

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

Análisis de la propagación en espacio libre. Los efectos de la difracción y refracción en la atmósfera. El margen de desvanecimiento. Los efectos de la reflexión en el terreno.

1- PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

Platón estaba impresionado por la certeza de las matemáticas y supuso que los conocimientos científicos eran reales, unitarios e inmutables. Las teorías evolutivas afectaron solo a los conocimientos de las ciencias biológicas y sociales. Sin embargo, **F.Nietzsche**-1911 propuso que "nuestras leyes mecánicas no serían eternas, sino que habrían evolucionado, sobreviviendo a innumerables leyes mecánicas alternativas". La ciencia se ha convertido en un método social de investigación de los fenómenos naturales. Hace exploraciones intuitivas y sistemáticas de las leyes que se formulan al observar la naturaleza y probando de manera rigurosa su veracidad en forma de pronósticos. Este trabajo se ocupa en parte de leyes absolutamente estadísticas y con innumerables variables.

1.1- DIGRESIÓN: PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA

Si bien **Ptolomeo**-140 dC describió el efecto de refracción de la luz no fue hasta **W.Snel**-1621 cuando se encontró la relación matemática. Ptolomeo relacionaba en forma constante los ángulos mientras que Snel lo hace con el seno del ángulo. La difracción de la luz la encontró **F.Grimaldi**-1665 haciendo pasar un rayo por una abertura; a partir de entonces la luz se parecía a un fenómeno ondulatorio. **B.Pascal**-1648 determinó que la atmósfera tiene una altitud finita (la estimó en 8000 m). En 1902 se pudo determinar que la atmósfera disponía de dos capas: tropósfera hasta 11000 m de altura y estratosfera por encima. En la troposfera existían variaciones de temperatura (dando lugar a los vientos y nubes) e índice de refracción (dando lugar a la curvatura de las ondas de radio).

El **campo electromagnético** generado en la antena de transmisión se propaga en forma perpendicular a la dirección del trayecto. La propagación en el vacío y los efectos que produce la atmósfera sobre la señal influyen notablemente la potencia recibida. La onda que se propaga dispone de un modelo simplificado para trabajar con conceptos sencillos.

Algunos de ellos se indican en los próximos ítems de este trabajo; los primeros conceptos son:

-El campo electromagnético EH está compuesto de vectores de **campo eléctrico E** y **campo magnético H** perpendiculares entre sí. Cuando los campos E y H se encuentran suficientemente lejos de la antena emisora se puede considerar como un frente de onda plano. El plano que contiene el campo E y la dirección de propagación se denomina **plano de polarización**. En general, nos referimos a un plano vertical y otro horizontal.

-El medio de propagación es no-dispersivo; por lo tanto, la velocidad de fase de las componentes espectrales no dependen de la frecuencia.

-En un primer paso se admite que un rayo directo une las antenas y más adelante se tratan los problemas producidos por los caminos múltiples.

-El modelo considera antenas isotrópicas, con idéntica densidad de potencia emitida en todas las direcciones. Las antenas con cierta directividad se consideran provistas de una ganancia de potencia respecto de la isotrópica.

1.2- ATENUACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

Si la antena emisora es **isotrópica** la potencia emitida por unidad de área de la superficie de una esfera (densidad de potencia) es:

$$P_d = P_t / 4 \cdot \pi \cdot d^2$$

donde P_t es la potencia transmitida por la antena y d es la distancia entre las antenas y el punto bajo estudio (radio de la esfera).

El **área efectiva** de una antena receptora se define como la superficie del frente de onda plano con densidad de potencia P_d que dispone de una potencia equivalente a la entregada por la antena. Para la antena isotrópica el área eficaz es:

$$A_e = \lambda^2 / 4 \cdot \pi$$

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

donde λ es la longitud de onda del campo radioeléctrico. Por ejemplo, para una frecuencia de 3 GHz con longitud de onda de 10 cm el área efectiva es de 7,96 cm². Se entiende entonces el hecho de la baja potencia captada. Relacionando ambos elementos se dispone de la potencia de recepción Pr en función de la Pt para antenas isotrópicas:

$$Pr = Pt \cdot \left\{ \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right\}^2$$

La **potencia recibida** es inferior a la transmitida debido a la imposibilidad de captar toda la potencia generada. Se puede expresar como una atenuación (por la propagación en el espacio libre de obstáculos) entre antenas isotrópicas. De acuerdo con el ITU-R (antes CCIR) **Rc.525** y **Rc.341** el valor de la **atenuación por espacio libre** se expresa como:

$$Ao = 10 \cdot \log Pt/Pr = 32,5 \text{ dB} + 20 \cdot \log (f \cdot d)$$

con la frecuencia f en MHz, la distancia d en Km y la atenuación Ao en dB.

ATENUACIONES ADICIONALES. La propagación atmosférica produce:

- refracción** en la atmósfera (levantamiento del horizonte);
- difracción** por zonas de Fresnel (atenuación por obstáculo);
- atenuación** por reflexiones en el terreno;
- desvanecimiento** por múltiple trayectoria (formación de ductos);
- absorción** por arboledas cercanas a la antena;
- absorción** por gases o hidrometeoros (lluvia, nieve, etc);
- dispersión** de energía debido a precipitaciones;
- desacoplamiento** de la polarización de la onda.

1.3- MARGEN DE DESVANECIMIENTO FM

Se define sobre el mismo el **Margen de Desvanecimiento FM** (*Fading Margen*) como la diferencia en dB entre el nivel de la potencia recibida Pn y el nivel mínimo de potencia que asegura una determinada tasa de error BER (denominada potencia umbral del receptor Pu).

$$FM = Pn - Pu$$

La **potencia de recepción nominal** se obtiene restando a la Pt en dBm las atenuaciones debidas a filtros y circuladores (*branching*) Ab, a cable coaxial o guía de onda Ag, al espacio libre Ao y sumando las ganancias de antenas Ga. En términos matemáticos:

$$Pn = Pt - Ab1 - Ag1 + Ga1 - Ao + Ga2 - Ag2 - Ab2$$

Los valores de atenuación por filtros son cercanos a 0,2 dB dentro de la banda de paso. Los circuladores producen una atenuación en el sentido directo cercano a 0,2 dB. Por ello el valor Ab depende del número de componentes en el branching. La atenuación de cable coaxial o guía de onda se expresa en dB/100m de longitud y es una función directa de la frecuencia de trabajo. La ganancia de la antena se expresa en la dirección de máxima directividad y es función directa de la frecuencia.

Tabla 01: Valores de potencia umbral.

Sistema	Pt	Pu3	Pu6	Frecuencia
34Mb/s-4PSK	25 dBm	-83 dBm	-79 dBm	7/8 GHz
140Mb/s-16QAM	28 dBm	-75 dBm	-71 dBm	6 GHz alta
140Mb/s-64QAM	28 dBm	-71 dBm	-67 dBm	6 GHz baja

La **potencia umbral del receptor Pu** se determina para los umbrales de BER en 10⁻³ y 10⁻⁶. Como referencia se puede indicar los valores típicos de la **Tabla 01**. Los valores de Pu3 se asocia con la BER= 10⁻³ y los objetivos de indisponibilidad (US) y calidad inaceptable

(SES), mientras que el Pu6 para BER= 10⁻⁶ se asocia con la calidad degradada (DM). El margen de desvanecimiento FM se puede ver reducido debido a la presencia de obstáculos, interferencias y desvanecimiento.

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

2- EFECTO DE REFRACCIÓN SOBRE LA PROPAGACIÓN

2.1- ÍNDICE DE REFRACCIÓN.

A continuación se estudia el efecto de la refracción y la forma de expresarlo en términos de una degradación del margen de desvanecimiento. En **ITU-R Rc.369** y **Rc.453** se define la atmósfera de referencia para la refracción. La variación del **índice de refracción n** es una función de la altura sobre el nivel del mar, de las condiciones atmosféricas y de la época del año. Se ha determinado la siguiente ley de variación:

$$n(h) = 1 + a \cdot \exp(-b \cdot h)$$

donde, a y b son constantes que se determinan por métodos estadísticos y h es la altura sobre el nivel del mar en Km. El índice de refracción se define como el cociente entre la velocidad de propagación de la onda radioeléctrica en el vacío y la velocidad de la onda a la altura h en la atmósfera. Como referencia se ha determinado el valor:

$$n(h) = 1 + 315 \cdot \exp(-0,136 \cdot h) \cdot 10^{-6}$$

En palabras, a la altura del nivel del mar (h= 0 km) el índice de refracción es 1,000315. Como el índice n disminuye desde 1,000315 en forma exponencial con el incremento de la altura se dice que en una atmósfera normal la derivada del índice respecto de la altura ($\delta n / \delta h$) o **gradiente**, es negativa. Ver a tal efecto la **Fig 01**.

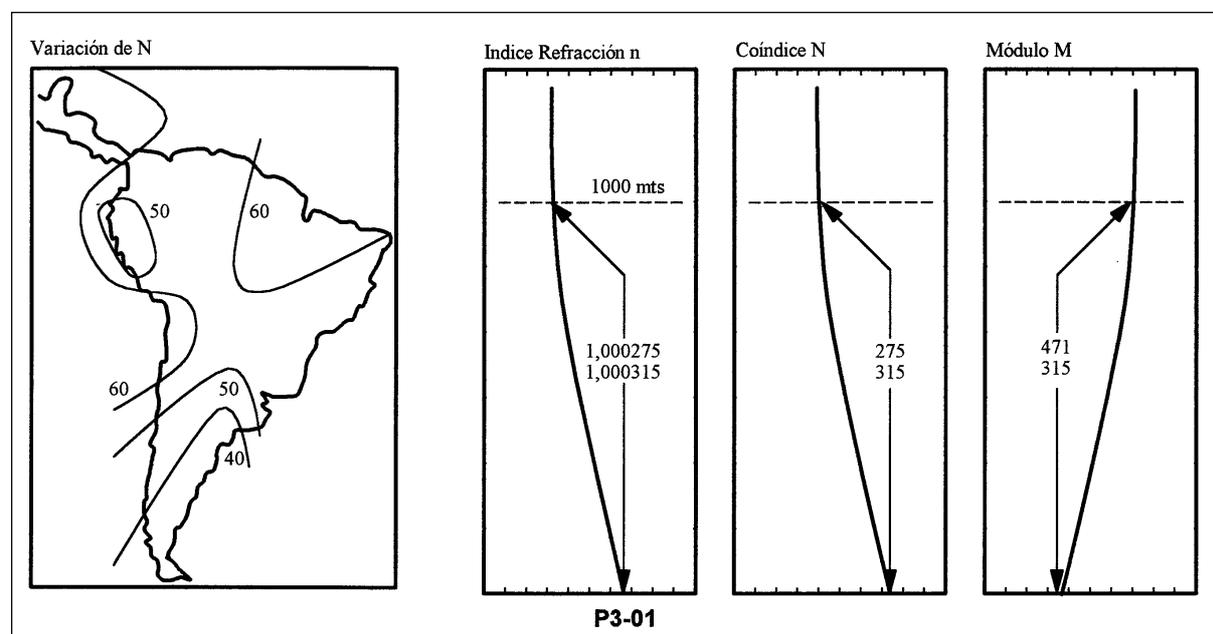


Fig 01. Efecto de la refracción en la atmósfera.

COINDICE DE REFRACCIÓN. Como el valor de n es cercano a la unidad se prefiere definir el **coíndice de refracción N** como:

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

es decir, para n=1,000315 el N=315, lo cual resulta en una valor más cómodo. En la **Fig 01** se muestra un ejemplo. El valor de N y n es una función climática:

$$N = 77,6/T \cdot (P + 4810 \cdot e/T); \text{ donde } p = 216,7 \cdot e/T$$

donde P es la presión atmosférica en milibares, e es la presión del valor de agua en mb y T la temperatura en grados Kelvin. La relación e/T da lugar a la concentración del vapor de agua p en gr/m^3 .

MODULO DE REFRACCIÓN M. Es el exceso del índice modificado con relación a la unidad:

$$M = (n + h/R_o - 1) \cdot 10^6$$

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

donde $(n + h/R_0)$ se denomina índice de refracción modificado y está determinado por la altura h y el radio de la Tierra $R_0 = 6370$ Km. Cuando h corresponde al nivel del mar el valor de M corresponde a N , es decir:

$$M = N + h/R_0 \cdot 10^6$$

Obsérvese que el valor de M se incrementa con la altitud. Como el índice de refracción n disminuye con la altura se tiene que la onda radioeléctrica se curva hacia abajo debido a la ley de Snell. Por ello es importante el valor del gradiente entre el índice y la altura cercano a la superficie de la Tierra.

GRADIENTE DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN. Se ha definido el **gradiente normal del coíndice de refracción** al valor mediano del gradiente en los primeros 1000 m de altura para zonas templadas. El mismo corresponde a $N(h)$:

$$h = 0 \text{ Km}; \quad n(0) = 1,000315 \quad \text{y} \quad N(0) = 315$$

$$h = 1 \text{ Km}; \quad n(1) = 1,000275 \quad \text{y} \quad N(1) = 275; \quad \delta N/\delta h = -40 \text{ N/Km}$$

Una atmósfera se define como subnormal (**sub-estándar**) cuando el gradiente supera el umbral de $-40/\text{Km}$ y como supernormal (**super-estándar**) si es inferior a $-40/\text{Km}$. Como se trata de un valor normal el 50% del tiempo se está por encima o por debajo de este umbral. Los valores de $\delta N/\delta h$ dependen del clima y en la **Fig 01** se muestra la información para América.

CONDICIONES DE PROPAGACIÓN. Los factores atmosféricos que intervienen en la propagación son:

-**Convección:** producida por el calentamiento del suelo lo cual introduce una reducción de temperatura con la altura. Se encuentra en tiempo claro y corresponde a una propagación estándar.

-**Turbulencia:** producida por efecto del viento y con condiciones de propagación estándar.

-**Advección:** se trata de un desplazamiento horizontal de masas de aire debido al intercambio de calor y humedad entre el aire y el suelo. Cuando una masa de aire cálido y seco incide desde la tierra hacia el mar las capas inferiores se enfrían y se cargan de humedad lo cual crea una capa de inversión del índice de refracción.

-**Subsidencia:** correspondiente a un desplazamiento vertical de aire a alta presión lo cual genera una capa de inversión del índice de refracción. Dicha capa se denomina conducto y produce una propagación de múltiples trayectorias.

-**Enfriamiento:** producido durante la noche por irradiación de la tierra lo que introduce una inversión del gradiente de temperatura.

-**Niebla:** produce una variación en el gradiente del índice de refracción. Si existe una inversión en el gradiente de temperatura la presión del vapor aumenta con la altura y se produce una propagación sub-estándar.

La propagación estándar es favorecida por la baja presión, la turbulencia y el cielo cubierto. En cambio la propagación no estándar se ve favorecida por la alta presión, la subsidencia y el cielo claro. Las mejores condiciones de propagación se obtienen con terrenos ondulados (debido a las corrientes verticales de aire), con trayectos oblicuos (debido al cruce de capas atmosféricas en forma transversal), en época invernal y por la noche.

2.2- RADIO FICTICIO DE LA TIERRA

Como la onda radioeléctrica se curva hacia abajo en una atmósfera normal, se define el **factor de radio ficticio** de la Tierra **K** que permite suponer a la onda en una propagación rectilínea y a la Tierra con un **radio aparente R_a** distinto al **radio real R_0** :

$$R_a = K \cdot R_0 \quad \text{donde } R_0 \text{ es } 6370 \text{ Km.}$$

La curvatura del rayo en la atmósfera se relaciona con el gradiente del índice mediante:

$$1/\sigma = - \delta n/\delta h$$

con σ el radio de curvatura del rayo. La curvatura de la Tierra respecto de la curvatura del rayo es:

$$1/R_0 - 1/\sigma = 1/K \cdot R_0$$

Por lo tanto, el valor de K se relaciona con el coíndice de la siguiente forma de acuerdo con **ITU-R I.718-2**:

$$K = (1 + R_0 \cdot \delta n/\delta h)^{-1} = (1 + 0,00637 \cdot \delta N/\delta h)^{-1}$$

El valor de K sigue las estadísticas de N . Se dice que el horizonte de la Tierra se "levanta" cuando K es inferior al valor promedio. Para $\delta N/\delta h = -40/\text{Km}$ el valor de K es de 1,34 (conocido como 4/3); esto corresponde a un radio aparente de la Tierra de 8500 Km.

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

La curvatura del rayo depende del gradiente y los cambios de éste pueden producir conductos y propagación por caminos múltiples o desenfoque de las antenas. Además pueden producirse atenuaciones por obstrucción. En la propagación por el espacio libre la energía se dispersa en dos direcciones ortogonales respecto al sentido de propagación. Por ello la atenuación del espacio libre es una función cuadrática de la distancia. Según **ITU-R I.718-2** en el caso de altos valores de gradiente del índice se produce una reflexión en un conducto atmosférico y la atenuación es menor pudiendo llegar a ser proporcional a la primer potencia de la distancia. En el caso extremo de un conducto continuo entre antenas emisora y receptora la atenuación del espacio es:

$$A_0 = 32,5 \text{ dB} + 20 \cdot \log f + 10 \cdot \log d$$

que para una distancia de 50 km corresponde a una diferencia de nivel de 17 dB.

La **propagación normal** es favorecida por la baja presión creada por turbulencias y el cielo cubierto. Generalmente provocadas en terreno rugoso o montañoso. El valor de $K = 4/3$ corresponde a una región de clima tropical templado. En regiones árticas el valor estándar corresponde a 1,2 mientras que en el trópico se incrementa a 1,6. Esta conclusión puede obtenerse de los valores presentados en la **Fig 01**.

El **valor estándar** de K se debe completar con el valor de K para el "peor caso". En **ITU-R I.338-5** se indica el comportamiento de K en un clima tropical templado en función de la longitud del enlace para una atmósfera subnormal en el 99,9 % del tiempo. Por ejemplo, para una longitud del enlace de 50 Km el valor de $K = 0,8$ es superado el 99,9 % del tiempo.

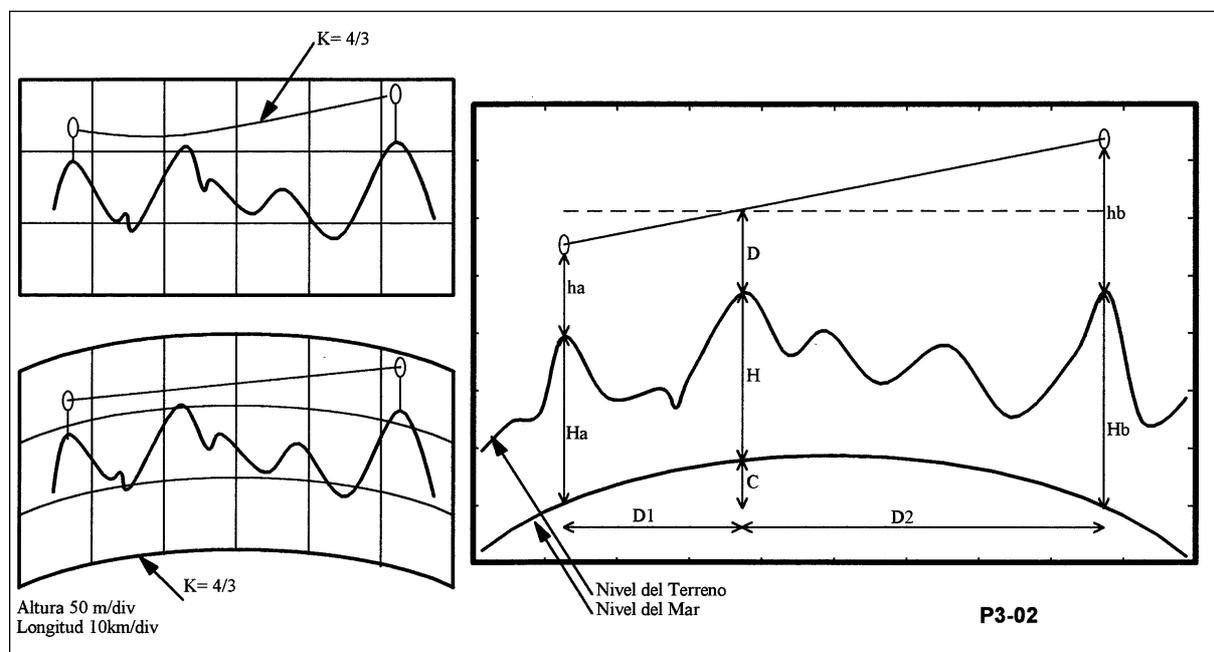


Fig 02. Curvatura del rayo y factor K.

2.3- PROTUBERANCIA DEL TERRENO

Un método de trabajo puede ser el siguiente: se gráfica en un reticulado ortogonal el perfil del terreno y el rayo que une las antenas tiene una curvatura de acuerdo con el valor de K. Otra posibilidad: se gráfica el perfil del terreno sobre una Tierra con curvatura correspondiente a $K = 4/3$ y el rayo es recto. En ambos casos se observa que la Tierra se levanta cuando el valor de K disminuye. Ambas posibilidades se tienen en la **Fig 02**.

Se puede determinar el valor de la curvatura (**protuberancia**) de la Tierra en un punto del enlace mediante:

$$C = \frac{4 \cdot (d_1 \cdot d_2)}{51 \cdot K}$$

donde, C es la curvatura expresada en metros y las distancias d_1 y d_2 se indican en Km. El valor de C se incrementa cuando K disminuye. Cuando se efectúan inspecciones visuales de los obstáculos se debe tener en cuenta que los rayos luminosos no se curvan tanto como las microondas. La atmósfera normal para la luz visible tiene un $K = 1,18$ (valor mínimo que corresponde a la refracción mínima y estable entre las 12 y 15 hs).

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

Téngase en cuenta que el valor usado como estándar ($K=1,34$ y $\delta N=-40$ /Km) es distinto para otros lugares del planeta. Por ejemplo, en algunas partes del sur de América se tiene $\delta N= -60$ /Km lo que corresponde a un valor de $K=1,62$. Si se supone un enlace de 50 Km con un obstáculo ubicado a $d_1=20$ Km y $d_2=30$ Km desde las estaciones. El valor de C para $K=4/3$ es de 35 mts mientras que el valor de C para $K=1$ es de 47 mts. Se puede decir que la variación del factor K desde $4/3$ a 1 produjo que la Tierra se "levante" 12 metros.

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

3- EFECTO DE LA DIFRACCIÓN SOBRE LA PROPAGACIÓN

Una antena se asimila a un emisor de un frente de onda en expansión. De acuerdo con el **principio de Huygen** (físico holandés del siglo XVII) cada elemento del frente de la onda produce un frente de onda secundario. Es decir que, a la antena receptora llega señal desde cada punto del frente de onda (señal difractada); existen entonces infinitos caminos que unen las antenas. Como los rayos así difractados recorren un camino más extenso llegan con un cierto retardo que puede producir una interferencia que se suma o se resta de acuerdo con la fase relativa. El efecto queda determinado por una familia de **elipsoides de Fresnel** (matemático francés del siglo XIX) con focos en las antenas. En la **Fig 03** se observa un elipsoide genérico correspondiente a dicha familia.

3.1- ZONAS DE FRESNEL

Se denominan **zonas de Fresnel** a las coronas circulares concéntricas determinadas por los rayos difractados que se suman en fase y en contrafase en forma alternada. Dentro del elipsoide de revolución la primer zona de Fresnel se caracteriza por el radio F_1 a una determinada distancia de la antena.

En **ITU-R I.715** se indica la relación entre los distintos elementos que interviene:

$$F_N = 550 \cdot \{(N \cdot d_1 \cdot d_2) / f \cdot (d_1 + d_2)\}^{1/2}$$

donde d_1 y d_2 corresponden a las distancias desde las antenas en km, f es la frecuencia en MHz y N es el número del elipsoide. El valor de F_N resulta en metros.

Las zonas pares ($N = 2, 4, 6$, etc) tienen una contribución sustractiva de potencia pues el rayo directo y el difractado se suman en contrafase y las zonas impares tienen una contribución aditiva. La potencia de recepción es la suma de todas las contribuciones; las amplitudes de estas contribuciones disminuyen en la medida que se incrementa el orden N . Las zonas de Fresnel aportan una **intensidad de campo** proporcional a la superficie de la zona y a un factor de oblicuidad. A causa de este factor el aporte de cada zona disminuye con el orden de la zona. En conjunto el aporte combinado desde la zona 2 en adelante es solo la mitad del aporte de la primer zona.

El principio de Huygen es una interpretación teórica que responde a un efecto determinado de las leyes de Maxwell con las condiciones de contorno correspondientes a la presencia de un obstáculo. El resultado de la difracción producida por un obstáculo es como si ocurriera dicho principio. El **despejamiento D** indicado en la **Fig 02** determina la separación entre el obstáculo y el rayo directo entre antenas. Es natural que el valor de D sea finito y por lo tanto se produzca una obstrucción de alguna parte de las zonas de Fresnel.

3.2- ATENUACIÓN POR OBSTRUCCIÓN

En la **Fig 03** se muestra la atenuación introducida por el obstáculo en función de la relación entre el despejamiento y el primer radio de Fresnel D/F_1 expresados en la misma unidad (**K.Bullington-1947**).

El valor mostrado en la figura es válido cuando se trata de una atmósfera estándar. Cuando el valor de K es inferior a $4/3$ el rayo se curva hacia la Tierra y la obstrucción aumenta. Obsérvese que un horizonte representado por una esfera homogénea produce mayor atenuación por difracción que una arista (filo de cuchillo). La Tierra plana tiene una curva igual a la esfera homogénea por encima de $D/F_1 = 0,2$; por debajo la atenuación es mayor a la esfera. La esfera o Tierra plana produce una inversión de fase de 180° en la reflexión; la cual varía de acuerdo con las imperfecciones del terreno.

La expresión para la **arista** se aproxima, para valores de D/F_1 inferiores a -1 , mediante:

$$A_t = 6,9 \text{ dB} + 20 \cdot \log \{D/F_1 + [(D/F_1)^2 + 1]^{1/2}\}$$

Téngase en cuenta que con $D/F_1 = 0$ la atenuación es de 6 dB para una arista. En **ITU-R I.338** se indica el valor para un **obstáculo promedio**:

$$A_t = 10 + 20 \cdot \log D/F_1$$

cuando el valor de D/F_1 es inferior a $-0,5$.

Cuando el valor de D/F_1 es positivo, es decir cuando el rayo pasa sobre el obstáculo se producen zonas de ganancia y atenuación sucesivas. Las mismas corresponden a obstaculizar las zonas pares e impares respectivamente. Un valor muy interesante corresponde a D/F_1 cercano a $0,6$. En este valor se compensa la atenuación producida sobre las zonas pares con las impares y el nivel de recepción es equivalente al obtenido en el **espacio libre de obstáculos**. En otras palabras, si se

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

dispone de un despejamiento equivalente a $D = 0,6.F1$ se puede aplicar la teoría desarrollada en la ECUACIÓN DEL ENLACE. Este valor se denomina **criterio de planificación** o de despejamiento.

El **ITU-R I.136** indica la atenuación promedio que introduce una arboleda como obstáculo cuando se encuentra cerca de la antena hasta una distancia de 400 m:

$$A = 0,2 \cdot f^{0,3} \cdot L^{0,6}$$

donde, la frecuencia se expresa en MHz (válida hasta 10 GHz) y la longitud L de la arboleda en m. El valor real es función de la densidad de la vegetación, la humedad de las hojas, la presencia de nieve acumulada en el follaje, etc. Cuando la arboleda se encuentra cerca de la antena la onda se propaga en su interior y sufre una atenuación por absorción. En cambio, si la arboleda se encuentra lejos de la antena se comporta como un obstáculo del tipo filo de cuchillo (arista) y produce difracción.

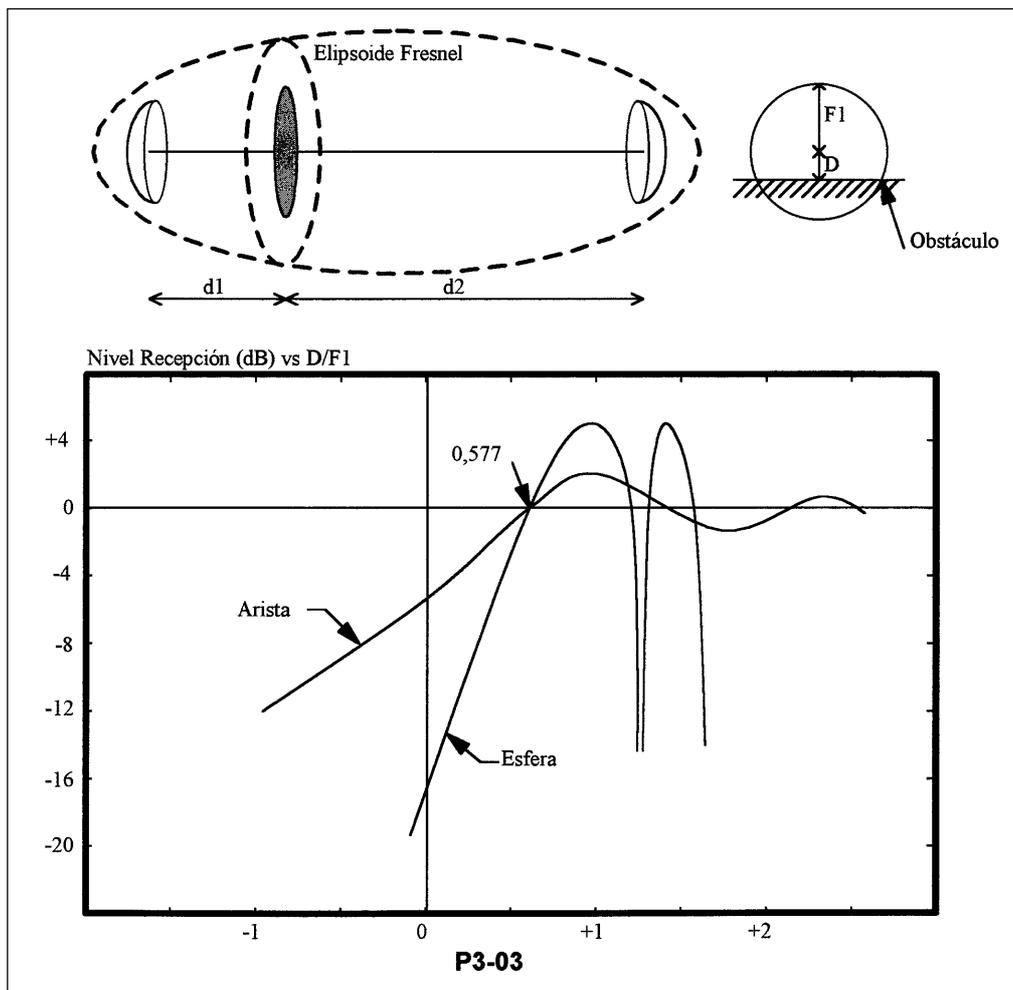


Fig 03. Efecto de la difracción en la atmósfera.

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

4- ECUACIÓN DEL ENLACE

Los elementos involucrados en la ecuación del terreno teniendo en cuenta el efecto de protuberancia y de difracción de Fresnel son mostrados en la **Fig 02**:

-**H1**= $H_a + h_a$ altura del terreno sobre el nivel del mar más la altura de la antena en la estación A.

-**H2**= $H_b + h_b$ corresponde a la misma definición en la estación B.

-**H3**= $C + H + D$ altura del rayo en el obstáculo constituido por la curvatura del terreno más la altura del obstáculo sobre el nivel del mar más un despejamiento adicional por difracción.

-**d1, d2** son las longitudes desde las estaciones A y B hasta el obstáculo.

Se puede, a continuación, plantear una relación de proporcionalidad entre los elementos:

$$(H_3 - H_1) \cdot d_2 = (H_2 - H_3) \cdot d_1$$

En general las incógnitas son las alturas de las antenas h_a y h_b . El valor de C es calculable en función de K y el valor D depende de la difracción.

4.1- ERRORES DE CALCULO

El estudio de un enlace en un papel cuadrículado introduce los siguientes errores (despreciables) de cálculo:

-Las elevaciones se dibujan siguiendo líneas verticales y no radios desde el centro de la Tierra como son realmente. En 50 Km de enlace el ángulo de divergencia es de $0,22^\circ$.

-La longitud del enlace real no es la medida sobre la superficie de la Tierra; debe tenerse en cuenta la inclinación vertical (diferencia de altura entre antenas). El ángulo para 50 km de enlace y 1000 mts de diferencia es de $1,15^\circ$.

-El radio de Fresnel es perpendicular al trayecto entre antenas; se lo dibuja en cambio perpendicular al terreno. El error es un ángulo similar, como en el ítem anterior.

-La línea de unión entre antenas recta sobre el mapa no representa el trayecto radioeléctrico verdadero; éste sigue un círculo máximo sobre la esfera.

-El valor de K no es el mismo a lo largo de todo el trayecto por cambios de terreno (rugosidad), humedad y temperatura (vegetación, cultivos, lugares habitados).

-Los mapas no representan la realidad actual. Los cambios deben ser actualizados mediante una inspección en el terreno (*survey*).

4.2- CRITERIOS DE DESPEJAMIENTO

Como se descubre de los ítems anteriores la curvatura de la Tierra es una función estadística de innumerables variables atmosféricas, climáticas y del terreno. El resultado es que la atenuación producida por el enlace es una variable de la cual se puede conocer el valor medio representado por la atenuación del espacio libre en el mejor de los casos.

Como se dispone de una **función estadística de varias variables** se han generado los denominados criterios de planificación. Se trata de reglas generales que se cumplen en la mayoría de los casos y permite resolver el problema de cálculo. Resultan ser de simple aplicación y a partir de dicho punto puede considerarse solo la atenuación del espacio libre.

En **ITU-R I.338** se propone un resumen de los criterios de distintos países. Por ejemplo:

-Francia (Boithias y Battesti-1967): selecciona la peor de las siguientes condiciones:

.D= 0.F1 y C para el valor K en el 99,9%

.D= 1.F1 y C para $K = 4/3$

-El Reino Unido propone el valor de:

.D= 0,6.F1 y C para $K = 0,8$

-Alemania selecciona la más desfavorable de las siguientes condiciones:

.D= 0,3.F1 y C para $K = 4/3$

.D= 0.F1 y C para $K = 1$

-Los Estados Unidos (Vigants-1975) también selecciona entre las posibilidades siguientes:

.D= 0,3.F1 y C para $K = 0,66$

.D= 1.F1 y C para $K = 4/3$

-En el mismo Informe el ITU-R propone un criterio basado en las experiencias anteriores adoptando la condición más desfavorable entre:

.D= 1.F1 y C para $K = 4/3$

.D= 0.F1 y K para el 99,9% c/obstrucción aislada

.D= 0,3.F1 y K para el 99,9% c/obstrucción continua

.D= 0,6.F1 y K para el 99,9% trayectos mayores 30 Km

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

-Algunas compañías comerciales proponen criterios semejantes de planificación. La empresa *Siemens* se refiere a la condición más desfavorable entre las siguientes posibilidades:

Enlaces en UHF hasta 1000 MHz

.D= 0,1.F1 y C para K= 0,66. Se considera una atenuación por obstáculo para K= 4/3

Enlaces entre 1500 y 2000 MHz

.D= 0,6.F1 y C para K= 4/3

.D= 0,3.F1 y C para K= 0,66

Enlaces superiores a 2000 MHz

.D= 0,6.F1 y C para K= 0,66

.D= 1.F1 y C para K= 4/3

.D= 0,6.F1 y C para K= 4/3 (antena diversidad de espacio)

Para frecuencias en la gama de 500 a 1000 MHz suele ser necesario operar con márgenes negativos sobre los obstáculos, compensando la atenuación adicional con potencia de transmisión o ganancia de antenas. La atenuación de los coaxiales y el radio de Fresnel impiden la elevación de la altura de antenas.

Desde el punto de vista de la **Fig 03** los criterios indican:

-Se adopta un despejamiento de 0,6.F1 (caracterizado por una atenuación igual a la del espacio libre) durante el 99,9% del tiempo cuando K= 0,8 en 50 Km de longitud.

-En cambio, se puede indicar un despejamiento igual al radio de Fresnel (D=1.F1) caracterizado por una ganancia de potencia durante el 50% del tiempo (K= 4/3).

-No tiene sentido un criterio que indique D= 0.F1 y K= 4/3 ya que implica una atenuación adicional sobre el cálculo sobre el espacio libre durante el 50% del tiempo. Un criterio con D= 1.F1 con K= 0,8 implica una sobre estimación (incremento de nivel sobre el 99,9 % del tiempo).

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

5- REFLEXIONES EN EL TERRENO

RAYO REFLEJADO. Sobre un enlace que posee zonas planas la antena receptora puede recibir un **rayo reflejado en el terreno**. El mismo puede sumarse con distinta fase sobre el rayo directo y producir atenuación o ganancia. Las variables de este modelo son (entre otras): la altura de antenas y el factor K. Otro posible **rayo reflejado en la atmósfera** genera la teoría de caminos múltiples (desvanecimiento selectivo) que se estudia en otro trabajo.

Se define el **Coefficiente de reflexión** de un terreno que se encuentra entre 0 (sin reflexión; obstáculo en arista) y -1 (el menos simboliza el desfase de 180° por reflexión). Si la superficie del terreno presenta suficientes irregularidades la reflexión es dispersada. Cuanto mayor es la frecuencia del enlace las irregularidades más pequeñas producen dispersión y reducción del coeficiente. La **polarización** tiene escasa influencia en trayectos sobre tierra. Pero sobre el mar la polarización vertical se comporta mejor que la horizontal. El coeficiente de reflexión disminuye más rápido en la medida que el viento produce el mar crispado.

EFECTO DEL FACTOR K. En la **Fig 04** se muestra el efecto que sobre la posición del rayo reflejado tienen la modificación del factor K y que sobre la potencia de recepción tiene la altura de antenas. En tanto el valor de K disminuye, el horizonte se levanta (protuberancia de la Tierra) y el lugar de reflexión cambia. También cambia la longitud del camino reflejado y por ello la diferencia de fase entre el rayo directo y reflejado. Esto produce que la **potencia de recepción es variable con el factor K**.

Cuando se cambia la altura de una antena se produce un efecto similar al anterior. El nivel de potencia de recepción pasa por sucesivos picos y valles en la medida que se eleva la antena. El diagrama de nivel esta más apretado sobre la antena más cercana al punto de reflexión y se expande sobre la otra. Se puede obtener una altura de antena donde exista un máximo de nivel, pero solo para un determinado valor de K.

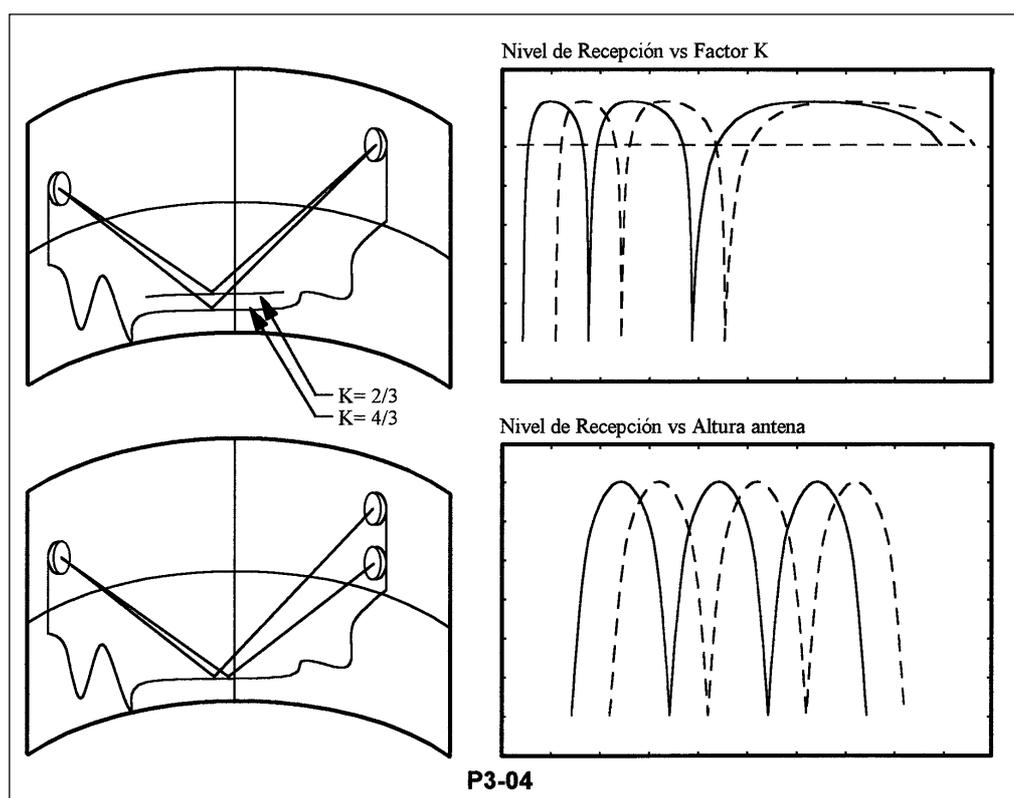


Fig 04. Efecto de la reflexión en el terreno.

SOLUCIONES. Es posible generar un diagrama del nivel de recepción en función del valor K. De acuerdo con la geometría del enlace se puede lograr una contribución en fase del rayo reflejado para una amplia gama de valores de K. También es posible, variando la altura de una antena, lograr que el rayo reflejado se encuentre atenuado por una obstrucción. En **ITU-R GAS3** se menciona otra forma de reducir el efecto de las reflexiones. Se trata de incrementar el diámetro de antenas de forma que la diferencia de fase se acerque a 360° entre la parte superior e inferior de la parábola de antena. Además se puede orientar la antena hacia arriba para mejorar la discriminación al rayo reflejado.

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

Cuando, seleccionando la altura de antenas no es suficiente para eliminar el efecto de atenuación debido a la reflexión, se requiere el uso del **sistema anti-reflectivo por diversidad de espacio**. En este caso (**Fig 04**), se trata de montar 2 antenas sobre la misma vertical. Se debe cumplir la condición de encontrar cada antena sobre distribuciones opuestas de Nivel vs altura y en otros términos de Nivel vs factor K. En otras palabras, la diferencia de caminos entre los rayos reflejados en ambas antenas debe ser de 180° de fase. De tal forma, en tanto una antena se encuentra con una contribución negativa (atenuación) la otra se encuentra con una adición (ganancia). Se puede adoptar el criterio de sumar las señales de recepción en RF (mediante un combinador) o bien de seleccionar entre ambas señales en banda base (mediante un conmutador).

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

6- REPETIDORES PASIVOS

La gran mayoría de los repetidores para enlaces radioeléctricos son regenerativos. En estos casos la señal se demodula hasta el nivel de frecuencia intermedia IF y se obtiene la banda base digital la cual se regenera antes de volver a modular en IF. En los repetidores regenerativos se obtiene una mejor prestación en términos de BER vs C/N cuando se dispone de una red digital con gran número de repetidoras. Por otro lado, mediante la operación *Add-Drop (Drop-Insert)*, es posible obtener canales de servicio desde la banda base. Algunas veces se recurre a repetidores no-regenerativos. Se tienen dos grandes divisiones: los pasivos del tipo **espejo** o **espalda-espalda** y los activos con **amplificadores de RF**.

REPETIDOR A ESPEJO. El tipo de repetidor pasivo con espejo refleja la onda entre antenas para salvar obstáculos y cambiar la dirección del campo electromagnético. El tratamiento de este tipo de repetidor desde el punto de vista de los niveles de potencia involucrados tiene en cuenta dos atenuaciones de espacio libre (A_1 y A_2) y la ganancia del espejo G_0 . En cambio, desde el punto de vista del análisis de calidad es un solo enlace.

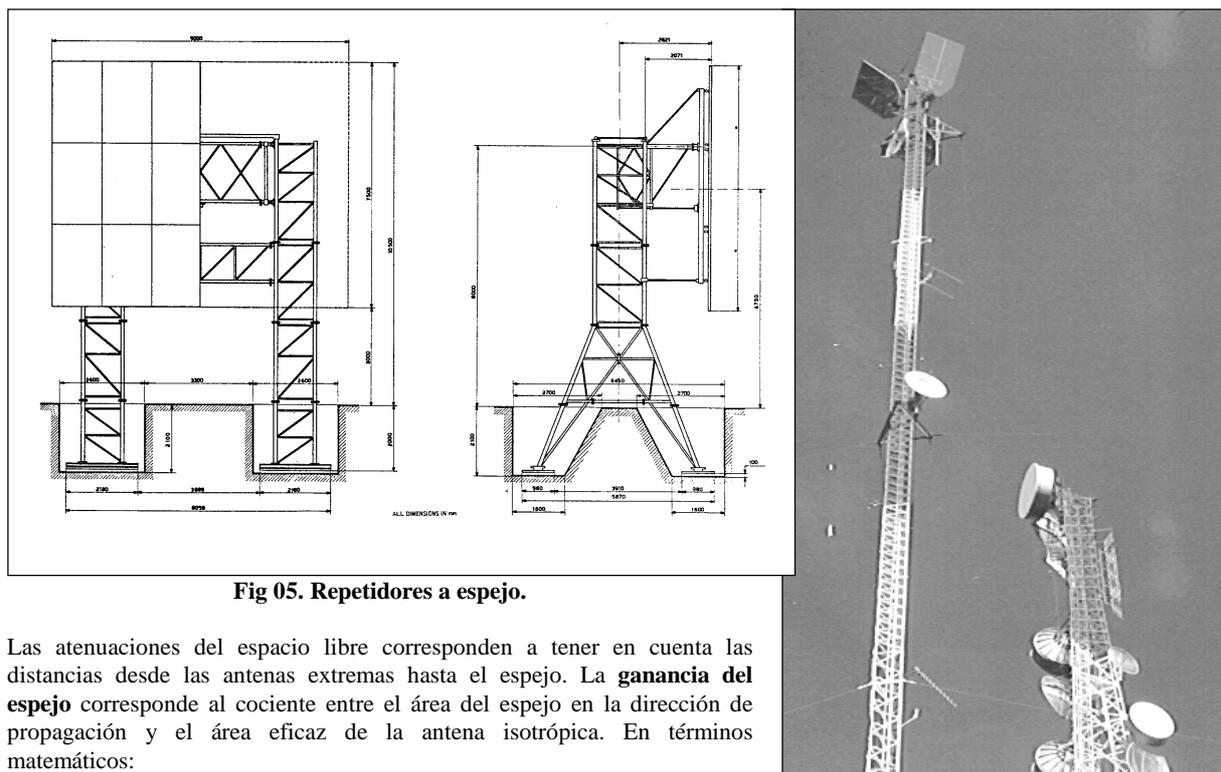


Fig 05. Repetidores a espejo.

Las atenuaciones del espacio libre corresponden a tener en cuenta las distancias desde las antenas extremas hasta el espejo. La **ganancia del espejo** corresponde al cociente entre el área del espejo en la dirección de propagación y el área eficaz de la antena isotrópica. En términos matemáticos:

$$G_0 = 20 \cdot \log \left(\frac{A \cdot \cos \phi}{\lambda^2 / 4\pi} \right)$$

donde el área del repetidor en la dirección ϕ se expresa mediante $(A \cdot \cos \phi)$ y el **área eficaz de la antena isotrópica** es $(\lambda^2 / 4\pi)$; el valor de longitud de onda se indica mediante λ . Ambos términos se deben expresar en iguales unidades para obtener el valor de G_0 en dB.

Dicha expresión es válida para frecuencias comprendidas entre 4 y 15 GHz. Es válida solo para el **campo lejano** cuando la distancia es superior a $2 \cdot D^2 / \lambda$, con D el diámetro de la antena expresado en las mismas unidades que λ . Un sistema **periscópico** (antena en la base de la torre y espejo en lo alto) no responde necesariamente a esta ley. Se puede expresar además la atenuación introducida por **irregularidades de la superficie** de la pantalla como:

$$A_t = 20 \cdot \log \{ \cos (360^\circ \cdot H / \lambda) \}$$

donde H es la altura de las irregularidades en la misma unidad que la longitud de onda. El valor de H debe ser inferior a $\lambda / 8$.

REPETIDOR ESPALDA-ESPALDA. El repetidor pasivo con **antenas espalda-espalda** no dispone de elementos activos y el cable coaxial o guía de ondas desde una antena se une a la otra con unos pocos metros de distancia. Desde el punto de vista del balance de potencia se consideran las atenuaciones de espacio libre para cada tramo y una ganancia del conjunto de las antenas. La ganancia total es la cercana a la suma de las ganancias individuales. Para el cálculo de calidad se trata de un

PROPAGACIÓN Y CAMPO RECIBIDO

solo enlace. Puede existir una interferencia entre antenas debido a la emisión frente-espalda. En estos casos es despreciable mientras que en los repetidores activos no lo es.

Desde el punto de vista de la instalación y la orientación, el repetidor espalda-espalda es más simple que el espejo. Pero un espejo de gran tamaño puede tener una ganancia mayor. Los repetidores pasivos solo son útiles cerca de una de las antenas y para enlaces relativamente cortos debido a la suma de atenuaciones de espacio libre.

REPETIDORES AMPLIFICADORES. Son amplificadores de radio-frecuencia sin conversión a frecuencia intermedia y demodulación a banda base. Son usados en estaciones de difícil acceso y requieren de una alimentación no convencional (energía solar) y con bajo consumo. Permiten una ganancia adicional respecto del espalda-espalda lo que asegura enlaces de mayor distancia. El equipo amplificador se coloca junto con las antenas y el sistema de alimentación, por lo que no se prevé una atenuación importante debido al cable coaxial o guía de ondas.

El problema en estos amplificadores es la suma del ruido en ambos saltos que introduce un empeoramiento en la relación BER vs C/N. Al no utilizar un convertor de frecuencia la portadora en ambos saltos es la misma y se producen interferencias. Para reducir este efecto se recurre al cambio de polarización entre enlaces adyacentes.