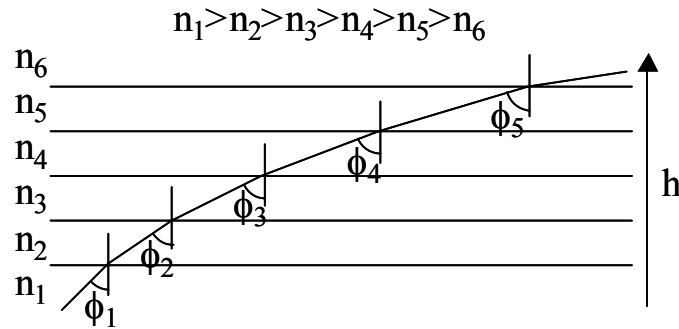


Figura 3.19: Modelo de troposfera para estudio de la refracción

El radio de curvatura del rayo ( $r=dl/d\phi$ ) se obtiene diferenciando la Expresión (3.37), donde  $dh$  es el diferencial de altura,  $dl$  el diferencial de trayecto del rayo,  $n$  el índice de refracción y  $\phi$  el ángulo del trayecto. En el caso de radioenlaces terrestres, donde el ángulo  $\phi$  es prácticamente  $90^\circ$  y el índice de refracción 1, se obtiene la aproximación de la Expresión (3.38).

$$\left. \begin{aligned} dn \cdot \text{sen}\phi + n \cos\phi d\phi = 0 \\ dl = \frac{dh}{\cos\phi} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{d\phi}{dl} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \text{sen}\phi \approx -\frac{dn}{dh} = -10^{-6} \frac{dN}{dh} \quad (3.38)$$

Para atmósfera estándar se obtiene un radio de curvatura del rayo:

$$r = 10^6 / 39 = 25640 \text{ km} \quad (3.39)$$

A la hora de diseñar radioenlaces terrestres se hace difícil trabajar con dos radios de curvatura, el de la Tierra y el del rayo. Por ello se suele trabajar con un modelo de rayo recto y se modifica el radio de la Tierra de modo que se mantenga la distancia entre ambas curvas (Figura 3.20). Esta modificación permitirá analizar de una forma más sencilla los efectos de reflexión y difracción estudiados anteriormente. Introduciendo el valor del radio de la Tierra de 6370 km, se obtiene el valor del radio modificado en función de la derivada del coíndice con la altura.

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} - \frac{1}{r'} \approx \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \left(157 + \frac{dN}{dh}\right) \cdot 10^{-6} \quad (3.40)$$

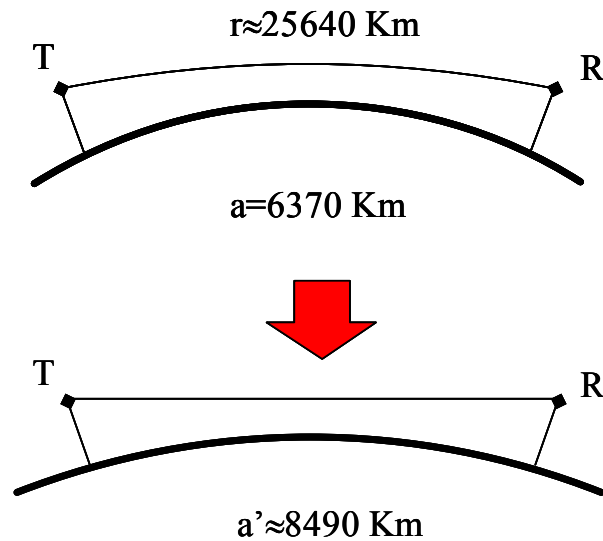


Figura 3.20: Radio modificado de la Tierra

Normalmente este radio modificado se suele expresar como un factor  $k$  que multiplica al radio de la tierra:  $a' = ka$ . Para los valores de atmósfera estándar (3.36) que recomienda la UIT-R, y considerando  $a = 6370 \text{ km}$ ,  $n = 1$  y  $\text{sen } \phi = 1$  se llega a un valor de radio modificado de la tierra igual a:  $a' = 8490 \text{ km}$ , que equivale a un factor de modificación del radio de la Tierra igual a  $k = 4/3$ . En estas condiciones destacar que el alcance es mayor que el que se produciría con visión directa, por lo que el fenómeno de refracción troposférica favorece, para condiciones estándares de la atmósfera, el alcance visible.

Sin embargo, la atmósfera es muy variable y la pendiente del coíndice de refracción varía desde valores ligeramente positivos, que producen refracción negativa y curvatura de los rayos contraria a la de la Tierra, hasta valores de superrefracción ( $dN/dh < -157$ ) que da lugar a propagación por conductos superficiales (Figura 3.21), con alcances extraordinariamente elevados. Estas situaciones de propagación por conductos suele darse en verano cuando la tierra, y sobre todo el mar, se recalientan haciendo que a ciertas horas la pendiente de temperatura sea muy superior a la estándar. Los conductos se forman a través de reflexiones múltiples sucesivas sobre la tierra y el mar y una muy alta refracción. Sin embargo, son de aparición esporádica y no se pueden utilizar para establecer canales de comunicaciones, aunque sí pueden ser los causantes de interferencias en bandas de VHF y superiores.

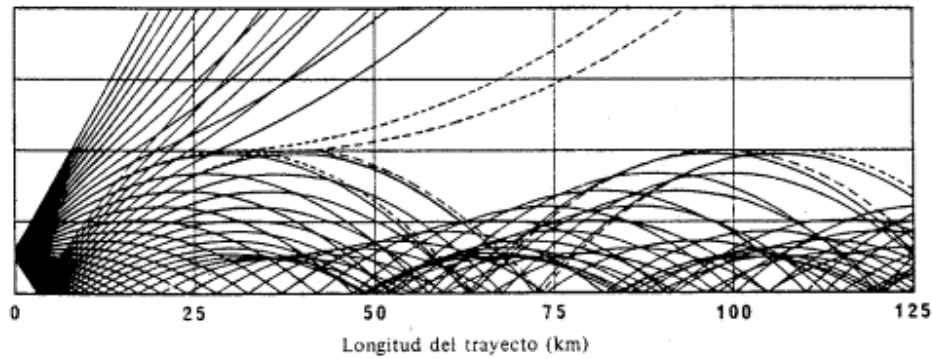
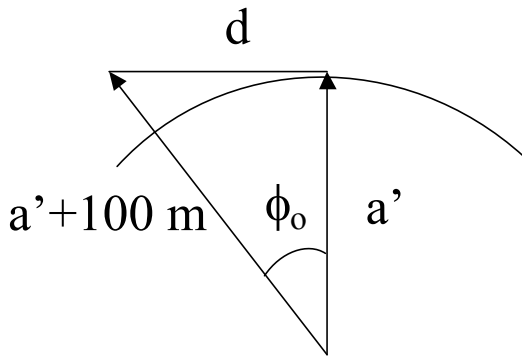


Figura 3.21: Propagación por conductos

**Ejemplo 3.6: Refracción en la troposfera**

Calcule el alcance visible sobre el mar para una antena situada al borde del mar, sobre una torre de 100 m de altura, para una atmósfera cuyo índice de refracción vale  $N(h) = 289 - 78 h(\text{Km})$ . Dato: radio de la Tierra 6370 km.



Como el radio de la tierra es mucho mayor que los 100 metros de la antena, el alcance será igual al arco de la figura. El arco es igual al radio por el ángulo:

$$d = a' \cdot \phi_0 \text{ (rad)}$$

El arco se calcula a partir del triángulo rectángulo de la figura:

$$\cos \phi_0 = \frac{a'}{a'+h}$$

siendo  $a'$  el radio modificado de la Tierra y  $h=100$  metros la altura de la antena

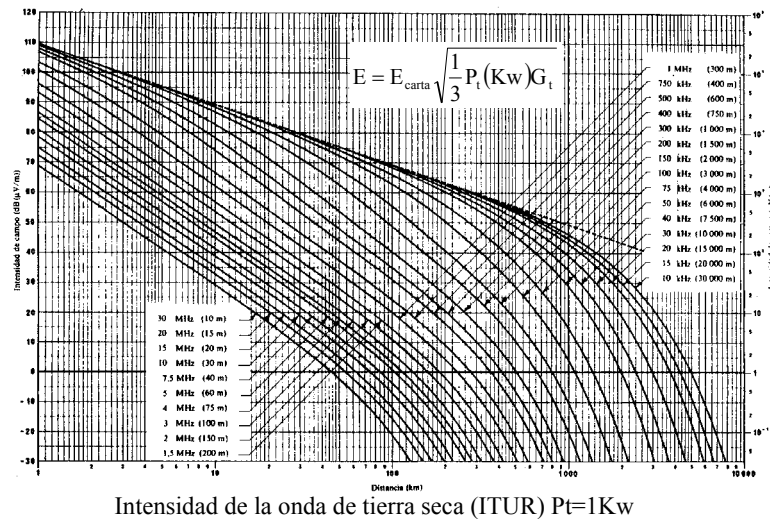
El radio modificado de la Tierra se obtiene como:

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} - \frac{1}{r'} \approx \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \left( 157 + \frac{dN}{dh} \right) \cdot 10^{-6} \Rightarrow \frac{1}{a'} = (157 - 78) \cdot 10^{-6} \Rightarrow a' = 12658 \text{ km}$$

Operando:  $\phi_0 = 0.004 \text{ rad} \Rightarrow d = a' \cdot \phi_0 \text{ (rad)} = 50 \text{ km}$

## Ejercicios propuestos:

1. Una comunicación en onda media (1 MHz) utiliza como antena transmisora un monopolo vertical de 25 m y un receptor que requiere una señal de 0.1 mV/m. Calcule la potencia que debe radiar el monopolo transmisor si el receptor está situado a 100 km de distancia.



2. Dos emisoras que radian la misma potencia transmiten a 1 MHz con sendos monopolos apoyados sobre el terreno de alturas 10 y 20 metros. ¿Qué relación existe entre los campos radiados ( $E_{10}/E_{20}$ ) para los puntos de la cobertura?

- a) 0,5                      b) 1                      c)  $1/\sqrt{2}$                       d)  $\sqrt{2}$

3. Decir cuál de las afirmaciones siguientes es correcta para una propagación mediante onda de superficie:

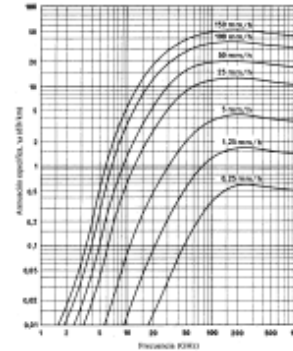
- a) La atenuación para la polarización horizontal es menor que para la vertical.  
 b) A grandes distancias el campo se atenúa como  $1/R^4$ .  
 c) Es el principal mecanismo de propagación entre 3 y 10 MHz.  
 d) En las cercanías de la antena el campo se atenúa como  $1/R$ .

4. Un mástil radiante de onda media ( $f=1$  MHz) de 75 m de altura radia una potencia de 10kw. ¿Cuánto vale la densidad de potencia a 50 Km del mástil si la propagación tiene lugar a través de una tierra seca con una conductividad de  $\sigma=0,002$  S/m? Recuerde:

$$p = \frac{\pi d}{60\sigma\lambda^2}, \quad F_e = \frac{2 + 0,3p}{2 + p + 0,6p^2}$$

- 5.** ¿Por qué el alcance de las emisoras de radiodifusión de onda media aumenta considerablemente por la noche?
- Porque la onda de superficie desaparece
  - Porque casi desaparece la ionización de las capas E y D de la ionosfera
  - Porque en ausencia del sol el ruido de antena disminuye.
  - Porque por la noche se da el fenómeno de propagación troposférica.
- 6.** ¿Por qué se produce un gran número de interferencias por la noche en un receptor de onda media (MF)?
- Porque como por la noche la audiencia aumenta las emisoras tienen que aumentar la potencia transmitida.
  - Porque por la noche aumentan los “efectos conducto”.
  - Porque la ionización de la capa D casi desaparece.
  - Porque la ionización de la capa F se reduce.
- 7.** En un radioenlace terrestre a 10 GHz ¿qué fenómeno no se produce nunca?
- Atenuación apreciable debido a la lluvia.
  - Refracción por la atmósfera.
  - Atenuación apreciable debido a la niebla.
  - Reflexión en el suelo.
- 8.** Un radioenlace, a 600 MHz, se utiliza para comunicar las orillas opuestas de un lago separadas 20 km. La altura de ambas antenas, de tipo Yagi (de 13 dBi de ganancia y adaptadas a transmisor y receptor), se ajusta para conseguir la primera interferencia constructiva entre la señal directa y la reflejada. Calcule cuál debe ser la potencia transmitida para obtener una relación señal a ruido de 26 dB, si la temperatura de ruido total del sistema vale 450 K y la anchura de banda del canal es de 10 MHz.
- 9.** Diga cuál de estas afirmaciones es falsa:
- La atenuación por gases atmosféricos a 34 GHz es inferior que a 94 GHz.
  - La atenuación por lluvias es importante a partir de 100 MHz.
  - La atenuación por lluvia se satura a partir de unos 100 GHz.
  - Las lluvias intensas despolarizan las ondas circularmente polarizadas.
- 10.** Diga cuál de las siguientes afirmaciones es falsa sobre la ionosfera:
- La capa F se desdobla durante el día.
  - La máxima frecuencia utilizable para obtener retorno sobre tierra depende de la hora del día.
  - La rotación de Faraday causa problemas con señales circularmente polarizadas.
  - La frecuencia crítica de las capas es proporcional a la densidad de electrones.

**11.** Un radioenlace terrestre de corto alcance ( $d=5$  km) en banda X (10 GHz), utiliza dos antenas parabólicas de 50 cm de diámetro que poseen eficiencias globales de 0,7. Si la temperatura total de ruido ( $T_a+T_r$ ) es de 250 K, calcule la potencia necesaria del transmisor que asegure a la salida del receptor (Bruido=1MHz) una relación señal a ruido de 30 dB cuando sobre el trayecto cae una lluvia torrencial de 150 litros/hora.



Recuerde que:  $\frac{S_0}{N_0} = \frac{P_{DRmin}}{kTB}$  y  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Julios/K

**12.** Sabiendo que durante la noche la frecuencia crítica de la capa F2 vale 5 MHz y su altura virtual 300 km, ¿qué frecuencia máxima puede utilizar un radioaficionado si quiere establecer enlaces con radioescuchas situados a 600 km de distancia? Recuerde la Ley de la secante:  $f = f_v \sec \phi_0$

**13.** Para un cierto ionograma que puede considerarse estático, en un enlace ionosférico, el radio de la zona de sombra en torno a la antena transmisora:

- a) Aumenta cuando aumenta la frecuencia.
- b) Disminuye cuando aumenta la frecuencia.
- c) No depende de la frecuencia.
- d) Depende de la potencia radiada.

**14.** Cuando una onda de 2 MHz se emite hacia la ionosfera ¿qué fenómeno no se produce nunca?

- a) Rotación de polarización.
- b) Dispersión.
- c) Atenuación.
- d) Transmisión hacia el espacio exterior.

**15.** Con respecto a los posibles mecanismos de propagación diga qué afirmación es **cierta**:

- a) La onda de tierra es un mecanismo de propagación típico a 40 MHz.
- b) En UHF predomina el fenómeno de dispersión troposférica.
- c) La potencia recibida por una antena en condiciones reales de propagación en un medio natural es siempre menor que la correspondiente a espacio libre.
- d) En VHF, en zona de visión directa a larga distancia sobre el mar, el campo decrece como  $1/d^2$ , siendo  $d$  la distancia al transmisor.

**16.** Si se quiere proporcionar un servicio de Televisión entre España y Bosnia, ¿qué mecanismo de propagación utilizaría?

- a) Reflexión ionosférica en Onda Media (MF).
- b) Onda de superficie en Onda Larga (LF).
- c) Comunicaciones vía satélite en Microondas.
- d) Dispersión troposférica en UHF.



**17.** Diga que afirmación es cierta con respecto a la propagación por onda de superficie en MF, con una PIRE de 3 kW.

- a) La atenuación es menor en el desierto del Gobi que en las zonas agrícolas polacas.
- b) El campo recibido se atenúa siempre como el inverso del cuadrado de la distancia al transmisor.
- c) El alcance es mayor que la visión directa.
- d) Ninguna de las anteriores es cierta.

**18.** Diga qué afirmación es **cierta** cuando se analiza la difracción frente a obstáculos:

- a) Para una correcta transmisión se debe dejar despejada una mayor altura libre de obstáculos en las zonas intermedias del vano transmisor-receptor que en las zonas próximas al transmisor o al receptor.
- b) Un rayo rasante a una cuña difractante aguda atenúa el 50% de la potencia.
- c) La atenuación por difracción se reduce cuando disminuye la frecuencia.
- d) La atenuación de difracción por una cuña aumenta cuanto mayor es el número de zonas de Fresnel que se liberan.

**19.** Diga qué afirmación es **cierta** en reflexión ionosférica en torno a 20 MHz, a mediodía cuando  $N_{max} = 10^{-12} \text{ (m}^{-3}\text{)}$ :

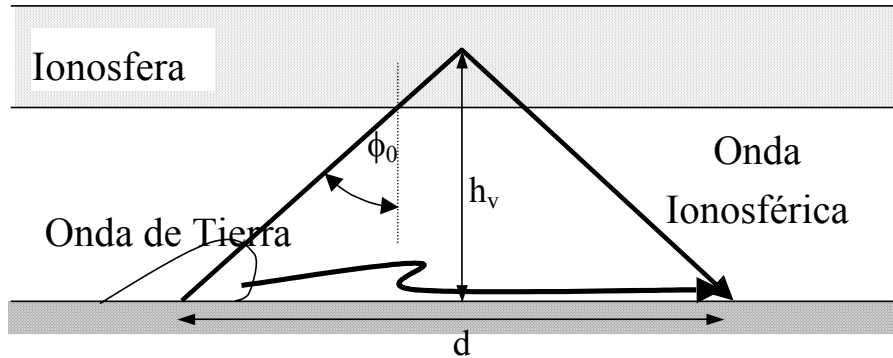
- a) La zona de sombra es mayor cuando se reduce la frecuencia de transmisión.
- b) La rotación de Faraday no afecta porque la frecuencia es muy baja.
- c) La frecuencia crítica de una capa es mayor cuando aumenta la densidad de electrones de dicha capa.
- d) Se consiguen alcances de 7000 km con un solo salto.

**20.** Considere un radioenlace a 3.75 GHz de corto alcance ( $d = 10 \text{ km}$ ) sobre una llanura que utiliza como antenas pequeños reflectores, de unas  $20\lambda$  de diámetro, situados sobre sendas torres de 20 metros de alto. Considerando que el coeficiente de reflexión es igual a  $\rho = -0.8$ , calcule el factor de atenuación de potencia por reflexión en tierra plana con respecto a espacio libre para este radioenlace.

- a) -3.9 dB
- b) -6.0 dB
- c) -9.7 dB
- d) -14 dB

**21.** Calcule para una emisora de radiodifusión de onda media ( $f = 1 \text{ MHz}$ ) a qué distancia se sitúa aproximadamente la zona de más alto *fading* nocturno, (recuerde que se da cuando las amplitudes de la onda de superficie y de la onda ionosférica son iguales), para una tierra con una conductividad media de 0.003 S/m. Para la onda ionosférica considere que la antena radia con un nivel de -8 dB (con respecto al horizonte) y que a la atenuación de espacio libre en el camino de la onda ionosférica hay que añadir una atenuación adicional de 12 dB. Considere una altura virtual de 200 km y modelo de tierra plana para la que:

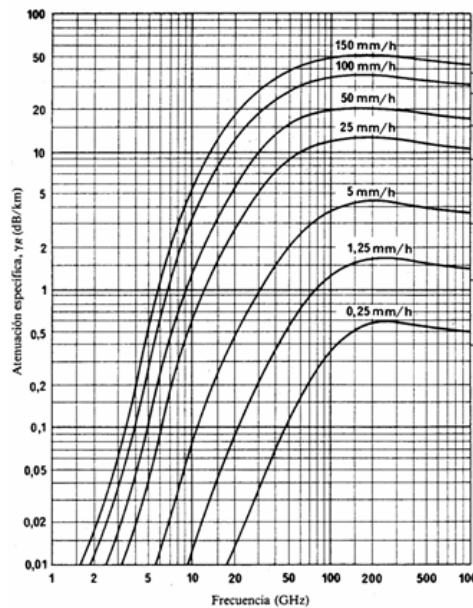
$$F_c = \frac{1}{2p} \qquad p = \frac{\pi \cdot d}{60 \cdot \sigma \cdot \lambda^2}$$



- a) 58 km                      b) 74 km                      c) 103 km                      d) 210 km

**22.** Dos bocinas rectangulares idénticas de área de apertura ( $4\lambda \times 2\lambda$ ) y eficiencia de iluminación de apertura del 50% se sitúan en el transmisor y el receptor de un radioenlace a 10 GHz, de 5 km de vano, sobre torres de 20 m de altura.

- Calcule las pérdidas del radioenlace en espacio libre en dB.
- Calcule las pérdidas del radioenlace incluyendo la propagación frente a tierra plana en dB. Considere un coeficiente de reflexión  $\rho = -0.5$ .
- Calcule las pérdidas del radioenlace (en dB) del caso b) en condiciones de lluvia intensa (100 litros/hora) en un tramo de 2 km.



**23.** Se pretende establecer un radioenlace a través de un lago a 1 GHz. con un vano de 20km. Calcule la altura mínima de las dos torres (supuestas iguales) para conseguir las mínimas pérdidas del radioenlace.