

Recomendación UIT-R BS.1968-1

(05/2023)

Serie BS: Servicio de radiodifusión (sonora)

**Evaluación de los campos
electromagnéticos de los sistemas
transmisores de radiodifusión terrenal
para evaluar la exposición de las
personas a las emisiones no ionizantes**

Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <https://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radioastronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2023

© UIT 2023

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R BS.1698-1

Evaluación de los campos electromagnéticos de los sistemas transmisores de radiodifusión terrenal para evaluar la exposición de las personas a las emisiones no ionizantes¹

(2005-2023)

Cometido

El objetivo de la presente Recomendación es sentar las bases necesarias para la derivación y estimación de los valores relativos a los campos electromagnéticos (CEM) de una estación de radiodifusión que se producen a distancias particulares del emplazamiento transmisor. A partir de dicha información, las organizaciones responsables pueden desarrollar métodos adecuados de evaluación de los niveles correspondientes, que pueden utilizarse para proteger a las personas expuestas a los campos electromagnéticos. Los niveles reales que se apliquen en cualquier normativa dependerán, naturalmente, de las decisiones adoptadas por las instituciones sanitarias responsables, a nivel nacional y mundial.

Palabras clave

Análisis de la exposición, CEM-RF, evaluación de la exposición, límites de exposición, sistemas transmisores de radiodifusión terrenal

Abreviaturas/Glosario

CEM:	Campos electromagnéticos
HF:	Ondas decamétricas (también conocidas como ondas cortas)
HR, HRS:	Antenas de cortina en ondas decamétricas; altura (H), filas (R), orientable (S)
ICNIRP:	Comisión Internacional sobre Protección contra las Radiaciones No Ionizantes, organización no gubernamental reconocida oficialmente por la OMS
LF:	Ondas kilométricas (también conocidas como ondas largas)
MF:	Ondas hectométricas (también conocidas como ondas medias)
MOM:	Método de momentos
PRA:	Potencia radiada aparente, relativa a un dipolo de media onda
RF:	Radiofrecuencias
RMS:	Valor eficaz
SAR:	Tasa de absorción específica
Z ₀ :	Impedancia característica del espacio libre

Recomendaciones, Informes y Manuales de la UIT conexos

Recomendaciones UIT-R – Serie BS: Servicio de radiodifusión (sonora):

- BS.705: Características y diagramas de las antenas transmisoras y receptoras en ondas decamétricas
- BS.1195: Características de las antenas transmisoras en ondas métricas y decimétricas

¹ De acuerdo con los números 1.137 y 1.138 del RR, el término "emisión" designa la "radiación" producida por una estación transmisora radioeléctrica.

BS.1386: Características y diagramas de las antenas transmisoras en ondas kilométricas y hectométricas

Informes UIT-R – Serie SM: Gestión del espectro:

Informe UIT-R SM.2452: Medición de campos electromagnéticos para la evaluación de la exposición de las personas

Manuales del UIT-R – Comisión de Estudio 1: Gestión del espectro:

Manual sobre comprobación técnica del espectro (sección 5.6, relativa a la medición de radiaciones no ionizantes)

Recomendaciones UIT-T – Serie K: Protección contra interferencias:

- K.52: Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos
- K.61: Directrices sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición de las personas
- K.70: Técnicas para limitar la exposición humana a los campos electromagnéticos en cercanías a estaciones de radiocomunicaciones
- K.83: Supervisión de los niveles de intensidad del campo electromagnético
- K.91: Orientación para la valoración, la evaluación y el seguimiento de la exposición humana a los campos electromagnéticos de las radiofrecuencias
- K.100: Medición de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia para determinar el cumplimiento de los límites de exposición de las personas cuando se pone en servicio una estación de base
- K.113: Trazado de mapas de campos electromagnéticos de radiofrecuencias
- K.121: Orientaciones en materia de gestión medioambiental para el respeto de los límites de los campos electromagnéticos de las frecuencias radioeléctricas para las estaciones base de radiocomunicaciones
- K.122: Niveles de exposición a proximidad inmediata de antenas de radiocomunicaciones
- K.145: Evaluación y gestión del cumplimiento de los límites de exposición a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia para los trabajadores en los emplazamientos e instalaciones de radiocomunicaciones

Cuestión 7/2 del UIT-D – Estrategias y políticas relativas a la exposición de las personas a los campos electromagnéticos:

Informe de resultados sobre la Cuestión 7/2 del UIT-D, octubre de 2021.

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que un nivel elevado de energía de radiofrecuencia podría tener efectos perjudiciales en el cuerpo humano;
- b) que la energía de radiofrecuencia podría crear potenciales eléctricos perjudiciales en los materiales conductores;

- c) que un nivel elevado de energía de radiofrecuencia podría tener efectos indirectos sobre la salud de las personas al interferir con dispositivos médicos;
- d) que la energía de radiofrecuencia podría dar lugar a la ignición no deseada de materiales inflamables o explosivos;
- e) que las autoridades competentes están efectuando determinaciones de los niveles perjudiciales de exposición y de los potenciales eléctricos, en términos de contenido espectral, intensidad, efectos acumulados, etc.;
- f) que las autoridades competentes están determinando las zonas en que los campos de radiofrecuencia y los potenciales eléctricos rebasan los niveles de seguridad;
- g) que las personas ajenas a dichos sistemas podrían verse expuestas involuntariamente a campos electromagnéticos o a potenciales eléctricos;
- h) que los trabajadores encargados del funcionamiento de los sistemas de radiodifusión terrenal podrían tener que trabajar en las inmediaciones de la fuente de dichas emisiones de radiofrecuencia,

recomienda

que se utilice el Anexo 1 a la presente Recomendación para evaluar los campos electromagnéticos generados por los sistemas transmisores de radiodifusión terrenal, con miras a determinar la exposición de las personas a las emisiones no ionizantes.

Anexo 1

Evaluación de los campos electromagnéticos de los sistemas transmisores de radiodifusión terrenal para evaluar la exposición de las personas a las emisiones no ionizantes

ÍNDICE

	<i>Página</i>
Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR).....	ii
Anexo 1 – Evaluación de los campos electromagnéticos de los sistemas transmisores de radiodifusión terrenal para evaluar la exposición de las personas a las emisiones no ionizantes.....	3
1 Introducción.....	5
2 Características de los campos electromagnéticos.....	6
2.1 Características generales de los campos electromagnéticos.....	6
2.2 Niveles de exposición a la intensidad de campo cerca de las antenas de radiodifusión.....	10
2.3 Campo de frecuencias combinado.....	13
2.4 CEM en el interior de edificios.....	13

3	Cálculo.....	14
	3.1 Procedimientos	14
	3.2 Soluciones cerradas	14
4	Mediciones	15
	4.1 Procedimientos	15
	4.2 Instrumentos	16
	4.3 Comparación entre predicciones y mediciones	19
5	Precauciones en las estaciones transmisoras de radiodifusión y sus proximidades	19
	5.1 Precauciones para controlar los efectos directos sobre la salud de las emisiones de RF de alto nivel.....	19
	5.2 Precauciones para controlar los peligros de la exposición indirecta a RF.....	21
	Adjunto 1 al Anexo 1 – Ejemplos de cálculos de intensidades de campo en las proximidades de las antenas de radiodifusión.....	22
1	Ejemplo A – Diagramas de intensidades de campo eléctrico y magnético	22
2	Ejemplo B – Determinación de la intensidad del campo magnético en la zona del campo cercano de las antenas de alta potencia en ondas kilométricas/hectométricas....	28
3	Ejemplo C – Campo electromagnético cercano de las antenas de cortina transmisoras en ondas decamétricas	29
	3.1 Introducción.....	29
	3.2 Campos eléctricos y magnéticos cercanos de las antenas de cortina.....	29
4	Conclusiones.....	32
	Adjunto 2 al Anexo 1 – Comparaciones entre predicciones y mediciones.....	32
1	Introducción.....	32
	1.1 Modelo utilizado para el sistema de antenas	33
	1.2 Ventajas y limitaciones del modelo del sistema de antenas	34
2	Comparación entre predicciones y mediciones	36
	2.1 Análisis numérico de estructuras filiformes: Ejemplo.....	36
	2.2 18 MHz	44
	2.3 Comparación entre mediciones y predicciones de la intensidad de campo en la zona cercana.....	51
3	Conclusiones.....	51

Página

Adjunto 3 al Anexo 1 – Límites y niveles internacionales	52
Adjunto 4 al Anexo 1 – Más información sobre la modulación	54
1 Características de las emisiones radioeléctricas	54
2 Potencia del transmisor e intensidad de campo expresados en términos del tipo de modulación	55
Adjunto 5 al Anexo 1 – Métodos de evaluación adicionales	58
1 Procedimientos numéricos.....	58
1.1 Método de momentos	59
1.2 Método de la transformada rápida de Fourier/gradiente conjugado	59
1.3 Método de diferencia finita en el dominio del tiempo.....	59
1.4 Método de múltiples multipolos	59
1.5 Método de la impedancia.....	59
2 Cálculos de la intensidad de campo.....	60
2.1 Análisis numérico de estructuras filiformes: Ejemplo.....	60
3 Dosimetría	62
3.1 Cálculos de la tasa de absorción específica	63
3.2 Medición de la tasa de absorción específica.....	63
4 Medición de la corriente del cuerpo	65
4.1 Corrientes inducidas por el cuerpo	65
4.2 Medición de la corriente de contacto.....	66
4.3 Medición de la tensión de contacto	67
Adjunto 6 al Anexo 1 – Dispositivos de electromedicina implantados y portátiles	67
1 Dispositivos de electromedicina.....	67
2 Dispositivos implantados y portátiles.....	67
Adjunto 7 al Anexo 1 – Referencias adicionales	68

1 Introducción

Durante muchos años, el tema de los efectos de la exposición electromagnética ha sido objeto de estudio y se ha intentado cuantificar los límites particulares que podrían aplicarse para proteger a las personas contra los efectos indeseables. Los estudios realizados en diversos países por diferentes

organismos han dado lugar a varias regulaciones administrativas. Es sorprendente e incomprensible que no se haya establecido hasta ahora una norma única a pesar de todos los esfuerzos realizados a tal efecto.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala [6] que, actualmente, muchos países se adhieren a las directrices recomendadas por:

- la Comisión Internacional sobre Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP);
y
- el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, a través del Comité internacional sobre seguridad electromagnética (IEEE ICES).

La presente Recomendación tiene por objeto proporcionar una base para la obtención y estimación de los valores relativos a la exposición electromagnética a emisiones procedentes de una estación de radiodifusión a distancias concretas del emplazamiento del transmisor. A partir de dicha información, las organizaciones responsables podrán desarrollar técnicas de medición adecuadas que podrán utilizarse para garantizar que los niveles de CEM eviten la exposición indeseada de las personas a emisiones nocivas. Los niveles reales que se apliquen en cualquier normativa dependerán, naturalmente, de las decisiones adoptadas por las instituciones sanitarias responsables, a nivel nacional y mundial.

Obsérvese que esta Recomendación UIT-R y las Recomendaciones UIT-T tratan de asuntos similares poniendo de relieve distintos aspectos del mismo tema general. Por ejemplo, la Recomendación UIT-T K.52, *Orientación sobre el cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos*, y la Recomendación UIT-T K.61, *Guía sobre la medición y la predicción numérica de los campos electromagnéticos para comprobar que las instalaciones de telecomunicaciones cumplen los límites de exposición humana*, aportan directrices respecto de la conformidad con los límites de exposición de los sistemas de telecomunicaciones. El material adicional más relevante a este respecto se recoge en la sección «Recomendaciones, Informes y Manuales de la UIT conexos».

2 Características de los campos electromagnéticos

2.1 Características generales de los campos electromagnéticos

Este punto presenta una exposición general de las características especiales de los campos electromagnéticos (CEM) importantes para esta Recomendación y hace especialmente la distinción entre campo cercano y campo lejano. Se obtienen ecuaciones sencillas para calcular la densidad de potencia y la intensidad de campo en el campo lejano y concluye definiendo los términos polarización y configuraciones de la interferencia.

2.1.1 Componentes de los campos electromagnéticos

El CEM radiado por una antena está formado por varias componentes de campo eléctrico y magnético, que se atenúan con la distancia, r , a partir de la fuente. Las componentes principales son las siguientes:

- el campo lejano (de Fraunhofer), también llamado campo de radiación, cuya magnitud disminuye en condiciones de propagación en el espacio libre según el factor $1/r$;
- el campo cercano radiante (de Fresnel), también llamado campo inductivo. La estructura del campo inductivo depende en gran medida de la forma, el tamaño y el tipo de antena aunque se han establecido varios criterios que se utilizan normalmente para especificar este comportamiento;
- el campo cercano reactivo (de Rayleigh), también denominado campo cuasiestático, que disminuye según el factor $1/r^3$.

Como las componentes inductiva y cuasiestática se atenúan rápidamente al aumentar la distancia desde la fuente de emisión, sólo son significativas en las proximidades de la antena transmisora, en la denominada región de campo cercano.

El campo de radiación, por otro lado, es el elemento dominante de la denominada región de campo lejano. Es el campo de radiación quien transporta realmente la señal de radiodifusión sonora o de televisión desde el transmisor a un receptor distante.

2.1.2 Campo lejano

En la región de campo lejano, el CEM toma el carácter predominantemente de una onda plana. Ello significa que los campos eléctrico y magnético están en fase y que sus amplitudes presentan una relación constante. Además, los campos eléctrico y magnético forman ángulos rectos entre sí y se encuentran en un mismo plano perpendicular a la dirección de propagación.

Con frecuencia se asume que las condiciones de campo lejano se aplican a distancias superiores a $2D^2/\lambda$, siendo D la máxima dimensión lineal de la antena y λ la longitud de onda.

Sin embargo, en el caso de las antenas de radiodifusión esta condición debe aplicarse con precaución por las siguientes razones:

- se ha obtenido a partir de consideraciones relativas a antenas planas;
- se supone que D es un valor elevado en comparación con λ .

Cuando las condiciones anteriores no se satisfacen debe utilizarse como condición de campo lejano una distancia superior a 10λ ; véase asimismo el Anexo A la especificación 62232 [5] de la CEI.

2.1.2.1 Densidad de potencia

El vector de densidad de potencia, vector de Poynting S , de un CEM viene dado por el producto vectorial de las componentes de campo eléctrico, E , y magnético, H :

$$S = E \times H \quad (1)$$

En el campo lejano, y en condiciones ideales donde no es significativa la influencia del suelo o de los obstáculos, esta expresión puede simplificarse porque los campos eléctrico y magnético y la dirección de propagación son mutuamente ortogonales. Además, la relación entre las amplitudes de intensidad de campo eléctrico, E , y magnético, H , es una constante, Z_0 , conocida como impedancia característica en el espacio libre¹ y toma un valor aproximado de 377Ω (o $120\pi \Omega$).

Por consiguiente, en el campo lejano, la densidad de potencia, S , en el espacio libre viene dada por la siguiente ecuación escalar:

$$S = E^2/Z = H^2 Z_0 \quad (2)$$

La densidad de potencia, a una distancia determinada y en cualquier dirección, puede calcularse en el campo lejano utilizando la siguiente ecuación:

$$S = P G_i / (4\pi r^2) \quad (3)$$

siendo:

S : densidad de potencia (W/m^2) en una dirección determinada

P : potencia (W) suministrada a la fuente de emisión, suponiendo un sistema sin pérdidas

¹ Generalmente, la impedancia característica de un medio viene dada por la fórmula $z = \sqrt{(\mu/\epsilon)}$ siendo μ la permeabilidad magnética ($= 1,2566... \times 10^{-6}$ F/m en espacio libre) y ϵ la permitividad ($= 8,85418 \times 10^{-12}$ H/m en el espacio libre).

G_i : ganancia de antena de la fuente de emisión en la dirección pertinente, con respecto a un radiador isótropo

r : distancia (m) desde la fuente de emisión.

El producto PG_i de la ecuación (3) se conoce como p.i.r.e. que representa la potencia que un radiador isótropo ficticio debería emitir para producir la misma intensidad de campo en el punto de recepción.

Para determinar las densidades de potencia en otras direcciones debe tenerse en cuenta el diagrama de antena.

Para utilizar la ecuación (3) con una antena cuya ganancia G_a se defina con respecto a una antena de referencia de ganancia isótropa G_r , tal como un dipolo de media onda o un monopolo corto, la ganancia de la antena G_i debe sustituirse por el producto $G_r \cdot G_a$, como se indica en la ecuación (4). El factor pertinente G_r aparece en el Cuadro 1.

$$S = P G_r G_a / (4\pi r^2) \quad (4)$$

CUADRO 1

Factores de ganancia isótropa para distintos tipos de antena de referencia

Tipo de antena de referencia	Factor de ganancia isótropa, G_r	Ganancia isótropa (dBi)	Aplicaciones habituales donde es pertinente el tipo de antena de referencia
Radiador isótropo	1,0	0,0	Radiodifusión en ondas decamétricas
Dipolo de media onda	1,64	2,15	Radiodifusión en ondas métricas y decimétricas
Monopolo corto	3,0	4,80	Radiodifusión en ondas kilométricas y hectométricas

Por consiguiente, cuando la ganancia de la antena G_d ($G_a = G_d$) valor original se expresa con respecto a la del dipolo de media onda:

$$S = 1,64 PG_d / (4\pi r^2) \quad (5)$$

siendo:

G_d : ganancia de la antena con respecto a un dipolo de media onda.

De forma similar, cuando la ganancia de la antena $G_a = G_m$ se expresa con respecto a la de un monopolo corto:

$$S = 3,0 PG_m / (4\pi r^2) \quad (6)$$

siendo:

G_m : ganancia de la antena con respecto a un monopolo corto.

2.1.2.2 Intensidad de campo

Las ecuaciones (2) a (10) suponen condiciones de onda plana (campo lejano) en el espacio libre y no son aplicables a los cálculos de campo cercano.

Si se combinan las ecuaciones (2) y (3) para eliminar S y se introduce un factor C para tener en cuenta las características directivas de la fuente de emisión, se obtiene la ecuación (7) para la intensidad de campo eléctrico (E) en el campo lejano de una fuente de emisión:

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{PG_i}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{30PG_i} \quad (7)$$

siendo:

E : intensidad de campo eléctrico (V/m)

$Z_0 = 120 \pi$ (alrededor de 377Ω), la impedancia característica en el espacio libre

P : potencia aplicada a la fuente de radiación (W) suponiendo un sistema sin pérdidas

C : factor ($0 \leq C \leq 1$) que tiene en cuenta las características directivas de la antena (en la dirección principal de radiación, $C = 1$).

Si la ganancia de la antena se expresa con respecto a un dipolo de media onda o a un monopolo corto, en vez de un radiador isótropo, deben utilizarse los factores G_d o G_m , respectivamente, en lugar de G_i , como se indica en las ecuaciones (8) y (9).

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{1,64PG_d}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{49,2PG_d} \quad (8)$$

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{3PG_m}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{90PG_m} \quad (9)$$

Para calcular la intensidad de campo magnético en el campo lejano de una fuente de radiación, se utiliza la ecuación (10).

$$H = E/Z_0 \quad (10)$$

siendo:

E : la intensidad de campo eléctrico (V/m)

H : la intensidad de campo magnético (A/m)

$Z_0 = 377 \Omega$ (120π), la impedancia característica en el espacio libre

2.1.3 Campo cercano

La estructura del campo en la región de campo cercano es más compleja que la descrita anteriormente para el campo lejano. En el campo cercano, existe una relación arbitraria de fase y amplitud entre los vectores de intensidad de campo eléctrico y magnético y las intensidades de campo varían considerablemente de un punto a otro. En consecuencia, al determinar la naturaleza del campo cercano deben calcularse o medirse tanto la fase como la amplitud de los campos eléctrico y magnético. Sin embargo, en la práctica esto puede ser muy difícil de llevar a cabo.

2.1.3.1 Densidad de potencia e intensidad de campo

No es fácil determinar el vector de Poynting en el campo cercano debido a la relación arbitraria entre la fase y la amplitud mencionada anteriormente. Las amplitudes E y H , junto con su relación de fase, deben medirse o calcularse por separado en cada punto lo que hace la tarea especialmente compleja y larga.

Utilizando las fórmulas analíticas, realizar una estimación de la intensidad de campo en el campo cercano sólo es posible para emisores ideales sencillos tales como el dipolo elemental. En el caso de sistemas de antenas más complejos deben utilizarse otras técnicas matemáticas para determinar los niveles de intensidad de campo en la región de campo cercano. Estas otras técnicas permiten efectuar estimaciones relativamente precisas de la intensidad de campo, de la densidad de potencia y de otras características pertinentes del campo, incluso en la compleja región del campo cercano.

2.1.4 Polarización

La polarización se define como la dirección del vector de campo eléctrico, con referencia a la dirección de propagación del frente de onda.

En radiodifusión, se utilizan distintos tipos de polarización. Los tipos principales son vertical y horizontal (con respecto a un frente de onda que se desplaza paralelamente a la superficie de la Tierra) aunque también pueden emplearse otros tipos de polarización tales como la oblicua y la elíptica.

2.1.5 Modulación

La modulación es una característica muy especial de la emisión producida por un transmisor de radiodifusión. La modulación podría tener que considerarse cuando se efectúen mediciones o cálculos para determinar si se rebasan o no los límites establecidos.

Los organismos de radiodifusión llevan muchos años aplicando técnicas de control del nivel de portadora dependiente de la modulación (MDCL), como la compansión de la modulación de amplitud (AMC), a fin de reducir sus costes de transmisión. En los casos en que se empleen técnicas de esa índole, la evaluación de los CEM debe realizarse de la misma forma que una transmisión AM con la portadora en su salida AM nominal.

Para una transmisión AM ordinaria, la potencia de salida de RF de cresta está relacionado con la profundidad de modulación. La modulación da lugar a menudo a una señal que varía tanto en amplitud como en frecuencia. Por esta razón normalmente es preciso efectuar una promediación en el tiempo a fin de calcular los valores que van a utilizarse en la medición y en el cálculo. Este requisito también se reconoce en las normas pertinentes. El Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) (Apéndice 1, Volumen 2) clasifica las emisiones de los transmisores radioeléctricos de acuerdo con las anchuras de banda necesarias y las características básicas y opcionales de la transmisión. Véase el Adjunto 4 para obtener más información sobre cómo abordar los distintos tipos de modulación.

2.1.6 Configuraciones de la interferencia

Tanto las estructuras naturales como las artificiales pueden producir una radiación secundaria del CEM. Los campos procedentes de esta radiación secundaria se suman vectorialmente al campo directo, lo que da lugar a unas configuraciones de la interferencia que comprenden máximos y mínimos localizados de la intensidad de campo. La configuración de la interferencia es aún más compleja si se producen múltiples radiaciones secundarias del campo.

Las configuraciones de la interferencia dependen de la frecuencia de la fuente de radiación. Cuanto más elevada sea la frecuencia, más pequeña es la longitud de onda y, por consiguiente, están más próximos, espacialmente, los máximos y mínimos. A las frecuencias de televisión en ondas decimétricas los máximos y mínimos locales pueden estar separados únicamente unos decímetros.

En el caso de múltiples fuentes de emisión se producen varias configuraciones superpuestas; por ejemplo, el caso de varios canales de radiodifusión sonora y de televisión que se transmiten desde el mismo emplazamiento.

2.2 Niveles de exposición a la intensidad de campo cerca de las antenas de radiodifusión

En este punto se consideran los niveles de intensidad de campo que aparecen en las proximidades de las antenas típicas de radiodifusión en bandas de ondas kilométricas/hectométricas, decamétricas, métricas/decimétricas, centrimétricas y ondas milimétricas.

2.2.1 Bandas de ondas kilométricas/hectométricas (150-1 605 kHz)

En las bandas de ondas kilométricas y hectométricas las frecuencias se encuentran por debajo de las frecuencias de resonancia del cuerpo humano. En el caso de efectos directos del CEM, los niveles límite (también definidos como «obtenidos») para los valores de los campos eléctrico, E , y magnético,

H, son relativamente elevados. No obstante, en muchos casos, los valores elevados están presentes únicamente en las proximidades de la antena transmisora. Esto es especialmente cierto en el extremo inferior de la gama de ondas kilométricas/hectométricas y en el caso de normas/directrices que han especificado niveles obtenidos más elevados. No obstante, en el extremo superior de la banda las distancias pertinentes pueden extenderse del orden de unos pocos cientos de metros. Cabe señalar que este aumento en la distancia se debe, al menos en parte, a la reducción de los niveles de interferencia en el extremo superior de la banda de ondas hectométricas. Durante las transmisiones, debe evitarse el acceso al mástil o a la torre debido a los altos valores que presenta la intensidad de campo en esa zona y al riesgo de sufrir una descarga eléctrica.

2.2.2 Bandas de ondas decamétricas (3-30 MHz)

Las mediciones efectuadas sugieren que en grandes zonas en torno a estaciones transmisoras en ondas decamétricas de alta potencia el CEM rebasará los niveles de intensidad de campo eléctrico obtenidos, especialmente cerca de los alimentadores de hilo desnudo. En muchas estaciones de radiodifusión, estos alimentadores están protegidos por canalizaciones para reducir el CEM, pero esto no puede hacerse alrededor de las propias antenas transmisoras. Por consiguiente, algunas partes de la superficie que contiene dichas antenas se convertirán en «zonas de exclusión» y deberán planificarse las pautas de mantenimiento de forma que se eviten los periodos de tiempo en los que las antenas están transmitiendo. Esto será difícil en muchas estaciones de ondas decamétricas donde, debido a los requisitos de programación, los diagramas de CEM pueden cambiar cada 15 minutos. La intensidad de campo frente a una antena de ondas decamétricas tiende a aumentar con la altura por encima del suelo, debido en parte a que el haz principal tiene un ángulo de elevación de unos 10 a 15 grados, pero se debe fundamentalmente a las condiciones de contorno en la superficie del suelo. La mayoría de las antenas de radiodifusión en ondas decamétricas tienen polarización horizontal, en cuyo caso la intensidad de campo eléctrico en el suelo sería cero para una tierra infinitamente conductora. No obstante, en la práctica, debido a la conductividad finita del suelo aparece una pequeña componente horizontal del campo eléctrico.

Es importante observar que el campo cercano de un sistema de antenas de ondas decamétricas puede extenderse a una distancia considerable, no sólo debido al propio tamaño de las antenas sino también a que las irregularidades del terreno pueden provocar una gran abertura efectiva de la antena. Ello da lugar a que las mediciones de intensidad de campo presenten valores inferiores a los niveles obtenidos en los emplazamientos próximos a la antena y aumenten nuevamente al incrementar la distancia desde la antena. Sin embargo, una vez que se llega a la región de campo lejano, los niveles de intensidad de campo siguen la norma habitual de disminuir al aumentar la distancia desde la antena.

En las proximidades de un sistema de antenas de cortina en ondas decamétricas con polarización horizontal, no debe suponerse que los CEM son necesariamente copolares, pues también pueden encontrarse componentes con polarización vertical. En ese sentido, no pueden hacerse suposiciones sobre la polarización de los peligros de RF inherentes al campo cercano.

2.2.3 Bandas de ondas métricas/decimétricas (30 MHz-3 GHz)

Normalmente, en los emplazamientos de radiodifusión en ondas métricas/decimétricas de alta potencia, las antenas suelen estar situadas a unos 100 m por encima del nivel del suelo y van montadas en mástiles o torres autosoportadas. Al nivel de suelo, por lo tanto, las intensidades de campo son relativamente bajas debido a la distancia desde la antena y también a la estrechez de la anchura del haz transmitido en el plano vertical.

2.2.4 Bandas de ondas centimétricas (3-30 GHz) y ondas milimétricas (30-300 GHz)

Las bandas de frecuencias 11,7-12,5 GHz, 40,5-41 GHz, 41-42,5 GHz y 74-76 GHz están atribuidas al servicio de radiodifusión. En estas frecuencias, el fenómeno de atenuación por propagación exige que los transmisores de radiodifusión terrenal se sitúen cerca de los receptores.

En los puntos siguientes se describen los sistemas utilizados en radiodifusión.

2.2.4.1 Definiciones de zona de campo

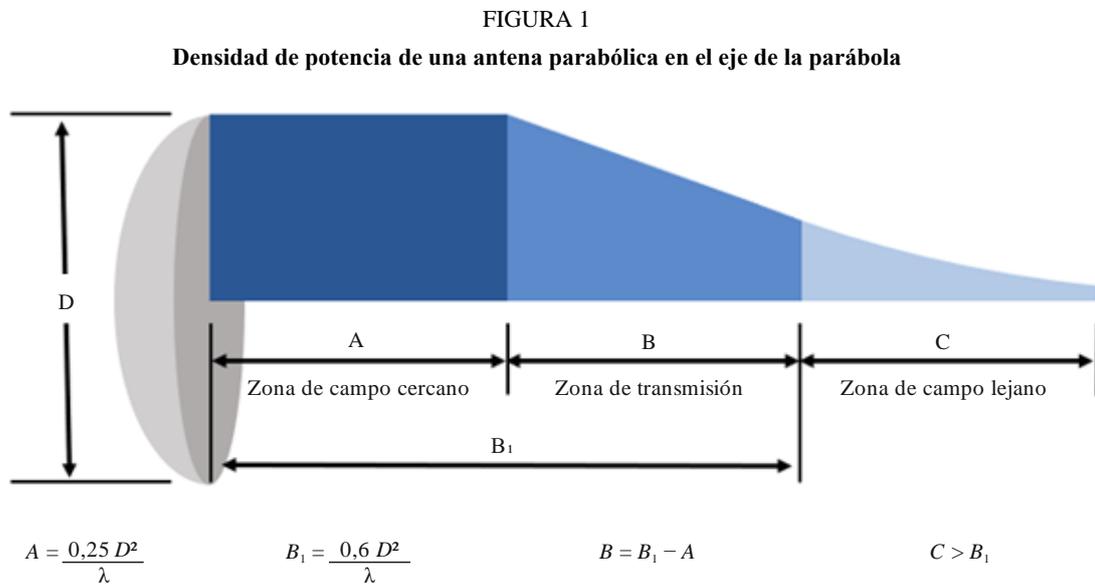
Para antenas parabólicas con diámetro $D \gg \lambda$ se utilizan las siguientes definiciones (véase asimismo la especificación ETSI TR 102 457 [7]):

Región de campo cercano – En el campo cercano, o región de Fresnel, del haz principal, la densidad de potencia puede alcanzar un máximo antes de que empiece a disminuir con la distancia. El máximo valor de la densidad de potencia de campo cercano en el eje depende únicamente de la potencia entregada a la antena, del diámetro, D , de la antena y de la eficacia de la antena.

Región de transición – La densidad de potencia en la región de transición disminuye de manera inversamente proporcional a la distancia desde la antena.

Región de campo lejano – En el espacio libre del campo lejano, o región de Fraunhofer, la densidad de potencia del diagrama de antena disminuye de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

En la Fig. 1 se representan las diversas zonas de una antena parabólica (utilizada principalmente para la realización de evaluaciones punto a punto). El siguiente método sólo es válido a lo largo del eje principal de la antena.



BT.1698-01

La radiación de una antena parabólica en la zona de campo cercano se produce a lo largo de toda la longitud de la zona que tiene la forma de un cilindro con diámetro D . El máximo valor del CEM y su densidad de potencia son constantes a lo largo de toda la zona del campo cercano.

Ello se expresa mediante la ecuación:

$$S(\text{W}/\text{m}^2) = \frac{16\eta P}{\pi D^2} \quad (11)$$

donde:

- η : eficacia de la antena parabólica (se utiliza un valor de 0,55)
- P : potencia del transmisor (W)

D : diámetro de la antena parabólica (m).

La densidad S es máxima a lo largo de la zona de campo cercano.

A partir del punto 1 (comienzo de la zona de transición) la densidad S disminuye linealmente con la distancia r hasta llegar al punto 2, donde empieza la zona de campo lejano.

En la zona de espacio libre del campo lejano, S disminuye con el cuadrado de la distancia según la ecuación:

$$S(\text{W/m}^2) = \frac{GP}{4\pi r^2} \quad (12)$$

donde:

G : ganancia de la antena parabólica con respecto a una fuente isótropa

r : distancia desde la antena parabólica (m).

La densidad S es máxima en el eje de la antena parabólica.

2.3 Campo de frecuencias combinado

Es común contar con más de un transmisor (que utiliza distintas frecuencias de transmisión) situado en el mismo emplazamiento de transmisión. En este caso es necesario considerar un efecto total (combinado) de la exposición de los seres humanos a la energía de RF. Por otro lado, los efectos dependen de la frecuencia y, por lo tanto, una vez calculados los parámetros pertinentes (S, E y H), debe tenerse en cuenta el efecto combinado.

Para el efecto térmico, los límites de exposición aparecen en términos de la tasa de absorción específica (SAR) (véase el Adjunto 3), lo que significa que deben determinarse las densidades de potencia apropiadas. En el caso de un emplazamiento de transmisor multifrecuencia, se recomienda que la densidad de potencia total sea la suma de la densidad de potencia en cada frecuencia transmisora:

$$S_t = \sum_{i=1}^n S_i \quad (13)$$

siendo S_i la densidad de potencia a la frecuencia f_i ($i = 1, 2, \dots, n$), con la siguiente condición:

$$\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{L_i} \leq 1 \quad (14)$$

siendo L_i el nivel de referencia de la densidad de potencia a la frecuencia f_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Éste es el principio básico pero hay algunas diferencias en la forma de aplicar dicho principio (véase el Adjunto 3).

2.4 CEM en el interior de edificios

Los materiales del edificio y la infraestructura dentro de un edificio tienen una fuerte influencia sobre el CEM y provocan variaciones en el campo resultante, de punto a punto, incluso dentro de una misma sala. Las variaciones espaciales del CEM son causadas por las múltiples reflexiones de la onda incidente y, en consecuencia, la polarización del campo resultante puede ser distinta a la de la onda incidente.

Los objetos metálicos y los conductos (líneas y tubos) provocan una radiación secundaria (actuando con una fuente secundaria) y modifican la intensidad de los CEM en sus proximidades.

Todas estas condiciones hacen difícil evaluar la exposición. Cuando se llevan a cabo cálculos o mediciones al respecto deben tenerse en cuenta un gran número de parámetros.

Para lograr una precisión aceptable en el cálculo de la exposición, es necesario seleccionar un modelo adecuado que represente el entorno.

La precisión de la medición depende del tamaño y del tipo de detección de la sonda, así como del emplazamiento del operario que va a realizar las mediciones con respecto a la fuente de radiación y la sonda. Véase el Informe UIT-R SM.2452, *Medición de campos electromagnéticos para la evaluación de la exposición de las personas*, la Recomendación UIT-R P.1238, la Recomendación UIT-R P.2109 y la Recomendación UIT-T K.61.

El problema fundamental no es simplemente determinar el valor de los propios límites de exposición sino la forma en que los cálculos y las mediciones deben efectuarse, y es el objetivo principal de la presente Recomendación.

3 Cálculo

Los procedimientos analíticos sólo pueden utilizarse para calcular las propiedades electromagnéticas en algunos casos y con geometrías especiales. A fin de resolver problemas generales, deben aplicarse técnicas numéricas. Cabe la posibilidad de utilizar programas comerciales según el caso. La óptica física y la óptica geométrica no se aplican en el campo cercano; la especificación 62232 [5] de la CEI contiene información adicional y directrices relacionadas con los métodos de cálculo de la exposición a los CEM.

3.1 Procedimientos

Los métodos de cálculo analítico y numérico pueden predecir los campos externos o internos procedentes de un emisor electromagnético. Los cálculos son útiles para estimar el nivel de las intensidades de campo en una cierta situación de exposición a fin de determinar si es necesario realizar mediciones y, de ser así, qué equipos deben utilizarse para ello. Los cálculos también pueden ser un complemento a las mediciones y debe emplearse para verificar que los resultados de dichas mediciones son razonables.

En algunas situaciones, como por ejemplo en condiciones de exposición de campo cercano complicadas en las que no se dispone del costoso equipo de medición de la SAR, los cálculos pueden sustituir a las mediciones.

La precisión y calidad de los cálculos dependerá del método analítico o numérico utilizado y de la exactitud con que se han descrito las fuentes EM y los objetos físicos situados entre el emisor y el punto de predicción que puede afectar a los campos. Para cálculos de la SAR, la precisión del modelo de cuerpo también afectará la calidad de los resultados.

Para poder realizar los cálculos, es necesario conocer los parámetros de la fuente o hacer una estimación de los mismos.

Entre los parámetros relativos a la fuente de radiodifusión cabe citar la frecuencia, la potencia, el diagrama de antena, la ganancia y la altitud sobre el suelo.

3.2 Soluciones cerradas

En la región de campo lejano de una fuente transmisora donde los CEM tienen fundamentalmente el carácter de una onda plana, pueden utilizarse expresiones analíticas para realizar una estimación de las intensidades de campo. En la dirección principal de una antena, suele emplearse la ecuación de espacio libre de Friis para calcular la densidad de potencia:

$$S = \frac{P G}{4\pi d^2} \quad (15)$$

siendo:

- S : densidad de potencia (W/m^2)
- P : potencia de salida media (W)
- G : ganancia de campo lejano de la antena con respecto a un radiador isótopo
- d : distancia desde el radiador (m).

La relación entre la densidad de potencia y las intensidades de campo eléctrico y magnético viene dada por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = H^2 Z_0 \quad (16)$$

siendo:

- E : intensidad de campo eléctrico (V/m) (valor eficaz)
- H : intensidad de campo magnético (A/m) (valor eficaz)
- Z_0 : impedancia intrínseca del espacio libre, 120π (377Ω).

Por consiguiente, utilizando las ecuaciones anteriores pueden calcularse las intensidades de campo:

$$E = \sqrt{\frac{P G Z_0}{4\pi d^2}} = \frac{5,5\sqrt{PG}}{d}$$

$$H = \sqrt{\frac{PG}{4\pi d^2 Z_0}} = \frac{\sqrt{PG}}{68,8d}$$

Estas ecuaciones sólo son válidas en la región de campo lejano de la fuente radiante, es decir, cuando $d > 2D^2/\lambda$, siendo D la mayor dimensión de la estructura radiante y λ la longitud de onda. La atenuación o incremento de la intensidad de campo debidos a la reflexión, a la transmisión del material y a la difracción no se han tenido en cuenta. Utilizando las ecuaciones anteriores en la región de campo cercano, o en direcciones distintas a la dirección principal, se obtendrá normalmente un valor demasiado elevado a menos que se introduzca un factor de corrección de campo cercano o un factor de diagrama de radiación.

4 Mediciones

4.1 Procedimientos

Los métodos de medición revisten importancia crítica, en especial para campos de frecuencias próximas y bajas; véanse el Informe UIT-R SM.2452, *Medición de campos electromagnéticos para la evaluación de la exposición de las personas*, la Recomendación UIT-T K.61 y las especificaciones EN 50496 [8] y EN 50 554 [9]. En el caso de las bandas de frecuencias inferiores, el método de medición es un tema muy sensible y complejo, puesto que generalmente la distancia al punto de prueba (desde la fuente de emisión) es mucho más pequeña que la longitud de onda. Por esa razón, para las mediciones, la gama de frecuencias 10 kHz-300 GHz se divide en cuatro bandas de radiodifusión principales: ondas kilométricas/hectométricas, ondas decamétricas, ondas métricas/decimétricas y ondas centimétricas/milimétricas. De acuerdo con las Directrices elaboradas por la ICNIRP en 2020 a fin de limitar la exposición a campos electromagnéticos (de 100 kHz a 300 GHz) [1], E y H sólo se utilizan hasta 2 000 MHz, mientras que la densidad de potencia incidente sólo se utiliza por encima de 30 MHz.

4.1.1 Bandas de ondas kilométricas/hectométricas

Para verificar los resultados teóricos, las mediciones de intensidad de campo en la zona cercana se llevan a cabo con instrumentos especiales (medidores de intensidad de campo), en particular, tres dipolos cortos ubicados de forma ortogonal. Se recomienda no utilizar ningún instrumento que necesite un cable de alimentación.

Para evitar la influencia perturbadora del operario que lleva a cabo la medición, el instrumento deberá atarse a un vástago aislante. La distancia entre el instrumento y el operador debe determinarse teniendo en cuenta que se produzca o no algún cambio en la escala del instrumento causado por algún movimiento del operador. Dicha distancia depende de la frecuencia de la señal medida.

Para realizar este tipo de mediciones, es necesario tener en cuenta la posible influencia de cualquier objeto situado en las proximidades, en particular, los que pueden provocar efectos de radiaciones secundarias.

Cuando el objeto de la medición es verificar los resultados obtenidos por cálculo teórico, deben seleccionarse los puntos de prueba a lo largo de una dirección radial y a una altura comprendida entre 1 y 2 m.

En la Recomendación UIT-R BS.1386 aparece una explicación más detallada al respecto.

4.1.2 Banda de ondas decamétricas

En la Recomendación UIT-R BS.705 aparece una explicación detallada al respecto.

4.1.3 Bandas de ondas métricas/decimétricas

En la Recomendación UIT-R BS.1195 aparece una explicación detallada al respecto.

4.1.4 Bandas de ondas centimétricas/milimétricas

Teniendo en cuenta la longitud de onda y las distancias desde las fuentes de emisión, deberá aplicarse un método de medición normalizado.

4.2 Instrumentos

4.2.1 Introducción

La medición de los campos de exposición en la gama de frecuencias 10 kHz–300 GHz exige un esfuerzo considerable para determinar la variabilidad espacial y temporal del campo que va a medirse.

Es necesario utilizar la instrumentación adecuada y un montaje de medición apropiado.

Es muy importante conocer las características de los instrumentos de medición porque esas características determinan la elección adecuada del instrumento. Las características que dependen de la frecuencia, tales como las interacciones de cables, las respuestas no calibradas fuera de banda y la respuesta de frecuencia conformada son particularmente importantes para los instrumentos de banda ancha. Es necesario hacer corresponder otras propiedades del campo con las características del instrumento; por ejemplo, si se trata de un campo reactivo o radiante, el tipo de polarización y modulación o el número de fuentes del campo.

La exposición de las personas a los CEM suele medirse en unidades de densidad de potencia, pero otros tipos de mediciones tales como la corriente inducida en el cuerpo podrían resultar más pertinentes, y estos son algunos de los aspectos críticos para la protección o el control que debe resolver el ingeniero. En muchos casos no existe una relación matemática sencilla entre los campos eléctrico y magnético y, por lo tanto, en estas situaciones cada uno debe medirse por separado.

Los instrumentos de medición que deben utilizarse en este caso son:

- instrumentos para medir el valor de la intensidad de campo E y H ;
- instrumentos para medir la corriente.

4.2.1.1 Consideraciones generales

Los componentes básicos de estos instrumentos son los siguientes:

- las sondas;
- los cables de conexión que transfieren la señal de la sonda a la unidad de lectura y cálculo;
- la unidad de lectura y cálculo.

4.2.1.2 Sondas

La sonda isótropa teórica presenta un diagrama de radiación esférico. La mayoría de las sondas son isótropas, u omnidireccionales en tres dimensiones, capaces de medir la energía en todas las direcciones.

Las sondas deben tener las siguientes características:

- responder a los campos previstos, E o H , sin responder al campo no previsto;
- por lo general la sonda es eléctricamente pequeña e inferior a $\lambda/10$ para la máxima frecuencia de funcionamiento; no obstante, ciertas evaluaciones especiales han demostrado que algunas sondas pueden ser eléctricamente grandes;
- responder de una manera previsible a las variaciones de las condiciones ambientales, tales como la temperatura y la humedad.

Es muy importante que, durante las mediciones, las sondas isotrópicas se ubiquen de tal modo que los cables de conexión queden perpendiculares al campo eléctrico o la polarización de la antena; esta condición puede disminuir la perturbación del campo en la sonda producida por los cables de conexión. Esta perturbación del campo constituye normalmente un problema cuando se miden campos eléctricos de frecuencias inferiores o de onda medias.

4.2.1.3 Cables

Los cables utilizados para conectar la sonda y el instrumento de lectura y cálculo no deben presentar ruido e impedir el acoplamiento del campo con la unidad de medición.

Es muy importante observar que es posible que los cables actúen como una antena y modifiquen el campo en la sonda para causar una lectura incorrecta. A veces es posible resolver este problema disponiendo los cables durante la prueba de forma perpendicular al campo eléctrico; el uso de ferritas de supresión en el cable de medición puede mitigar esos efectos.

4.2.2 Características de los instrumentos de medición del campo eléctrico y magnético

Normalmente, la medición de la exposición al CEM se lleva a cabo en el dominio de la frecuencia. Existen dos grupos principales de instrumentos.

4.2.2.1 Tipos de instrumentos de banda ancha y especificaciones conexas

Con los instrumentos de banda ancha (véase la Fig. 2) se puede medir el campo total en una gama de frecuencias determinada (es decir, la anchura de banda), pero no es posible distinguir la contribución de la fuente de una sola frecuencia cuando varias fuentes radian simultáneamente.

FIGURA 2
Instrumentos de banda ancha



1698-02

Los instrumentos de banda ancha están hechos con sensores que pueden ser no isótropos para medir una sola componente espacial del campo, o isótropos, para medir las tres componentes del campo al mismo tiempo. Estos instrumentos pueden medir el nivel total del campo eléctrico magnético instantáneo, o el valor del campo RMS o el valor medio de la densidad de potencia en un periodo determinado de tiempo, normalmente seis minutos de acuerdo con las normas sobre exposición. Los instrumentos de banda ancha pueden dividirse en las siguientes clases, dependiendo del detector utilizado:

- diodo;
- bolómetro;
- termopar.

Estos instrumentos pueden utilizarse en situaciones de campo cercano y campo lejano.

4.2.3 Tipos y especificaciones de instrumentos de banda estrecha

Los instrumentos de banda estrecha son selectivos en frecuencia y pueden medir la intensidad del CEM en una gama de frecuencias distintas. Los receptores de banda estrecha son especialmente útiles en los casos en que existen fuentes múltiples, ya que permiten evaluar la contribución de cada fuente al campo total. La dirección y la polarización del campo pueden evaluarse con ayuda de una antena o un sensor no isotrópico. Debe tenerse precaución con el montaje de medición ya que los campos pueden cambiar rápidamente en el espacio en relación con el tamaño de la antena, especialmente en presencia de efectos reflectantes tales como las paredes, el suelo y los postes y estructuras metálicos. Es importante observar que si se cambia el punto de medición la intensidad del campo detectado puede ser completamente distinta. Asimismo, la medición puede verse influenciada por la posición de la antena y los cables de conexión.

Cuando se realiza la medición de un CEM en el dominio del tiempo, es necesario utilizar instrumentos con las características de análisis adecuadas (en términos de frecuencia y resolución) a fin de obtener buenos resultados en el análisis espectral realizado mediante la transformada de Fourier.

El sistema consta de los siguientes componentes básicos:

- Una antena calibrada que convierte el campo eléctrico de una antena dipolo o el campo magnético de una antena de bucle en una onda por una línea de transmisión.
- Una línea de transmisión o un cable coaxial de conexión calibrados.

- Un receptor selectivo, por lo general un analizador de espectro o un receptor de medición, que mide la intensidad de la señal recibida en función de la frecuencia utilizando un circuito de sintonización. El analizador de espectro proporciona los valores de la tensión o la potencia en el dominio de la frecuencia.

Durante estas mediciones, es importante velar por que los instrumentos de medición no perturben el campo objeto de medición.

4.3 Comparación entre predicciones y mediciones

La comparación entre predicciones y mediciones indica si los resultados de la medición están de acuerdo con los resultados obtenidos mediante cálculo teórico. Para más detalles al respecto, véase el Adjunto 2.

5 Precauciones en las estaciones transmisoras de radiodifusión y sus proximidades

Este punto indica las precauciones que deben tomarse en torno a las estaciones transmisoras de radiodifusión para controlar los posibles riesgos debidos a la exposición a las RF. Estos riesgos son de dos categorías principales, el primero se refiere al riesgo directo a la salud de las personas debido a la exposición niveles elevados de emisiones de RF, incluidas las conmociones, las quemaduras y el posible funcionamiento incorrecto de los implantes médicos. La segunda categoría comprende los riesgos indirectos por los que las emisiones de RF pueden provocar explosiones o incendios o interferir con el funcionamiento seguro de las máquinas, grúas, vehículos, etc.

5.1 Precauciones para controlar los efectos directos sobre la salud de las emisiones de RF de alto nivel

Para determinar las precauciones que deben tomarse razonablemente se consideran dos grupos de personas. El primer grupo son los empleados en las estaciones transmisoras o visitantes oficiales que regularmente acuden a las mismas. Como este grupo se enfrenta a estos riesgos más frecuentemente, las medidas de control que deben aplicarse son superiores a las del segundo grupo que son las personas del público en general.

5.1.1 Medidas de precaución para los empleados (personal de servicio)

5.1.1.1 Medidas físicas

Debe proporcionarse, según proceda, una cierta forma de barrera protectora para restringir el acceso a cualquier zona donde se rebasen los límites de exposición o sea posible el contacto con conductores RF al descubierto. El acceso a tales áreas sólo debe ser posible mediante la utilización de una llave o algún otro tipo de instrumento. Debe bloquearse mecánica o eléctricamente el acceso a recintos donde sea necesario entrar para realizar las labores de mantenimiento.

Además de estas barreras protectoras, pero no sustituyendo a las mismas, deben utilizarse otras medidas físicas tales como luces o señales de aviso.

El riesgo de conmoción o quemaduras causadas por las tensiones de red inducidas en los objetos conductores, tales como verjas y estructuras de soporte, debe reducirse al mínimo mediante dispositivos de puesta a tierra o de conexión a masa de RF eficaz y adecuadamente mantenidos. Debe prestarse especial atención a la puesta a tierra de cualquier cable o hilos metálicos temporales, como por ejemplo los aparejos de los cabrestantes.

O cuando es preciso manejar tales objetos en un campo RF, deben tomarse medidas de protección adicionales contra las conmociones o quemaduras utilizando guantes reforzados o mediante un etiquetado de aviso eficaz.

5.1.1.2 Procedimientos operativos

La evaluación de los riesgos de exposición a RF debe ser realizada por personal adecuadamente entrenado y experimentado en la construcción y también cuando se vaya a introducir algún cambio significativo en la estación transmisora. El objetivo inicial debe ser la identificación de:

- las zonas donde las personas pueden estar expuestas a niveles de referencia;
- los distintos grupos de personas que pueden estar expuestas; por ejemplo, empleados, personas que comparten el emplazamiento, público en general;
- las consecuencias de averías, tales como fugas de RF, alineamiento incorrecto de la antena o errores operativos.

Puede efectuarse una comprobación inicial de los niveles de exposición a RF mediante cálculos o estableciendo un modelo matemático, pero también deben realizarse algunas mediciones de muestra a efectos de verificación. En la mayoría de los casos, sin embargo, serán necesarias mediciones para determinar con mayor precisión los niveles de exposición a RF. Las cantidades reales que deben medirse (campo E, campo H, densidad de potencia o corriente inducida) deben determinarse basándose en las circunstancias específicas, que incluyen las frecuencias de la estación, la región de campo (campo cercano/lejano) que va a medirse y si se propone verificar la conformidad con las restricciones básicas (SAR) o solamente con los niveles de referencia. Estas circunstancias también determinarán en gran medida si deben medirse las tres distintas componentes de campo por separado o si debe utilizarse un instrumento isótropo. Los controles de exposición a RF deben realizarlos personal entrenado en la utilización de tales instrumentos, siguiendo procedimientos de medición determinados y registrando los resultados en un formato especificado.

En todo organismo o empresa debe nombrarse una persona competente que sea responsable de la identificación y disposición de los instrumentos de medición adecuados. Tales instrumentos de medición deben ser utilizados siempre de conformidad con las instrucciones del fabricante y hay que someterlos a pruebas funcionamiento con una referencia de verificación y calibraciones funcionales periódicas. Tras dichas pruebas o calibraciones deben fijarse en los instrumentos etiquetas que indiquen las fechas de expiración. Deben mantenerse registros de las calibraciones efectuadas incluida la información sobre los ajustes y reparaciones que hayan sido necesarios en cada ocasión. Esta información debe utilizarse para determinar el intervalo entre calibraciones.

Deben establecerse procedimientos de trabajo para asegurar que no se rebasan los límites de exposición a RF. Asimismo, debería impartirse capacitación a los empleados en lo que respecta a los procedimientos de seguridad RF adecuados. Las actividades de mantenimiento en zonas sujetas a restricciones de acceso debido a altos niveles de exposición a RF deben planificarse teniendo en cuenta los periodos de interrupción de la transmisión o los cambios en los diagramas de emisión, siempre que sea posible. Sin embargo, debe haber siempre un equilibrio entre la exposición a las emisiones de RF y otros riesgos, tales como el trabajo en los mástiles por la noche aunque estén iluminados. Cuando sea necesario deben conmutarse los transmisores para reducir la potencia, o incluso desconectarlos, a fin de permitir un acceso seguro para realizar los trabajos de mantenimiento o reparación.

Las zonas de acceso prohibido en las estaciones de transmisión deben estar claramente definidas y señalizadas y deben implantarse sistemas de «permiso para trabajar». Deben tomarse las disposiciones necesarias para todos los sistemas, antenas, combinadores o zonas compartidas por otras organizaciones. Todo el personal que trabaje regularmente en zonas con elevados niveles de exposición a RF debe ir equipado con alguna forma de alarma personal o medidor de niveles peligrosos de RF.

Deben mantenerse registros de las exposiciones por encima de los niveles de exposición a RF especificados. Las empresas u organizaciones responsables de las estaciones transmisoras en

funcionamiento deben supervisar la salud del personal que trabaje regularmente en zonas con altos niveles de exposición a RF y tomar parte en encuestas epidemiológicas cuando sea conveniente.

Los detalles sobre los métodos y procedimientos generales relativos a la seguridad contra la exposición a RF deben incluirse en unas instrucciones de seguridad escritas que deberán distribuirse a todo el personal adecuado. Además, deben establecerse instrucciones locales para cada estación transmisora a fin de asegurar el cumplimiento de dichos métodos y procedimientos.

El entrenamiento y capacitación sobre los métodos de seguridad deben también incluir la naturaleza y los efectos de la exposición a RF, los aspectos médicos y las normas de seguridad.

Se ha de prestar especial atención a los trabajadores particularmente sensibles a los CEM, entre ellos mujeres embarazadas y personas portadoras de dispositivos médicos pasivos o activos. En el caso de los trabajadores que lleven un dispositivo médico implantable activo (AIMD), se dispone de pautas pormenorizadas en directrices regionales, como los documentos de CENELEC de la serie EN 50527, sobre el procedimiento aplicable a efectos de la evaluación de la exposición a campos electromagnéticos de los trabajadores portadores de dispositivos médicos implantables activos. Véase asimismo el Adjunto 6 al Anexo 1.

5.1.2 Medidas de precaución para el público en general

5.1.2.1 Medidas físicas

Al público en general se aplican consideraciones similares a las indicadas en el § 5.1.1.1 para los empleados. Debe prestarse especial atención a las zonas donde podrían rebasarse los límites de exposición a RF si se produce una avería. Deben establecerse barreras protectoras en forma de verjas que rodeen el perímetro de la zona de peligro, adecuadamente puestas a tierra cuando sea necesario. También podría ser necesario incluir señales de advertencia de peligro.

5.1.2.2 Procedimientos operativos

Al evaluar los riesgos, de la forma indicada en el § 5.1.1.2, debe tenerse en cuenta la posibilidad de que alguna persona lleve implantes médicos. Debe adoptarse un procedimiento para informar a dichos visitantes de los posibles peligros para su salud y conviene igualmente establecer los procedimientos adecuados de acceso restringido. A los visitantes regulares de la estación debe proporcionárseles las instrucciones básicas de seguridad contra las radiaciones de RF.

Debe considerarse la necesidad de llevar a cabo controles de exposición a RF más allá de los límites del emplazamiento, en particular cuando las tensiones inducidas en estructuras metálicas externas (grúas, puentes, edificios, etc.) puedan causar pequeñas conmociones o quemaduras. Al llevar a cabo esas comprobaciones hay que tener en cuenta la posibilidad de que aumente la intensidad de campo con la distancia, normalmente debido a la elevación del terreno. Cuando sea necesario, debe implantarse un procedimiento para supervisar las aplicaciones de planificación u otras propuestas de desarrollo.

5.2 Precauciones para controlar los peligros de la exposición indirecta a RF

Los efectos indirectos de la exposición a RF, tales como los peligros de encendido de productos inflamables, pueden aparecer a niveles muy inferiores a los niveles de referencia, especialmente en las bandas de ondas kilométricas/hectométricas, y ello se debe a que los productos inflamables pueden almacenarse en un emplazamiento que cuente con estructuras conductoras asociadas, tales como conductos, que podrían actuar como una antena receptora bastante eficaz. Sin embargo los riesgos reales son escasos pero pueden afectar a plantas de procesamiento industrial, dispositivos de almacenamiento de combustible y gasolineras. No obstante, la evaluación detallada de estos riesgos no es nada sencilla. En consecuencia, el procedimiento general que se recomienda a continuación se

basa en un proceso de eliminación progresiva. Las precauciones detalladas adoptadas deberán tener en cuenta las normas o legislación nacionales en el país correspondiente.

Debe llevarse a cabo una evaluación inicial, basada en las estimaciones del caso práctico de carácter más desfavorable, de la mínima separación necesaria para evitar dicho peligro entre un tipo particular de transmisor y una estructura conductora. El primer paso para ello consiste en calcular la mínima intensidad de campo que puede representar un peligro de encendido para las frecuencias que está utilizando el transmisor concreto. Ello es función del tipo de producto inflamable y del perímetro de cualquier recinto formado por estructuras metálicas, normalmente conductos, y puede determinarse fácilmente a partir de cuadros o gráficos. A continuación, debe hacerse una estimación de la zona vulnerable a partir de esta mínima intensidad de campo, mediante cálculo, modelado matemático o por cuadros/gráficos.

Si la zona vulnerable, establecida como se ha indicado anteriormente, contiene emplazamientos en los que se almacenan productos inflamables o está previsto que pueda contener tales productos, debe realizarse una evaluación más detallada que se basará en las dimensiones reales de las estructuras metálicas, en el tipo de combustible del producto inflamable que va a almacenarse y en las mediciones de intensidad de campo. Esta evaluación detallada debe efectuarse calculando la potencia extraíble de la estructura metálica para determinar si rebasa la mínima energía de encendido del producto inflamable. De ser así, debe medirse la potencia extraíble y hay que introducir las modificaciones necesarias en la estructura así como cualquier otro dispositivo de seguridad que pueda ser preciso.

Una categoría similar a los peligros de encendido es la posible **detonación de materiales explosivos**. Esta circunstancia se dará en raras ocasiones, pero pueden obtenerse orientaciones detalladas en directrices regionales como el documento PD CLC/TR 50426:2004 de CENELEC, que contiene una guía para la evaluación de la iniciación involuntaria de dispositivos electroexplosivos de hilo encendedor por radiación de radiofrecuencia. Otros efectos indirectos que deben considerarse incluyen las interferencias causadas a los sistemas de seguridad por vehículos, máquinas, grúas, etc. que se encuentren próximos a las estaciones transmisoras o dentro de sus límites.

Cuando sea necesario, deben tomarse precauciones similares, en sus principios, a las descritas en el § 5.1.2.

Adjunto 1 al Anexo 1

Ejemplos de cálculos de intensidades de campo en las proximidades de las antenas de radiodifusión

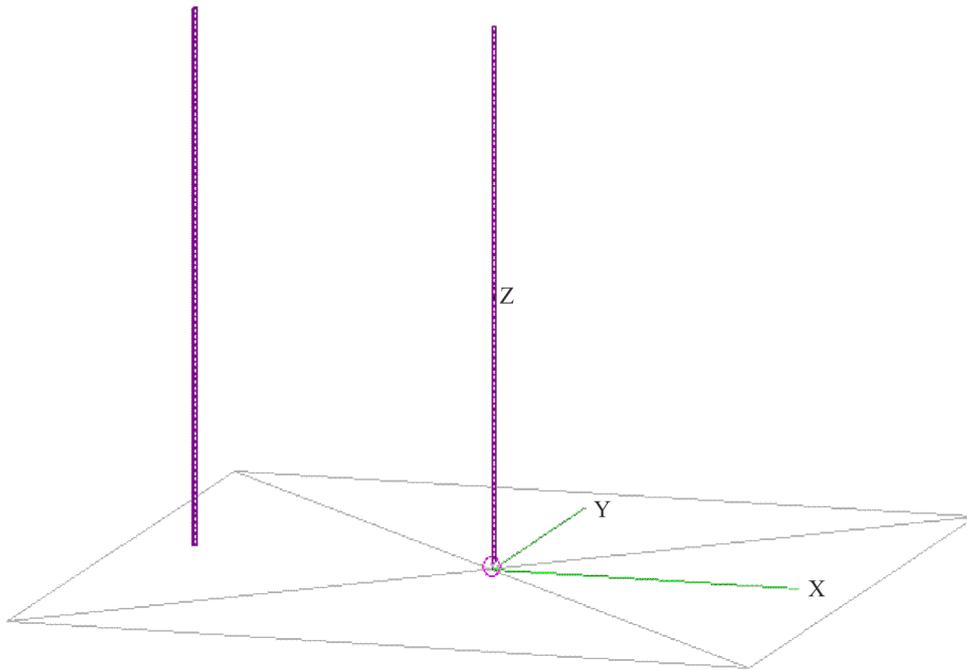
1 Ejemplo A – Diagramas de intensidades de campo eléctrico y magnético

De acuerdo con el § 3 pueden realizarse cálculos de la distribución del campo eléctrico y magnético en las proximidades de las antenas de transmisión de radiodifusión para determinar las intensidades de campo en ciertos puntos o zonas. Ello incluye especialmente la zona de campo cercano, donde la estructura del campo es generalmente muy complicada. También pueden efectuarse cálculos para determinar los contornos del campo (líneas o superficies de intensidad de campo constante) donde se respetan los valores límite pertinentes (niveles) relativos a las restricciones de campo electromagnético. De esta forma es posible (por ejemplo, a efectos de planificación), realizar una estimación de la extensión de las zonas pertinentes donde pueden o deben tomarse las medidas de protección necesarias.

En las siguientes Figuras se representan en forma de gráficos los resultados de algunos cálculos realizados con ejemplos de antenas transmisoras de radiodifusión en ondas hectométricas y decamétricas.

La Fig. 3 ilustra una simulación de una antena direccional de ondas hectométricas; la antena está compuesta por dos mástiles de media longitud de onda de altura cada uno; uno de ellos recibe alimentación y el otro es un reflector pasivo. La Fig. 3 muestra el modelo; los ejes de referencia tienen una longitud de 50 m.

FIGURA 3
Simulación de una antena direccional de ondas hectométricas

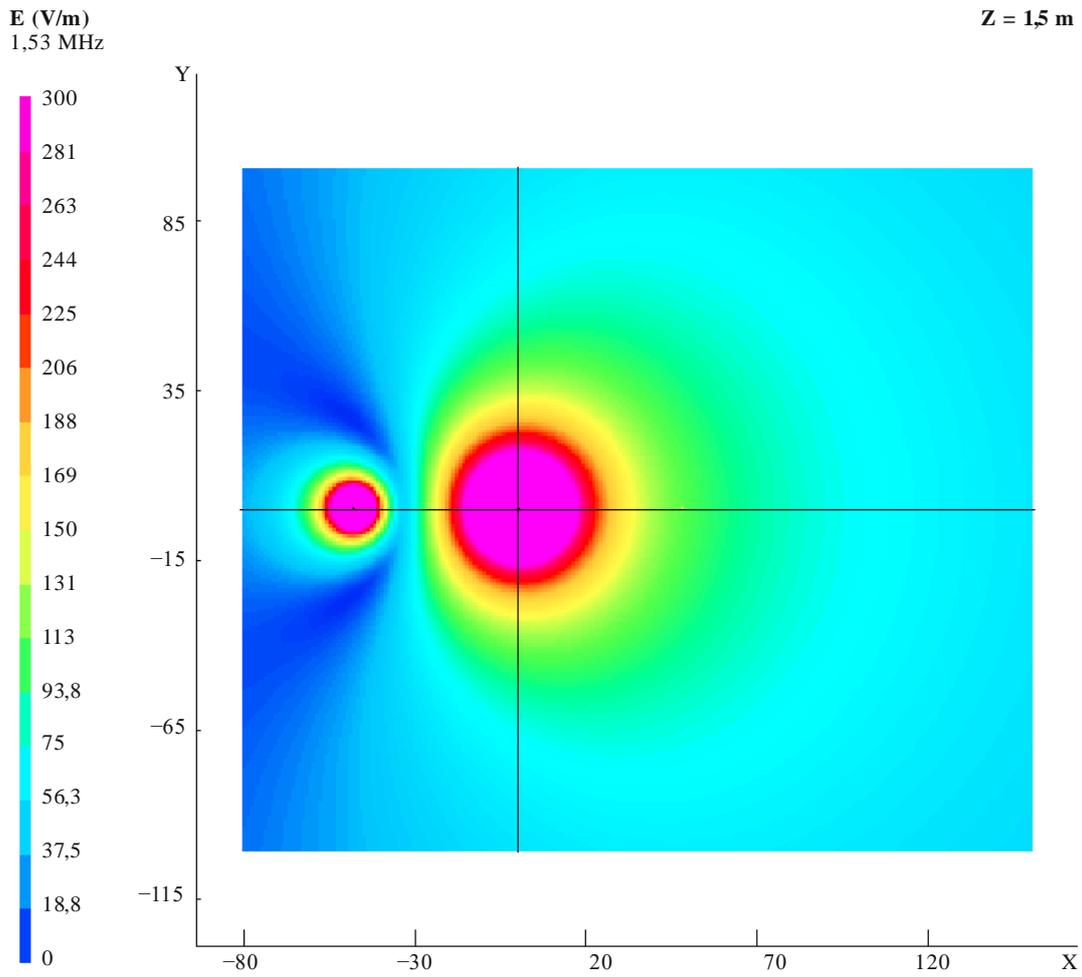


BT.1698-03

La Fig. 4 muestra la intensidad del campo eléctrico calculada a 1,5 m sobre el nivel del suelo, con una entrada de 500 kW.

FIGURA 4

Intensidad del campo eléctrico calculada a 1,5 m sobre el nivel del suelo, con una entrada de 500 kW

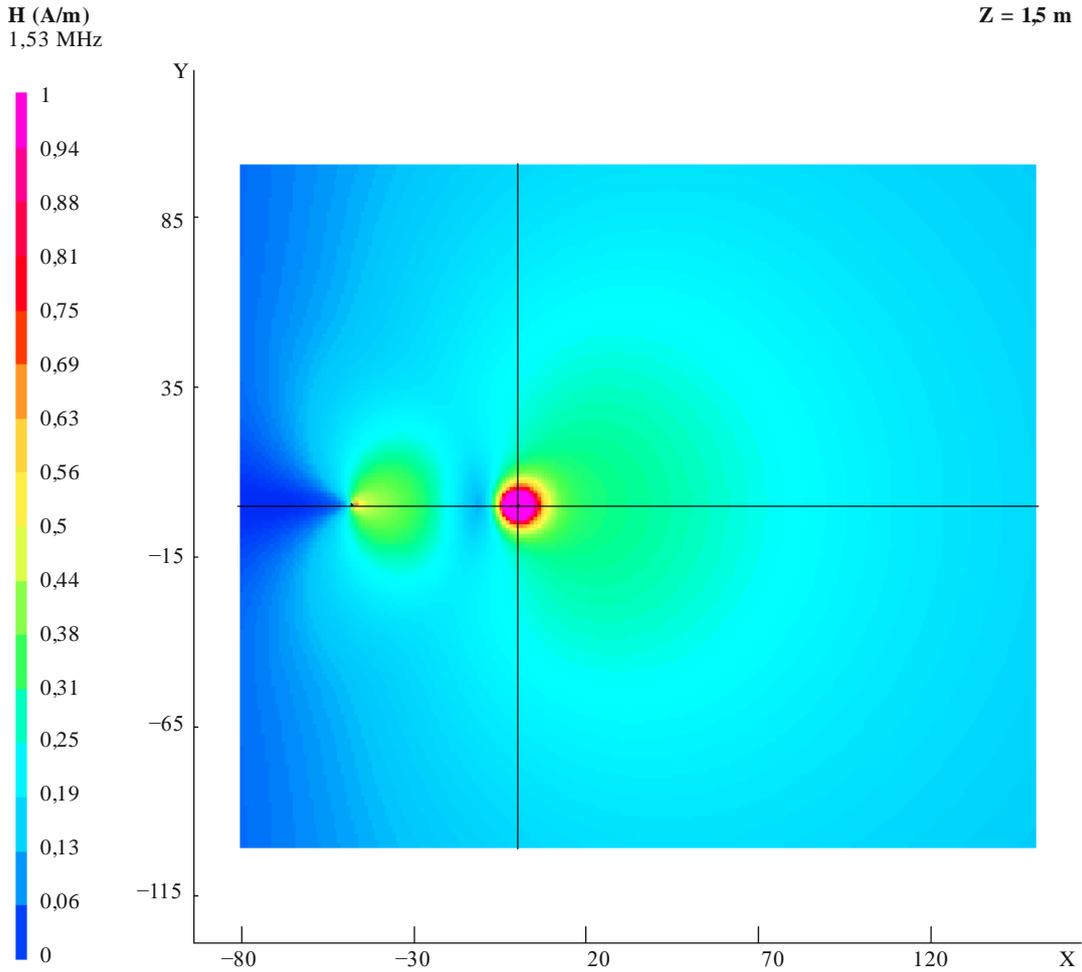


BT.1698-04

La Fig. 5 muestra la intensidad del campo magnético calculada a 1,5 m sobre el nivel de suelo, con una entrada de 500 kW.

FIGURA 5

Intensidad del campo magnético calculada a 1,5 m sobre el nivel de suelo, con una entrada de 500 kW

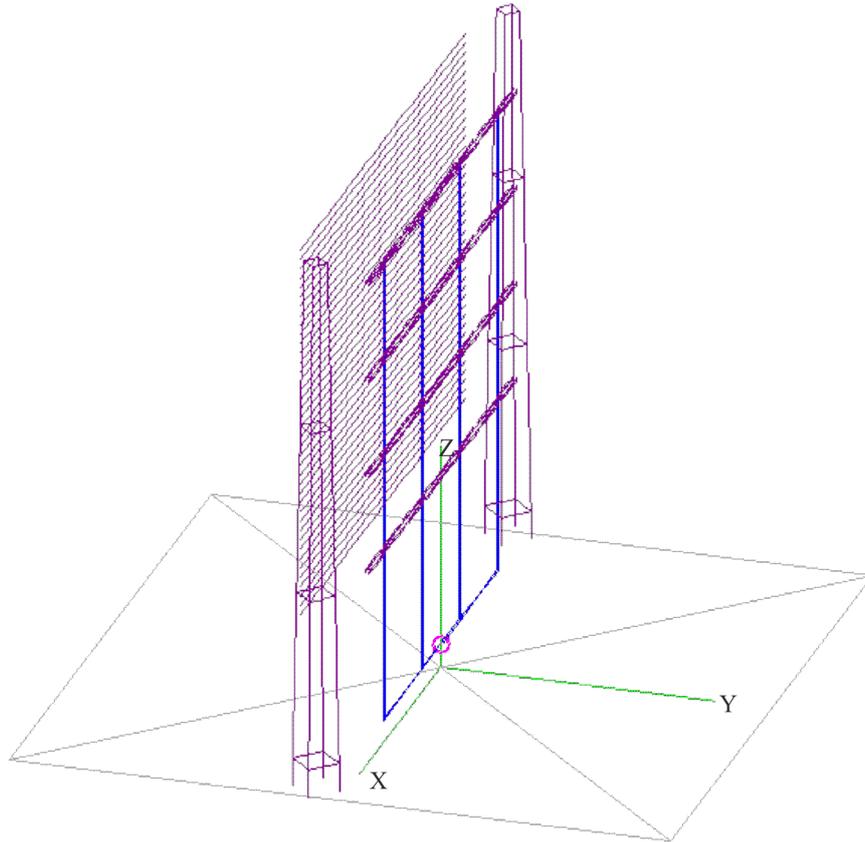


BT.1698-05

La Fig. 6 ilustra un modelo de antena de cortina de ondas decamétricas 4/4/1 típica con un reflector aperiódico a una longitud de onda por encima del nivel del suelo (AHR(S) 4/4/1). Se distinguen cuatro filas de elementos, cada una compuesta por cuatro dipolos. En este modelo se tienen en cuenta los elementos radiantes activos de la antena, el reflector y una estructura de apoyo simplificada. Los resultados que muestran el campo eléctrico y el campo magnético obtenidos se reproducen en las Figs. 7 y 8, respectivamente, a 1,5 metros sobre el nivel del suelo. Los ejes (en verde) tienen una longitud de 50 m a título de referencia.

Obsérvese que los niveles no descienden simplemente de forma monotonía al aumentar la distancia desde el sistema.

FIGURA 6
Modelo de antena AHR(S) 4/4/1 típica



BT.1698-06

FIGURA 7

Intensidad del campo eléctrico (V/m) calculada a 1,5 m sobre el nivel del suelo; antena de cortina ARS 4/4/1 típica. Potencia de entrada 500 kW a 7 MHz

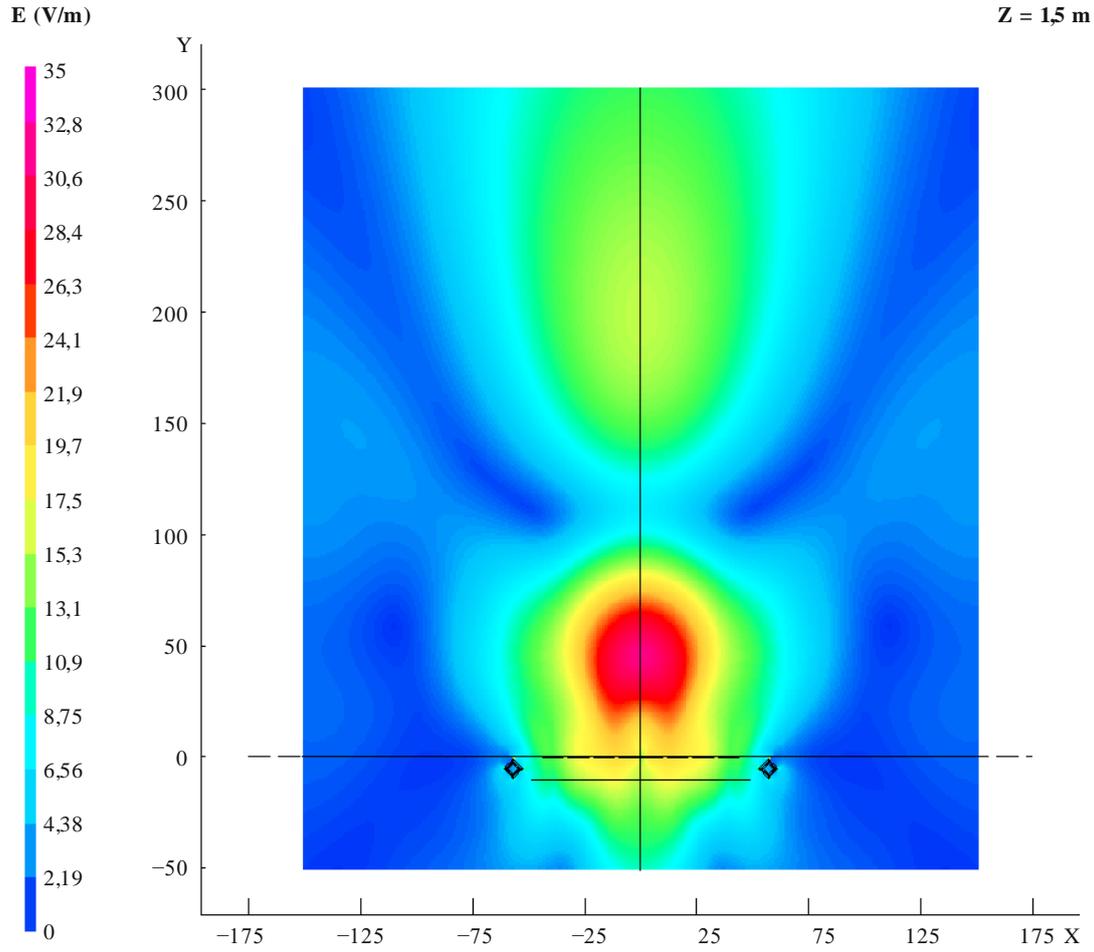
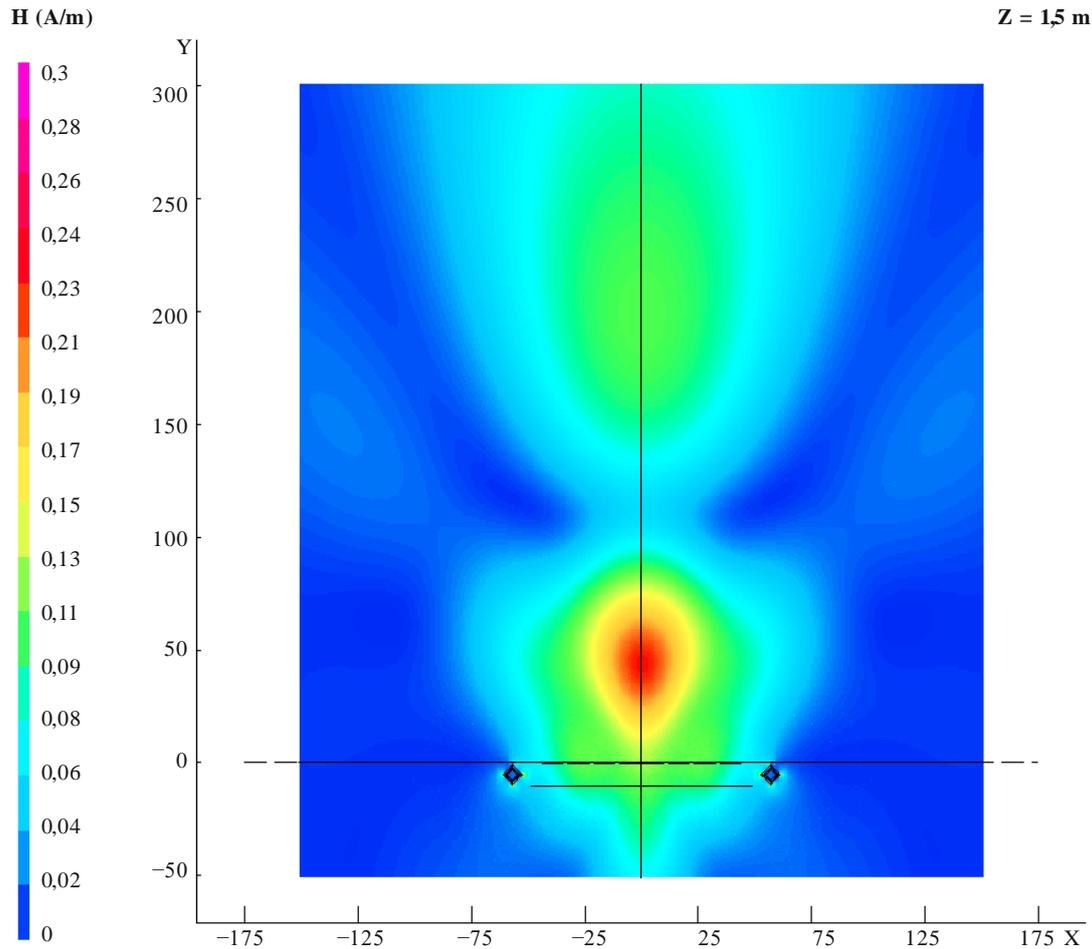


FIGURA 8

Intensidad del campo magnético (A/m) calculada a 1,5 m sobre el nivel del suelo; antena de cortina ARS 4/4/1 típica.
Potencia de entrada 500 kW a 7 MHz



BT.1698-08

2 Ejemplo B – Determinación de la intensidad del campo magnético en la zona del campo cercano de las antenas de alta potencia en ondas kilométricas/hectométricas

En este ejemplo se determina la intensidad del campo magnético en la zona del campo cercano en las antenas de mástil (monopolos) en ondas kilométricas y hectométricas, resolviendo la ecuación integral de Hallen.

En las bandas de frecuencias por debajo de 10 MHz, la relación física entre E y H en el CEM es mucho más compleja. Ello contrasta con las frecuencias más altas, donde el CEM tiene características del campo en la zona lejana incluso a distancias muy cortas desde la fuente de emisión y donde el concepto de densidad de potencia radiada (intensidad del vector de Poynting) es muy útil. De hecho, en la zona de campo cercano, con independencia de la frecuencia, la relación sencilla entre los campos eléctrico y magnético ya no existe: los dos campos no están en fase y su relación no es 377Ω . Sin embargo, para frecuencias tan bajas como 10 MHz o menos, la zona de campo cercano es mayor que para frecuencias más altas.

Evidentemente, la intensidad de campo medida dependerá del tipo de antena transmisora, de la potencia del transmisor y de la distancia desde la antena de transmisión. Por ejemplo, en el caso de la componente E transmitida a alta potencia, las intensidades de campo en un emplazamiento de ondas

kilométricas/hectométricas típico pueden variar desde unos pocos V/m a más de 250 V/m. En las proximidades de la antena de transmisión la intensidad de campo puede ser del orden de 1 000 V/m.

3 Ejemplo C – Campo electromagnético cercano de las antenas de cortina transmisoras en ondas decamétricas

3.1 Introducción

Este ejemplo se refiere a una estructura de antena más complicada, denominada antena de cortina. Estas antenas son muy importantes para la transmisión en onda corta (alta frecuencia, ondas decamétricas) de alta potencia. Se trata, en realidad, de sistemas de dipolos horizontales dispuestos en un plano vertical.

La tendencia general hacia el aumento de la potencia y la ganancia de las antenas de transmisión es muy acusada en la radiodifusión en ondas decamétricas. En los grandes centros de transmisión para la prestación de cobertura a escala mundial, no es extraño registrar potencias de transmisión de hasta 500 kW y ganancias de antena (en la dirección la máxima emisión) de más de 20 dB (con respecto al dipolo de media longitud de onda). Un transmisor de 500 kW modulado al 100% (véase el Adjunto 4 al Anexo 1) con una antena de 20 dB de ganancia produce una potencia radiada aparente (PRA) de 75 MW (en la dirección de máxima emisión).

En el Adjunto 5 (§ 2.1) se describe brevemente la técnica numérica que puede utilizarse para calcular los campos eléctricos y magnéticos cercanos de las antenas de alta potencia.

En el § 3.2 figuran los resultados para los campos en las proximidades de antenas de cortina.

3.2 Campos eléctricos y magnéticos cercanos de las antenas de cortina

En el contexto de la difusión en ondas cortas, se utiliza una amplia gama de transmisoras de alta potencia, como los dipolos horizontales (que suelen formar un sistema directivo o cortina), las antenas rómbicas y los monopolos verticales. Los dipolos de una antena de cortina suelen ser dipolos de media onda, sencillos o plegados, alimentados por corrientes de aproximadamente la misma amplitud (pero a veces de fases distintas) para producir el diagrama de emisión deseado. La antena cuenta normalmente con un reflector pasivo que, en la mayoría de los casos, consiste en una malla de hilos (reflector aperiódico), pero también puede ser un sistema de dipolos sintonizados. Los sistemas de cortina de antenas se denominan $H(R)(S) m/n/h$, donde la H hace referencia a un sistema de dipolos horizontales dispuesto en un plano vertical; la R a un reflector (caso de estar presente); la S representa un desplazamiento de fase (si existe) entre las corrientes que alimentan dipolos colineales adyacentes para desplazar el acimut del haz principal; m es el número de dipolos colineales en cada fila; n es el número de dipolos paralelos apilados verticalmente (normalmente a una distancia de media longitud de onda), es decir número de filas; y h es la altura sobre el suelo (en longitudes de onda) de la fila más baja. Para obtener más información al respecto, véase la Recomendación UIT-R BS.705.

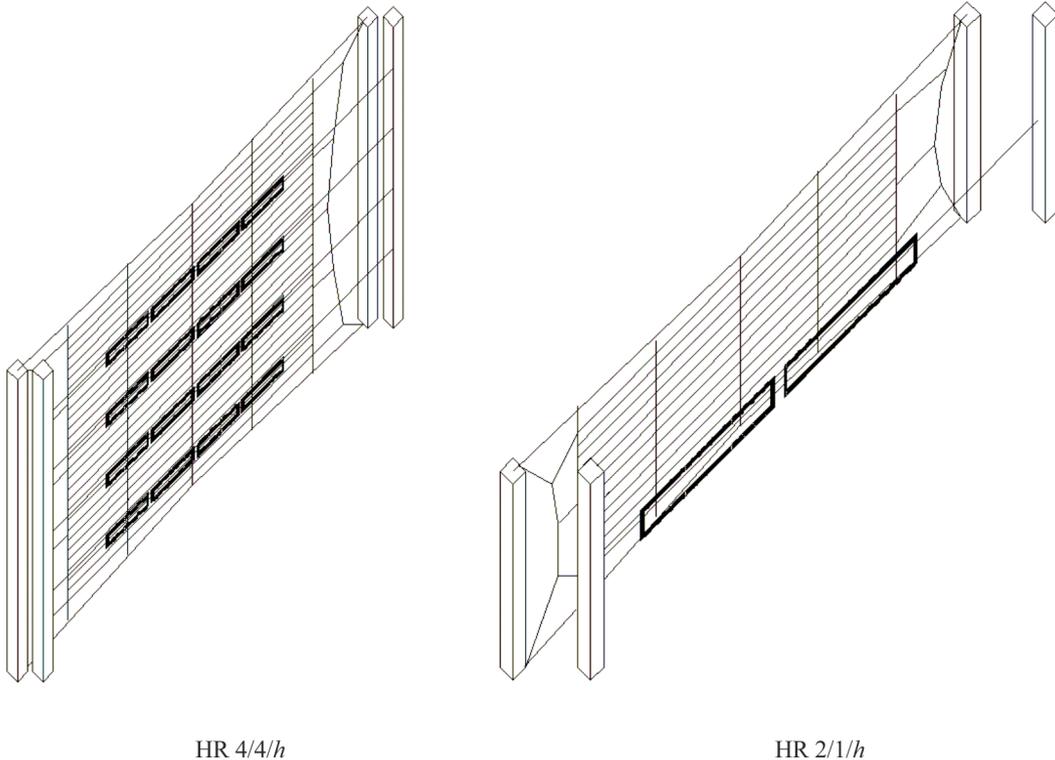
Entre las excelentes propiedades que ofrecen los sistemas de antenas de cortina figura una alta ganancia (más de 20 dB), es decir, un diagrama de emisión muy directivo y capacidad de manejar altas potencias (hasta 500 kW). Por consiguiente, desempeñan un cometido muy importante en las grandes estaciones de transmisión en ondas decamétricas. El problema central en esta Recomendación tratado consiste en elaborar una técnica precisa y eficaz para evaluar los campos producidos por estas antenas.

Las estaciones de radiodifusión en ondas decamétricas suelen disponer de un campo de antenas compuesto por antenas con polarización horizontal, a las que, en algunos casos, se suman antenas de cuadrante con características omnidireccionales. Una antena de cortina típica contiene 16 dipolos plegados, dispuestos en cuatro filas de cuatro elementos ($HRS 4/4/h$). Algunas antenas de cortina

cuentan con un reflector aperiódico, constituido por finos hilos horizontales o un conjunto de dipolos sintonizados (véase la Fig. 9).

FIGURA 9

Sistemas de antenas de cortina en ondas decamétricas



BT.1698-09

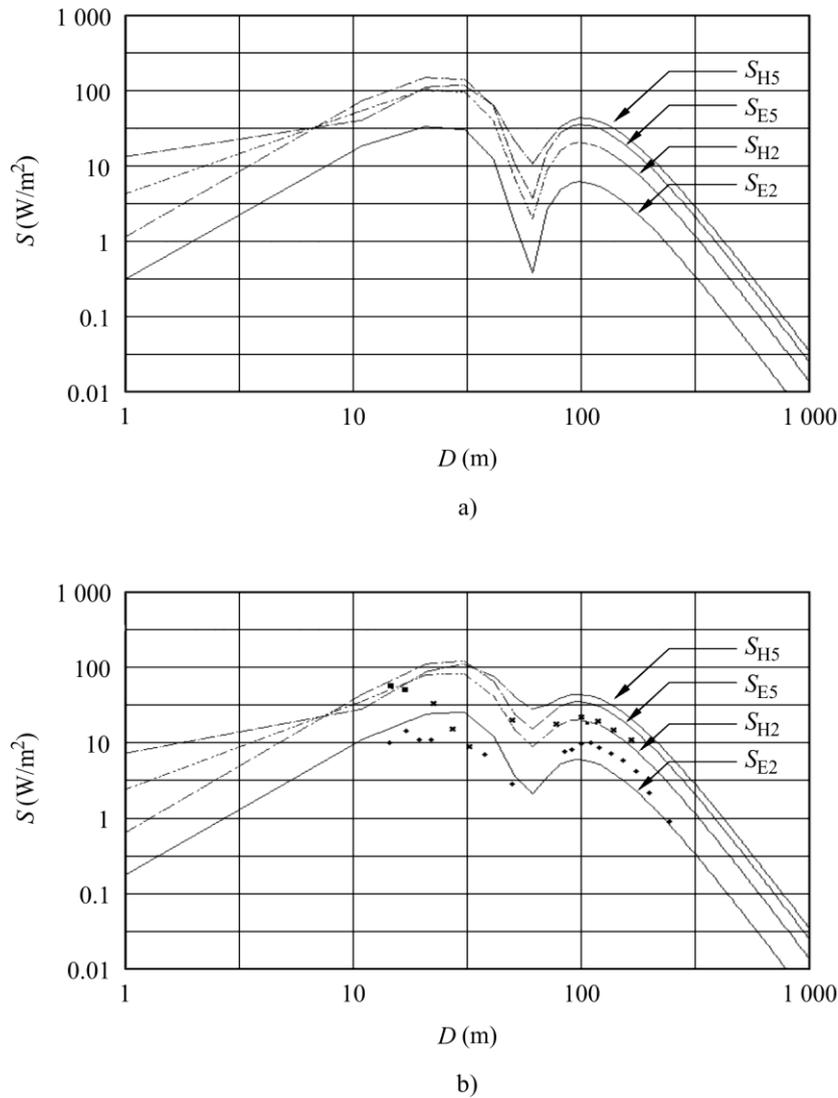
En algunos textos aparecen los cálculos de los campos eléctrico y magnético de las antenas de cortina en ondas decamétricas, pero todos ellos se basan en la aproximación sinusoidal de la distribución de la corriente a lo largo de los dipolos y en la hipótesis de que las corrientes que alimentan a los dipolos tienen amplitudes idénticas. El objeto de este Informe es proporcionar un análisis más riguroso utilizando una aproximación más precisa de la distribución de corrientes y teniendo en cuenta el acoplamiento entre los elementos del sistema, es decir alimentando los elementos con tensiones de igual amplitud.

Se demostró experimentalmente (y se confirmó teóricamente utilizando la aproximación sinusoidal para la distribución de corrientes) que aproximando el suelo real mediante un plano perfectamente conductor se obtienen resultados bastante precisos. Esta simplificación es importante, ya que permite tratar únicamente las antenas situadas por encima de un suelo perfecto. El análisis actual se realizó con dipolos sencillos en vez de dipolos plegados. Esta aproximación se realizó para obtener resultados precisos. Se considera que la longitud de un dipolo sencillo es algo inferior a media longitud de onda a la frecuencia de diseño, basándose en los datos extraídos de las propias dimensiones de las cortinas reales. La distancia entre los puntos de alimentación de las antenas adyacentes es siempre de media longitud de onda, tanto horizontal como verticalmente. La distancia entre los dipolos y el reflector es de exactamente un cuarto de longitud de onda. El reflector se modeló introduciendo imágenes negativas (en el plano vertical) de los dipolos originales. La distancia entre los dipolos originales y sus respectivas imágenes es, por consiguiente, de media longitud de onda.

Los campos eléctrico y magnético cercanos se evaluaron en la dirección del máximo del diagrama de emisión (pues se observó que el campo en la dirección de los lóbulos laterales era notablemente inferior). Los campos se determinaron para elevaciones de $z = 2$ m, a fin de evaluar los riesgos de exposición del personal de la estación de radiodifusión que puede caminar por el campo de la antenna, y de $z = 5$ m para la población en general, teniendo en cuenta a las personas que viven en viviendas de dos plantas.

FIGURA 10

Vector de Poynting «equivalente» de la antenna HRS 4/4/1 cuando los dipolos están alimentados por a) corrientes idénticas y b) tensiones idénticas, y datos experimentales (curva de puntos)



BT.1698-10

Los resultados de los análisis se compararon en primer lugar con los resultados para una antenna HRS 4/4/1. La frecuencia de funcionamiento de la antenna fue 15,245 MHz y la potencia de alimentación 500 kW. La Fig. 10a) muestra los resultados para el vector de Poynting «equivalente», cuando se supone que los dipolos están alimentados por corrientes idénticas. La Fig. 10b) muestra los mismos resultados pero considerando que los dipolos están alimentados por tensiones idénticas junto con los datos medidos para $z = 2$ m. La similitud entre los datos teóricos y experimentales es bastante elevada. Es evidente que alimentando la antenna con tensiones iguales se obtiene una mejor predicción del campo real, en particular cerca de la depresión del gráfico a una distancia de 70 m de la antenna.

4 Conclusiones

Se han investigado teóricamente los campos eléctrico y magnético cercanos en las proximidades de antenas de cortina transmisoras de alta potencia en ondas decamétricas. También se han determinado las zonas de seguridad para los seres humanos en las proximidades de esas antenas. Los resultados obtenidos en el cálculo de los campos cercanos de las antenas de cortina se presentan utilizando una teoría rigurosa y concuerdan en gran medida con los datos experimentales publicados en otros textos.

Adjunto 2 al Anexo 1

Comparaciones entre predicciones y mediciones

1 Introducción

Distintos miembros del personal han llevado a cabo simulaciones y mediciones de forma independiente, para evitar influencias recíprocas en los trabajos y en los resultados.

El sistema de antena sólo ha sido parcialmente simulado por ser particularmente complejo (véase el modelo de antena en el § 1.1).

Las mediciones y predicciones se realizaron sobre un sistema de antenas, representado en las Figs. 11 y 12, capaz de funcionar correctamente en las bandas de onda corta. Las comparaciones se realizaron a 13 MHz y 18 MHz.

FIGURA 11

Ejemplo de sistema de antenas en ondas decamétricas



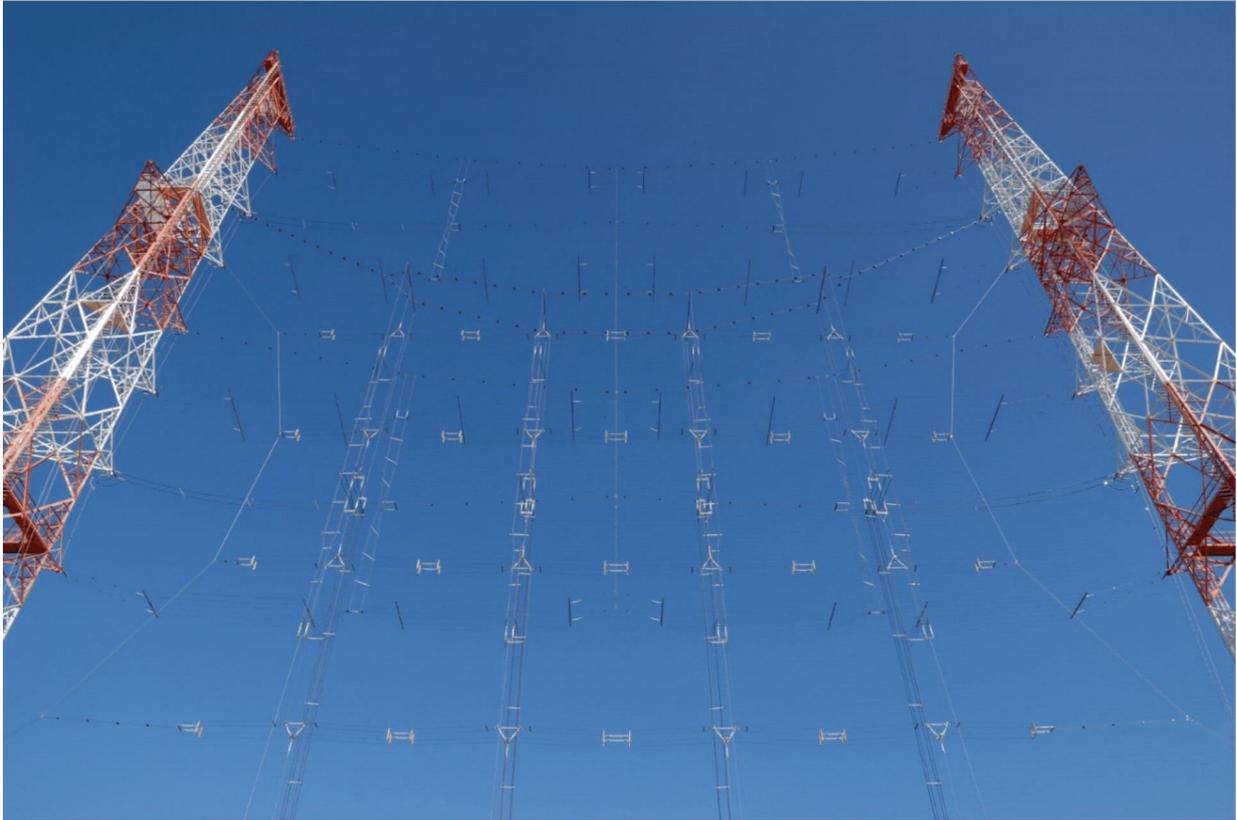
BT.1698-11

1.1 Modelo utilizado para el sistema de antenas

El sistema de antenas, mostrado en la Fig. 12, está constituido por un conjunto de 16 dipolos plegados con polarización horizontal situados frente a un reflector constituido por una red de hilos. Los dipolos están alimentados por líneas bifilares que constituyen una red de adaptación de impedancia compleja; todas las líneas bifilares de la red de adaptación de impedancia, representadas en la Fig. 10, son principalmente verticales (sentido ortogonal a los dipolos); algunas líneas horizontales son relativamente cortas y ortogonales tanto a los dipolos como a los alimentadores a lo largo de la dirección de propagación. En la base de la antena se encuentran otras líneas bifilares utilizadas para dividir la potencia de RF entre las cuatro «columnas» de dipolos.

FIGURA 12

Vista detallada de los elementos de radiación y parte de la red de adaptación



BT.1698-12

Para simplificar el modelo y evitar detalles innecesarios que alargarían demasiado el tiempo de cálculo, todo el sistema debe modelarse como un sencillo sistema de 16 dipolos, representado en la Fig. 13, en el que cada uno de los dipolos es alimentado por su propio generador de tensión adecuadamente desfasado con respecto a los demás y sin necesidad de modular la red de adaptación/alimentación. Además, cada dipolo plegado, compuesto por dos hilos paralelos plegados en los bordes, se ha modelado como un solo dipolo plegado de hilo, de sección representativa adecuada para obtener un valor de impedancia idéntico.

Por último, cada dipolo aparece representado por 24 segmentos, cada uno de una longitud no superior a $\lambda/20$, según se indica en la Fig. 14.

1.2 Ventajas y limitaciones del modelo del sistema de antenas

La ventaja más importante es la extrema sencillez del modelo realizado, en comparación con la complejidad del sistema de antenas real. Gracias a este modelo es posible lograr un tiempo de cálculo relativamente bajo.

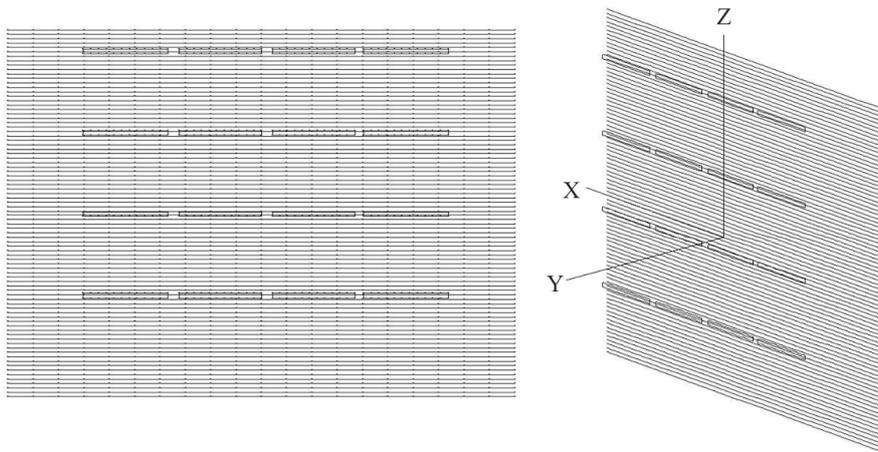
Otra ventaja es la posibilidad de ajustar fácilmente el modelo, si es necesario, a fin de representar más adecuadamente el sistema real. De hecho, generalmente el resultado de una primera comparación entre las simulaciones y las mediciones representan una buena base para realizar algunos ajustes en el primer modelo. La limitación más importante en el sencillo modelo adoptado es la imposibilidad de tener en cuenta correctamente la contribución de la compleja red de adaptación/alimentación a las componentes x, y, z de los campos. De hecho, una cierta cantidad de potencia es radiada por las líneas de adaptación bifilares que funcionan en régimen de onda estacionaria. Por esta razón, no aparece la

componente vertical del campo E (componente z), así como la componente horizontal en la dirección de propagación (componente y), salvo en algunos casos en que los valores son bastante bajos; puede observarse un comportamiento similar para la componente x del campo H. Ello se debe a que la predicción se realizó sin considerar los radiadores verticales y los radiadores en la dirección de propagación. Por el contrario, en los resultados de la medición aparecen ambas componentes del campo E, la vertical (z) y la horizontal (y), así como la componente horizontal (x) del campo H, lo que provoca algunos problemas para realizar una comparación directa. Lo más razonable es considerar que estas dos componentes son generadas por la cantidad de potencia que no llega a los sistemas de dipolos. Su contribución al campo medido debe considerarse dentro de la componente horizontal (x) en el resultado de la simulación. En otras palabras, la contribución horizontal (x) resultante de la simulación debe compararse con el resultado global de las mediciones, obtenido como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las contribuciones medidas en los ejes x, y, z.

FIGURA 13

Modelo del sistema de dipolos y su orientación en el sistema triaxial X, Y, Z

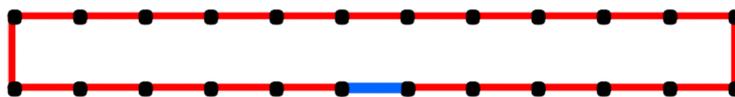
Cada dipolo está alimentado por su propio generador de tensión, en fase con todos los demás. Las contribuciones E_x , E_y , E_z , H_x , H_y , H_z de los campos E y H en el punto de evaluación tienen la misma orientación que los ejes X, Y Z



BT.1698-13

FIGURA 14

Modelo de dipolo simple. El dipolo aparece representado por 24 segmentos, cada uno de una longitud inferior a $\lambda/20$. La excitación se aplica en el centro del brazo superior o inferior, en el punto medio del segmento central



BT.1698-14

2 Comparación entre predicciones y mediciones

2.1 Análisis numérico de estructuras filiformes: Ejemplo

2.1.1 Predicciones

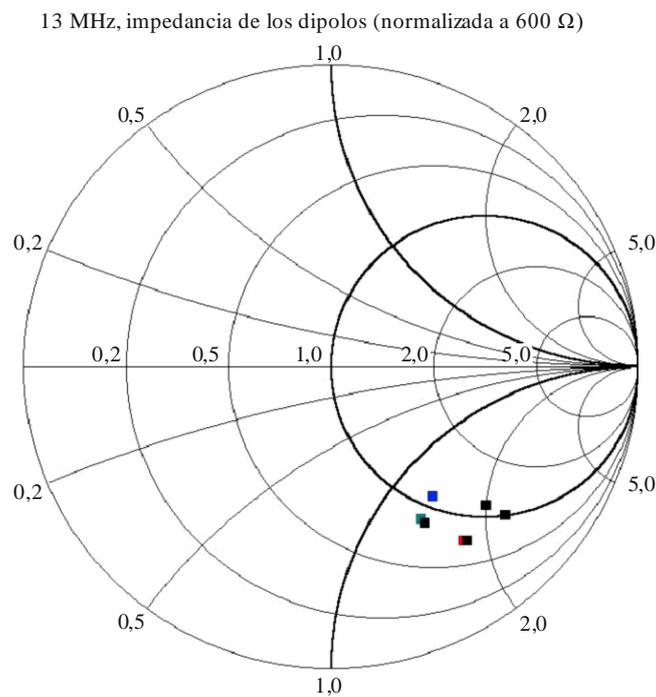
2.1.1.1 Notas sobre el modelo

Para ajustar mejor el modelo antes descrito al sistema real de antenas es necesario conocer la cantidad exacta de potencia a la entrada de cada dipolo, teniendo en cuenta las pérdidas en la línea de transmisión.

Para aplicar la tensión adecuada a cada dipolo, se ha calculado la impedancia de entrada de cada uno de estos dipolos. Los valores correspondientes se ilustran en la Fig. 15.

FIGURA 15

Impedancia de entrada de los dipolos obtenida de la simulación, normalizada a 600 Ω .
Obsérvese la pequeña, pero no inexistente, dispersión de los valores de resistencia cerca de 600 Ω



BT.1698-15

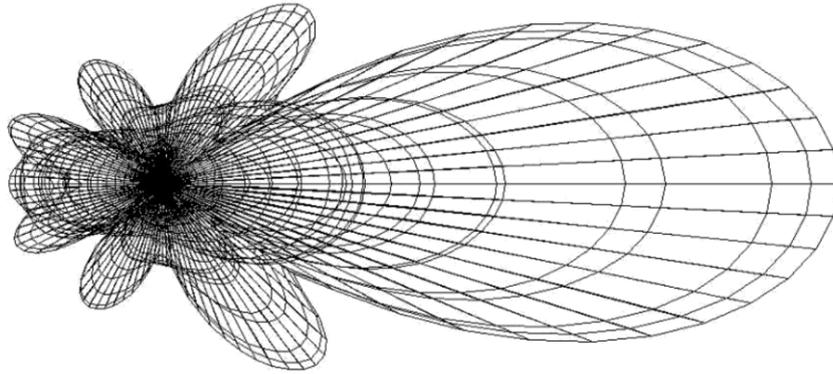
A continuación, para cada dipolo se ha adoptado un valor común de resistencia igual a 600 Ω , que es el valor medio obtenido de la simulación. Cabe señalar que esta decisión puede causar imprecisiones en los resultados de la predicción.

A fin de compensar la desadaptación, debida fundamentalmente a la componente reactiva y la consiguiente reflexión de potencia hacia el transmisor, se ha considerado un aumento adecuado de potencia. En consecuencia, se aplicó una tensión adecuada a cada dipolo.

2.1.1.2 Evaluaciones de campo lejano

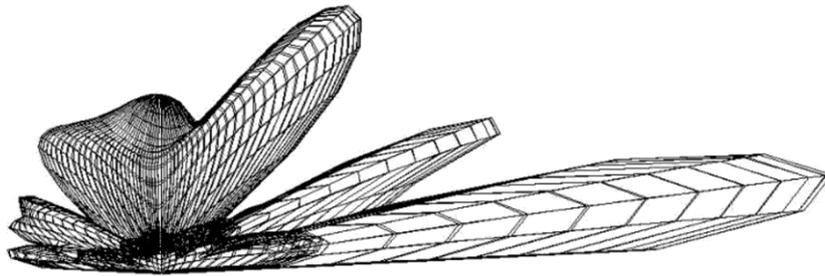
Para comparar más adecuadamente el comportamiento del modelo con antenas reales, indicado en las Figs. 11 y 12, se calcularon los diagramas de radiación. Los resultados se muestran en la Fig. 16 (plano horizontal), en la Fig. 17 (plano vertical) y en la Fig. 18 (vista frontal).

FIGURA 16
Diagrama de radiación en el plano horizontal



BT.1698-16

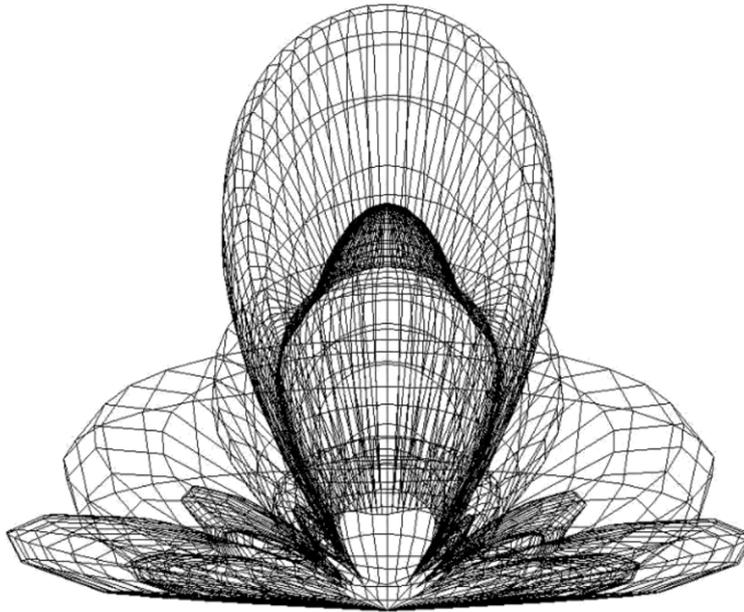
FIGURA 17
Diagrama de radiación en el plano vertical



BT.1698-17

FIGURA 18

Diagrama de radiación, vista frontal

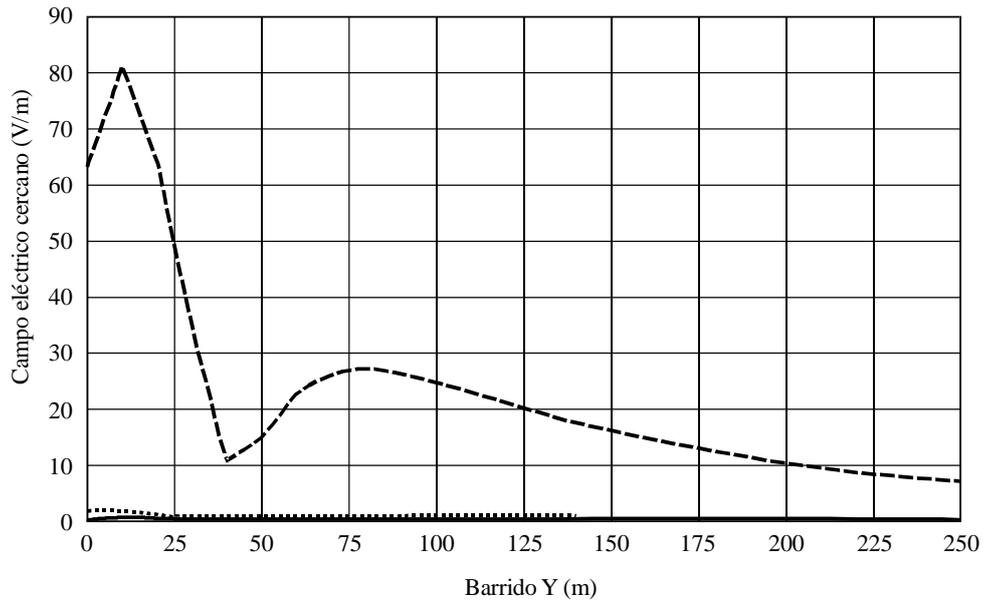


BT.1698-18

2.1.1.3 Resultados de la predicción de la intensidad de campo en la zona cercana

Se realizó una predicción calculando las componentes x , y , z de los campos E y H en dirección de la máxima ganancia de antena (eje Y) a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo (eje $Z = 2$). Los valores calculados se representan en la Fig. 19 (campo E) y en la Fig. 20 (campo H). La fuerte influencia del terreno tanto en las evaluaciones como en las mediciones puede introducir una diferencia adicional entre los dos resultados. Para mostrar la gran influencia del terreno, los valores de los campos E y H también se han calculado variando la altura del punto de evaluación sobre el nivel del suelo (eje Z) desde 0 hasta 9 m y para una distancia fija de 60 m ($Y = 60$). El comportamiento se representa gráficamente en la Fig. 21 (campo E) y en la Fig. 22 (campo H).

FIGURA 19
Intensidad del campo E calculada en la zona cercana



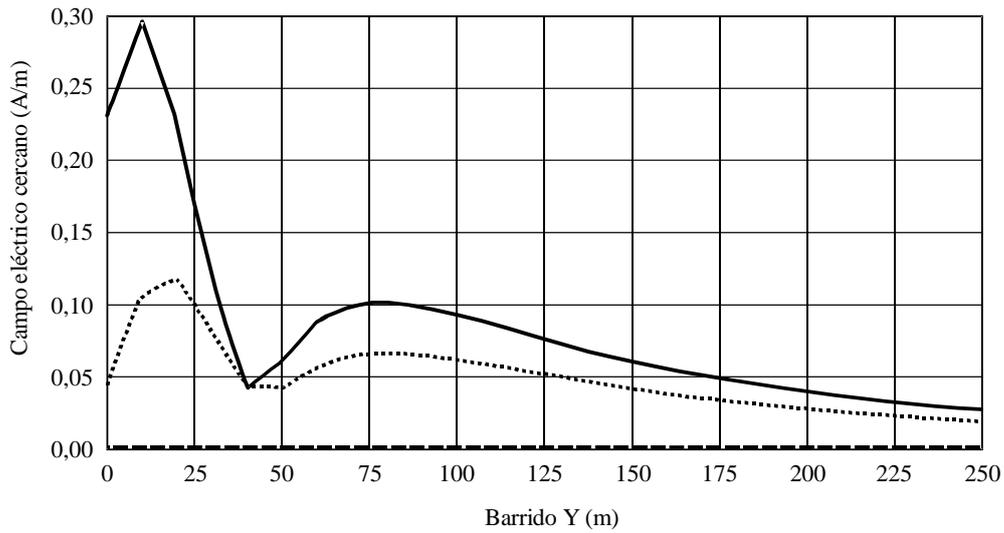
13 MHz, campo eléctrico cercano en función de las distancia. Potencia del transmisor: 225 kW en el conector de antena. Altura: 2 m sobre el nivel del suelo

- Campo eléctrico cercano, mag (X), barrido Y, constantes: X = 0, Z =2; CORT13
- Campo eléctrico cercano, mag (Y), barrido Y, constantes: X = 0, Z =2; CORT13
- Campo eléctrico cercano, mag (Z), barrido Y, constantes: X = 0, Z =2; CORT13

BT.1698-19

La contribución más importante es la componente x. En el eje horizontal se representa la distancia (m) desde la antena (barrido Y). Z se fija a un valor de 2 m (altura sobre el nivel del suelo). La intensidad de las componentes del campo E se representa en V/m en el eje vertical.

FIGURA 20
Intensidad del campo H calculada en la zona cercana



13 MHz, campo magnético cercano en función de la distancia. Potencia del transmisor: 225 kW en el conector de antena. Altura: 2 m sobre el nivel del suelo

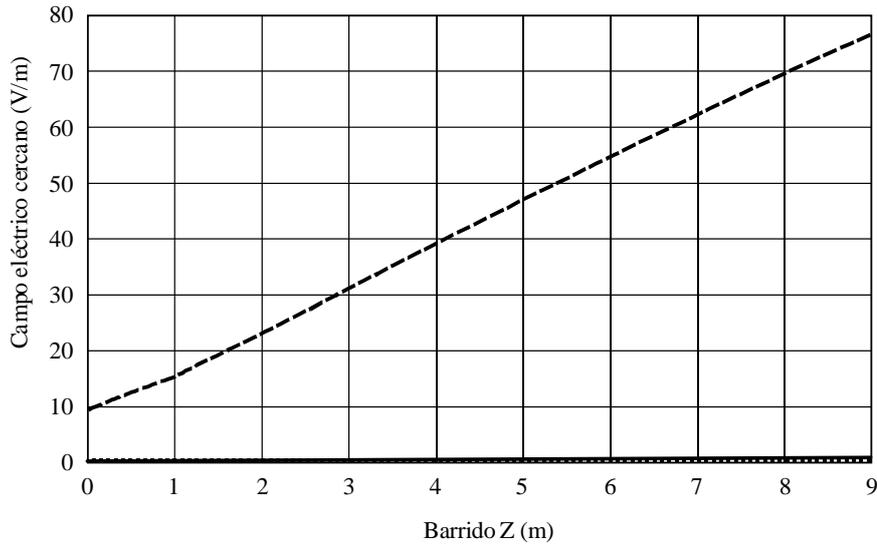
- Campo electromagnético cercano, mag (X), barrido Y, constantes $X = 0$, $Z = 2$; CORT13
- Campo electromagnético cercano, mag (Y), barrido Y, constantes $X = 0$, $Z = 2$; CORT13
- Campo electromagnético cercano, mag (Z), barrido Y, constantes $X = 0$, $Z = 2$; CORT13

BT.1698-20

La contribución más importante es la componente y. La componente z es menor y la componente x es 0. En el eje horizontal se representa la distancia en metros desde la antena (barrido Y). Z se fija a un valor de 2 m (altura sobre el nivel del suelo). La intensidad de las componentes del campo H se representa en A/m en el eje vertical.

FIGURA 21

Intensidad del campo E calculada a una distancia de 60 m desde la antena (Y = 60) a distintas alturas entre 0 y 9 m (barrido Z)



13 MHz, campo eléctrico cercano en función de la altura, a unos 60 m desde la antena.
Potencia del transmisor: 225 kW en el conector de antena.

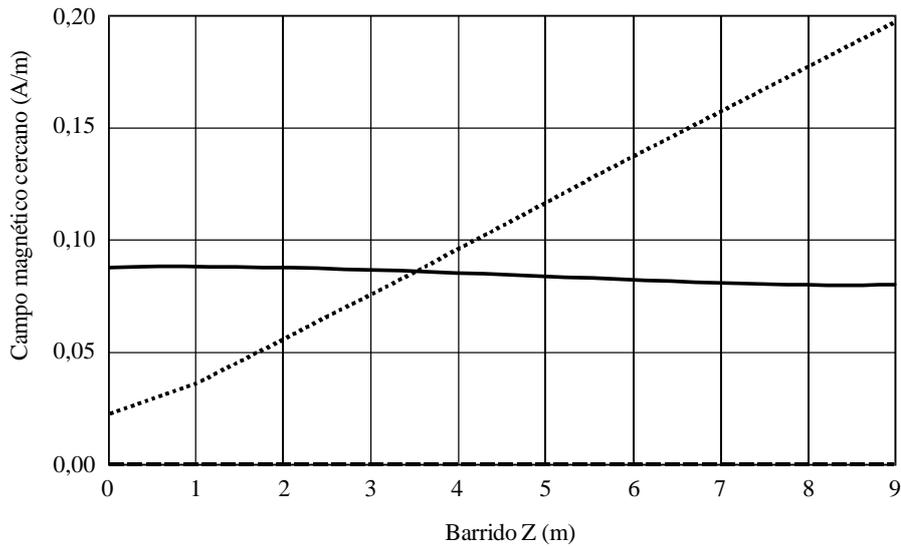
- Campo eléctrico cercano, mag (X), barrido Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT13
- Campo eléctrico cercano, mag (Y), barrido Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT13
- Campo eléctrico cercano, mag (Z), barrido Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT13

BT.1698-21

La estrecha relación entre los valores de E y la altura (sólo está presente la componente x del campo E) es evidente.

FIGURA 22

Intensidad del campo H calculada a una distancia de 60 m desde la antena ($Y = 60$) a distintas alturas entre 0 y 9 m (barrido Z)



13 MHz, campo magnético cercano en función de la altura, a unos 60 m desde la antena.
Potencia del transmisor: 225 kW en el conector de antena

- Campo magnético cercano, mag (X), barrido Z, constantes: $X = 0$, $Y = 60$; CORT13
- Campo magnético cercano, mag (Y), barrido Z, constantes: $X = 0$, $Y = 60$; CORT13
- Campo magnético cercano, mag (Z), barrido Z, constantes: $X = 0$, $Y = 60$; CORT13

BT.1698-22

La estrecha relación entre los valores de H y la altura (están presentes las componentes z e y del campo H y el valor de la componente y es bastante constante) es igualmente evidente.

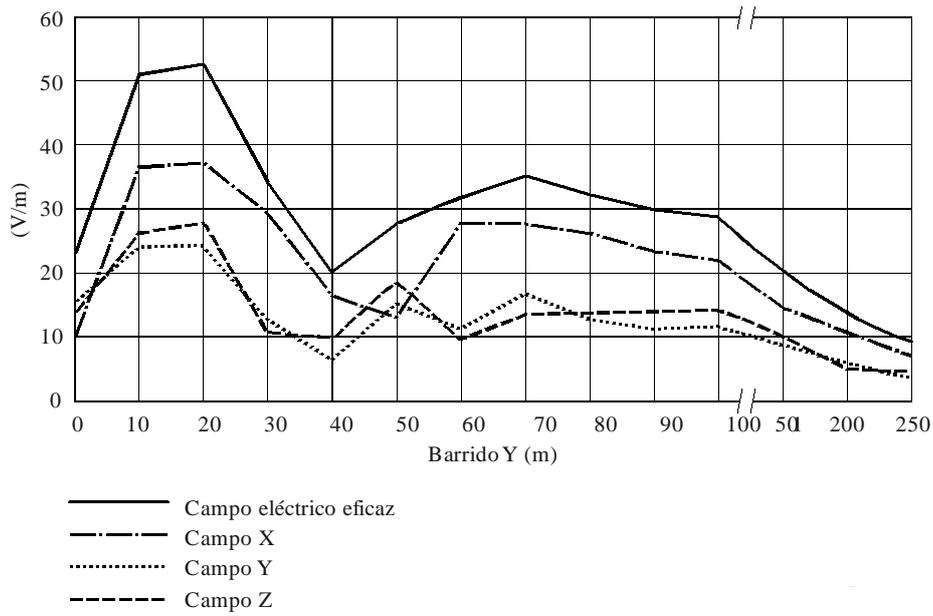
2.1.2 Mediciones

Se han realizado mediciones utilizando un medidor de intensidad de campo de banda ancha instalado sobre una carretilla dieléctrica desplazada por un operador situado lejos del emplazamiento de la antena. De esta forma se evita cualquier tipo de perturbación en el campo E/H.

2.1.2.1 Resultados de las mediciones

Los valores medidos se presentan en la Fig. 23 (campo E) y en la Fig. 24 (campo H). Las Figs. 23 y 24 pueden compararse directamente con las Figs. 19 y 20, respectivamente.

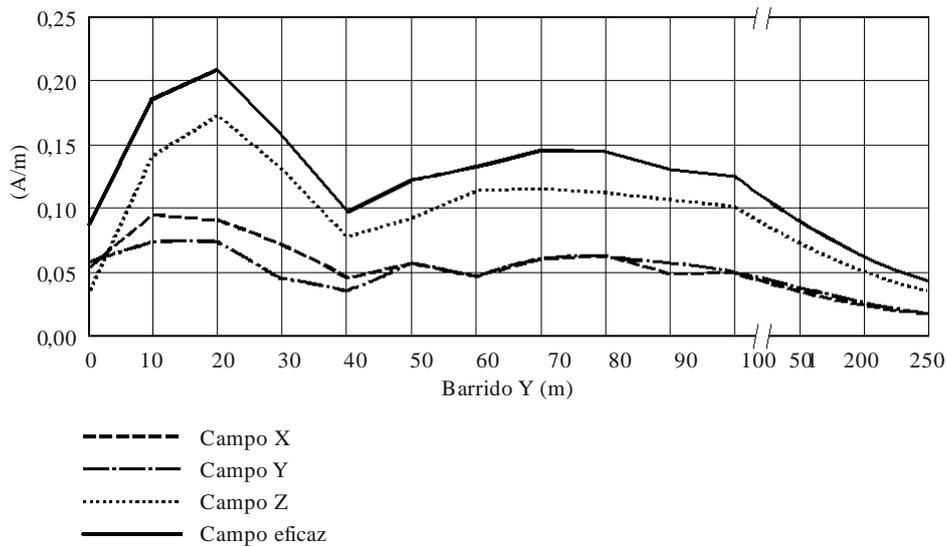
FIGURA 23
Campo E medido



BT.1698-23

En el eje horizontal se representa la distancia en metros desde la antena (barrido Y). La intensidad de las componentes del campo E se representa en V/m en el eje vertical. Las tres componentes x, y, z del campo E están presentes y la línea superior representa el valor total.

FIGURA 24
Campo H medido



BT.1698-24

En el eje horizontal se representa la distancia en metros desde la antena (barrido Y). La intensidad de las componentes del campo H se representa en A/m en el eje vertical. Las tres componentes x, y, z del campo H están presentes y la línea superior representa el valor total.

2.2 18 MHz

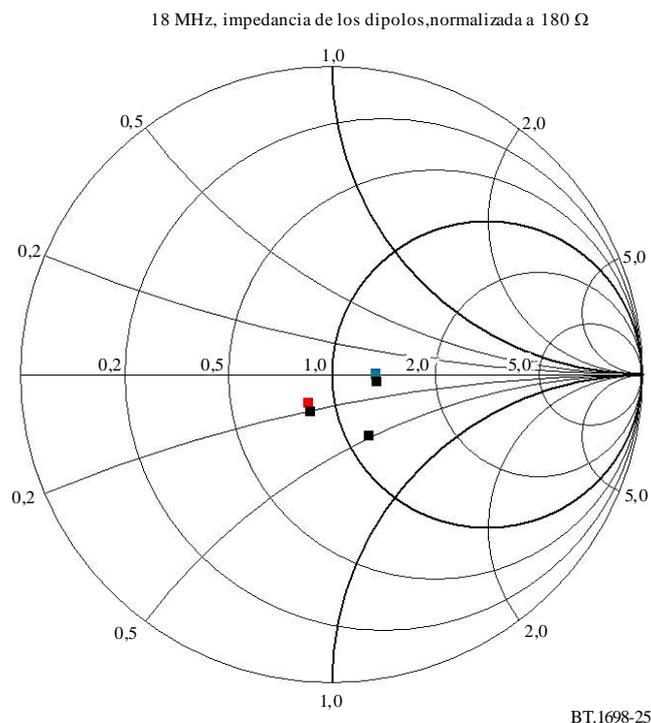
2.2.1 Predicciones

2.2.1.1 Notas sobre el modelo

Para ajustar mejor el modelo antes descrito al sistema real de antenas, es necesario conocer la cantidad exacta de potencia a la entrada de cada dipolo, teniendo en cuenta las pérdidas en la línea de transmisión y las pérdidas debidas a la desadaptación.

Para aplicar el valor de tensión adecuada en cada dipolo, en la simulación se calcula la impedancia de entrada de cada uno de los dipolos y los valores se representan en la Fig. 25.

FIGURA 25
Impedancia de entrada de los dipolos, normalizada a 180 Ω



A continuación, para cada dipolo se ha adoptado un valor común de resistencia igual a 180 Ω , ya que éste es el valor medio obtenido de la simulación. Obsérvese que esta decisión puede ser causa de imprecisión en los resultados.

Gracias al bajo valor de las componentes reactivas de la impedancia de entrada compleja, no sería necesario realizar ningún ajuste en la potencia del transmisor para compensar las pérdidas de potencia debidas a la desadaptación y la consiguiente reflexión entre el transmisor y la antena.

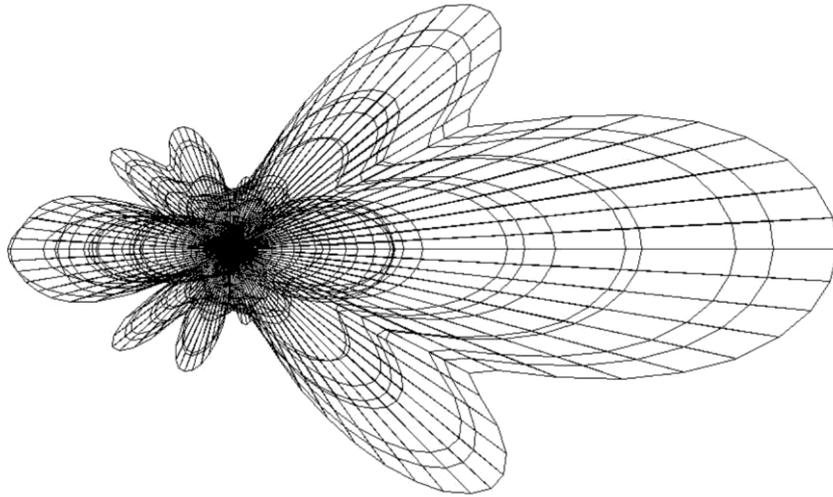
Obsérvese la pequeña, pero no inexistente, dispersión de los valores de la resistencia cerca de 180 Ω y la ausencia notable de componentes reactivas.

2.2.1.2 Evaluaciones del campo lejano

Para comparar mejor el comportamiento del modelo con las antenas reales, indicado en las Figs. 11 y 12, se han calculado los diagramas de radiación y los resultados se muestran en la Fig. 26 (plano horizontal), en la Fig. 27 (plano vertical) y en la Fig. 28 (vista frontal).

FIGURA 26

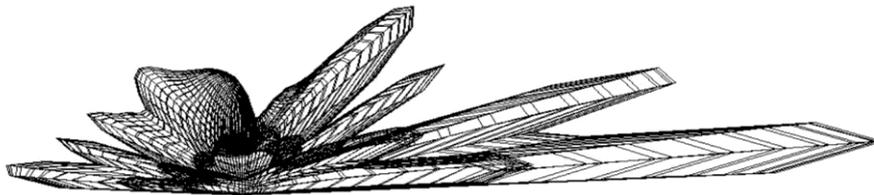
Diagrama de radiación en el plano horizontal



BT.1698-26

FIGURA 27

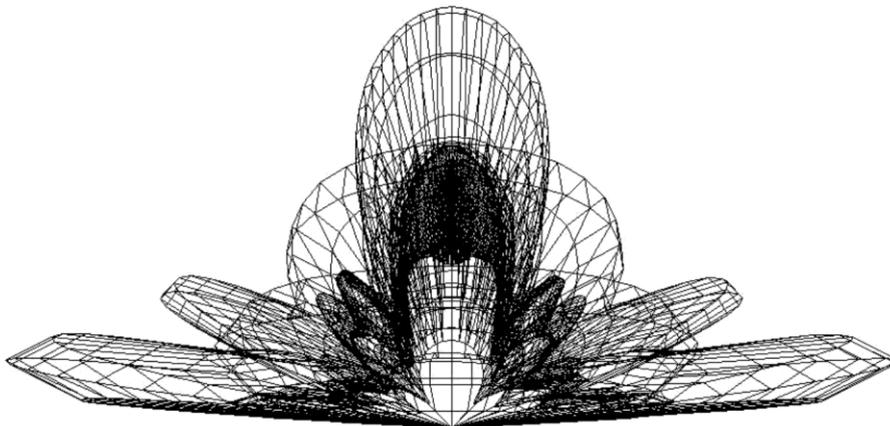
Diagrama de radiación en el plano vertical



BT.1698-27

FIGURA 28

Diagrama de radiación, vista frontal



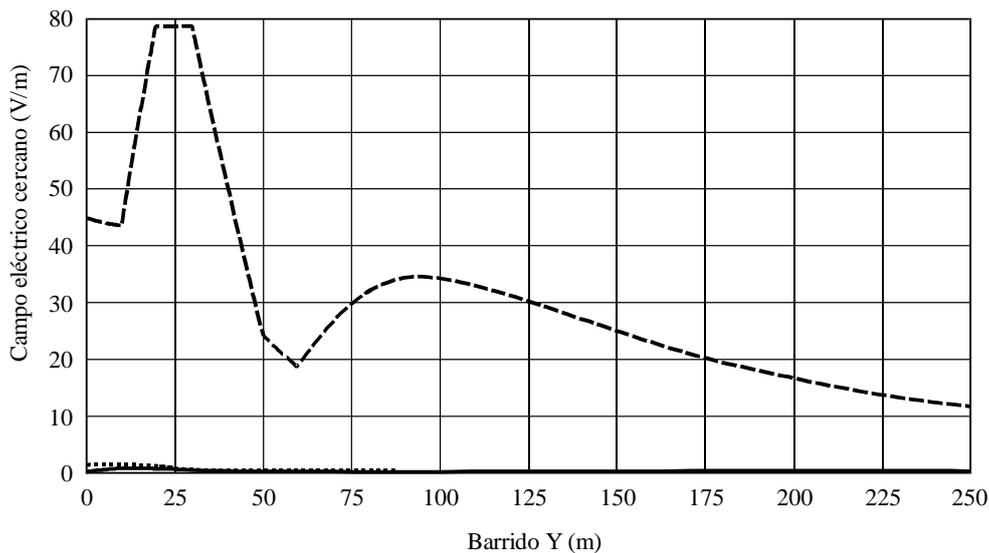
BT.1698-28

2.2.1.3 Resultados de la predicción de la intensidad de campo en la zona cercana

Se realizó una predicción calculando las componentes x, y, z de los campos E y H en dirección de la máxima ganancia de antena (eje Y) a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo (eje Z = 2). Los valores calculados se representan en la Fig. 29 (campo E) y en la Fig. 30 (campo H). La fuerte influencia del terreno tanto en las evaluaciones como en las mediciones puede introducir una diferencia adicional entre los dos resultados. Para demostrar la gran influencia del terreno, los valores de los campos E y H también se han calculado variando la altura del punto de evaluación sobre el nivel del suelo (eje Z) desde 0 hasta 9 m para una distancia fija de 60 m (Y = 60). El comportamiento se representa en la Fig. 31 (campo E) y en la Fig. 32 (campo H).

FIGURA 29

Intensidad del campo eléctrico E calculada en la zona cercana



18 MHz, campo eléctrico cercano en función de la distancia. Potencia del transmisor: 200 kW en el conector de antena. Altura: 2 m sobre el nivel del suelo

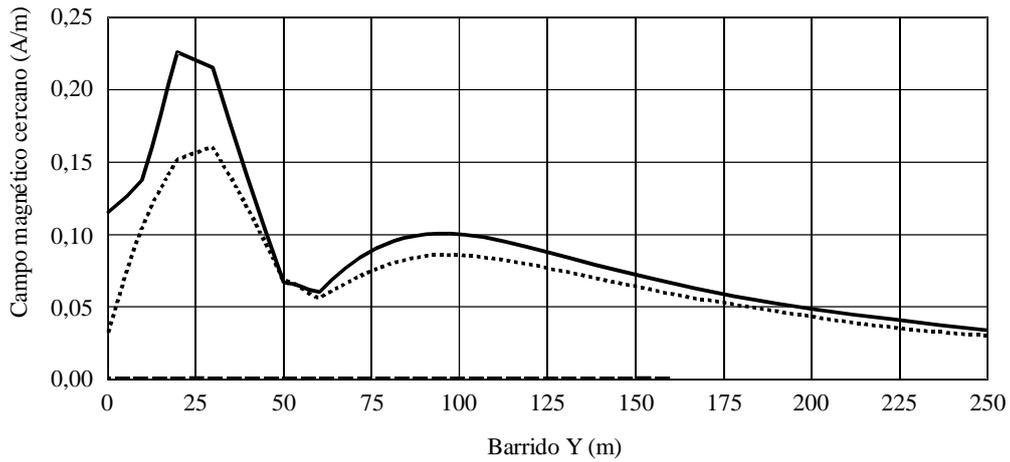
- Campo eléctrico cercano, mag (X), barrido Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18
- Campo eléctrico cercano, mag (Y), barrido Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18
- Campo eléctrico cercano, mag (Z), barrido Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18

BT.1698-29

La contribución más importante es la componente x. En el eje horizontal se representa la distancia en metros desde la antena (barrido Y). Z se fija a un valor de 2 m (altura sobre el nivel del suelo). La intensidad de las componentes del campo E se representa en V/m en el eje vertical.

FIGURA 30

Intensidad de campo magnético cercano H calculada en la zona cercana



18 MHz, campo magnético cercano en función de la distancia. Potencia del transmisor: 200 kW en el conector. Altura: 2 m sobre el nivel del suelo

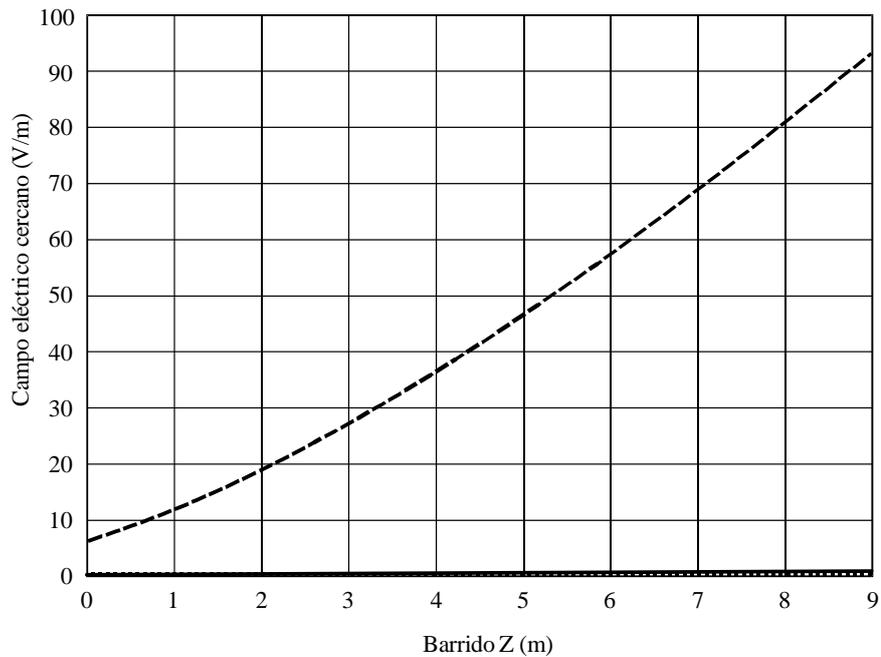
- Campo magnético cercano, mag (X), barrido Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18
- Campo magnético cercano, mag (Y), barrido Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18
- Campo magnético cercano, mag (Z), barrido Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18

BT.1698-30

La principal contribución es la de la componente y. La componente z es menor y la componente x toma el valor 0. En el eje horizontal se representa la distancia en metros desde la antena (barrido Y). Z se fija a un valor de 2 m (altura sobre el nivel del suelo). La intensidad de las componentes del campo H se representa en A/m sobre el eje vertical.

FIGURA 31

Intensidad del campo E calculada a una distancia de 60 m desde la antena ($Y = 60$) a distintas alturas entre 0 y 9 m (barrido Z)



18 MHz, campo eléctrico cercano en función de la altura a unos 60 m desde la antena.
Potencia del transmisor: 200 kW en el conector de antena

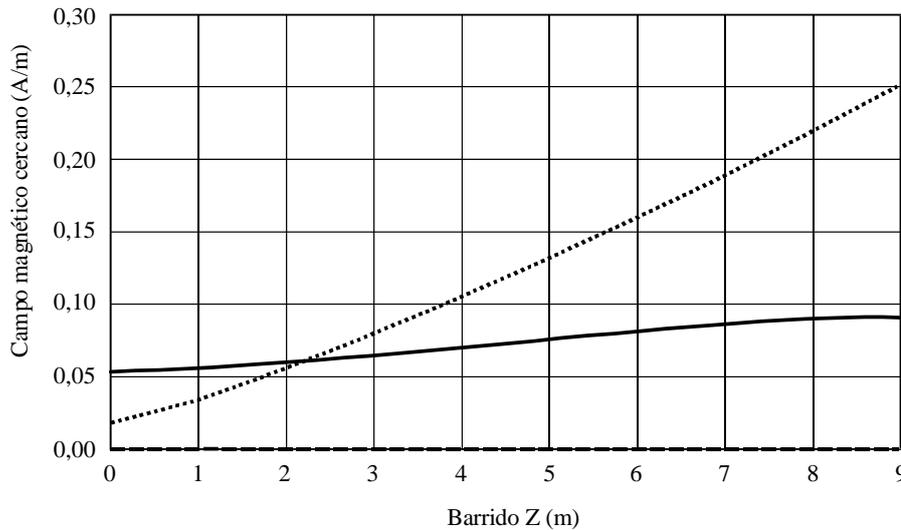
- Campo eléctrico cercano, mag (X), barrido Z, constantes: $X = 0$, $Y = 60$; CORT18
- Campo eléctrico cercano, mag (Y), barrido Z, constantes: $X = 0$, $Y = 60$; CORT18
- Campo eléctrico cercano, mag (Z), barrido Z, constantes: $X = 0$, $Y = 60$; CORT18

BT.1698-31

La estrecha relación entre los valores de E y la altura (sólo se representa la componente x del campo E) es evidente.

FIGURE 32

Intensidad del campo H calculada a una distancia de 60 m desde la antena (Y = 60) a distintas alturas entre 0 y 9 m (barrido Z)



18 MHz, campo magnético cercano en función de la altura, a unos 60 m desde la antena .
Potencia del transmisor: 200 kW en el conector de la antena

- Campo magnético cercano, mag (X), barrido Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT18
- Campo magnético cercano, mag (Y), barrido Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT18
- Campo magnético cercano, mag (Z), barrido Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT18

BT.1698-32

La estrecha relación entre los valores de H y la altura (están presentes tanto la componente z como la componente y del campo H, el valor de la componente y es bastante constante) es evidente.

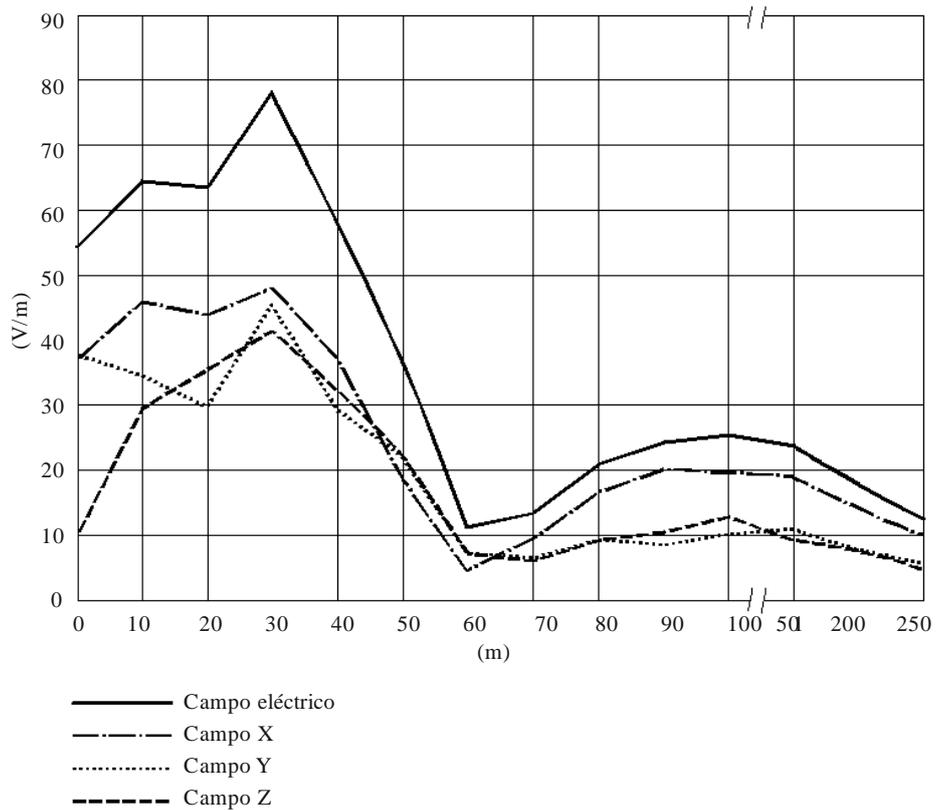
2.2.2 Mediciones

Se han realizado mediciones utilizando un medidor de intensidad de campo de banda ancha instalado en una carreta dieléctrica desplazada por un operador situado lejos del emplazamiento de la antena. De esta forma se evita cualquier tipo de perturbación sobre los campos E/H.

2.2.2.1 Resultados de las mediciones

Los valores medidos se representan en la Fig. 33 (campo E) y en la Fig. 34 (campo H). Las Figs. 33 y 34 pueden compararse directamente con las Figs. 28 y 29, respectivamente.

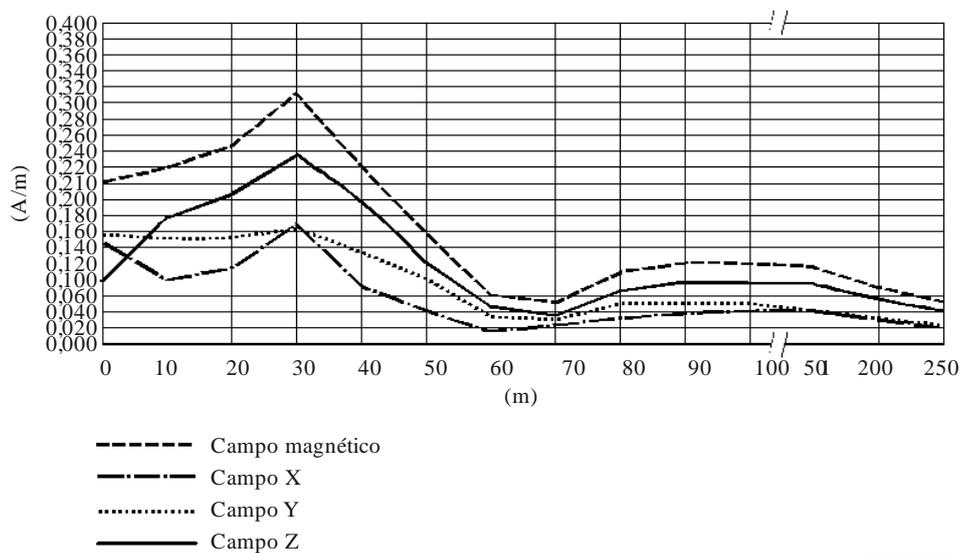
FIGURA 33
Intensidad del campo E medida en la zona cercana



BT.1698-33

En el eje horizontal se representa la distancia en metros desde la antena (barrido Y). La intensidad de las componentes del campo E se representa en V/m en el eje vertical. Las tres componentes x, y, z del campo E están presentes y la línea superior representa el valor total.

FIGURA 34
Intensidad del campo H medida en la zona cercana



BT.1698-34

En el eje horizontal se representa la distancia en metros desde la antena (barrido Y). La intensidad de las componentes del campo H se representan en A/m en el eje vertical. Las tres componentes x, y, z del campo H están presentes y la línea superior representa el valor total.

2.3 Comparación entre mediciones y predicciones de la intensidad de campo en la zona cercana

2.3.1 13 MHz

A una distancia inferior a 40 m, en la predicción se han obtenido valores, tanto para el campo E como para el campo H, superiores a los medidos; los máximos valores de E y H se encontraron a distancias comprendidas entre 10 y 20 m desde la antena, tanto en los resultados de la simulación como en las mediciones.

En los valores previsto y medido hay un «mínimo» evidente a 40 m de la antena, más acusado en la predicción que en la medición.

El segundo «máximo» alcanza su cresta, en ambos casos, a 75 m de la antena; en este caso los valores obtenidos en las simulaciones son inferiores a los valores obtenidos en las mediciones.

A grandes distancias, 250 m de la antena, todos los campos alcanzaron prácticamente los mismos valores en la predicción y en la medición.

2.3.2 18 MHz

A una distancia inferior a 40 m, en la predicción se obtuvieron valores, tanto para el campo E como para el campo H, superiores a los medidos; los máximos valores de E y H aparecieron a distancias comprendidas entre 10 y 20 m desde la antena, tanto en los resultados de la simulación como en las mediciones.

Un segundo «máximo» para los campos E y H se alcanza a 100 m, tanto en la predicción como en la medición, siendo menor el valor para el campo E medido. A una distancia superior a 60 m desde la antena el campo H toma el mismo valor tanto en la predicción como en la medición.

3 Conclusiones

La comparación entre los valores medidos y previstos de los campos E y H, tanto a 13 MHz como a 18 MHz, arroja resultados interesantes.

Los valores en general no coinciden plenamente, como era obvio esperar; sin embargo, no presentan diferencias importantes entre ellos si se comparan con la incertidumbre introducida por la instrumentación, la incertidumbre introducida por la planicidad de la superficie de la Tierra cerca de la antena (no tenida en cuenta en las simulaciones aunque sea evidente la fuerte dependencia de la intensidad de campo con la altura del punto de medición) y la sencillez impuesta por el modelo. Las diferencias son mayores, hasta el 50%, en las proximidades de la antena (el primer máximo aparece a unos 10 m) y disminuye con la distancia; a 250 m las diferencias son muy pequeñas.

Los motivos de esas diferencias deben buscarse en las dificultades de realizar mediciones de campo cercano, en la incertidumbre inherente introducida por la instrumentación, en la sencillez del modelo, en la presencia de algunos objetos cerca de la antena (estructuras metálicas, las dos celosías que soportan los dipolos y la red de adaptación) que no han sido tenidos en cuenta en el modelo, así como la red de adaptación y sus emisiones. Por último, el terreno ha sido modelado con sus valores eléctricos típicos.

A fin de realizar predicciones relativas a los campos E y H utilizando un modelo, se recomienda lo siguiente:

Modelo de antena: las dimensiones físicas de los elementos radiante y pasivo deben determinarse cuidadosamente así como la impedancia de entrada compleja del sistema. Para simplificar un sistema complejo, es decir un sistema de radiadores, puede ser conveniente sustituir la red de adaptación y alimentación por un número igual de generadores de tensión aplicados a la entrada de cada radiador. Si no se considera la red de adaptación, es necesario compensar la subsiguiente desadaptación entre generadores y radiadores introduciendo elementos de adaptación artificiales o redes sencillas, o ajustando la potencia asignada al transmisor. El resultado final es bastante insensible a la presencia de pequeñas desadaptaciones que no requieren modelado.

Subdivisión en segmentos: es suficiente representar un sistema de antenas de hilo con segmentos de longitud no superior a $\lambda/20$.

Modelo del terreno: es necesario proporcionar los valores exactos de la permitividad y la conductividad, especialmente en el caso del campo E con polarización horizontal.

Potencia del transmisor: es importante tener en cuenta las pérdidas introducidas por las líneas de transmisión, la red de adaptación, la resistencia de las conexiones y las desadaptaciones de la carga. En algunos casos, conviene ajustar artificialmente el valor exacto de la potencia para tener en cuenta las diversas causas de las pérdidas sin complicar demasiado el modelo del sistema de antenas.

Altura de los puntos de medición sobre el nivel del suelo: en muchos casos, este parámetro es muy importante si se va a realizar una comparación entre mediciones y predicciones. De hecho, puede observarse en los valores de los campos una fuerte influencia de la altura y, si el terreno se modela como llano, pueden observarse grandes errores en la comparación con una medición. En todos los casos en que los radiadores se encuentran próximos al terreno y éste no es totalmente llano, los resultados de las predicciones deben considerarse con cierta prudencia.

Selección de código: la simulación basada en el método de momentos (MOM) parece útil y fácil de emplear en casos de antenas filiformes en las que se conocen perfectamente las características físicas y eléctricas. Es posible y bastante sencillo simplificar el modelo de acuerdo a un mínimo número de reglas sin perder precisión en los resultados.

Adjunto 3 al Anexo 1

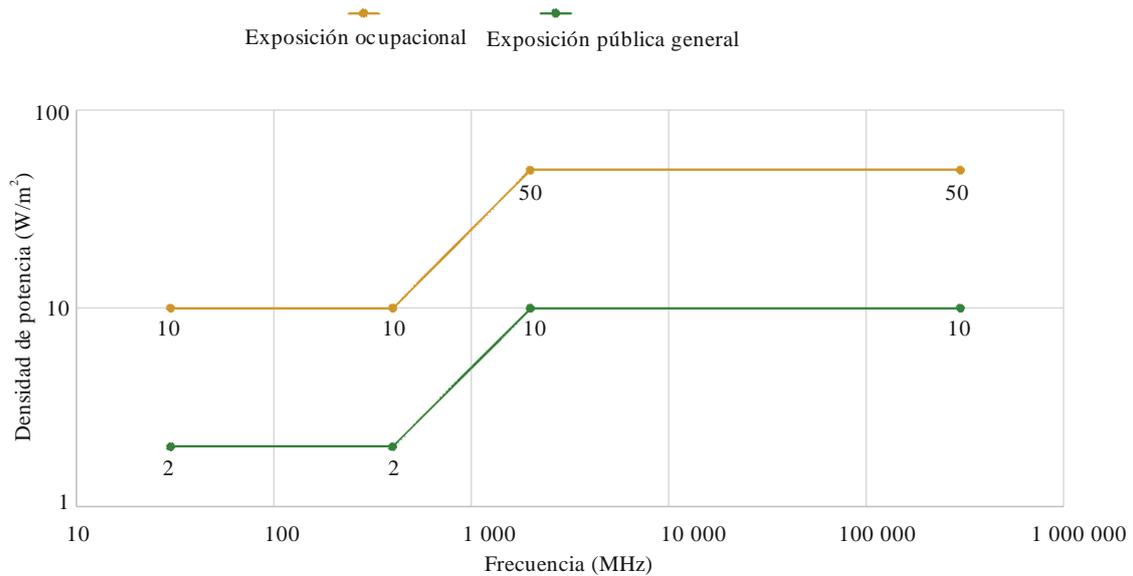
Límites y niveles internacionales

Tal y como se menciona en la introducción, no existe una única norma mundial que establezca límites en esta esfera. Sin embargo, tanto las directrices de la ICNIRP como la norma del IEEE aplican un enfoque similar. Los límites se establecen en términos de restricciones básicas (como la tasa de absorción específica), que son difíciles de medir en la práctica; a continuación, se determinan niveles de referencia adicionales en términos de intensidades de campo, que pueden medirse con mayor facilidad y utilizarse como herramienta auxiliar para determinar el cumplimiento.

El Apéndice I sobre límites de exposición de la Recomendación UIT-T K.91, relativa a la orientación para la valoración, la evaluación y el seguimiento de la exposición de las personas a los campos electromagnéticos de las radiofrecuencias, se basa en las directrices de la ICNIRP (2010 [2] y 2020 [1]), la norma C95.1-2019 [3] del IEEE y el Informe de 2021 de la Cuestión 7/2 del UIT-D. En dicho Apéndice se especifican las directrices de la ICNIRP (2010 y 2020) en vigor, se desarrollan los cuadros y las figuras de las directrices de la ICNIRP (2020), se detalla la norma C95.1-2019 del IEEE y se explica el fenómeno de exposición simultánea a múltiples fuentes.

FIGURA 35

Valores de densidad de potencia para exposiciones ocupacionales frente a exposiciones públicas generales a 30 MHz-300 GHz del Cuadro 5 de la ICNIRP (2020)



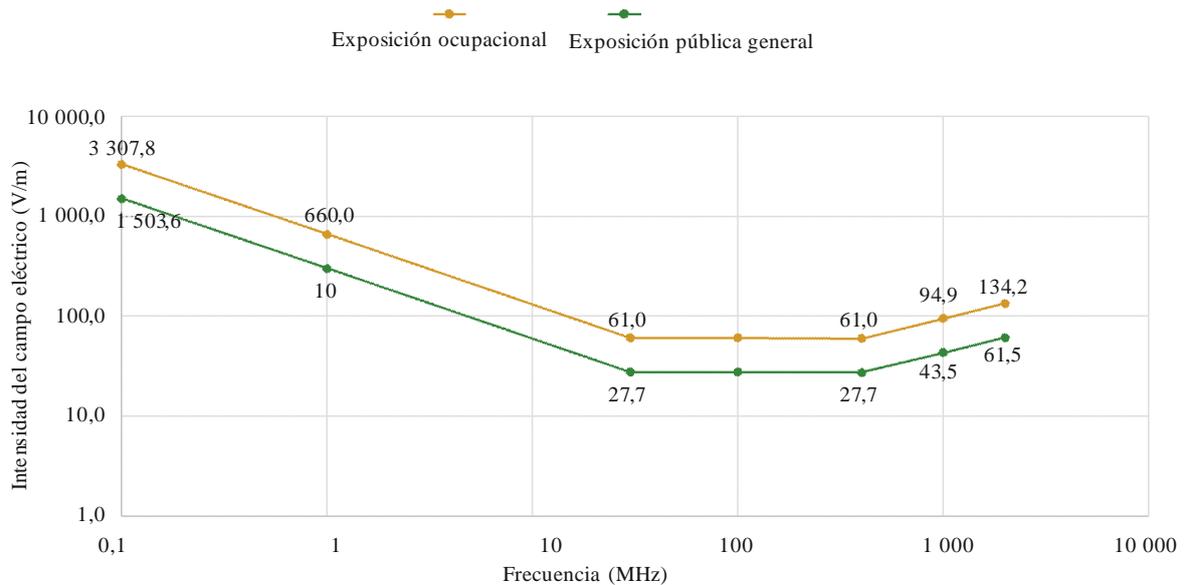
BT.1698-35

La anterior Fig. 35 y la siguiente Fig. 36² (véase el Capítulo 9 de la referencia [4], revisada en 2021) ilustran las diferencias entre los niveles de intensidad de campo y de densidad de potencia de la ICNIRP (2020) relativos a la exposición ocupacional y a la exposición pública general, promediadas durante 30 minutos y en todo el cuerpo. La relación potencia-densidad de 5 del Cuadro 5 de la ICNIRP (2020) (por ejemplo, de 30 a 400 MHz, relación de 50/10 vatios) da como resultado una relación V/m de $61,0/27,7 = 2,2 \approx \sqrt{5}$.

² Mazar 2016, Wiley «Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques» (revisado en 2021), Capítulo 9, Figuras 9.6 y 9.7. Véase asimismo la Figura I.1 de la Recomendación UIT-T K.91.

FIGURA 36

Comparación de los valores de intensidad de campo para la exposición ocupacional y pública general del Cuadro 5 de la ICNIRP (2020), a 0,1 MHz-2 000 MHz, promediada durante 30 minutos y en todo el cuerpo



BT.1698-36

En abril de 2022, la ICNIRP publicó una nueva declaración, titulada «A Description of ICNIRP's Independent, Best Practice System of Guidance on the Protection of People and the Environment from Exposure to Non Ionizing Radiation», en la que se describe el sistema de orientación independiente de la ICNIRP, basado en las mejores prácticas, para la protección de las personas y el medio ambiente frente a la exposición a radiaciones no ionizantes.

Adjunto 4 al Anexo 1

Más información sobre la modulación

1 Características de las emisiones radioeléctricas

El Reglamento de Radiocomunicaciones (RR) clasifica las emisiones de los transmisores radioeléctricos en función de los anchos de banda requeridos y de las características básicas y opcionales de la transmisión. La clasificación completa consta de nueve caracteres, pero sólo tres características básicas revisten importancia a la hora de realizar las consideraciones de seguridad en RF. Dichas características son las siguientes:

- tipo de modulación de la portadora principal Carácter 5
- naturaleza de las señales que modulan a la portadora principal Carácter 6
- tipo de información que se va a transmitir Carácter 7

En el Cuadro 2, basado en la información que aparece en el RR, se enumeran los distintos caracteres utilizados.

CUADRO 2

Caracteres, pertinentes para la radiodifusión, utilizados para definir la clase de emisión, conforme a la información incluida en el RR

Carácter 5 Tipo de modulación de la portadora principal		Carácter 6 Naturaleza de la(s) señal(es) que modula(n) a la portadora principal		Carácter 7 Tipo de información que se va a transmitir	
A	Modulación de amplitud: doble banda lateral	1	Un único canal con información analógica	E	Telefonía, incluida la radiodifusión sonora
R	Modulación de amplitud: banda lateral única, portadora de nivel reducido o variable	7	Dos o más canales con información cuantizada o digital	F	Televisión (vídeo)
J	Modulación de amplitud: banda lateral única, portadora suprimida	9	Dos o más canales con una mezcla de canales analógicos y digitales		
C	Modulación de amplitud: banda lateral residual				
X	Casos no previstos				

En el Cuadro 3 se detallan las clases de emisión más comunes para el servicio de radiodifusión.

CUADRO 3

Clases de emisión más comunes para el servicio de radiodifusión

Sistema de radiodifusión	Descripción de la emisión	Clase de emisión
Imágenes de televisión analógica	VSB	C3F
Sonido de televisión analógica	Sonido FM o AM	F3E o A3E
ATSC	VSB	C7W
DVB-T/T2/H	COFDM	X7F
ISDB-T	SOFDM	X7F
ISDB-T (sistema multimedios «F»)	OFDM	X7W
T-DMB	COFDM	X7W
T-DAB	COFDM	X7E
DRM	COFDM	X7E
Radiodifusión sonora en ondas decamétricas/hectométricas/kilométricas	AM	A3E / A8E
Radiodifusión Sonora en FM	FM	F3E / F8E

2 Potencia del transmisor e intensidad de campo expresados en términos del tipo de modulación

La información sobre la potencia del transmisor suministrada a la antena y sobre el tipo de modulación puede obtenerse del organismo de transmisión responsable del funcionamiento de los equipos en un emplazamiento en particular. Es importante saber si la potencia del transmisor se expresa con relación

a la potencia de la portadora, P_c , a la potencia media, P_m , o a la potencia de cresta, P_p , de forma que los valores medidos o calculados puedan compararse con precisión con los niveles de referencia.

A título de ejemplo, se ha considerado un transmisor de radiodifusión sonora en ondas hectométricas (es decir, un tipo de emisión A3E). Se supone que los cálculos o mediciones tienen en cuenta únicamente la potencia de portadora, no obstante, los niveles de referencia también toman en consideración las componentes de modulación (en términos de potencia del transmisor, lo que corresponde a la potencia media). Además, se supone que sólo se utilizan valores eficaces.

Para comparar los valores calculados o medidos con los niveles de referencia, debe realizarse una de las siguientes transformaciones:

- los valores calculados o medidos deben modificarse para incluir las componentes de modulación, o
- los niveles obtenidos deben modificarse de tal manera que se correspondan con los valores de potencia de la portadora únicamente, es decir, sin componentes de modulación.

En el Cuadro 4 se indican los factores de multiplicación que relacionan un tipo de notación de potencia con otro (estas distintas notaciones para la potencia se definen en el RR). En el caso de una transmisión A3E, indicada como A*E en el Cuadro 4, puede observarse que la potencia media, P_m , es 1,5 veces la potencia de portadora, P_c .

En el cuadro 4 se asume una profundidad de modulación del 100%. En la práctica, la profundidad de modulación de los transmisores de radiodifusión suele ser inferior. De nuevo, tomando el ejemplo de una transmisión A3E pero con una profundidad de modulación m , donde $m = 1$ representa el 100%, la potencia de cresta equivaldrá a $(1 + m)^2 P_c$ y la potencia media a $[1 + 2(m/2)^2] P_c$.

Nota: los valores anteriores hacen referencia a potencias, por lo que, cuando se trate de intensidades de campo, debe utilizarse la raíz cuadrada de los factores de conversión indicados en el Cuadro 4. Así, en el ejemplo anterior de radiodifusión AM, el valor eficaz de la intensidad de campo de la portadora debe multiplicarse por $\sqrt{1.5}$ para obtener el valor eficaz de la intensidad de campo que incluye las componentes de modulación. A la inversa, el nivel obtenido (incluidas las componentes de modulación) debe dividirse por $\sqrt{1.5}$ para determinar el nivel obtenido equivalente sólo para la portadora.

El valor eficaz de la intensidad de campo en el campo lejano puede calcularse a partir de la potencia conocida, utilizando la ecuación (7); el tipo adecuado de potencia que debe utilizarse (es decir, P_m , o P_p) se indica en el Cuadro 5.

CUADRO 4

Relación entre las potencias de portadora, media, de cresta y máxima instantánea para distintas clases de emisión (valores relativos al caso más desfavorable)

Clase de emisión (características básicas) ^{(1), (2)}	Tipo de potencia conocida								
	Potencia de portadora, P_c			Potencia media, P_m			Potencia de cresta, P_p		
	Factor para determinar la:			Factor para determinar la:			Factor para determinar la:		
	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p
A*E	1	1,5	4	0,67	1	2,67	0,25	0,38	1

CUADRO 4 (*fin*)

Clase de emisión (características básicas) ^{(1), (2)}	Tipo de potencia conocida								
	Potencia de portadora, P_c			Potencia media, P_m			Potencia de cresta, P_p		
	Factor para determinar la:			Factor para determinar la:			Factor para determinar la:		
	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p
C*F ⁽³⁾ Modulación negativa Modulación positiva	–	–	–	–	1	1,85	–	0,54	1
F*... ⁽⁴⁾	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X7E	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GX7F	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X7W	1	1	1	1	1	1	1	1	1

⁽¹⁾ Véase en el Cuadro 1 más información sobre el código de 3 símbolos que se utiliza para describir las tres características básicas de un tipo de transmisión.

⁽²⁾ Un * indica que la segunda característica (es decir, la naturaleza de la señal moduladora) no es relevante para el examen de los peligros.

⁽³⁾ La potencia de portadora, P_c , no está claramente definida.

⁽⁴⁾ La tercera característica no es relevante para el examen de los peligros.

Estos factores se dan para X7E, X7F and X7W *cuando* las mediciones se llevan a cabo en toda la potencia del canal (por ejemplo, 1,5 MHz para DAB y 8 MHz para DVB).

CUADRO 5

Relación entre ciertas notaciones de intensidad de campo y notaciones de potencia

Para calcular	Utilícese la potencia expresada como
El valor eficaz de la intensidad de campo equivalente	Potencia media del transmisor, P_m
El valor medio de la intensidad de campo equivalente que se produce durante un periodo de oscilación de RF de cresta	Potencia de cresta, P_p
El valor de cresta (máximo) de la intensidad de campo equivalente	Potencia de cresta, $P_p^{(1)}$

⁽¹⁾ El valor de cresta de la intensidad de campo equivalente se determina a partir de la potencia de cresta, P_p , utilizando el factor de corrección valor de cresta/valor eficaz. Este factor es 21/2 en el caso de una portadora sinusoidal.

Adjunto 5 al Anexo 1

Métodos de evaluación adicionales

1 Procedimientos numéricos

En esta sección se resumen brevemente diversos métodos numéricos. Obsérvese que, en la Recomendación UIT-T K.61, también se abordan estos métodos. Existen algunos programas comerciales disponibles, por ejemplo, CST, HFSS y WIPL-D.

Los procedimientos analíticos sólo pueden utilizarse para calcular las propiedades electromagnéticas en algunos casos y con geometrías especiales. A fin de resolver problemas generales, deben aplicarse técnicas numéricas. A continuación se indican los procedimientos numéricos más comunes para calcular el CEM de una fuente de transmisión o los campos internos y la tasa de absorción específica en cuerpos biológicos. Las técnicas numéricas más adecuadas para resolver un cierto problema dependen de la gama de frecuencias considerada, de las estructuras geométricas que deben modelarse y del tipo de situación de exposición (campo cercano o campo lejano).

A continuación se indican algunos métodos habituales de modelización numérica:

- Óptica física (PO, *physical optics*)
- Teoría física de la difracción (PTD, *physical theory of diffraction*)
- Óptica geométrica (GO, *geometrical optics*)
- Teoría geométrica de la difracción (GTD, *geometrical theory of diffraction*)
- Teoría uniforme de la difracción (UTD, *uniform theory of diffraction*)
- Método de corrientes equivalentes (MEC, *method of equivalent currents*)
- Método de momentos (MOM, *method of moments*)
- Método de múltiples multipolos (MMP, *multiple multipole method*)
- Método de diferencia finita en el dominio del tiempo (FDTD, *finite-difference time-domain method*)
- Método del elemento finito (FEM, *finite element method*)
- Método de la impedancia.

En cada aplicación, debe realizarse una evaluación a fin de establecer cuál de los métodos anteriores es el más adecuado para resolver un problema determinado. Por ejemplo, la óptica física y la óptica geométrica no se aplican en el campo cercano.

Cada uno de estos procedimientos permite determinar la amplitud y la fase de las siguientes cantidades de CEM, en cualquier punto del espacio, donde los elementos radiantes y de dispersión pueden ser conductores ideales o materiales dieléctricos:

- intensidad de campo eléctrico;
- intensidad de campo magnético;
- densidad de potencia;
- corriente;
- tensión;
- impedancia.

1.1 Método de momentos

El método de momentos (MOM) se utiliza a menudo para diseñar sistemas de antenas de radiodifusión (potencia de salida del transmisor, ganancia de antena, etc.) y calcular los CEM resultantes. Este método permite efectuar los cálculos tanto en el extremo de transmisión como en el extremo de recepción, así como en los campos cercano y lejano de la antena.

Pueden construirse modelos de estructuras técnicas de hasta tres dimensiones, teniendo en cuenta tanto sus parámetros materiales (constante dieléctrica compleja) como los del suelo. El modelo trabaja con hilos delgados con respecto a la longitud de onda y, en principio, puede representar también superficies. La limitación de este método radica en el hecho de que el modelado de estructuras amplias y complicadas puede consumir demasiado tiempo y memoria en el ordenador.

El MOM ha sido ampliamente utilizado para resolver problemas electromagnéticos y efectuar cálculos relacionados con la SAR en modelos de bloques de cuerpos biológicos. De acuerdo con el MOM, los campos eléctricos dentro de un cuerpo biológico se calculan mediante una solución de la función de Green de las ecuaciones integrales de Maxwell.

1.2 Método de la transformada rápida de Fourier/gradiente conjugado

El método de la transformada rápida de Fourier/gradiente conjugado (TRF/CG) es un ulterior desarrollo del MOM. Se utilizan algoritmos iterativos basados en la TRF y el procedimiento del gradiente se emplea para resolver ecuaciones lineales derivadas del MOM.

1.3 Método de diferencia finita en el dominio del tiempo

El método de diferencia finita en el dominio del tiempo (FDTD) es un método numérico que permite resolver las ecuaciones rotacionales diferenciales de Maxwell en el dominio del tiempo. Puede utilizarse para calcular los CEM internos y externos y la distribución de la SAR en cuerpos biológicos para exposiciones de campo cercano o de campo lejano. En el FDTD, tanto el tiempo como el espacio se convierten en cantidades discretas y el cuerpo biológico se modela asignando los valores de permitividad y conductividad a las células espaciales que ocupa. La memoria de ordenador necesaria es proporcional al número de células espaciales. El FDTD se considera el método de cálculo de la SAR más prometedor, no obstante, para realizar cálculos precisos se necesitan ordenadores muy potentes.

1.4 Método de múltiples multipolos

El método de múltiples multipolos (MMP) se basa en soluciones analíticas a ecuaciones de campo que tienen un multipolo en un punto del espacio y se utiliza conjuntamente con la técnica multipolo generalizada (GMP). El procedimiento del MMP es especialmente adecuado para la simulación de los denominados cuerpos de «dispersión con pérdidas», que se encuentran cerca de las fuentes de radiación; es decir, en el campo cercano inmediato.

1.5 Método de la impedancia

El método de la impedancia se ha aplicado con éxito para resolver problemas de dosimetría cuando pueden realizarse aproximaciones cuasi estáticas. Este método ha demostrado ser muy eficaz para calcular la SAR en el cuerpo humano en frecuencias de hasta 40 MHz. Con arreglo al método de la impedancia, el cuerpo biológico se modela mediante una red tridimensional de impedancias complejas.

2 Cálculos de la intensidad de campo

La mayoría de los métodos indicados anteriormente pueden utilizarse para calcular los niveles de intensidad de campo producidos por radiadores electromagnéticos. La precisión de los resultados depende en gran medida de la exactitud con que se modele el radiador (por ejemplo, la antena). Si existen objetos cerca del radiador, situados entre el radiador y el punto de predicción, o próximos al punto de predicción de la intensidad de campo que afecten significativamente los niveles de intensidad de campo dichos objetos, también deberían modelarse.

2.1 Análisis numérico de estructuras filiformes: Ejemplo

En esta sección se describe en términos generales un método que permitiría determinar los niveles de intensidad de campo en las proximidades de una antena de cortina en ondas decamétricas, partiendo de la formulación de la denominada ecuación de dos potenciales para la distribución de la corriente a lo largo de los hilos. Esta ecuación se resuelve utilizando el MOM con una aproximación polinómica para la corriente.

Se considera una estructura arbitraria, situada en el vacío, ensamblada con segmentos de hilo rectos perfectamente conductores. De acuerdo con las condiciones límite, en la superficie de los hilos, la componente tangencial del campo eléctrico total debe ser cero; es decir:

$$(E + E_i)_{\text{tan}} = 0 \quad (17)$$

siendo:

E : campo eléctrico producido por las corrientes y cargas de la estructura

E_i : campo eléctrico aplicado, que modela la excitación al sistema.

El campo aplicado puede ser, por ejemplo, el campo eléctrico de una onda plana incidente en la estructura (cuando se analizan dispersores o antenas receptoras) o un campo situado en una pequeña región en los terminales de antena, que modela el generador que excita la antena (cuando se analizan antenas transmisoras).

El campo eléctrico producido por las corrientes y cargas de los hilos puede expresarse en función del vector potencial magnético, A , y del potencial eléctrico escalar, V , como sigue:

$$E = -j\omega A - \text{grad } V \quad (18)$$

siendo:

ω : frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$).

A su vez, los dos potenciales pueden expresarse en función de las densidades de las corrientes (\mathbf{J}_s) y cargas (ρ_s) en la superficie, que están relacionadas por la ecuación de continuidad. A continuación, las corrientes y cargas en la superficie se aproximan mediante corrientes y cargas de línea (aproximación de hilo delgado) y la estructura del hilo se divide en N segmentos (cada uno de ellos con un eje local, s_m). Por último, la ecuación de dos potenciales (denominada también ecuación de potencial escalar vectorial) para la distribución de corrientes se obtiene como sigue:

$$\sum_{m=1}^N \int_0^{h_m} \left[\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m I_m(s_m) g(r_a) + \frac{1}{k^2} \frac{dI_m(s_m)}{ds_m} \text{grad } g(r_a) \right] ds_m = \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{j\omega\mu_0} \quad (19)$$

siendo:

I_m : intensidad de la corriente a lo largo del segmento de hilo

$k = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$: coeficiente de fase en el espacio libre

$$g(r_a) = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp(-j k r_a)}{r_a} : \text{ correspondiente función de Green}$$

r_a : distancia media aproximada entre el punto situado en la superficie del elemento de hilo ds_m y el punto de campo.

La ecuación (19) es una ecuación íntegrodiferencial para la distribución de corriente y sólo puede resolverse por métodos numéricos. Para ello se siguen las directrices generales del método y se aproxima la función desconocida $I_m(s_m)$ mediante una serie de funciones conocidas (funciones de base) con unos coeficientes de ponderación desconocidos. Como funciones de base se eligen las funciones de potencia simples, que equivalen a la aproximación polinómica de la distribución de corriente, es decir:

$$I_m(s_m) = \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \tag{20}$$

siendo:

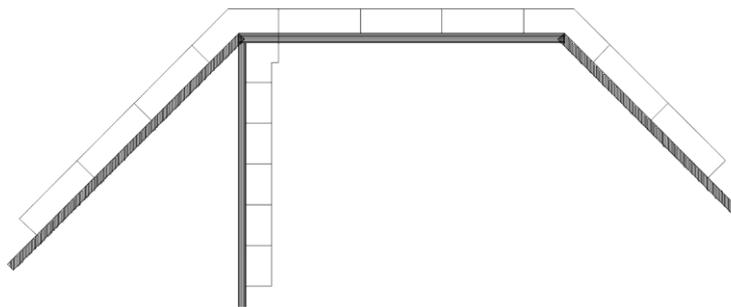
h_m : longitud del segmento

I_{mi} : coeficientes de ponderación.

La ecuación (19) no puede satisfacerse exactamente en todos los puntos de los segmentos de hilo, sino sólo aproximadamente. De acuerdo con el método MOM, se selecciona un conjunto de funciones de ponderación y se evalúan los puntos internos de la ecuación (19) y estas funciones. Como funciones de ponderación se utilizan impulsos. Cada impulso es una constante de valor unidad en un subsegmento corto y de valor cero fuera de ese subsegmento. En la Fig. 37 se representa una distribución típica de los impulsos.

FIGURA 37

Distribución típica de las funciones de ponderación de impulsos utilizadas en el programa AWAS



BT.1698-37

Para un impulso definido en el subsegmento (s_{p1} , s_{p2}) a lo largo del eje del segmento de hilos p , la evaluación del producto interno da lugar a la ecuación (21):

$$\sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left\{ \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \int_0^{h_m} \mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i g(r_a) ds_m ds_p + \frac{1}{k^2} \frac{i}{h_m} \int_0^{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^{i-1} [g(r_a)_{s_{p2}} - g(r_a)_{s_{p1}}] ds_m \right\} + \sum_{i=0}^{n_p} I_{pi} \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \frac{Z'(s_p)}{j \omega \mu_0} \left(\frac{s_p}{h_p} \right)^i ds_p = \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{j \omega \mu_0} ds_p \tag{21}$$

En esta ecuación, \mathbf{u}_p es el vector unitario del segmento de hilo p y Z' es la impedancia por unidad de longitud de una posible impedancia de carga distribuida a lo largo del segmento. Cuando se evalúan para todos los impulsos, las ecuaciones de la forma (21) comprenden un sistema de ecuaciones lineales en I_{mi} que puede resolverse numéricamente.

Una vez conocidos los coeficientes I_{mi} , se determina la distribución de corriente aproximada a lo largo de los segmentos de hilo y se evalúan las diversas características de la estructura filiforme. Esta parte de la Recomendación trata fundamentalmente de los campos eléctrico y magnético cercanos. El campo eléctrico puede evaluarse en términos de los dos potenciales, de forma similar a la que se obtiene en la ecuación de dos potenciales, es decir:

$$\mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left[\mathbf{u}_m \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i g(r_a) + \frac{1}{k^2} \frac{i}{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^{i-1} \text{grad } g(r_a) \right] ds_m \quad (22)$$

El campo magnético puede expresarse en función del potencial vectorial magnético como sigue:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \mathbf{A} \quad (23)$$

Cuando este potencial se expresa en términos de las corrientes de los hilos, se obtiene por último:

$$\mathbf{H} = - \sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \mathbf{u}_m \times \text{grad } g(r_a) ds_m \quad (24)$$

3 Dosimetría

La aplicación de los conceptos de dosimetría permite relacionar las intensidades de campo externas (es decir, fuera del cuerpo) e internas, la densidad de corriente inducida y la tasa de absorción de energía en los tejidos. El desarrollo de la dosimetría experimental y numérica ha sido complementario. Ambos métodos requieren aproximaciones a la simulación de la exposición del cuerpo humano; sin embargo, el desarrollo de materiales equivalentes a los tejidos y de sondas que introducen una perturbación mínima en el dominio experimental así como la utilización de modelos anatómicos realistas a efectos de cálculo ha mejorado la comprensión de la interacción de los campos de radiofrecuencia con el cuerpo humano.

Si bien la densidad de corriente y la intensidad del campo eléctrico interno son las magnitudes que, a simple vista, más relación guardan con los efectos biológicos a bajas frecuencias, la tasa de absorción específica (SAR) de energía es el parámetro más significativo a medida que la frecuencia aumenta hasta llegar a longitudes de onda comparables a las dimensiones del cuerpo humano.

En muchas situaciones de exposición, la SAR puede determinarse únicamente a partir de las intensidades de campo medidas en el entorno utilizando modelos dosimétricos. En frecuencias por debajo de 100 MHz se han utilizado técnicas no invasoras para medir la corriente inducida y en campos uniformes amplios se han relacionado las intensidades de campo eléctrico externo con las corrientes inducidas en función de la frecuencia. En la región de resonancia del cuerpo, pueden aparecer exposiciones significativas en el campo cercano reactivo donde el acoplamiento del campo incidente con el cuerpo es difícil de establecer debido a la no uniformidad del campo y al alineamiento cambiante entre el campo y el cuerpo. Además, pueden aparecer aumentos localizados en la densidad de corriente y en la tasa de absorción de energía en partes del cuerpo como consecuencia de la sección transversal geométrica restringida de los tejidos más conductores.

Las cantidades dosimétricas pueden calcularse utilizando los procedimientos numéricos correspondientes y modelos de cálculo del cuerpo humano. Por otro lado, tales cantidades pueden medirse empleando modelos físicos adecuados.

3.1 Cálculos de la tasa de absorción específica

Dada la dificultad de medir la SAR promediada en todo el cuerpo o la SAR de cresta local en muchas situaciones de exposición, cabe la posibilidad de utilizar varios cálculos numéricos de las técnicas numéricas mencionadas anteriormente para estimar la distribución de la SAR en un cuerpo biológico expuesto a una radiación electromagnética de campo cercano o de campo lejano, por ejemplo, el FDTD, el MOM y el MMP.

La pertinencia de cada uno de estos métodos para resolver un problema particular depende, por ejemplo, de la frecuencia, de las condiciones de exposición, del tamaño del objeto expuesto, de la precisión requerida y del máximo tiempo de cálculo tolerable. Cada método requiere tener una experiencia en el análisis biofísico y numérico.

Para utilizar cualquiera de estos modelos se necesita un modelo numérico geométrico tridimensional del cuerpo expuesto o de la parte del cuerpo expuesta. Las propiedades eléctricas a la frecuencia de exposición deben ser conocidas para las distintas partes del cuerpo. Dependiendo de la precisión necesaria, pueden utilizarse modelos de diversa complejidad. En algunas situaciones, pueden utilizarse como modelo del cuerpo formas sencillas tales como esferas y cilindros. Las propiedades eléctricas de los tejidos humanos aparecen en muchos textos. Utilizando imágenes de resonancia magnética del cuerpo humano pueden elaborarse modelos corporales numéricos muy complejos y precisos. Para calcular la distribución de la SAR con el método FDTD en seres humanos expuestos a campos electromagnéticos procedentes de transmisores radioeléctricos portátiles se han empleado modelos de resonancia magnética con varios tipos de tejidos y una resolución espacial inferior a unos pocos milímetros. En el mercado, existen diversos paquetes de programas informáticos que permiten elaborar este tipo de modelos.

3.2 Medición de la tasa de absorción específica

La tasa de absorción específica (SAR) (W/kg) es la cantidad límite básica que establece la mayor parte de las normas y los reglamentos en materia de exposición a RF. La SAR es una medida de la tasa de energía electromagnética disipada por unidad de masa del tejido, o sea, la potencia absorbida por unidad de masa.

La SAR puede especificarse como el valor normalizado en toda la masa del cuerpo (a menudo denominada «SAR promediada en todo el cuerpo») o como el valor localizado en un pequeño volumen de tejido («SAR localizada»).

La SAR puede determinarse a partir de ciertas cantidades internas de tres formas, como se indica en la siguiente ecuación:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} = C_i \frac{dT}{dt} = \frac{J^2}{\sigma \rho} \quad (25)$$

siendo:

- E : intensidad de campo eléctrico interno en el tejido corporal (V/m^{-1})
- σ : conductividad del tejido corporal (S/m^{-1})
- ρ : densidad del tejido corporal (kg/m^{-3})
- C_i : capacidad térmica del tejido corporal ($J/kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$)
- dT/dt : derivada con respecto al tiempo de la temperatura en el tejido corporal ($^\circ C/s^{-1}$)
- J : densidad de corriente inducida en el tejido corporal (A/m^2).

La SAR local en una masa incremental (dm) se define como la derivada con respecto al tiempo de la energía incremental (dW) absorbida dividida por la masa:

$$SAR = d/d_t \quad dW/dm \quad (26)$$

Este valor es importante desde dos puntos de vista; la distribución no uniforme resultante de la absorción de energía cuando se expone a una onda plana uniforme y la absorción de energía localizada procedente de campos no uniformes muy próximos a una fuente de exposición.

La reglamentación o las normas sobre exposición contienen los límites de campo eléctrico y magnético obtenidos. El concepto dosimétrico básico garantiza que la conformidad con los niveles obtenidos (externos) asegurará el cumplimiento de los límites de SAR básicos. Sin embargo, también pueden utilizarse las mediciones de la SAR internas o externas para demostrar la conformidad. En condiciones de exposición de una parte del cuerpo al campo cercano, puede ser difícil medir los CEM externos o pueden rebasarse los límites obtenidos, aunque la SAR local esté por debajo de los límites básicos. En estos casos, deben realizarse mediciones de la SAR interna en modelos del cuerpo. A continuación se describen los métodos más importantes para medir la SAR.

3.2.1 Medición del campo eléctrico

La SAR también es proporcional al valor eficaz de la intensidad de campo eléctrico E (V/m) dentro del tejido expuesto:

$$SAR = \sigma E^2 / \rho \quad (27)$$

siendo:

σ (S/m): conductividad y

ρ (kg/m^3): densidad de masa del material de tejido en la posición de interés.

Utilizando una sonda de campo eléctrico isótropa, puede determinarse la SAR local dentro de un modelo de cuerpo irradiado. Desplazando la sonda y repitiendo las mediciones de campo eléctrico en todo el cuerpo o parte del mismo, puede obtenerse la distribución de la SAR así como sus valores promediados en todo el cuerpo o en parte del cuerpo. La medición de un solo campo eléctrico lleva únicamente unos pocos segundos, lo que significa que las distribuciones de SAR tridimensionales pueden determinarse con una elevada resolución espacial en un tiempo de medición razonable (normalmente menos de una hora).

3.2.2 Medición de la temperatura

La SAR es proporcional a la tasa inicial de elevación de la temperatura dT/d_t (K/s) en el tejido de un objeto expuesto:

$$SAR = c \Delta T / \Delta t \quad (28)$$

siendo c la capacidad térmica específica del material del tejido ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$). Utilizando algunas sondas de temperatura, puede determinarse la SAR local dentro de un modelo de cuerpo irradiado. Se utilizan una o más sondas para determinar el incremento de temperatura ΔT durante un breve tiempo de exposición Δt (normalmente menos de 30 s para evitar la transferencia de calor). La tasa inicial de elevación de la temperatura se aproxima mediante $\Delta T / \Delta t$, y el valor de la SAR local se calcula para cada posición de medición. Repitiendo las mediciones de temperatura en todo el cuerpo o en una parte del cuerpo puede determinarse la distribución de la SAR y sus valores promediados en todo el cuerpo o en parte del cuerpo.

Las mediciones de la distribución SAR tridimensional llevan tiempo debido al gran número de puntos de medición. Para lograr un tiempo de medición razonable debe limitarse el número de puntos, lo que significa que es difícil medir con precisión distribuciones de SAR intensa no uniforme. La precisión

de las mediciones de temperatura también puede resultar afectada por la conducción y convección térmica durante las mediciones, o entre mediciones.

3.2.3 Medición calorimétrica

La SAR promediada en todo cuerpo puede determinarse utilizando métodos calorimétricos. En una medición calorimétrica normal, se irradia durante un determinado periodo de tiempo un modelo de cuerpo a tamaño natural o a escala que se encuentre en equilibrio térmico. A continuación, se utiliza un calorímetro para medir el flujo de calor despedido por el cuerpo hasta que el modelo se encuentra nuevamente en equilibrio térmico. La energía absorbida total obtenida se divide por el tiempo de exposición y la masa del modelo de cuerpo con lo que se obtiene la SAR de todo el cuerpo. La técnica de fuentes gemelas calorimétrica utiliza dos calorímetros y dos modelos de cuerpo idénticos. Uno de los modelos se irradia y el otro se utiliza como referencia térmica, lo que significa que la medición puede realizarse en condiciones térmicas controladas con menos precisión que en el caso de una medición calorimétrica normal.

Las mediciones calorimétricas proporcionan determinaciones bastante precisas de la SAR de todo cuerpo pero no dan información alguna sobre la distribución de la SAR interna. Para conseguir resultados precisos es necesario un volumen suficiente de deposición de energía. El tiempo total de una medición, que viene determinado por el tiempo que tarda en alcanzarse el equilibrio térmico tras la exposición, puede ser de hasta varias horas. La SAR de parte de un cuerpo puede medirse utilizando modelos de cuerpo parcial y pequeños calorímetros.

4 Medición de la corriente del cuerpo

Los dispositivos de medición de la corriente del cuerpo pueden ser de dos categorías:

- Dispositivos de medición para determinar la corriente entre el cuerpo y el suelo.
- Dispositivos de medición para determinar la corriente de contacto.

4.1 Corrientes inducidas por el cuerpo

Las corrientes internas del cuerpo son inducidas en personas debido a la exposición parcial o de todo el cuerpo a campos de RF en ausencia de contacto con otros objetos distintos del suelo.

Las dos técnicas principales utilizadas para medir las corrientes del cuerpo incluyen los transformadores de corriente de tipo mordaza (solenoidal) para medir el flujo de corriente en las extremidades y los sistemas de placas para las que permiten medir las corrientes que fluyen al suelo a través de los pies.

Se han desarrollado instrumentos con transformadores de corriente de tipo abrazadera que pueden llevarse puestos.

La unidad medidora va montada directamente sobre el transformador o conectada a través de un enlace de fibra óptica para proporcionar una visualización de la corriente que fluye en un miembro (brazo o pierna) en torno al cual se sujeta el transformador de corriente. En estos dispositivos la corriente se determina utilizando técnicas de banda estrecha, por ejemplo, analizadores de espectro o receptores sintonizados (que ofrecen la ventaja de poder determinar la distribución de frecuencia de la corriente inducida en entornos multifuente) o técnicas de banda ancha que utilizan detección por diodo o conversión térmica.

Se han diseñado instrumentos para proporcionar indicaciones de valores eficaces verdaderos en presencia de múltiples frecuencias y/o ondas moduladas en amplitud.

La respuesta a la frecuencia superior de los transformadores de corriente está limitada normalmente a 100 MHz; sin embargo, se han utilizado transformadores con núcleo de aire (en contraposición con

los transformadores con núcleo de ferrita) para ampliar la frecuencia superior de respuesta de estos instrumentos. Si bien estos transformadores con núcleo de aire son más ligeros y, por lo tanto, más útiles para realizar mediciones a largo plazo, son bastante menos sensibles que los dispositivos con núcleo de ferrita.

Una alternativa a un dispositivo de tipo abrazadera es el sistema de placas paralelas. En este instrumento, la corriente del cuerpo fluye por los pies hasta una placa conductora a través de una forma de sensor de corriente montado entre las placas y, por consiguiente, a tierra. La corriente que fluye entre las placas superior e inferior puede determinarse midiendo la caída de tensión de RF a través de la resistencia de baja impedancia. De forma alternativa, puede utilizarse un pequeño transformador de corriente de RF de apertura o un termoacoplador de vacío para medir la corriente que fluye a través del conductor entre las dos placas.

Se dispone de instrumentos con una respuesta en frecuencia plana entre 3 kHz y 100 MHz.

Hay varios temas que deben considerarse cuando se selecciona un instrumento para medir la corriente inducida.

En primer lugar, los medidores fijos están sujetos a la influencia de las corrientes de desplazamiento inducidas por el campo eléctrico y causadas por los campos que terminan en la placa superior. Algunas investigaciones han demostrado que los errores aparentes que surgen en ausencia de una persona no son significativos en el funcionamiento de los medidores cuando está presente una persona.

En segundo lugar, la suma de las corrientes de ambos tobillos medidas con medidores de tipo abrazadera tiende a ser ligeramente superior que el correspondiente valor indicado en los medidores de tipo de placa. La magnitud de este efecto, que es una función de la radiofrecuencia y de la geometría del medidor, es probable que no sea muy grande. No obstante, el método más preciso de determinar la corriente que fluye por los brazos o piernas es el transformador de corriente. El método preciso de medición puede depender de los requisitos establecidos en las directrices de protección cuya conformidad debe evaluarse.

En tercer lugar, debe considerarse la propia capacidad de medir corrientes inducidas en los brazos y piernas en condiciones realistas de puesta a tierra tal como se dan en la práctica. En particular, los distintos grados de contacto eléctrico entre la tierra y la placa inferior del sistema de placas paralelas y la superficie de tierra real pueden afectar el flujo aparente de corriente a tierra.

Las mediciones pueden realizarse utilizando antenas diseñadas de manera que sean equivalentes a una persona, lo que permite utilizar un enfoque normalizado y posibilita efectuar mediciones de corriente sin necesidad de que los operarios se expongan a corrientes y campos posiblemente peligrosos.

4.2 Medición de la corriente de contacto

El dispositivo de medición de corriente debe insertarse entre la mano de la persona y el objeto conductor. La técnica de medición puede constar de una sonda metálica (zona de contacto definitivo) sujeta en un extremo por una mano mientras que el otro extremo está en contacto con el objeto conductor. Puede utilizarse un sensor de corriente de tipo abrazadera (transformador de corriente) para medir la corriente de contacto que fluye a través de la mano que está en contacto con el objeto conductor.

Como métodos alternativos pueden citarse:

- la medición de la diferencia de potencial (caída de tensión) a través de una resistencia no inductiva (en la gama de 5-10 Ω) conectada en serie entre el objeto y la sonda metálica sostenida con la mano;
- un miliamperímetro de acoplamiento térmico situado directamente en serie.

Las conexiones alámbricas y el medidor de corriente deben disponerse de tal manera que se minimice la interferencia y los errores debidos al propio sistema de captación.

En el caso de que puedan aparecer corrientes excesivamente elevadas, puede simularse la impedancia equivalente del cuerpo mediante una red eléctrica de resistencias y condensadores.

4.3 Medición de la tensión de contacto

La tensión de contacto (tensión sin carga) se mide utilizando un voltímetro u osciloscopio adecuado para la gama de frecuencias considerada. Los dispositivos de medición se conectan entre el objeto conductor cargado por la tensión inducida por el campo y un potencial de referencia (tierra). La impedancia de entrada del voltímetro no debe ser inferior a 10 k Ω .

Adjunto 6 al Anexo 1

Dispositivos de electromedicina implantados y portátiles

1 Dispositivos de electromedicina

La compatibilidad electromagnética es un problema de carácter general para los equipos electrónicos y, en especial, para los dispositivos de electromedicina. Si se utilizan dispositivos de electromedicina en presencia de estaciones de radiodifusión terrenal potentes, el funcionamiento de los primeros puede verse afectado. El riesgo de mal funcionamiento aumenta si la intensidad del campo es suficientemente alta. Dicho riesgo depende de diversas variables, tales como el nivel de la intensidad de campo, el cual depende a su vez de la distancia entre la antena transmisora y el dispositivo, de la potencia del transmisor, de la frecuencia de emisión, del tipo de modulación de la señal radiada, del efecto de acoplamiento del cable y de la propia inmunidad a las radiofrecuencias del dispositivo electrónico.

Se podrían reducir, o incluso eliminar, las interferencias de RF a los dispositivos de electromedicina mediante un apantallamiento de RF o un filtrado electrónico adecuados. Existen técnicas aplicadas al respecto similares a las que se emplean normalmente para la compatibilidad electromagnética. Tanto a los dispositivos médicos, implantados o no, como a la instrumentación médica pueden aplicarse límites especiales que pueden ser significativamente inferiores a los establecidos para la población general.

2 Dispositivos implantados y portátiles

Los CEM pueden causar interferencia de RF a dispositivos implantados activos o dispositivos médicos portátiles. Las bombas de insulina y los marcapasos pertenecen a esta clase de dispositivos y es posible que cada vez se utilicen con más frecuencia. Además, parece registrarse un aumento paulatino en la gama y el número de dispositivos utilizados, entre ellos monitores portátiles y prótesis ópticas y ortopédicas. De forma general puede decirse que los marcapasos y otros dispositivos médicos pueden sufrir interferencias causadas por CEM emitidos. Sin embargo, en el caso de los dispositivos de electromedicina implantados, los problemas causados por las interferencias de RF aún no se han resuelto por completo.

Adjunto 7 al Anexo 1

Referencias adicionales

- [1] [ICNIRP 2020](#), *Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)*.
 - [2] [ICNIRP 2010](#), *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)*.
 - [3] [IEEE C95.1-2019](#), *Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*.
 - [4] Mazar 2016, *Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques*, [Capítulo 9](#), 2021.
 - [5] IEC 62232, *Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure*.
 - [6] [OMS \(febrero de 2020\)](#), *Radiation: 5G mobile networks and health*.
 - [7] [ETSI TR 102 457](#), *Fixed Radio Systems; Evaluation of the Electro Magnetic Field (EMF) radiated by Line-of-Sight (LoS) fixed radio stations using parabolic dish directional antennas*.
 - [8] [EN 50496](#), *Determination of workers' exposure to electromagnetic fields and assessment of risk at a broadcast site*.
 - [9] [EN 50554](#), *Basic standard for the in-situ assessment of exposure to radio frequency electromagnetic fields in the vicinity of a broadcast site*.
-