

RECOMENDACIÓN UIT-R BS.1386*

**CARACTERÍSTICAS Y DIAGRAMAS DE LAS ANTENAS TRANSMISORAS
EN ONDAS KILOMÉTRICAS Y HECTOMÉTRICAS****

(Cuestión UIT-R 201/10)

(1998)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que las Recomendaciones UIT-R BS.705 y UIT-R BS.1195 definen, respectivamente, los diagramas de las antenas de radiodifusión en las bandas de ondas decamétricas y en las bandas de ondas métricas decimétricas junto con otra información pertinente;
- b) que los diagramas publicados en esta Recomendación deben ser fáciles de entender y de utilizar por los ingenieros de planificación y diseño, manteniendo no obstante toda la información útil necesaria;
- c) la experiencia obtenida en anteriores ediciones de Recomendaciones sobre antenas;
- d) que las características de las antenas de ondas kilométricas y hectométricas contenidas en el Anexo 1 a la presente Recomendación tienen una amplia aplicación,

recomienda

1 que para evaluar la calidad de funcionamiento de las antenas transmisoras de ondas kilométricas y hectométricas, especialmente a efectos de planificación, se utilicen las fórmulas que se ilustran mediante diagramas y que están contenidas en el Anexo 1 a la presente Recomendación, así como los correspondientes programas informáticos.

NOTA – La Parte 1 del Anexo 1 presenta una información completa y detallada sobre las características teóricas de las antenas de transmisión de ondas kilométricas y hectométricas.

Los programas informáticos se han desarrollado a partir de la teoría utilizada para calcular los diagramas de radiación y la ganancia de los diversos tipos de antena incluidos.

El comportamiento de las antenas en condiciones reales de funcionamiento diferirá en cierta medida de lo que cabría esperar teniendo en cuenta sus características calculadas de forma analítica. A tal efecto, en la Parte 2 se ofrecen algunas directrices sobre estas diferencias basándose en los resultados de un conjunto completo de mediciones llevadas a cabo por varias administraciones mediante técnicas modernas.

ANEXO 1

ÍNDICE

PARTE 1 – CARACTERÍSTICAS Y DIAGRAMAS DE LAS ANTENAS TRANSMISORAS EN ONDAS KILOMÉTRICAS Y HECTOMÉTRICAS

- 1 Introducción
- 2 Cálculo de los diagramas de radiación y de la ganancia
 - 2.1 Consideraciones generales
 - 2.2 Diagramas de radiación
 - 2.2.1 Representación gráfica
 - 2.2.2 Representación tabular
 - 2.3 Directividad y ganancia
 - 2.4 Efecto del terreno
 - 2.4.1 Reflexión de las ondas en terreno imperfectamente conductor
 - 2.5 Denominación de la antena

* Esta Recomendación contiene modificaciones de redacción.

** El § 2 de la Parte 2 del Anexo 1 debe señalarse a la atención de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI).

- 3 Sistemas de antenas en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas
 - 3.1 Consideraciones generales
 - 3.2 Sección transversal del elemento radiante
 - 3.3 Frecuencia de funcionamiento
 - 3.4 Sistema de tierra y características del terreno
 - 3.5 Tipos de antenas omnidireccionales
 - 3.5.1 Monopolos verticales
 - 3.5.2 Tipos de monopolos verticales
 - 3.6 Antenas directivas
 - 3.6.1 Redes de elementos verticales activos
 - 3.6.2 Redes de elementos verticales pasivos
 - 3.7 Otros tipos de antenas
 - 3.7.1 Antenas en T
 - 3.7.2 Antenas de paraguas
- 4 Cálculo de los diagramas de radiación y de la ganancia
 - 4.1 Consideraciones generales
 - 4.2 Métodos analíticos actualmente disponibles

Anexo 1 – Procedimiento de cálculo

- 1 Objetivos principales
- 2 Limitaciones principales
- 3 Análisis comparativo de los métodos disponibles
- 4 Método numérico
- 5 Algoritmo de cálculo
- 6 Hipótesis básicas

Referencias Bibliográficas

Bibliografía

PARTE 2 – ASPECTOS PRÁCTICOS DE LAS ANTENAS TRANSMISORAS EN ONDAS KILOMÉTRICAS Y HECTOMÉTRICAS

- 1 Introducción
- 2 Mediciones de los diagramas de radiación de las antenas
 - 2.1 Métodos de medición
 - 2.1.1 Mediciones de los diagramas de radiación horizontal realizadas desde el suelo
 - 2.1.2 Mediciones de los diagramas de radiación realizadas desde helicóptero
 - 2.2 Equipo de medición
 - 2.3 Procedimientos de medición
 - 2.3.1 En el suelo
 - 2.3.2 Por helicóptero
 - 2.4 Procesamiento de los datos medidos
 - 2.4.1 En el suelo
 - 2.4.2 Por helicóptero
- 3 Comparación entre los diagramas de radiación teóricos y medidos
 - 3.1 Campo lejano
 - 3.2 Variaciones en el comportamiento real de las antenas
 - 3.2.1 Influencia del entorno circundante sobre los diagramas de radiación
 - 3.2.1.1 Conductividad del suelo
 - 3.2.1.2 Topografía del terreno y otras estructuras cercanas al emplazamiento de la antena
 - 3.2.2 Disposiciones de la alimentación y riostras

PARTE 1 – CARACTERÍSTICAS Y DIAGRAMAS DE LAS ANTENAS TRANSMISORAS DE ONDAS KILOMÉTRICAS Y HECTOMÉTRICAS

1 Introducción

La utilización eficaz del espectro en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas exige la utilización de antenas omnidireccionales y directivas cuyas características y calidad de funcionamiento deben conocerse con la mayor precisión posible. Por consiguiente, en sus actividades de planificación nacional y de coordinación internacional los ingenieros deben disponer de un método unificado para evaluar la ganancia de las antenas y el diagrama de radiación de las mismas. Anteriormente, el ex CCIR respondió a este requisito elaborando manuales sobre Diagramas de Antenas (ediciones de 1963, 1978 y 1984), donde se incluían representaciones gráficas de los diagramas de radiación de algunos de los tipos de antenas más utilizados en las bandas de ondas hectométricas y decamétricas. Para mayor sencillez, los diagramas se calcularon suponiendo una distribución de corriente sinusoidal y utilizando los medios informáticos disponibles en esas fechas. Actualmente, las modernas teorías sobre antenas y las poderosas herramientas informáticas con que se cuenta permiten al ingeniero de planificación determinar las características de las antenas con una precisión muy superior y llevar a cabo los cálculos pertinentes en ordenadores de bajo coste.

En un próximo futuro está prevista la aplicación de técnicas digitales a la radiodifusión sonora en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas y el UIT-R ya está realizando los estudios correspondientes. Las ventajas de tales técnicas combinadas con las características de propagación en esas bandas en comparación con la radiodifusión en las bandas de ondas métricas (tales como zonas de cobertura mayores, recepción más estable en condiciones móviles, etc.) hará que los nuevos servicios sean no sólo más eficaces desde el punto de vista de la utilización del espectro sino también más atractivos desde el punto de vista económico. No obstante, la introducción de técnicas digitales en la radiodifusión en ondas kilométricas y hectométricas pondrá en evidencia la necesidad de utilizar herramientas de planificación avanzadas, tales como el cálculo de los diagramas de antena, que deberán estar disponibles para las futuras conferencias de planificación así como para evaluar con mayor precisión la calidad de funcionamiento de los sistemas de transmisión existentes. La presente Recomendación se ha elaborado para responder a su debido tiempo a tales requisitos proporcionando, como en el caso de las Recomendaciones UIT-R BS.705 y UIT-R BS.1195 similares, los programas informáticos asociados que deben emplearse para realizar los cálculos correspondientes.

2 Cálculo de los diagramas de radiación y de la ganancia

2.1 Consideraciones generales

Un sistema de antenas en ondas kilométricas y hectométricas puede consistir en un solo elemento o en una red de elementos radiantes. Los diagramas de radiación de un sistema de antenas pueden representarse por un lugar geométrico de puntos tridimensional. El diagrama de radiación tridimensional se basa en el sistema de coordenadas de referencia representado en la Fig. 1, donde pueden definirse los siguientes parámetros:

θ : ángulo de elevación con respecto a la horizontal ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

φ : ángulo acimutal con respecto al Norte, suponiendo que el Norte coincide con el eje y ($0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$)

r : distancia entre el origen del sistema de coordenadas y el punto de observación distante donde se calcula el campo lejano.

2.2 Diagramas de radiación

En el sistema de coordenadas de referencia representado en la Fig. 1, la magnitud del campo eléctrico producido por una antena viene dada por la siguiente expresión:

$$|E(\theta, \varphi)| = k |f(\theta, \varphi)| \quad (1)$$

siendo:

$|E(\theta, \varphi)|$: magnitud del campo eléctrico

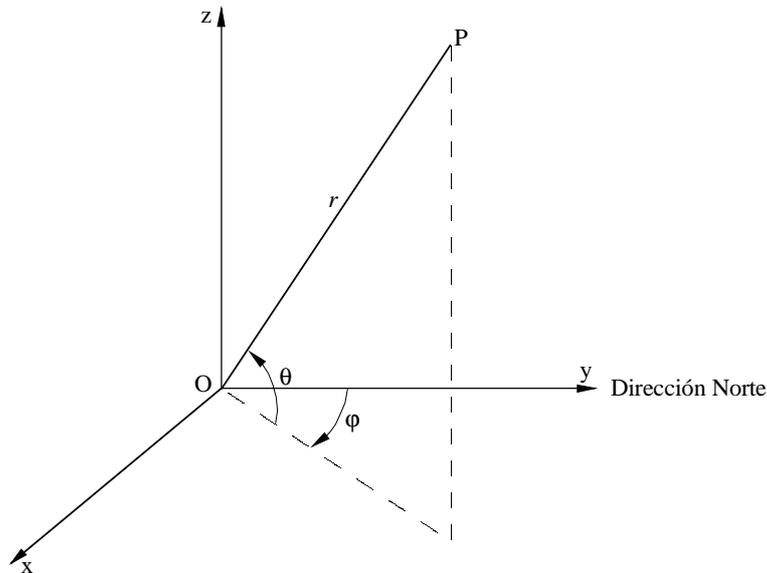
$|f(\theta, \varphi)|$: función del diagrama de radiación

k : factor de normalización para fijar $|E(\theta, \varphi)|_{m\acute{a}x}$ a un valor 1, es decir 0 dB.

Expresando el campo eléctrico total en términos de sus componentes en un sistema de coordenadas esféricas se obtiene:

$$|E(\theta, \varphi)|^2 = |E_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(\theta, \varphi)|^2 \quad (2)$$

FIGURA 1
Sistema de coordenadas de referencia



1386-01

2.2.1 Representación gráfica

Para describir el diagrama de radiación completo se utiliza un conjunto de secciones particulares del diagrama de radiación para valores específicos de los ángulos de elevación (diagramas acimutales) y de los ángulos acimutales (diagramas verticales). Las secciones más importantes son los diagramas acimutales para el ángulo de elevación en el cual se produce la máxima fuerza cicomotriz (f.c.m.) y el diagrama vertical para el ángulo acimutal en el cual se produce la máxima fuerza cimomotriz. Estos diagramas se denominan, respectivamente, diagrama de radiación horizontal y diagrama de radiación vertical.

2.2.2 Representación tabular

Puede ser útil efectuar una representación tabular del diagrama de antena completo cuando los datos de la antena se integran en un sistema de planificación. Una solución que se considera adecuada a tal efecto consiste en evaluar los valores del diagrama cada 2° para los ángulos de elevación y cada 5° para los ángulos acimutales.

2.3 Directividad y ganancia

La directividad D de una fuente radiante se define como la relación entre su máxima intensidad de radiación (o densidad de flujo de potencia) y la intensidad de radiación de una fuente isótropa que emite la misma potencia total. Puede expresarse mediante la fórmula siguiente:

$$D = \frac{4\pi |E(\theta, \varphi)|_{m\acute{a}x}^2}{\int_0^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |E(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (3)$$

Cuando se aplica la ecuación (1), D puede expresarse en términos de la función del diagrama de radiación normalizado de la fuente, $|f(\theta, \varphi)|$:

$$D = \frac{4\pi |f(\theta, \varphi)_{m\acute{a}x}|^2}{\int_0^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} |f(\theta, \varphi)|^2 \cos \theta \, d\theta \, d\varphi} \quad (4)$$

La anterior definición de directividad es función únicamente de la forma del diagrama de radiación de la fuente.

La eficacia de la antena se define como la relación entre la potencia radiada, P_{rad} , y la potencia a la entrada de la antena, $P_{entrada}$:

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_{entrada}} \quad (5)$$

La ganancia de la antena, G , se expresa como la relación entre su máxima intensidad de radiación y la máxima intensidad de radiación de una antena de referencia con la misma potencia de entrada.

Cuando se toma como antena de referencia recomendada una antena isótropa sin pérdidas, la ganancia, G_i , se expresa mediante la fórmula siguiente:

$$G_i = 10 \log_{10} D \quad \text{dB} \quad (6)$$

Otras expresiones utilizadas son la ganancia con respecto a la antena semi isótropa, G_{hi} , que es:

$$G_{hi} = G_i - 3,01 \quad \text{dB} \quad (7)$$

y la ganancia, G_v , con respecto a un monopolo vertical corto:

$$G_v = G_i - 4,77 \quad \text{dB} \quad (8)$$

2.4 Efecto del terreno

Utilizando las hipótesis señaladas en el § 2.1 y considerando, además, que la antena está situada en el sistema de coordenadas de la Fig. 1 donde el plano x-y representa una superficie homogénea plana, el campo lejano producido en el punto de observación $P(r, \theta, \varphi)$, incluida la parte reflejada por el suelo, puede obtenerse como sigue.

Si se supone que la radiación incidente sobre el suelo tiene un frente de onda plano, pueden considerarse los dos siguientes casos:

- a) polarización horizontal;
- b) polarización vertical.

En el caso de *polarización horizontal*, el vector eléctrico (directo) incidente es paralelo al plano x-y reflector (y por consiguiente perpendicular al plano de incidencia, es decir, al plano que contiene la dirección de propagación y la perpendicular a la superficie reflectora, como se muestra en la Fig. 2a).

En el caso de *polarización vertical*, el vector eléctrico incidente es paralelo al plano de incidencia y el correspondiente vector magnético incidente es paralelo a la superficie reflectora, como puede observarse en la Fig. 2b).

2.4.1 Reflexión de las ondas en terreno imperfectamente conductor

Las componentes de campo lejano totales por encima del suelo, en la Fig. 2, pueden expresarse de la forma siguiente:

- a) *Polarización horizontal*

$$E_h = E_i(r_1) + E_r(r_2) = E_i(r_1) + R_h E_i(r_1) \quad (9)$$

siendo:

- E_h : componente horizontal total
- r_1 : distancia directa entre la antena y el punto de observación
- r_2 : distancia entre la imagen de la antena y el punto de observación

E_i : campo eléctrico directo incidente

E_r : campo eléctrico reflejado

R_h : coeficiente de reflexión complejo para ondas con polarización horizontal, definido como:

$$R_h = \frac{\text{sen}\theta - \left[(\epsilon - \cos^2\theta) - j \frac{18\,000 \cdot \sigma}{f_{\text{MHz}}} \right]^{1/2}}{\text{sen}\theta + \left[(\epsilon - \cos^2\theta) - j \frac{18\,000 \cdot \sigma}{f_{\text{MHz}}} \right]^{1/2}} \quad (10)$$

y

θ : ángulo de incidencia

ϵ : permitividad relativa (o constante dieléctrica) de la Tierra

σ : conductividad de la Tierra (S/m)

f_{MHz} : frecuencia de funcionamiento (MHz).

b) *Polarización vertical*

$$E'_h = E_i(r_1) + R_h E_i(r_1)$$

$$E_v = E_i(r_1) + R_v E_i(r_1) \quad (11)$$

siendo:

E'_h : componente horizontal total

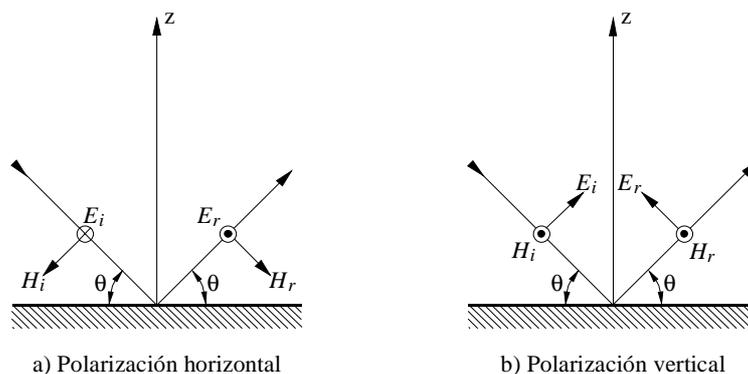
E_v : componente vertical total

E_i : campo eléctrico incidente

R_v : coeficiente de reflexión complejo para ondas con polarización vertical, definido como:

$$R_v = \frac{\left[\epsilon - j \frac{18\,000 \cdot \sigma}{f_{\text{MHz}}} \right] \text{sen}\theta - \left[(\epsilon - \cos^2\theta) - j \frac{18\,000 \cdot \sigma}{f_{\text{MHz}}} \right]^{1/2}}{\left[\epsilon - j \frac{18\,000 \cdot \sigma}{f_{\text{MHz}}} \right] \text{sen}\theta + \left[(\epsilon - \cos^2\theta) - j \frac{18\,000 \cdot \sigma}{f_{\text{MHz}}} \right]^{1/2}} \quad (12)$$

FIGURA 2
Efecto del terreno



2.5 Denominación de la antena

Considerando la variedad de sistemas de antenas en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas, puede que no sea posible realizar una denominación adecuada de la antena basándose únicamente en la longitud eléctrica. Por lo tanto tal denominación debe considerarse caso a caso.

3 Sistemas de antenas en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas

3.1 Consideraciones generales

Las antenas en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas tienen por lo general pocos elementos radiantes. La altura y la separación de estos elementos no está limitada a $\lambda/2$. El diagrama de radiación de esas antenas es función de:

- la sección transversal de los elementos radiantes;
- la frecuencia de funcionamiento;
- el sistema de tierra y las características del terreno;
- el número de elementos y su separación;
- la altura de los elementos sobre el suelo;
- la orientación;
- la disposición de la alimentación;
- las características del entorno.

3.2 Sección transversal del elemento radiante

Existen varias estructuras radiantes que se utilizan comúnmente, tales como las torres autoportadas, los mástiles arriestrados y los elementos de hilos. Por consiguiente, la sección transversal y, en consecuencia, la corriente en el elemento radiante varían considerablemente lo cual afecta su diagrama de radiación y su ganancia. En el caso de torres o mástiles radiantes normalmente las secciones transversales son triangulares o cuadradas mientras que las estructuras a base de hilos se caracterizan por tener secciones transversales circulares. Para simplificar el cálculo de los diagramas y de las ganancias de las antenas en ondas kilométricas y hectométricas a efectos de planificación, se supone que cada elemento del sistema de antena tiene la misma sección transversal. Además, el procedimiento de cálculo desarrollado de acuerdo con la teoría incluida en el Anexo 1, transforma automáticamente toda sección transversal triangular o cuadrada en una sección transversal circular equivalente.

Parámetros utilizados en el procedimiento de cálculo

- Tipo de sección transversal (T, S, C)
Triangular (T), cuadrada (S) o circular (C)
- Dimensiones de la sección transversal (m)
Debe especificarse el lado de la sección o, en el caso de una sección circular, su diámetro.

3.3 Frecuencia de funcionamiento

La frecuencia de funcionamiento de un sistema de antenas determinado tiene influencia sobre el diagrama de radiación resultante. En algunos casos, se utiliza una estructura concreta para transmitir por más de un canal o puede emplearse para radiar en un canal distinto del de la frecuencia de diseño. De ser así, el diagrama debe evaluarse para la frecuencia de funcionamiento real a fin de conseguir resultados significativos.

Parámetros utilizados en el procedimiento de cálculo

- Frecuencia (kHz)
(Se incluye un valor por defecto de 1 000 kHz).

3.4 Sistema de tierra y características del terreno

Como se ha mencionado en el § 2.4 los sistemas de antenas en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas normalmente están situados sobre un terreno imperfectamente conductor cuyas características en términos de coeficientes de reflexión se especifican por la constante dieléctrica y la conductividad del terreno. Sin embargo, los sistemas de antenas en ondas kilométricas y hectométricas eficaces requieren un sistema de tierra que idealmente debería consistir en una superficie circular perfectamente conductora que rodee a la base de la antena.

En la práctica, un sistema de tierra se realiza mediante una red de conductores radiales de longitud y diámetro adecuados que sólo puede ser una aproximación a la superficie conductora perfectamente ideal.

La longitud de los conductores radiales varía entre $0,25 \lambda$ y $0,50 \lambda$ y su número entre 60 y 120, siendo su diámetro del orden de unos pocos milímetros. Una configuración de un sistema de tierra típico consiste en una malla circular con 120 hilos de $0,25 \lambda$ de longitud y un diámetro de 2,7-3 mm. Como de costumbre, es necesario optimizar los sistemas tanto desde el punto de vista técnico como desde el punto de vista económico.

En el caso de antenas verticales directivas (véase el § 3.2.2) cada elemento radiante normalmente va equipado con un sistema de tierra individual adecuadamente conectado a los demás.

Para simplificar el cálculo de los diagramas y de la ganancia de las antenas de ondas kilométricas y hectométricas a efectos de planificación, se supone que el sistema de tierra está representado por una red de hilos circular centrada en la base del elemento radiante. En el caso de sistemas de elementos radiantes también se supone que los parámetros del sistema de tierra de cada uno de los elementos radiantes son los mismos.

Parámetros utilizados en el procedimiento de cálculo

Para evaluar el diagrama de radiación sobre un terreno imperfectamente conductor se necesitan los siguientes parámetros:

- Constante dieléctrica
(Se incluye un valor por defecto de $\epsilon = 4$)
- Conductividad del terreno (S/m)
(Se incluye un valor por defecto de $S_0 = 0,01$ S/m)

Cuando hay un sistema de tierra se necesitan los siguientes parámetros adicionales:

- Radio del sistema de tierra (m)
(Se incluye un valor por defecto de $0,25 \lambda$ para la frecuencia de cálculo por defecto)
- Número de hilos del sistema de tierra
(Se incluye un valor por defecto de 120 hilos)
- Diámetro del hilo del sistema de tierra (mm)
(Se incluye un valor por defecto de 2,7 mm).

3.5 Tipos de antenas omnidireccionales

3.5.1 Monopolos verticales

Un radiador básico en ondas kilométricas y hectométricas es el monopolo vertical que consiste en un elemento radiante vertical erigido sobre un sistema de tierra. El monopolo vertical puede realizarse mediante una estructura autosoportada o mediante un mástil arriostrado y puede alimentarse de diversas formas, eligiendo adecuadamente la altura del punto de alimentación sobre su estructura vertical. El monopolo vertical con alimentación por la base es una de las disposiciones de alimentación más comunes.

La sección transversal de elemento radiante puede variar considerablemente según el método de diseño utilizado. Las torres autorradiantes presentan secciones triangulares o cuadradas con longitudes de los lados del orden de 5 a 10 m y los recientes montajes de radiadores de jaula presentan secciones transversales aún de mayor tamaño.

La altura del monopolo vertical normalmente oscila entre $0,1$ y $0,625 \lambda$, de acuerdo con los diversos requisitos de funcionamiento (véase la Parte 2).

La impedancia en el caso de alimentación por la base depende de la altura y de la sección de la antena. Un aumento de la sección disminuirá la reactancia y aumentará la anchura de banda.

El monopolo vertical proporciona un diagrama omnidireccional en el plano acimutal, sin embargo en el diagrama vertical correspondiente siempre influyen muy considerablemente las constantes del terreno así como diversos parámetros físicos; por ejemplo, la altura eléctrica de la antena, entre otros.

La presencia de un sistema de tierra no afecta significativamente la forma geométrica del diagrama pero sí influye sobre la eficacia.

3.5.2 Tipos de monopolos verticales

Los monopolos verticales con alturas eléctricas en la gama de $0,15$ a $0,3 \lambda$ puede realizarse fácilmente en las ondas kilométricas y hectométricas mediante radiadores alimentados por la base (mástiles o torres) con la base aislada. También pueden utilizarse construcciones sobre el terreno con una jaula de hilos alimentada por la parte inferior (monopolo plegado o alimentación en paralelo). En muchos casos los radiadores relativamente cortos se cargan en la parte superior para aumentar su altura eléctrica.

– *Monopolos cortos*

Por razones económicas, a las frecuencias más bajas se utilizan normalmente monopolos cortos (es decir con una altura eléctrica considerablemente inferior a un cuarto de la longitud de onda). Cabe señalar que el empleo de este tipo de antenas para transmisiones de alta potencia puede provocar tensiones elevadas.

– *Monopolos de un cuarto de longitud de onda*

Este tipo de radiador tiene una altura eléctrica de aproximadamente un cuarto de longitud de onda y es el más adecuado cuando se necesita dar servicio por onda de superficie a una distancia relativamente corta debiendo comenzar el servicio por onda ionosférica a la mayor proximidad posible del emplazamiento del transmisor.

– *Antenas antidesvanecimiento*

En ondas kilométricas y hectométricas aparece desvanecimiento en la recepción de la señal difundida cuando la intensidad de campo de la onda de superficie presenta un valor del mismo orden de magnitud que la intensidad de campo de la onda ionosférica. La amplitud de la señal resultante en el receptor variará de acuerdo con su diferencia de fase relativa que resulta afectada por las condiciones de propagación.

El desvanecimiento puede reducirse controlando la cantidad de potencia de la onda ionosférica radiada en la zona de servicio deseada. Este control puede obtenerse seleccionando monopolos verticales con alturas eléctricas comprendidas entre $0,5$ y $0,6 \lambda$. En este caso, el diagrama de radiación vertical presenta los lóbulos laterales menores y el lóbulo lateral mínimo en el sector angular comprendido entre 50° y 90° donde la radiación se dirige hacia la ionosfera.

3.6 Antenas directivas

Los sistemas de antenas directivas se utilizan ampliamente para:

- limitar la radiación dirigida hacia la zona de servicio de otras estaciones, a fin de reducir las interferencias;
- concentrar la radiación hacia la zona de cobertura deseada;
- lograr una ganancia más elevada.

En ondas kilométricas y hectométricas los sistemas de antenas directivas más comunes consisten en redes de radiadores verticales con dos disposiciones básicas:

- redes de elementos activos verticales;
- redes de elementos pasivos verticales (en combinación con uno o más elementos activos).

Las redes de elementos pasivos en combinación con más de un elemento activo son menos frecuentes en las aplicaciones prácticas.

3.6.1 Redes de elementos verticales activos

Las redes de elementos verticales activos constan de un cierto número de elementos radiantes verticales adecuadamente separados. La directividad del diagrama horizontal deseado depende de la separación entre los elementos radiantes, de la amplitud de la corriente que alimenta cada elemento, de la fase de la corriente de alimentación y del lugar por donde se alimenta cada elemento.

Controlando estos parámetros es posible obtener una amplia variedad de diagramas, incluso en el caso más sencillo de una red de dos elementos. Sin embargo, las mayores ganancias y directividades (así como las mayores relaciones frontal/dorsal) se logran con redes de más de dos elementos a costa de montar una estructura más costosa y compleja.

El diagrama vertical de una red de elementos radiantes verticales dependerá de la altura de los elementos, del sistema de tierra, de las características del terreno, etc.

Los elementos radiantes que componen la red pueden alimentarse de varias formas, como se ha indicado anteriormente, siendo el método más común y económico el de la configuración de alimentación por la base.

Cabe señalar que las redes de elementos activos verticales ofrecen definitivamente un control de los diagramas directivos resultantes mucho mejor que el de las redes de elementos pasivos verticales debido a que es posible controlar con más precisión la corriente en cada elemento. No obstante, esta ventaja se logra a costa de establecer una disposición de la alimentación más compleja y costosa.

Por último debe señalarse que si bien el método más común consiste en disponer las bases de los radiadores verticales a lo largo de una línea situada en el plano horizontal, también pueden utilizarse otras configuraciones.

Una red de cuatro elementos con sus respectivas bases situadas en las esquinas de un cuadrado en el plano horizontal puede proporcionar un lóbulo de radiación principal orientable si se controla adecuadamente la disposición de la alimentación. También puede lograrse un diagrama aproximadamente omnidireccional.

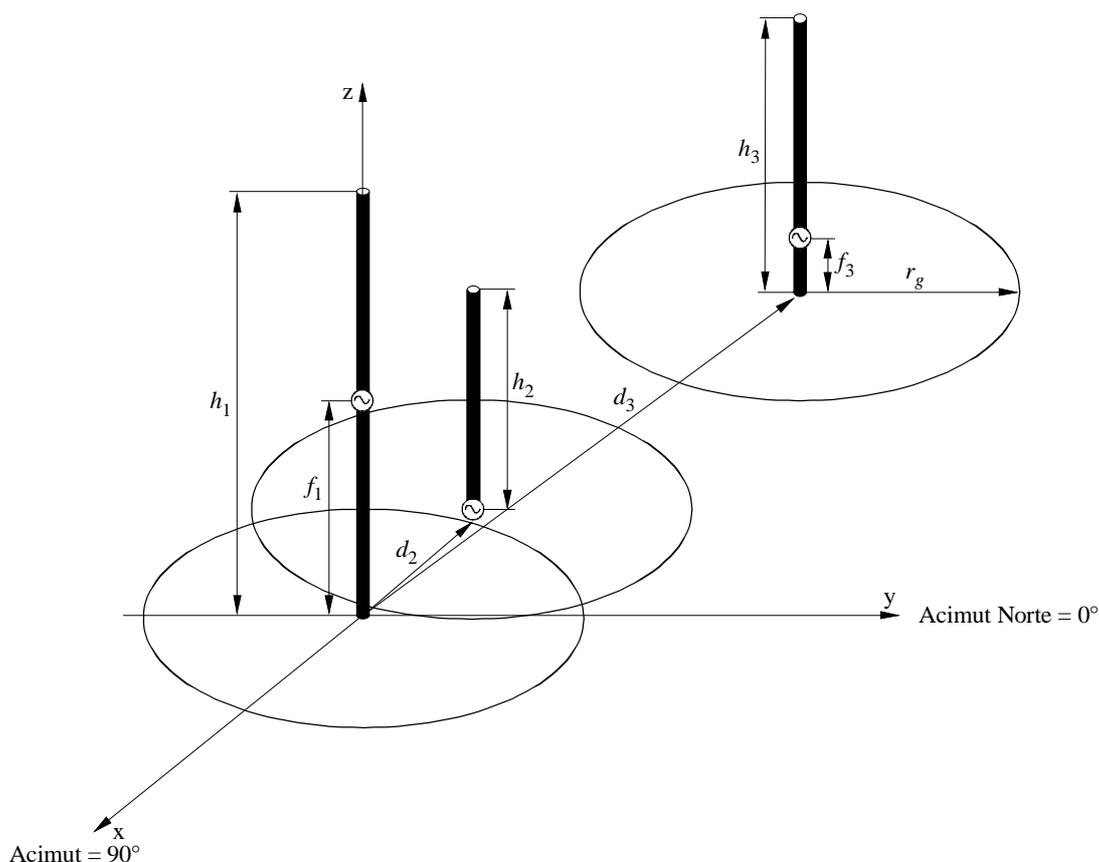
En publicaciones previas de la UIT (Manual de Diagramas de antenas, 1978) aparecen unos cuantos ejemplos de diagramas de estos sistemas de antenas que se han calculado aplicando una distribución de corriente sinusoidal. Sin embargo, el procedimiento de cálculo descrito en la presente Recomendación permite evaluar el diagrama de radiación de redes de elementos verticales que tengan cualquier posición relativa en el plano horizontal y cualquier altura, como se representa en la Fig. 3. También es posible tener en cuenta los elementos radiantes no alimentados por la base, siempre que se especifique la altura del punto de alimentación.

Parámetros utilizados en el procedimiento de cálculo

Con referencia a la Fig. 3, son necesarios los siguientes parámetros para aplicar el procedimiento de cálculo:

- Altura de cada elemento radiante (m)
- Distancia (m) a cada elemento
(Desde el elemento N.º 1 que se considera situado en el origen del sistema de coordenadas)
- Ángulo acimutal (grados) de la línea desde el elemento N.º 1 a cada uno de los otros elementos
(Con respecto a la dirección Norte que coincide con el eje y)
- Altura del punto de alimentación de cada elemento (m)
- Amplitud de la tensión de alimentación (%)
(Expresado en porcentaje para cada elemento)
- Fase de la tensión de alimentación (grados)
(Con respecto a la fase de la tensión aplicado al elemento N.º 1 que se supone de 0°).

FIGURA 3
Redes de elementos verticales activos



1386-03

3.6.2 Redes de elementos verticales pasivos

Estas redes representan el método más económico para lograr diagramas acimutales directivos a costa de utilizar un procedimiento de ajuste más engorroso.

Se realizan en general mediante un elemento activo (alimentado por la base o alimentado por el centro) con uno o más elementos pasivos adecuadamente separados en el plano horizontal. La directividad horizontal deseada depende del emplazamiento de los elementos radiantes y de la reactancia pasiva situada en el punto de alimentación de cada radiador pasivo.

Controlando estos parámetros es posible obtener una amplia variedad de diagramas acimutales, aun en el caso más sencillo de una red que conste únicamente de dos elementos. Sin embargo, las ganancias y directividades más elevadas (y las mayores relaciones frontal/dorsal) se logran con redes de más de un elemento pasivo a costa de una realización más costosa. Cabe señalar que la ganancia global de la red no aumenta linealmente con el número de elementos radiantes, de manera que las redes con muchos elementos radiantes puede que no representen una solución económica para requisitos específicos de alta ganancia.

El elemento activo puede alimentarse de varias formas como se ha indicado anteriormente, siendo la más común y económica la disposición de alimentación por la base.

Debe señalarse que las redes de elementos pasivos verticales exigen un control muy eficaz de la amplitud y la fase de la corriente de los elementos pasivos para lograr el diagrama acimutal deseado. Una vez determinado el emplazamiento de los elementos, la única forma de realizar dicho control consiste en insertar una reactancia adecuada en el punto de alimentación del elemento pasivo. Si bien el valor teórico deseado de tal reactancia puede determinarse fácilmente es necesario realizar un ajuste importante in situ para lograr el efecto perseguido en la práctica.

Debe mencionarse igualmente que en el caso de aplicaciones específicas (baja potencia, baja directividad) es posible utilizar uno o más hilos arriostrados como elementos radiantes pasivos en un sistema de una sola antena de mástil, siempre que se introduzca una adecuada reactancia de base.

Estas redes actualmente muy utilizadas no se incluyeron en las publicaciones de la UIT antes mencionadas debido a la dificultad de calcular correctamente las corrientes inducidas en los elementos pasivos cuando se aplica el método de distribución de corriente sinusoidal. El procedimiento de cálculo descrito en esta Recomendación permite tener en cuenta su reactancia en el punto de alimentación (suponiendo, para mayor sencillez, que no tiene pérdidas).

Además, como en el caso anterior, el elemento de alimentación (que se considera situado en el origen del sistema de coordenadas que aparecen en la Fig. 1) puede tener una altura del punto de alimentación variable y los diversos elementos pasivos pueden estar situados en cualquier posición del plano horizontal, como se muestra en la Fig. 4.

Parámetros utilizados en el procedimiento de cálculo

Con referencia a la Fig. 4, son necesarios los siguientes parámetros para aplicar el procedimiento de cálculo:

- Altura de cada elemento radiante (m)
- Distancia (m) a cada elemento
(Desde el elemento activo N.º 1 que se considera situado en el origen del sistema de coordenadas)
- Ángulo acimutal (grados) de la línea desde el elemento N.º 1 a cada uno de los otros elementos
(Con respecto a la dirección Norte que coincide con el eje y)
- Altura del punto de alimentación de cada elemento activo (m)
- Reactancia de base de los elementos pasivos (Ω)
(Pueden utilizarse valores tanto positivos como negativos).

3.7 Otros tipos de antenas

Las antenas eléctricamente cortas normalmente tienen una baja resistencia a la radiación, una eficacia reducida, una alta reactancia capacitiva y un valor elevado de Q (y por consiguiente una anchura de banda estrecha). Cargando capacitivamente la parte superior de estas antenas se mejoran todas estas características. Por regla general, la carga en la parte superior puede realizarse de dos formas. Una manera es añadiendo en la cima del mástil un cierto número de hilos horizontales de manera que el mástil y los hilos formen una estructura radiante con forma de «T». Un segundo tipo de estructura cargada en la parte superior es la antena «de paraguas» construida por un cierto número de hilos radiales conectados a la cima del mástil vertical e inclinados hacia abajo.

Los diagramas de radiación en los planos horizontal y vertical son muy similares a los de un monopolo vertical.

3.7.1 Antenas en T

Las antenas en T consisten en un elemento radiante vertical adecuadamente alimentado, conectado en su extremo superior al centro de un elemento horizontal convenientemente sustentado por sus extremos. Estos elementos radiantes generalmente tienen una alimentación por la base.

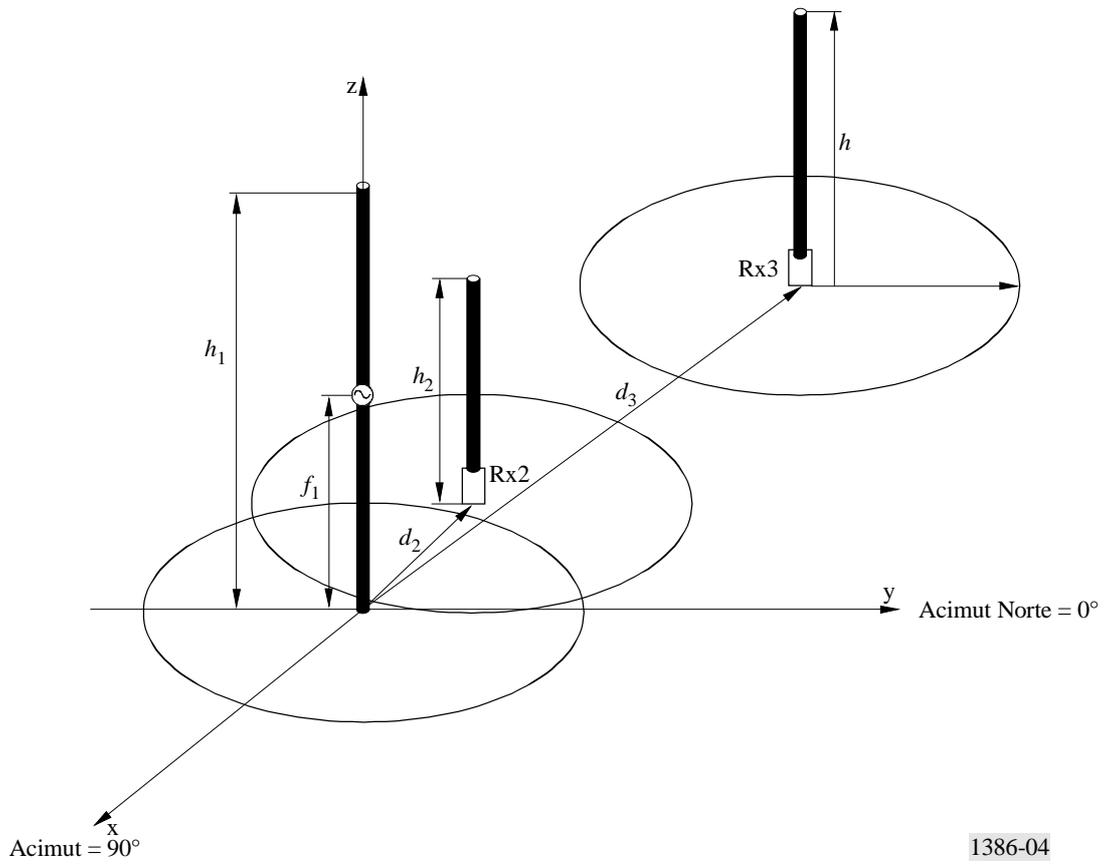
Este tipo de antenas se utiliza a veces, especialmente en ondas kilométricas, para aplicaciones en las que el elemento horizontal (a menudo llamado sombrero de capacidad) se emplea para obtener una distribución de corriente más uniforme a lo largo del elemento vertical principal. El elemento horizontal consiste a menudo en uno o más hilos horizontales cortos como puede observarse en la Fig. 5. Si la longitud del elemento radiante horizontal es corta en comparación con la longitud de onda, puede suponerse que la antena en T no es directiva. Cabe señalar que la polarización de la radiación de esta antena es fundamentalmente vertical con una pequeña componente horizontal.

Parámetros utilizados en el procedimiento de cálculo

Con referencia a la Fig. 5, se necesitan los siguientes parámetros para aplicar el procedimiento de cálculo:

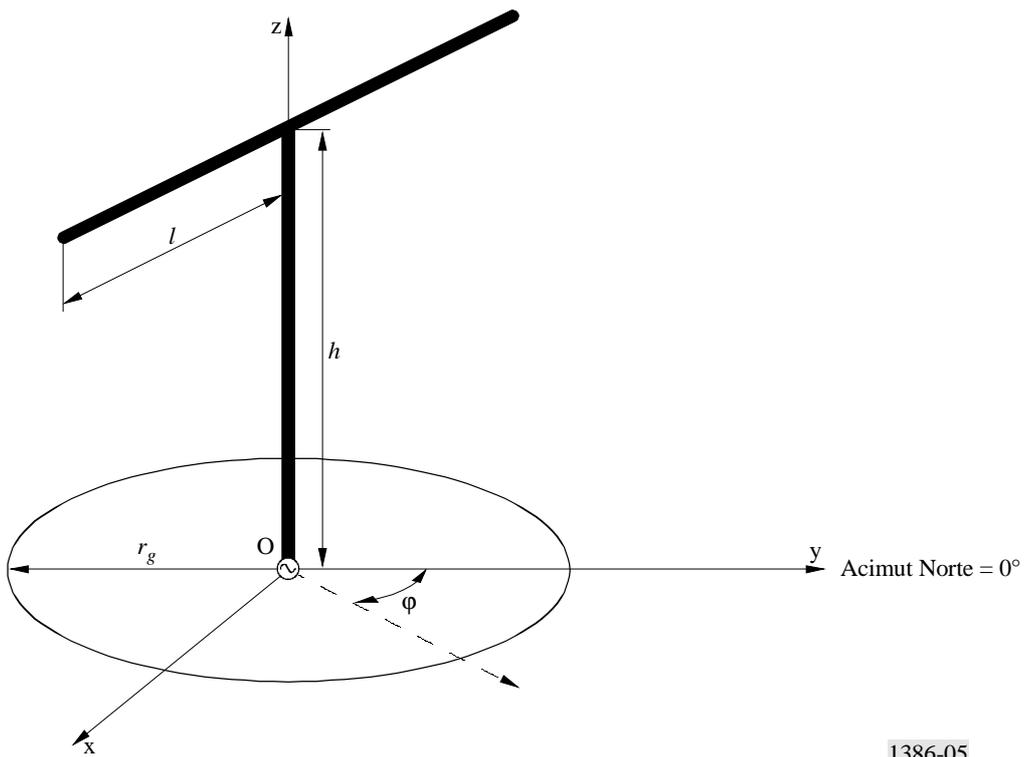
- Altura del elemento vertical (m)
- Semilongitud del elemento horizontal (m)
- Acimut con respecto al Norte de la dirección normal al elemento horizontal (grados).

FIGURA 4
Redes de antenas verticales con elementos pasivos



1386-04

FIGURA 5
Antena en T



1386-05

3.7.2 Antenas de paraguas

La antena de paraguas consiste básicamente en un radiador vertical corto adecuadamente alimentado, siendo la alimentación por la base la solución más habitual. Para mejorar la eficacia de la antena aumentando la resistencia a la radiación, la altura física normalmente corta del radiador vertical se aumenta eléctricamente cargando capacitivamente la parte superior del elemento radiante. Ello se hace conectando en el extremo superior del elemento radiante vertical un cierto número de elementos radiantes de igual longitud inclinados hacia abajo un ángulo igual con respecto a la vertical. Estos radiadores inclinados, con una distribución uniforme acimutal, constituyen un cono (o paraguas) sobre la parte superior del radiador vertical. Los radiadores inclinados están convenientemente soportados y aislados en sus extremos inferiores, como puede observarse en la Fig. 6.

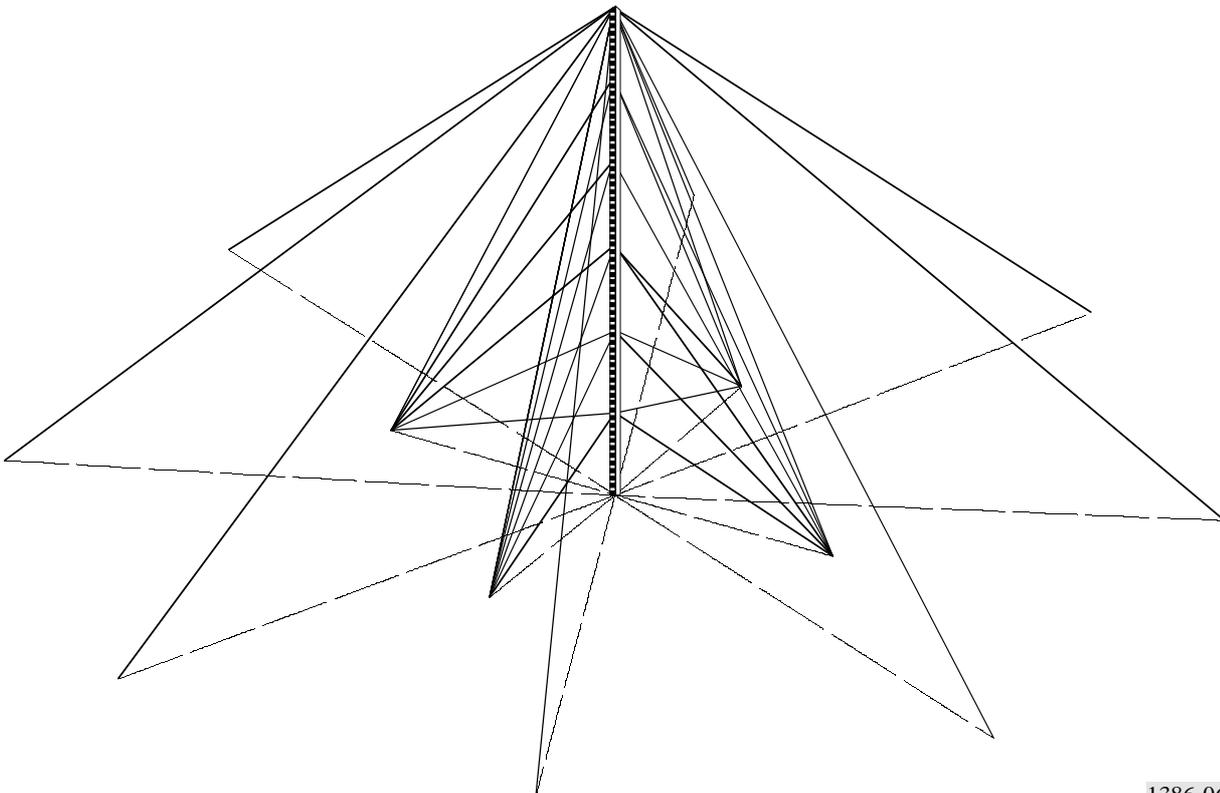
Si el cono tiene unas dimensiones reducidas en comparación con la longitud de onda (normalmente $0,1 \lambda$) y consta de un número suficiente de elementos radiantes (normalmente no superior a 8) puede suponerse que la antena «de paraguas» no es directiva.

Parámetros utilizados en el procedimiento de cálculo

Con referencia a la Fig. 6, se necesitan los siguientes parámetros para aplicar el procedimiento de cálculo:

- Altura del elemento vertical (m)
- Número de radiales
- Longitud del radial (m)
- Pendiente de los radiales con respecto al elemento vertical (grados).

FIGURA 6
Antena de paraguas



4 Cálculo de los diagramas de la radiación y de la ganancia

4.1 Consideraciones generales

Existen dos aspectos interrelacionados que hacen extremadamente importante lograr un método unificado para calcular los diagramas de antena:

- la planificación y el diseño de las estaciones de radiodifusión nacional;
- la conformidad de los parámetros de las estaciones con los planes de frecuencia internacionales.

Estos factores llevan al desarrollo de un procedimiento de cálculo unificado que:

- pueda aplicarse a diversos tipos de antena de radiodifusión;
- en la medida de lo posible, calcule directamente (sin interpolación) los valores del diagrama;
- presente los resultados del cálculo del diagrama tanto en forma gráfica como en forma numérica.

4.2 Métodos analíticos actualmente disponibles

Actualmente se dispone de varios métodos matemáticos con diversos grados de dificultad para resolver las ecuaciones del diagrama de antena. Estos métodos pueden agruparse básicamente de la forma siguiente (en orden creciente de precisión):

- teoría de la distribución de corriente sinusoidal,
en la que se desprecia la sección transversal del elemento radiante;
- teoría de la distribución de corriente no sinusoidal,
en la que la corriente de los elementos radiantes depende de su longitud y de su sección transversal;
- métodos de integración numérica,
en los que la estructura radiante se descompone en elementos cortos y delgados y se supone que la distribución de corriente en cada uno de los elementos tiene una función determinada elemental y la distribución global de la corriente, las impedancias y el diagrama de radiación se obtienen por integración de las ecuaciones de Maxwell.

ANEXO 1

Procedimiento de cálculo

1 Objetivos principales

Antes de seleccionar un procedimiento de cálculo determinado es necesario considerar el objetivo particular que se persigue; es decir, el cálculo de los parámetros de antena que deben utilizarse para la planificación. Por consiguiente, deben realizarse los dos cálculos básicos:

- el *diagrama de antena*, (con los valores de ganancia relativos al valor máximo);
- la *ganancia de directividad*, (sin incluir las pérdidas).

2 Limitaciones principales

El procedimiento de cálculo seleccionado debe ser:

- fácil de utilizar en pequeños ordenadores;
- lo suficientemente preciso como para cumplir los objetivos indicados;
- altamente interactivo con el personal no especializado;
- lo suficientemente rápido como para integrarlo en un sistema de planificación;
- homogéneo y fácilmente aplicable a todos los tipos de antena considerados;
- de unas características tales que necesite sólo un número limitado de parámetros de entrada.

3 Análisis comparativo de los métodos disponibles

En el Cuadro 1 se resumen los resultados de una comparación de los distintos métodos, indicados en el § 6 de la Parte 1, en función de su respuesta a las anteriores limitaciones y cuando se aplican al cálculo de los diagramas de antena en ondas kilométricas y hectométricas:

CUADRO 1

Comparación de los métodos de cálculo

Requisito	Sinusoidal	No sinusoidal	Númérico
Aplicación en pequeños ordenadores	SÍ	SÍ	SÍ ⁽¹⁾
Lo suficientemente preciso para la planificación	NO ⁽²⁾	NO ⁽³⁾	SÍ
Interactivo con operadores no especializados	SÍ	SÍ	NO ⁽⁴⁾
Rápido para su integración en un sistema de planificación	SÍ	SÍ	SÍ ⁽⁵⁾
Generalizado y fácil aplicación a todos los tipos de antena	NO ⁽⁶⁾	NO ⁽⁶⁾	SÍ
Necesidad de un número mínimo de parámetros de entrada	SÍ	NO	NO

- (1) Con algunas limitaciones los ordenadores pequeños actualmente disponibles pueden ejecutar métodos numéricos.
- (2) Las imprecisiones aparecen cuando la aproximación de hilo delgado deja de ser aplicable.
- (3) Las imprecisiones aparecen cuando el sistema de tierra presente puede ser inaceptable.
- (4) Puede realizarse una interfaz de usuario adecuada para asegurar una alta interactividad, como se indica más adelante.
- (5) Aunque se utilizarán procedimientos de larga duración, puede preverse una rápida implementación en los sistemas de planificación (véase más adelante).
- (6) La aplicación generalizada a todos los tipos de antenas en ondas kilométricas y hectométricas previstos puede que no sea práctica ya que podría dar lugar a unos desarrollos analíticos demasiado engorrosos.

Del Cuadro 1 se desprende que el método de la distribución de corriente sinusoidal aplicado en el pasado por el ex CCIR puede que no represente el mejor método, puesto que para conseguir unos resultados lo suficientemente precisos aplicando la teoría de la distribución de corriente sinusoidal es necesario que se cumplan las siguientes condiciones básicas:

- los elementos radiantes deben ser hilos perfectamente conductores y delgados (de sección despreciable);
- las corrientes en los elementos radiantes deben ser sinusoidales;
- los efectos mutuos entre los elementos radiantes deben ser despreciables;
- la estructura radiante debe estar situada en un terreno imperfectamente conductor, plano y homogéneo.

Las anteriores conexiones rara vez se respetan en el caso de las antenas de ondas kilométricas y hectométricas en las que en la sección transversal del elemento radiante a menudo no es despreciable (por ejemplo, en el caso de mástiles o torres autorradiantes) y los efectos mutuos entre los elementos no pueden despreciarse (por ejemplo, en el caso de elementos verticales pasivos, etc.). Además, la aplicación de la teoría de la distribución de corriente sinusoidal en antenas distintas de las redes verticales u horizontales puede tener como consecuencia la aparición de unos complicados algoritmos que dependen de la geometría concreta de la antena.

Por otro lado, la teoría de la distribución de corriente no sinusoidal si bien da lugar a una definición más precisa de los parámetros de la antena presenta los mismos inconvenientes. Su aplicación generalizada a los diferentes tipos de antenas que se utilizan en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas puede ser bastante complicada.

4 Método numérico

Este método fue seleccionado como el preferido. Sin embargo, el método numérico básico se modificó considerablemente para satisfacer los requisitos enumerados en el Cuadro 1. El procedimiento resultante parece satisfacer las limitaciones indicadas en el § 6. La única condición que debe verificarse es la posibilidad de integrarlo

directamente en el contexto de una planificación. Si esta condición no se cumple, el procedimiento puede aún aplicarse para obtener un conjunto de valores tabulados con una resolución adecuada (como se indica en el § 2.2.2) a fin de interpararlos en la planificación. Para su utilización con ordenadores personales, el procedimiento de cálculo se ha realizado mediante un paquete de programas informáticos integrado con las siguientes características:

- alto grado de interactividad con el operador logrado mediante:
 - instrucciones controladas por menú;
 - introducción de datos con máscara de vídeo;
 - amplia utilización de gráficos de alta resolución;
 - salida de datos tabulada dirigida a consola o impresora;
 - resultado de los cálculos almacenados en ficheros para su recuperación.

5 Algoritmo de cálculo

Los métodos numéricos se basan en la integración directa de las ecuaciones de Maxwell mediante un cierto número de métodos ampliamente descritos en la literatura actual. El procedimiento seleccionado en este documento es una versión primitiva del programa MININEC elaborado en años pasados [Li, y otros, 1983]. La teoría en que se basa puede resumirse de la forma siguiente. Una relación bien conocida obtenida a partir de la ecuación de Maxwell en el caso de hilos de sección transversal circular es:

$$\mathbf{E}_{inc} \cdot \mathbf{s}(s) = -\nabla\Phi \cdot \mathbf{s}(s) - j \omega \mathbf{A} \cdot \mathbf{s}(s) \quad (13)$$

siendo:

- \mathbf{E}_{inc} : campo eléctrico incidente radiado por la densidad de corriente, \mathbf{J} , que fluye a través de un hilo radiante
- Φ : potencial escalar (función de posición) en el hilo radiante
- \mathbf{A} : potencial vector en el hilo radiante
- $\mathbf{s}(s)$: vector unitario paralelo al eje del hilo radiante
- ω : $2\pi f$
siendo f la frecuencia de cálculo.

Puede demostrarse que:

$$\Phi = -\frac{1}{j \omega \mu \epsilon} \nabla \cdot \mathbf{A} \quad (14)$$

siendo:

- μ : permeabilidad magnética
- ϵ : constante dieléctrica
- y

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \mathbf{J} \rho / r \, dV \quad (15)$$

siendo

- ρ : densidad de carga
- r : distancia de cada punto en la distribución de carga al punto de observación
- V : volumen del hilo radiante.

En el caso de los de sección circular la fórmula (14) se expresa de la siguiente forma:

$$\Phi = \frac{1}{4\pi \epsilon} \int_c q(s) \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-j k r}}{r} \, ds \, d\phi \quad (16)$$

siendo $q(s)$ la densidad de carga lineal, es decir:

$$q(s) = -\frac{1}{j \omega} \frac{dI}{ds} \quad (17)$$

La ecuación (13), que es una de las que deben resolverse, puede expresarse de la forma general:

$$v = F(i) \tag{18}$$

donde v es la excitación conocida (tensión aplicada a la antena), i es la respuesta desconocida (corriente en antena) y F es un operador lineal (integral) conocido. El objetivo es determinar i cuando se especifican F y v . La linealidad del operador hace posible una solución numérica. En el método del momento la función de respuesta desconocida se desarrolla como una combinación lineal de N términos y se expresa de la forma siguiente:

$$i(s) \approx c_1 i_1(s) + c_2 i_2(s) + \dots + c_N i_N(s) = \sum_1^n c_n i_n(s) \tag{19}$$

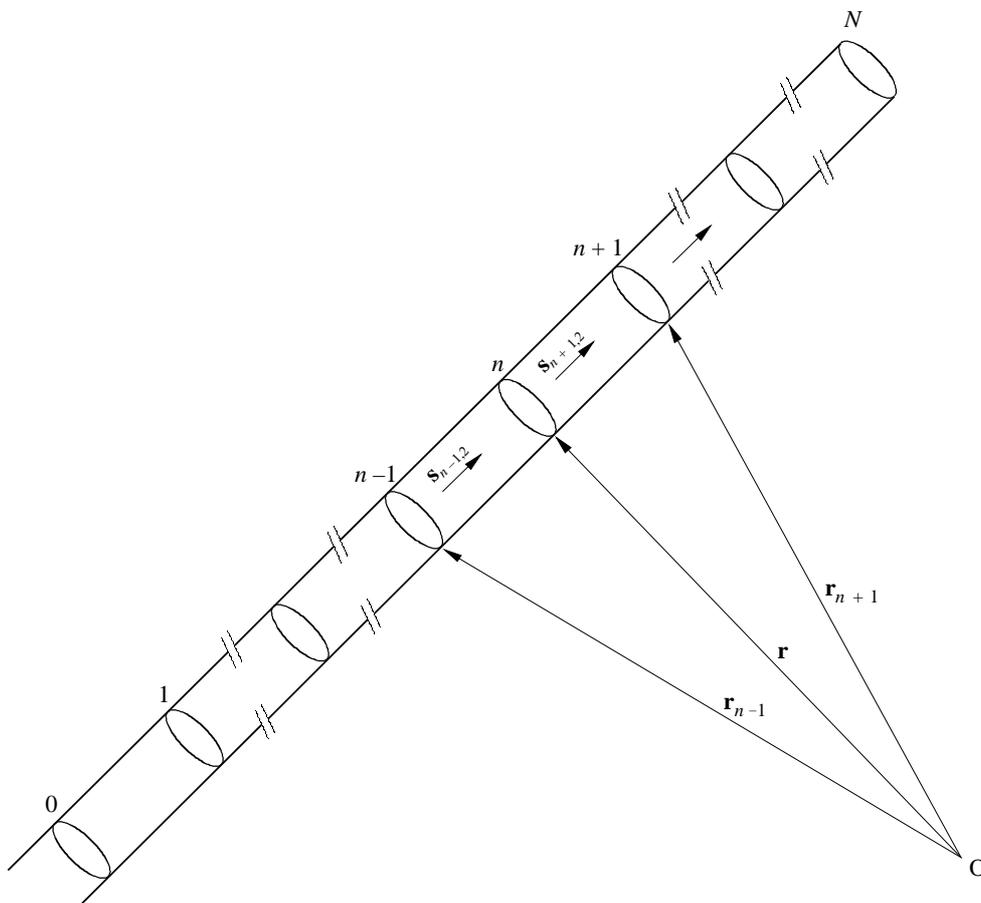
Cada coeficiente, c_n , es una constante desconocida y cada coeficiente, $i_n(s)$, es una función conocida denominada generalmente función de base o de desarrollo situada en el mismo dominio que la función desconocida, I . Utilizando la linealidad del operador, F , la ecuación (18) puede volver a escribirse de la forma siguiente:

$$\sum_1^n c_n F(i_n) = I \tag{20}$$

La selección de las funciones de base desempeña un cometido fundamental en toda solución numérica y se obtiene normalmente entre las funciones de base que permiten una fácil evaluación de $F(i_n)$; la única tarea que queda entonces es determinar las constantes desconocidas, c_n .

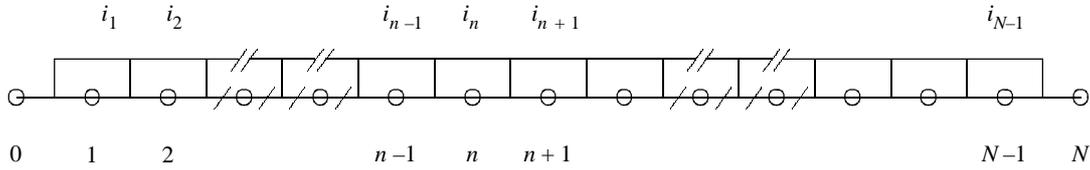
Las funciones de subdominio (que no son cero únicamente en una parte del dominio de la función $i(s)$ que corresponde a la superficie de la estructura) son las más utilizadas puesto que no requieren un conocimiento previo de la función que deben representar.

FIGURA 7
Segmentación de la estructura de la antena



Un método directo consiste en subdividir la estructura en N segmentos iguales sin superposición, como se muestra en la Fig. 7, y seleccionar la función de impulsos, mostrada en la Fig. 8, como función de base.

FIGURA 8
Funciones de impulsos



1386-08

Este método permite simplificar considerablemente el algoritmo y disminuir el tiempo de cálculo manteniendo una aceptable precisión. En la Fig. 7, los vectores $\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_{N+1}$ se definen con respecto al sistema de coordenadas de referencia.

Los vectores unitarios paralelos al eje hilo para cada segmento mostrado se definen como:

$$\mathbf{s}_{n+1/2} = (\mathbf{r}_{n+1} - \mathbf{r}_n) / |\mathbf{r}_{n+1} - \mathbf{r}_n| \quad (21)$$

La función del impulso n utilizada en este método se define entonces como:

$$i_n(s) = \begin{cases} 1 & \text{para } s_{n-1/2} < s < s_{n+1/2} \\ 0 & \text{para otros valores} \end{cases} \quad (22)$$

donde los puntos $s_{n+1/2}$ designan los puntos medios del segmento en:

$$s_{n+1/2} = (s_{n+1} + s_n) / 2 \quad (23)$$

y

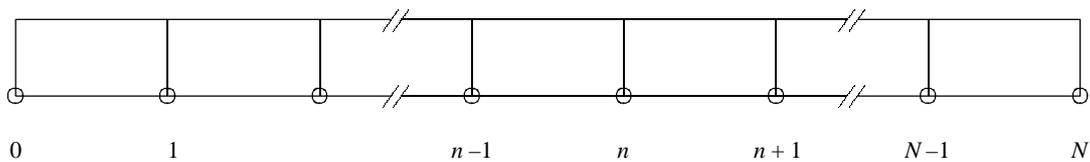
$$\mathbf{r}_{n+1/2} = (\mathbf{r}_{n+1} + \mathbf{r}_n) / 2 \quad (24)$$

Suponiendo s_m como punto de observación para los vectores \mathbf{E}_{inc} y \mathbf{A} , la ecuación (21) puede expresarse de la forma siguiente:

$$\mathbf{E}_{inc}(s_m) \cdot \{ [(s_m - s_{m-1}) / 2] \mathbf{s}_{m-1/2} + [(s_{m+1/2} - s_m) / 2] \mathbf{s}_{m+1/2} \} = j\omega \mathbf{A}(s_m) \cdot \{ [(s_m - s_{m-1}) / 2] \mathbf{s}_{m-1/2} + [(s_{m+1/2} - s_m) / 2] \mathbf{s}_{m+1/2} \} + \varphi(s_{m+1/2}) - \varphi(s_{m-1/2}) \quad (25)$$

Las corrientes circulan en los impulsos centrados en las uniones de los segmentos adyacentes (véase la Fig. 9).

FIGURA 9
Distribución de la corriente por los impulsos



1386-09

Los impulsos se omiten en los extremos del hilo. Ello equivale a introducir un semiimpulso de amplitud cero en cada extremo, imponiendo de esa forma las condiciones de contorno de corriente nula en los extremos del hilo sin conectar. Sustituyendo la ecuación (20) en la ecuación (25) el sistema de ecuaciones se estructura y se expresa en la forma matricial mostrada en la ecuación (14). Cada uno de los elementos de la matriz \mathbf{Z}_{mn} , asociado con la corriente n -ésima y el punto de observación s_m incorpora términos potenciales escalares y vectoriales.

Estos términos tienen la siguiente forma integral:

$$\Psi_{m,u,v} = \int_{s_u}^{s_v} k(s_m - s') ds' \quad (26)$$

con:

$$k(s_m - s') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-jkr_m}}{r_m} d\phi \quad (27)$$

y

$$r_m = \left[(s_m - s')^2 + 4a^2 \sin^2 \phi / 2 \right]^{1/2} \quad (28)$$

siendo a el radio del hilo radiante.

$$[\mathbf{Z}_{mn}] [\mathbf{I}_n] = [\mathbf{V}_m] \quad (29)$$

donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{mn} = & -1/4j\pi\omega\epsilon \{ k^2 [\mathbf{r}_{m+1/2} - \mathbf{r}_{m-1/2}] \cdot [\mathbf{s}_{n+1/2} \Psi_{m,n,n+1/2} + \mathbf{s}_{n-1/2} \Psi_{m,n-1/2,n}] - \\ & [\Psi_{m+1/2,n,n+1} / (s_{n+1/2} - s_n)] + [\Psi_{m+1/2,n-1,n} / (s_n - s_{n-1})] + \\ & [\Psi_{m-1/2,n,n+1} / (s_{n+1} - s_n)] - [\Psi_{m-1/2,n-1,n} / (s_n - s_{n-1})] \} \end{aligned} \quad (30)$$

y

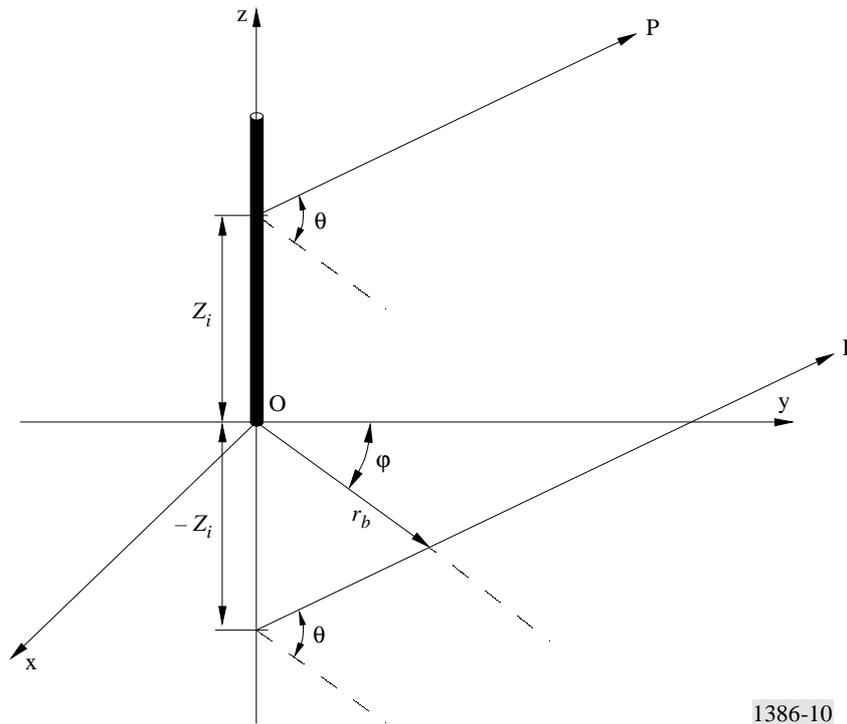
$$\mathbf{V}_m = \mathbf{E}_{inc}(s_m) \cdot (\mathbf{r}_{m+1/2} + \mathbf{r}_{m-1/2}) \quad (31)$$

$[\mathbf{Z}_{mn}]$ es una matriz cuadrada e $[\mathbf{I}_n]$ y $[\mathbf{V}_m]$ son matrices de columna donde $n = 1, 2, \dots, N$ y $m = 1, \dots, N$ siendo N el número de impulsos, es decir, el número total de incógnitas. $[\mathbf{V}_m]$ representa una tensión aplicada que se superpone a un campo eléctrico tangencial constante a lo largo del hilo para una distancia de una longitud de segmento cuyo centro coincide con el emplazamiento de los impulsos de corriente. Por lo tanto, en una antena transmisora todos los elementos de $[\mathbf{V}_m]$ se ponen a cero salvo los elementos correspondientes a los impulsos situados en los puntos de alimentación deseados.

En el procedimiento de cálculo adoptado, descrito en [Li y otros, 1983], la matriz $[\mathbf{Z}_{mn}]$ se rellena mediante la evaluación de una integral elíptica y la utilización de la cuadratura gaussiana para la integración numérica.

Cuando un sistema de antenas se encuentra en un terreno perfectamente conductor, se aplica el método de las imágenes para determinar las corrientes en los hilos situados sobre el terreno. En este caso, un sistema de antenas representado por N segmentos puede sustituirse por la estructura original y su imagen, como se representa esquemáticamente en la Fig. 10. El campo lejano se obtiene sumando la contribución de un radio directo y un radio reflejado desde cada impulso de corriente. Por consiguiente, habrá el doble de segmentos y deberán determinarse $2N$ incógnitas. Las corrientes imagen I_{N+1}, \dots, I_{2N} serán iguales a las corrientes en la estructura original I_1, \dots, I_N de manera que $I_N = I_{2N-n+1}$. Por consiguiente, la ecuación $[I_{2N}] = [V_{2N}][Z_{2N,2N}]$ contiene información redundante y puede reducirse a la ecuación original (14).

FIGURA 10
Rayos incidente y reflejado



1386-10

En el caso de un terreno conductor imperfectamente conductor, el campo debido al rayo reflejado se calcula de acuerdo con el § 2.4.1. La aplicación de los coeficientes de reflexión depende de la impedancia que presenta la superficie del terreno en el punto de reflexión y del ángulo de incidencia. La impedancia de la superficie del terreno (imperfecto) puede expresarse de la forma siguiente:

$$Z_g = 1/\sqrt{(\epsilon/\epsilon_0) - j(\sigma/\omega\epsilon_0)} \tag{32}$$

siendo:

- ϵ : la constante dieléctrica del terreno
- ϵ_0 : la constante dieléctrica del espacio vacío
- σ : la conductividad del terreno
- ω : $2\pi f$
siendo f la frecuencia de cálculo.

La impedancia de la superficie cuando el punto de reflexión se encuentra en el sistema de tierra viene dada por:

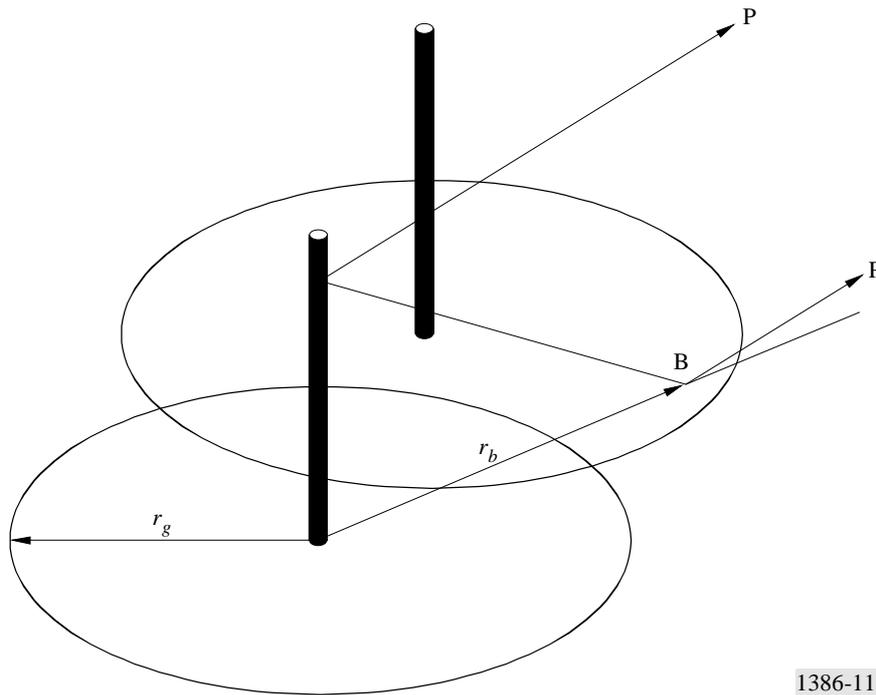
$$Z_{gs} = j\sqrt{\epsilon_0\mu_0} (\omega r_b/n_r) \ln(r_b/n_r d_w) \tag{33}$$

siendo:

- r_b : la distancia entre el punto de reflexión y el impulso de corriente en el plano horizontal
- n_r : número de hilos del sistema de tierra
- d_w : diámetro de los hilos del sistema de tierra.

Cuando el punto de reflexión se encuentra en el sistema de tierra, la impedancia real viene dada por la combinación en paralelo de la impedancia del terreno imperfectamente conductor y la impedancia del sistema de tierra. Por consiguiente, es necesario calcular r_b , como se muestra en la Fig. 11, a fin de determinar si el punto de reflexión se encuentra en el interior de alguno de los sistemas de tierra existentes (ello exige la aplicación de un procedimiento especial, particularmente en el caso de redes verticales donde por regla general cada elemento tiene su propia malla de tierra).

FIGURA 11
Reflexión sobre el sistema de tierra



1386-11

En el caso de redes de elementos pasivos verticales es preciso tener en cuenta las impedancias situadas en la estructura radiante (tales como la reactancia de base en los sistemas de reflector pasivo). Si se añade una impedancia $Z_L = R + jX$ a la estructura de manera que su emplazamiento coincida con el de una de las funciones impulsivas distintas de cero, la carga introduce una caída de tensión adicional igual al producto de la magnitud del impulso de corriente por Z_L . En este caso, la ecuación (33) pasa a ser:

$$[\mathbf{Z}'_{mn}] [\mathbf{I}_n] = [\mathbf{V}_m] \quad (34)$$

siendo $\mathbf{Z}'_{m,n} = Z_{mn}$ para $m = n$ y $\mathbf{Z}'_{mn} = Z_{mn} + Z_L$ para $m = n$. Por consiguiente, el valor de la impedancia simplemente se suma al elemento de impedancia diagonal de la matriz correspondiente al impulso en el hilo específico.

La ganancia en potencia de una antena en una dirección determinada (θ, φ) en el sistema de coordenadas de referencia se expresa de la siguiente forma:

$$G = 10 \log [4\pi P(\theta, \varphi) / P_{IN}] \quad (35)$$

siendo $P(\theta, \varphi)$ la potencia radiada por unidades de estereoradián en la dirección (θ, φ) y P_{IN} la potencia total de entrada a la antena. Se calculan de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$P_{IN} = \sum_1^N \operatorname{Re} [V_n I_n^*] / 2 \quad (36)$$

donde I_n^* representa la conjugada compleja y n es el número de la fuente. Por consiguiente,

$$P(\theta, \varphi) = r_0^2 \operatorname{Re} [E \cdot H] / 2 = [r_0^2 / 2\eta] [E \cdot E^*] \quad (37)$$

siendo

- r_0 : magnitud del vector de posición en la dirección (θ, φ)
- E : campo eléctrico
- H : campo magnético
- η : impedancia en el espacio libre.

Las ganancias se calculan para las componentes ortogonales individuales de los campos determinados a partir de la ecuación (35). La ganancia en potencia así obtenida se expresa en dB con respecto a una antena isótropa. A continuación, se calcula un factor de normalización de la ganancia de manera que los valores del diagrama se refieran a un máximo que se supone de valor cero (véase también la Recomendación UIT-R BS.705).

Los resultados de las pruebas de convergencia llevadas a cabo [Li y otros, 1983] sobre el método adoptado indicaron que para dipolos más cortos que una longitud de onda simplemente con 4 segmentos puede obtenerse un resultado preciso. Para lograr mejores resultados deben utilizarse de 8 a 18 segmentos, mientras que en el caso de una antena cuyas dimensiones sean las de una longitud de onda se recomienda el empleo de 30 a 36 segmentos.

Además, la precisión del método depende también de la relación entre la longitud del segmento y el radio l_s/a . Los datos obtenidos en las pruebas indican que se obtienen resultados precisos para hilos gruesos cuando la relación l_s/a es 2,5 o superior. Esta condición normalmente se cumple en la presente aplicación.

Como se ha indicado anteriormente, el programa original descrito en [Li y otros, 1983] exige amplias modificaciones para tener en cuenta:

- los cálculos sobre terreno imperfectamente conductor (y no sólo en espacio libre o sobre terreno perfectamente conductor);
- los cálculos en presencia de un sistema de tierra;
- una introducción de datos rápida e interactiva;
- una adaptación a tipos específicos de antena;
- una implementación de la salida de datos gráfica y tabular.

6 Hipótesis básicas

Para satisfacer los requisitos indicados en el Cuadro 1 y, por consiguiente, elaborar un programa informático que pueda ejecutarse en ordenadores pequeños, es necesario introducir un cierto número de hipótesis básicas a fin de disminuir el tiempo de cálculo y los requisitos de memoria. Ambos parámetros dependen del número de hilos utilizados para representar el sistema de antenas. El método de compromiso resultante es el siguiente:

- número máximo de hilos: 10;
- número máximo de segmentos: 180.

Esta solución permite el cálculo del diagrama de redes de hasta 10 elementos con las condiciones siguientes:

- se considera que cada elemento de antena es un hilo de sección transversal circular con la misma área que su sección transversal original;
- la relación entre la longitud del segmento y el radio, l_s/a , es mayor de 2,5;
- se consideran redes con 10 elementos como máximo;
- el cálculo sobre terreno imperfectamente conductor se lleva a cabo evaluando los coeficientes de reflexión;
- todo sistema de tierra se asimila a una superficie perfectamente conductora en torno al elemento.

Evidentemente, la primera condición limita la precisión del método. Sin embargo, aunque se necesitará la pertinente verificación con los diagramas medidos, se estima que en cualquier caso la precisión global mejora sustancialmente con respecto a la que se logra aplicando la teoría de la corriente sinusoidal convencional y es perfectamente satisfactoria a efectos de planificación.

La segunda condición también limita la precisión global, incluso si se cumple generalmente en el caso de antenas de ondas kilométricas y hectométricas. En cualquier caso, puede implementarse una opción para ofrecer acceso directo, con las limitaciones antes mencionadas, al procedimiento de cálculo de estructuras multihilos, es decir, estructuras con elementos que no respetan la condición $l_s/a > 2,5$. Esta misma opción también puede utilizarse para calcular los diagramas de los tipos de antenas no incluidos en los casos anteriores.

La tercera condición no es muy limitativa puesto que no es muy frecuente encontrar redes de hasta 10 elementos verticales en ondas kilométricas y hectométricas y existe una amplia gama de estructuras radiantes distintas que pueden cubrirse fácilmente mediante una representación a 10 hilos. Un requisito algo más estricto es el de que el número total de segmentos no debe ser superior a 180. El programa informático incluye una rutina de segmentación automática que optimiza el número de segmentos para cada hilo en función de la longitud de onda y de la sección transversal para obtener la mejor precisión posible. Sin embargo, en un sistema de antenas de 10 hilos es evidente que no puede haber más de 18 segmentos por hilo.

La cuarta condición es la aplicación directa del modelo de terreno plano e imperfectamente conductor definido por su conductividad y su constante dieléctrica, establecido en los procedimientos elaborados anteriormente por la Comisión de Estudio 10. La implementación de esta característica en el programa ha exigido una amplia revisión de la rutina de cálculo original aplicable únicamente al caso de un terreno perfectamente conductor. En el programa se ha retenido la opción de llevar a cabo los cálculos sobre un terreno perfectamente conductor puesto que dicha opción se emplea para determinar el acimut de máxima radiación.

La quinta condición se deriva de la hipótesis de que el sistema de tierra es circular y rodea a los elementos radiantes. En el caso de redes verticales, se supone (como sucede en la práctica) que cada elemento radiante tiene su propia malla del sistema de tierra circular cuyos parámetros (tales como el diámetro total y el número y diámetro de los hilos) son comunes a todos los elementos.

Para permitir una fácil introducción de los datos, se han implementado máscaras de entrada de vídeo adecuadas junto con opciones controladas por menú que permiten llevar a cabo los siguientes cálculos:

- ganancia;
- diagrama horizontal para un ángulo de elevación determinado con la resolución deseada;
- diagrama vertical para un ángulo acimutal determinado con la resolución deseada;
- creación de un fichero de datos completo sobre el diagrama para su utilización externa y/o proyección Samson-Flamsteed.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LI, S. T. y otros [1983] *Microcomputer tools for communications engineering*. Airtech House, Inc.

BIBLIOGRAFÍA

BALANIS, C. A. [1982] *Antenna theory, analysis and design*. J. Wiley & Sons.

PARTE 2 – ASPECTOS PRÁCTICOS DE LAS ANTENAS TRANSMISORAS EN ONDAS KILOMÉTRICAS Y HECTOMÉTRICAS

1 Introducción

El método convencional utilizado en el pasado para evaluar el comportamiento de una antena en ondas kilométricas y hectométricas consistía en determinar su diagrama de radiación horizontal midiendo la intensidad de campo a nivel del suelo.

Hoy en día se logra una precisión muy superior evaluando los diagramas de radiación totales de las antenas en ondas kilométricas y hectométricas mediante la realización de mediciones llevadas a cabo con un helicóptero especialmente equipado.

2 Mediciones de los diagramas de radiación de las antenas

2.1 Métodos de medición

2.1.1 Mediciones de los diagramas de radiación horizontal realizadas desde el suelo

El método convencional normalmente se lleva a cabo utilizando un medidor de intensidad de campo equipado con una antena de cuadro situada sobre un trípode a una altura de aproximadamente 1,5 m. Las mediciones se realizan a una distancia de la antena no superior a 10λ y en un mínimo de 30 puntos distribuidos en torno a la antena.

Los valores de intensidad de campo medidos con este método en general coinciden bastante con los valores teóricos cuando las mediciones se efectúan en una zona relativamente llana, con irregularidades del terreno que no superan los 5 m de altura y sin obstáculos metálicos de gran tamaño en las proximidades.

2.1.2 Mediciones de los diagramas de radiación realizadas desde helicóptero

En este caso, la antena receptora a bordo del helicóptero va montada en una mástil que puede extenderse 3,5 m por debajo del helicóptero durante las mediciones, de manera que éstas no resulten afectadas por la propia estructura del helicóptero.

Los diagramas verticales se miden mediante una combinación de los vuelos de aproximación y de ascensión vertical. El helicóptero situado a una distancia de 0,5 km de la antena comienza a realizar las mediciones cerca del suelo y seguidamente asciende hasta una altitud de 1 000 m (correspondiente a un ángulo de elevación de aproximadamente 25°). A dicha altitud el helicóptero continúa con un vuelo de aproximación sobre la antena.

El resultado de la medición vertical proporciona el ángulo de elevación para el cual el diagrama de antena podría medirse especialmente a efectos del cálculo de la intensidad del campo de la onda ionosférica. Conservando este ángulo de elevación, el helicóptero vuela alrededor de la antena siguiendo un círculo de radio fijo de 0,5 km o más para obtener el diagrama horizontal. (La distancia de medición real se anota en cada hoja del diagrama.)

Cuando se mide el diagrama horizontal, deben completarse al menos dos vuelos circulares para verificar la coherencia de las mediciones. El margen de incertidumbre de estas mediciones es de ± 1 dB y generalmente mejor de $\pm 0,5$ dB. Esta diferencia puede deberse a que el helicóptero no ha atravesado el lóbulo principal con el mismo ángulo de elevación o a que la posición del helicóptero al describir los dos círculos no ha sido la misma.

La ganancia de antena indicada en las hojas del diagrama es la ganancia del sistema de antenas que incluye la eficacia de la red de alimentación desconocida. Cabe señalar que la precisión de los cálculos de la ganancia depende del conocimiento preciso de la potencia de entrada a la antena.

Como el diagrama de radiación debe medirse en el campo lejano, la mayoría de las distancias de medición indicadas anteriormente pueden parecer algo cortas pero vienen determinadas por la necesidad de evitar la influencia de otras antenas o estructuras (véase el § 3.1).

2.2 Equipo de medición

- La antena de medición para ondas hectométricas normalmente es una antena de cuadro (varias espiras electrostáticamente apantalladas).
- Receptor de prueba.
- Sistema de control por ordenador.
- Sistema mundial de determinación de posición (GPS) y sistema de determinación de la distancia terrenal.
- Helicóptero.
- Equipo de evaluación: ordenador y trazador de gráficos.

2.3 Procedimientos de medición

2.3.1 En el suelo

En el método convencional mencionado en el § 2.1.1, la antena de cuadro, situada en un trípode de 1,5 m de altura, debe dirigirse hacia arriba para alcanzar un desplazamiento mínimo de la intensidad de campo y a continuación debe ajustarse el receptor de prueba a un valor nulo. Posteriormente, la antena de cuadro se dirige hacia la antena sometida a prueba para alcanzar el máximo valor de intensidad de campo.

2.3.2 Por helicóptero

El medidor de intensidad de campo a bordo del helicóptero realiza una medición cada vez que el ordenador de a bordo recibe una actualización posicional del equipo de determinación de la posición situado en el suelo (aproximadamente dos veces por segundo). Utilizando la información sobre posicionamiento, se corrige el nivel de la señal recibida a fin de tener en cuenta el diagrama de radiación de la antena receptora y se determina para una distancia fija. Los datos sobre el nivel de la señal medida se almacenan en un disco flexible junto con los correspondientes datos sobre la posición. En el procesamiento posterior se promedian los datos relativos a dos puntos del nivel de la señal por grado en el diagrama horizontal y a varios puntos del nivel de la señal por grado en la parte ascendente del diagrama vertical.

2.4 Procesamiento de los datos medidos

2.4.1 En el suelo

Todos los valores medidos a las distintas distancias deben referirse a la misma distancia desde la antena, mediante interpolación lineal. Estos valores se utilizarán para establecer un diagrama polar centrado en el emplazamiento de la antena a fin de obtener el diagrama de onda de superficie con interpolación no lineal.

2.4.2 Por helicóptero

Al finalizar las mediciones en vuelo, los datos almacenados en el disco se procesarán por el ordenador de evaluación situado en el suelo que calculará la intensidad de campo teniendo en cuenta el diagrama de la antena de recepción y, finalmente, trazará un gráfico del diagrama de radiación resultante de la antena sometida a prueba.

3 Comparación entre los diagramas de radiación teóricos y medidos

3.1 Campo lejano

Las mediciones sobre antenas en ondas kilométricas y hectométricas deben realizarse en sus campos lejanos, que normalmente se encuentran a distancias de 10λ a partir del centro del sistema de antenas. Sin embargo, algunas consideraciones de tipo práctico pueden imponer la necesidad de utilizar distancias considerablemente inferiores. Estas distancias prácticas pueden ser de 1 a 5 km para antenas de ondas kilométricas y de 0,5 a 3 km para antenas de ondas hectométricas. A pesar de estas limitaciones, las mediciones de los diagramas realizadas a estas distancias coinciden en general con los diagramas calculados utilizando procedimientos teóricos.

3.2 Variaciones en el comportamiento real de las antenas

En las Figs. 12 y 13 se representan los diagramas de radiación horizontal y vertical teóricos de una red directiva de 4 mástiles para la banda de ondas hectométricas y en las Figs. 14 y 15 aparecen los diagramas de radiación horizontal y vertical medidos. Estas mediciones se efectuaron durante las pruebas de aceptación para comprobar la veracidad de los diagramas especificados en diversas direcciones. Se eligió una distancia de medición de sólo 500 m para evitar en la medida de lo posible la influencia de las estructuras cercanas. Los resultados correspondientes para una distancia de medición de 3 000 m se representan en las Figs. 16 y 17.

Estas mediciones muestran diagramas muy distorsionados, lo que indica que los diagramas de radiación resultan muy afectados por las estructuras cercanas; por ejemplo, otra antena de onda media y un sistema de antenas de cortina en ondas decamétricas.

El diagrama de radiación vertical medido en diversas direcciones de radiación muestra que la radiación se concentra en ángulos de radiación bajos de manera que se reduce el desvanecimiento debido a la onda ionosférica.

FIGURA 12
Red directiva de 4 mástiles para la banda de ondas hectométricas

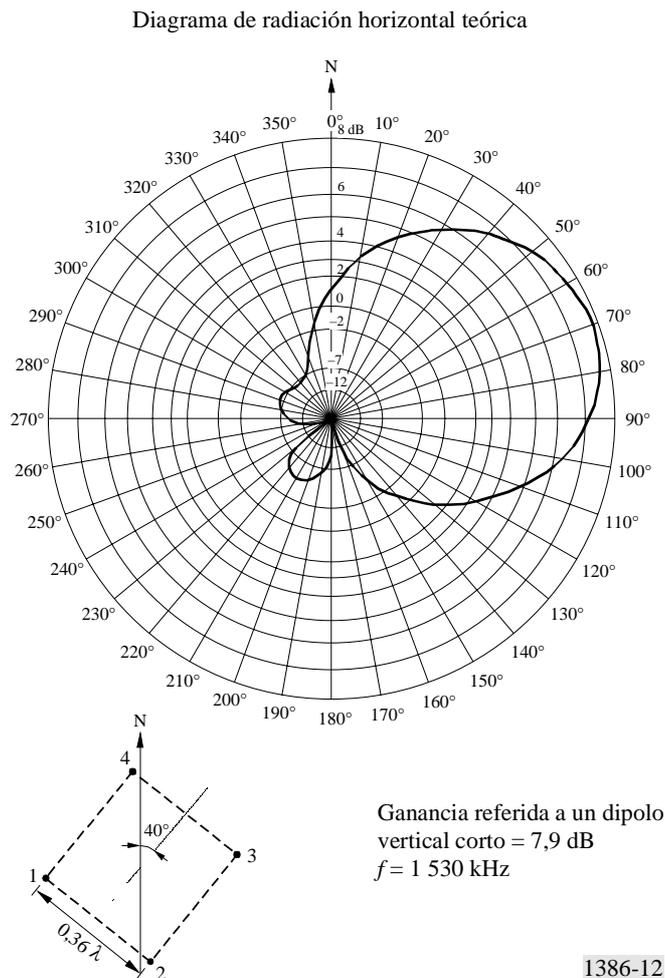


FIGURA 13
Red directiva de 4 mástiles para la banda
de ondas hectométricas

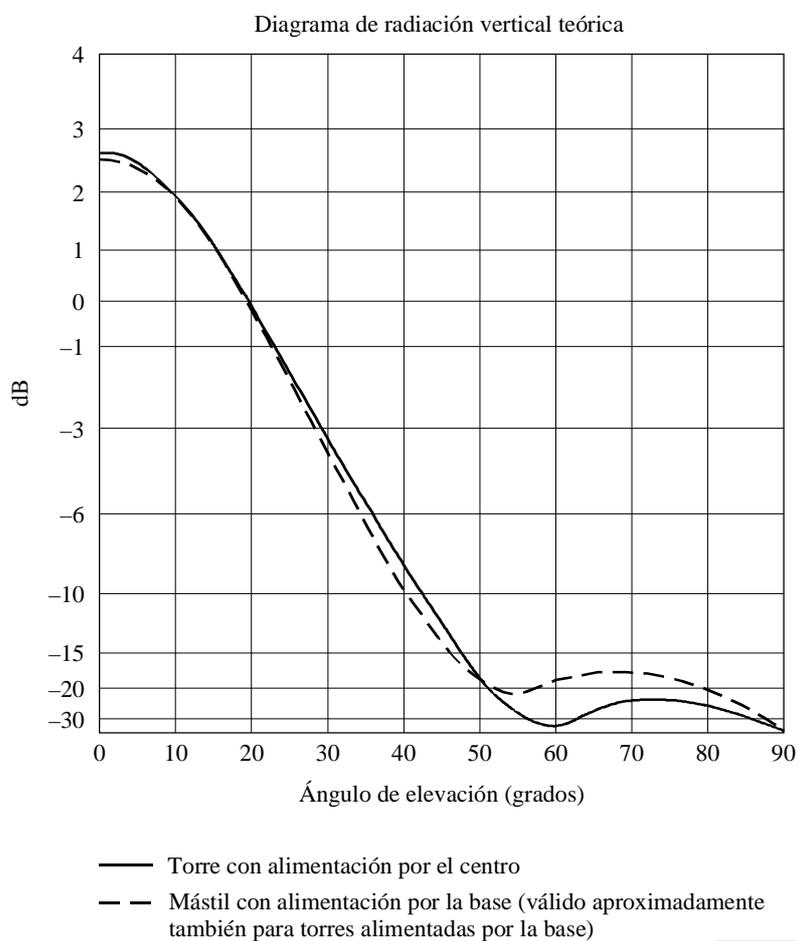
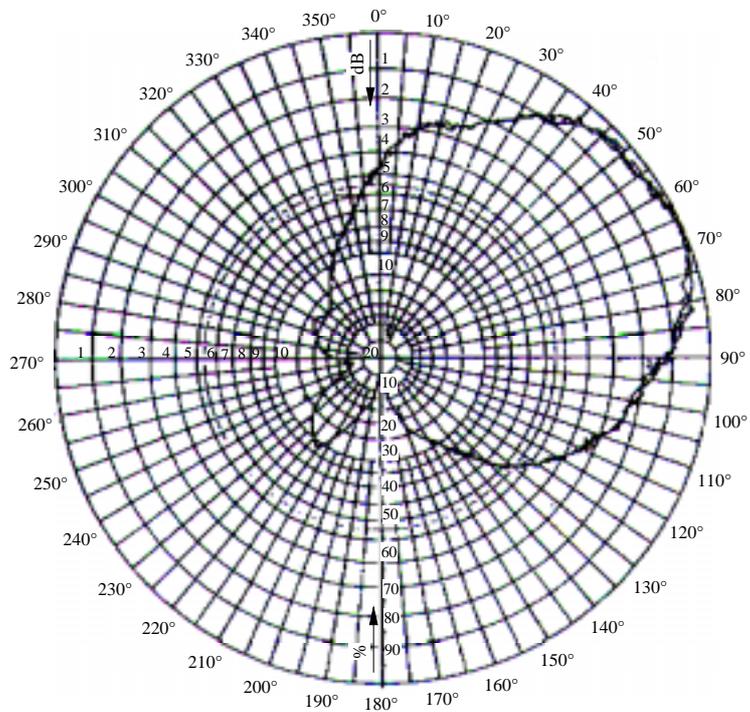


FIGURA 14
Red directiva de 4 mástiles para la banda de ondas hectométricas

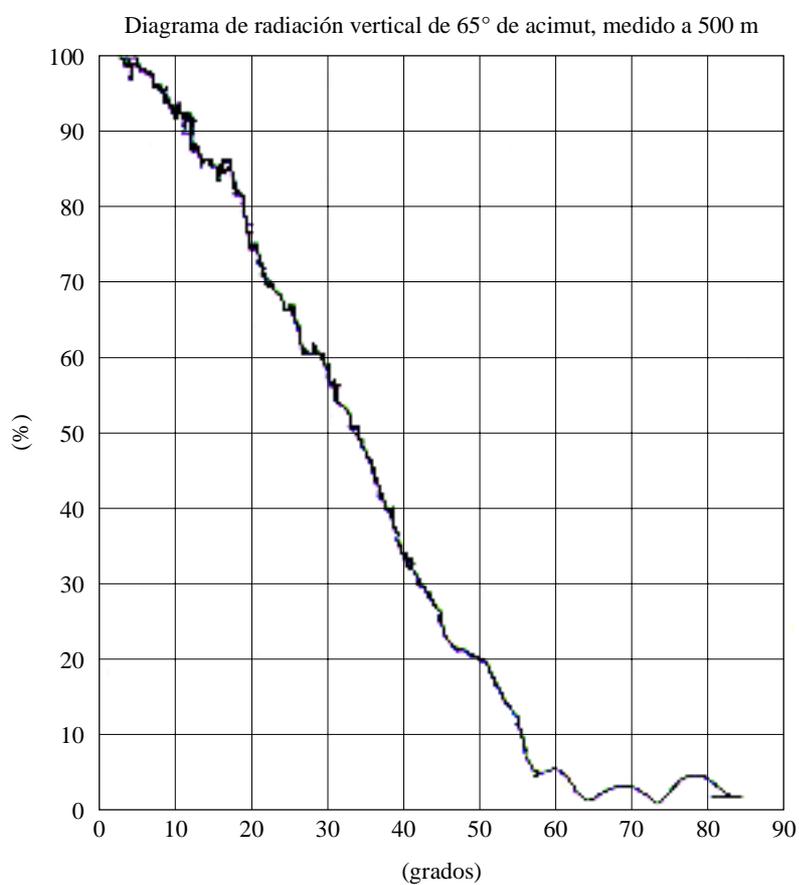
Diagrama de radiación horizontal medido a 500 m



Identidad de la antena:	ondas hectométricas, diagrama B	Fuerza cicomotriz medida:	180 V (únicamente en ondas kilométricas y hectométricas)
Frecuencia:	1,53 MHz	Distancia:	500 m
Dirección de la radiación:	65°		
Tipo de antena:	directiva		
Potencia transmitida:	baja potencia		

1386-14

FIGURA 15
**Red direccional de 4 mástiles para la banda
 de ondas hectométricas**

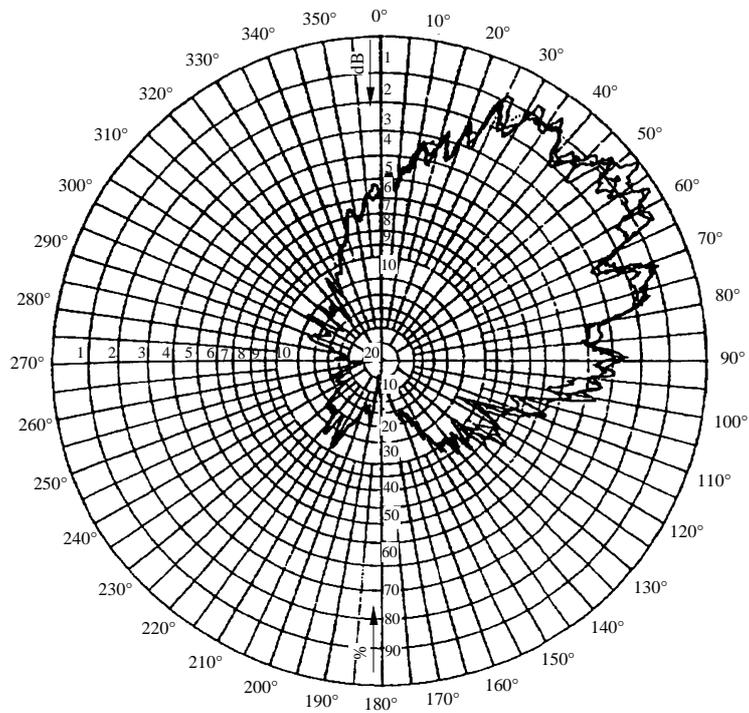


Identidad de la antena:	ondas hectométricas, diagrama B	Fuerza cicomotriz medida:	180 V (únicamente en ondas kilométricas y hectométricas)
Frecuencia:	1,53 MHz	Distancia:	500 m
Dirección de la radiación:	65°		
Tipo de antena:	directiva		
Potencia transmitida:	baja potencia		

1386-15

FIGURA 16
Red directiva de 4 mástiles para la banda
de ondas hectométricas

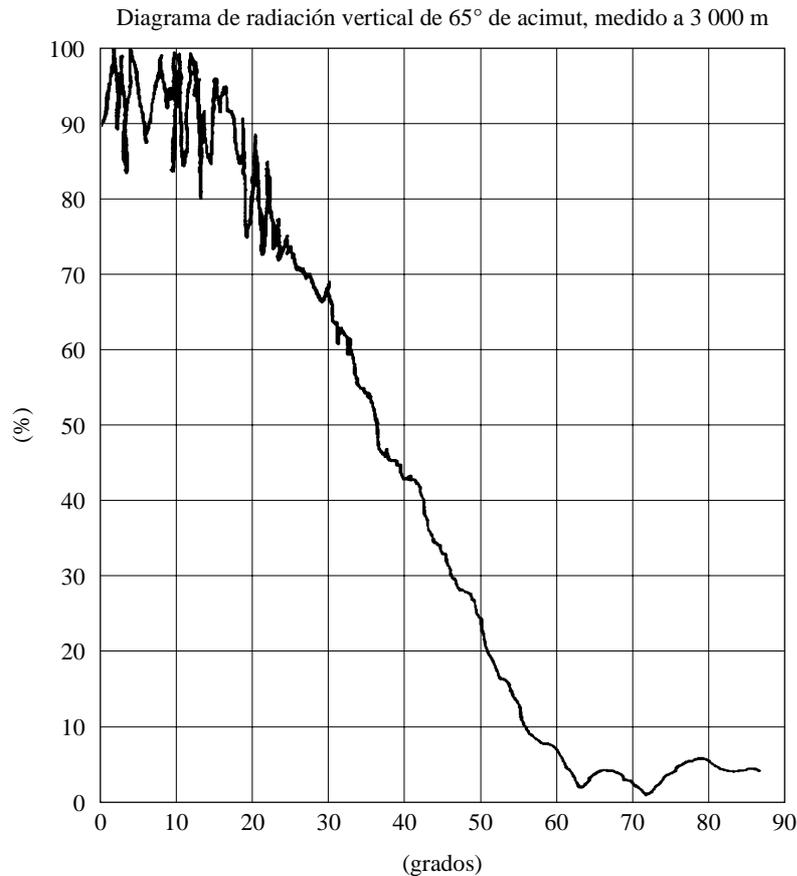
Diagrama de radiación horizontal medido a 3 000 m



Identidad de la antena:	ondas hectométricas, diagrama B	Fuerza ciclotriz medida:	8 000 V (únicamente en ondas kilométricas y hectométricas)
Frecuencia:	1,53 MHz	Distancia:	3 000 m
Dirección de la radiación:	65°		
Tipo de antena:	directiva		
Potencia transmitida:	fuerte potencia		

1386-16

FIGURA 17
**Red directiva de 4 mástiles para la banda
 de ondas hectométricas**



Identidad de la antena:	ondas hectométricas, diagrama B	Fuerza ciclotriz medida:	8 000 V (únicamente en ondas kilométricas y hectométricas)
Frecuencia:	1,53 MHz	Distancia:	3 000 m
Dirección de radiación:	65°		
Tipo de antena:	directiva		
Potencia transmitida:	fuerte potencia		

1386-17

Estas mediciones demuestran que varias líneas del alimentador de antena contribuyen a los errores en las mediciones.

Cuando las mediciones se realizaron a corta distancia, la diferencia resultante con respecto al valor teórico fue inferior a 1 dB. Cuando se hicieron a una distancia mayor, la desviación más elevada fue de 3 dB, posiblemente debido a reflexiones causadas por entorno.

3.2.1 Influencia del entorno circundante sobre los diagramas de radiación

En las Figs. 12 y 13 se representan los diagramas calculados. Las Figs. 14 y 15 (diagrama a 500 m) y las Figs. 16 y 17 (diagrama a 3 000 m) muestran las deformaciones causadas por diversos factores que repercuten en el diagrama y que se indican a continuación.

3.2.1.1 Conductividad del suelo

Las mediciones de la conductividad del suelo cerca de la antena, desde 500 m a 3 000 m en tierra de cultivo con un cierto grado de humedad, y de las características eléctricas dan valores casi constantes. En consecuencia, puede considerarse que las grandes deformaciones de los diagramas a 3 000 m no son producidas por la variación en la conductividad del terreno.

3.2.1.2 Topografía del terreno y otras estructuras cercanas al emplazamiento de la antena

Las zonas de medición pueden considerarse como un terreno llano. En las Figs. 14 y 15 (500 m de distancia) no aparecen grandes distorsiones y en el lugar no hay edificios ni carreteras, pero en las Figs. 16 y 17 (3 000 m de distancia), en el sector acimutal de 60° a 90° y en el sector de elevación por debajo de 25° , pueden observarse grandes distorsiones del diagrama debido a la presencia de 3 ó 4 grandes edificios y de carreteras.

3.2.2 Disposiciones de la alimentación y riostras

La antena probada con el helicóptero consistió en torres autosoportadas con alimentación por el centro mediante sistemas coaxiales y sin arriostamiento. Las mediciones realizadas a 500 m no mostraron distorsiones producidas por el sistema de alimentación.

Las mediciones por helicóptero llevadas a cabo en otra antena consistente en un mástil arriestrado mostraron una distorsión del diagrama evidente en los sectores acimutales correspondientes al emplazamiento de las riostras.
