

Unión Internacional de Telecomunicaciones

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Informe UIT-R SM.2452-0
(06/2019)

Medición de campos electromagnéticos para la evaluación de la exposición de las personas

Serie SM
Gestión del espectro



Unión
Internacional de
Telecomunicaciones

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 los Informes UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REP/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	Radio astronomía
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

Nota: Este Informe UIT-R fue aprobado en inglés por la Comisión de Estudio conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2020

© UIT 2020

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

INFORME UIT-R SM.2452-0

**Medición de campos electromagnéticos para la
evaluación de la exposición de las personas**

(2019)

ÍNDICE

Página

1	Introducción.....	2
2	Marco reglamentario.....	2
2.1	Directrices de la ICNIRP de 1998 para transmisores: niveles de referencia.....	2
2.2	Presentación de mapas de la intensidad de campo calculada en torno a los transmisores.....	5
3	Guía práctica para la medición de CEM a fin de evaluar la exposición de las personas	7
3.1	Nociones básicas del proceso de medición de CEM	7
3.2	Instrumentos de medición con funcionalidades específicas para la evaluación de CEM.....	9
3.3	Reducción del número de puntos de medición en el espacio	12
3.4	Reducción del tiempo de observación y extrapolación de la exposición máxima	14
3.5	Cómo evaluar la exposición a servicios concretos	14
4	Referencias	16
5	Glosario y abreviaturas	17

1 Introducción

La proliferación de instalaciones inalámbricas de todo tipo en todo el mundo hace necesario tomar medidas exactas. El título de la Cuestión 239/1 del UIT-R es «Medición de campos electromagnéticos para la evaluación de la exposición de las personas». El título de la Resolución 176 (Rev. Dubái, 2018) de la Conferencia de Plenipotenciarios de la UIT es «Problemas de la medición y evaluación de la exposición de las personas a los campos electromagnéticos». En la sección 5.6 del Manual de la UIT sobre Comprobación Técnica del Espectro (edición de 2011) se detalla la medición de radiación no ionizante. Los límites de la exposición a campos electromagnéticos (CEM) se aplican a nivel nacional. Los límites de exposición son distintos para el público en general y para los trabajadores que acceden a zonas cercanas a instalaciones inalámbricas. La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrotécnicos (IEEE) son los grupos de expertos que fijan los niveles de exposición segura. Se insta a las administraciones a seguir las directrices formuladas por esos grupos de expertos o los límites que fijen sus propios expertos. Se ha de evaluar la observancia de los límites de CEM, habida cuenta de que la densidad de potencia y la intensidad de campo son valores combinados de diversas fuentes. En las cercanías de las instalaciones inalámbricas la exposición puede ocurrir en el campo cercano. También se han de medir los niveles de exposición en zonas accesibles al público (trabajadores o público en general, según el caso). Es posible que las instalaciones inalámbricas no transmitan a su máxima potencia teórica en el momento de efectuar la medición, por lo que, a la hora de determinar el cumplimiento de los límites, se deberá proceder a la adaptación en potencia para reflejar la potencia máxima. Puede ser necesario medir por separado los campos E y H, sobre todo en el dominio de campo cercano, que se comporta de manera distinta al campo lejano. Los resultados de las mediciones pueden presentarse en diversos formatos según a quien y para qué estén destinados. Queda fuera del alcance de este Informe la conformidad de los equipos de usuario portátiles, como teléfonos y portátiles, que se utilizan cerca de la cabeza o el cuerpo.

Si bien los límites de la ICNIRP se han fijado para proteger al público en general, en algunos países la inquietud sobre los efectos de los CEM lleva a supervisar y controlar la densidad de potencia y la intensidad de campo de las emisiones. Es necesario compartir prácticas idóneas de comprobación técnica de los CEM que induzca a las administraciones a ajustarse a los límites fijados por la ICNIRP.

2 Marco reglamentario

2.1 Directrices de la ICNIRP de 1998¹ para transmisores: niveles de referencia

Según las Directrices de la ICNIRP de 1998, página 495, «El hecho de que los valores medidos o calculados excedan los niveles de referencia no implica necesariamente un incumplimiento de las restricciones básicas. Sin embargo, cuando se supera un nivel de referencia, cabe verificar el cumplimiento de la restricción básica pertinente y determinar si es o no necesario adoptar medidas de protección adicionales».

Los límites ICNIRP 1998 e IEEE C95.1-2005² son los niveles de referencia aceptados en varios países, cuyo umbral se compara con esos niveles de referencia.

¹ La ICNIRP y el IEEE están revisando sus límites CEM. En función de las políticas y procedimientos fijados por los diversos organismos nacionales de reglamentación, podrán aplicarse otros límites de exposición.

² Los valores de exposición del Cuadro 9 de IEEE C95.1-2005 son semejantes al nivel ICNIRP 1998 ($f_{\text{MHz}}/200 \text{ W/m}^2$); a 10-400 MHz el campo eléctrico (E) y el FCC del IEEE son 27,5 (V/m), pero son 28 (V/m) en la ICNIRP 1998. El IEEE ofrece una ecuación adicional por encima de 100 GHz: $\{(90 \times f_{\text{GHz}} - 7,000)\} / 200 \text{ W/m}^2$.

En los Cuadros 6 y 7 de ICNIRP 1998 se definen los umbrales de exposición. En los siguientes Cuadros y Figuras se especifican los niveles ICNIRP de referencia a distintas frecuencias. El valor de exposición de las figuras se refiere al público en general y a la exposición profesional. En las directrices se especifica un tiempo de promediación de seis minutos. Por debajo de 10 MHz (longitud de onda de 30 metros) la exposición se da sobre todo en el campo cercano; los valores de referencia se refieren principalmente a la intensidad de campo eléctrica (V/m). Entre 10 MHz y 300 GHz también se fijan restricciones básicas en función de la densidad de potencia (W/m^2). En lo tocante al límite de densidad de potencia, los niveles de exposición del público en general son cinco veces inferiores a los ocupacionales.

CUADRO 1

Niveles de referencia de la ICNIRP 1998 para la exposición pública general y ocupacional

Gama de frecuencias	Intensidad del campo eléctrico (V/m) <i>f</i> : frecuencia		Densidad de potencia de onda plana equivalente S_{eq} (W/m^2)	
	Pública general	Ocupacional	Pública general	Ocupacional
1-25 Hz	10 000	20 000	Límites de densidad de potencia no aplicables	
0,025-0,82 kHz	$250/f$ (kHz)	$500/f$ (kHz)		
0,82-3 kHz	$250/f$ (kHz)	610		
3-1 000 kHz	87	610		
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$ (MHz)	$610/f$ (MHz)		
10-400 MHz	28	61	2	10
400-2 000 MHz	$1,375f^{1/2}$ (MHz)	$3f^{1/2}$ (MHz)	$f/200$	$f/40$
2-300 GHz	61	137	10	50

FIGURA 1³

Niveles de intensidad del campo eléctrico de la ICNIRP 1998 para la exposición pública general y ocupacional

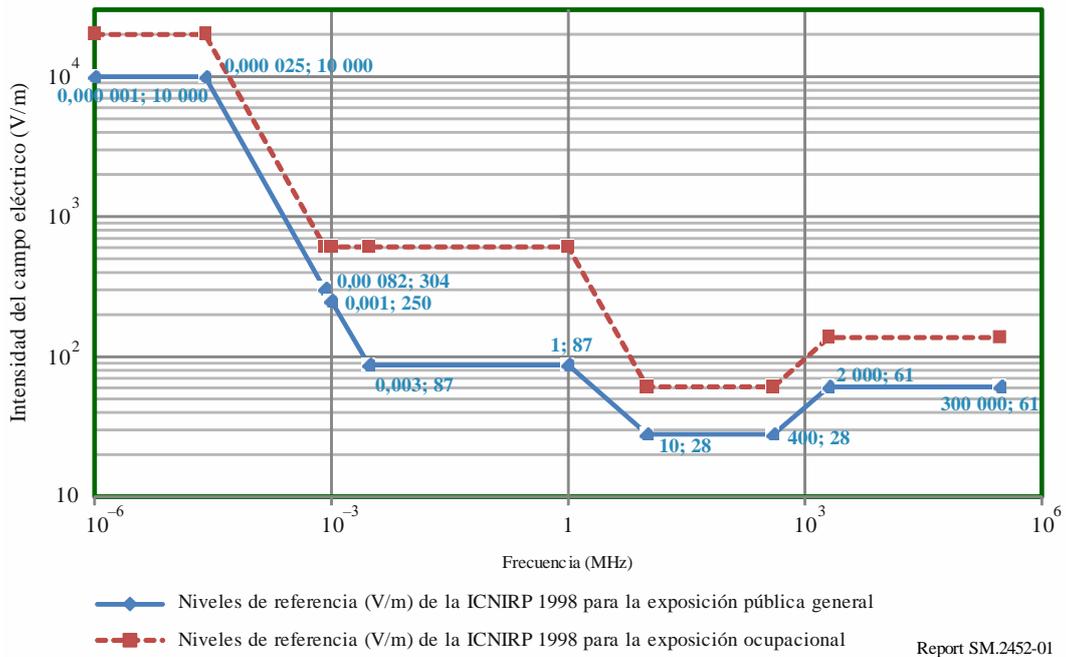
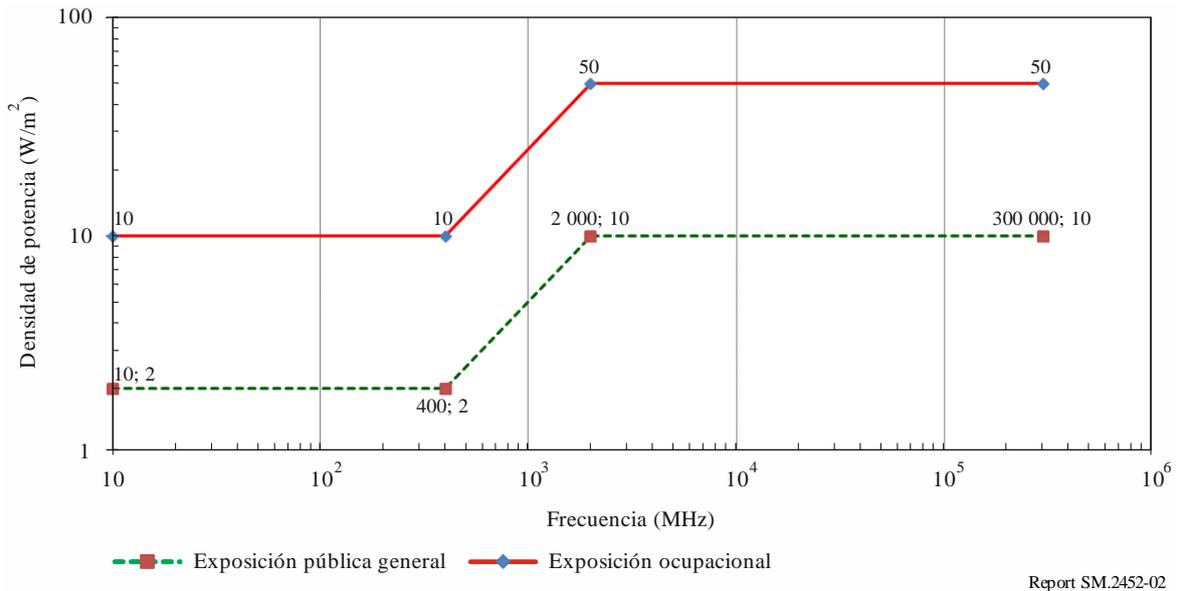


FIGURA 2

Niveles de referencia relativos a la densidad de potencia de la ICNIRP 1998 únicamente por encima de 10 MHz



³ Véase *Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques*, Chapter 9. Mazar, H. (http://mazar.atwebpages.com/Downloads/Chapter9RF-EMF_HumanHazards_Mazar2019.pdf).

2.2 Presentación de mapas de la intensidad de campo calculada en torno a los transmisores

2.2.1 Definiciones, cálculo en el espacio libre y supuestos

- p_t : potencia del transmisor (vatios)
 g_t : ganancia de la antena transmisora (numérica)
 $p.i.r.e.^4$: potencia isotrópica radiada equivalente (vatios)
 d : distancia desde el transmisor (metros)
 e : intensidad del campo eléctrico (IC) voltios/metro (V/M).

Para la pérdida de propagación en el espacio libre, $e = \frac{\sqrt{30 p.i.r.e.}}{d}$ y $d = \frac{\sqrt{30 p.i.r.e.}}{e}$.

Por ejemplo, dejando de lado los inmuebles y demás obstáculos, la distancia de seguridad para una p.i.r.e. de 60 kW, en condiciones de propagación en el espacio libre, los contornos de seguridad son de 45 m para 30 V/m (nivel de referencia para la exposición pública general a 482 MHz) y de 20 m para 66 V/m (nivel de referencia para la exposición ocupacional). Si se tienen en cuenta la orografía y los inmuebles, además de la pérdida de propagación en el espacio no libre, las distancias de seguridad calculadas son inferiores.

En las siguientes simulaciones el modelo de propagación tiene en cuenta la atenuación debida a los inmuebles.

Menos en el caso de los enlaces punto a punto, se supone que la altitud del receptor por encima del nivel del suelo es de 1,5 m. En las figuras se dan los valores de intensidad de campo (V/m); por ejemplo, a 482 MHz: 5, 15, 30 (nivel de referencia ICNIRP para la exposición pública general), 45 y 66 (nivel de referencia para la exposición ocupacional) V/m.

Los cálculos se realizan de la siguiente manera:

- 3D: se determina la cobertura tridimensional de las fachadas de los inmuebles con una altura de antena receptora variable entre 1 m y la altura del tejado. La mayor potencia recibida por cada inmueble se utiliza para determinar el color de intensidad de campo que corresponde a todo el inmueble.
- 2D: semejante a 3D, pero a partir de una proyección cenital en dos dimensiones.

2.2.2 Intensidad de campo calculada en torno a transmisores de TV digital (DTV)

A continuación se muestra un análisis para el canal 22 de ondas decimétricas (UHF) (Región 1):

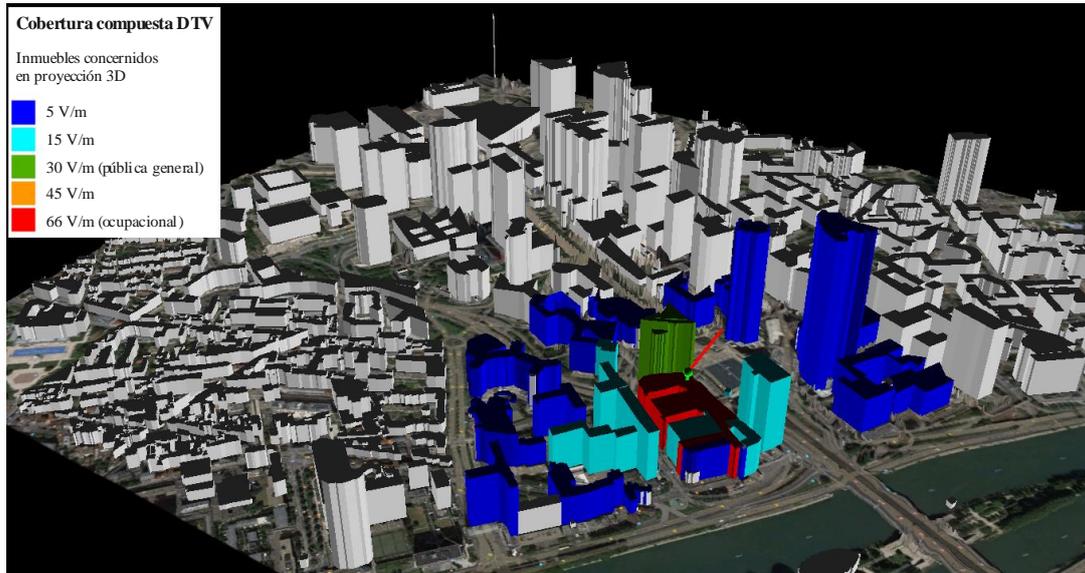
- 478-486 MHz (frecuencia central 482 MHz);
- transmisor con p.i.r.e. de 60 000 vatios;
- 60 m por encima del nivel del suelo.

A 482 MHz el nivel de referencia ICNIRP para la exposición pública general (véase el Cuadro 1) a la intensidad del campo eléctrico (IC) es de 30 V/m: $1,375f^{1/2}$ (MHz) = $1,375 \times 482^{1/2}$. El nivel de referencia ICNIRP para la exposición ocupacional a la IC (V/m) es de 66 V/m: $3f^{1/2}$ (MHz) = $3 \times 482^{1/2}$.

⁴ «Producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia con relación a una antena isotrópica en una dirección dada», Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT, Volumen 1, número **1.161**. La p.i.r.e. no es necesariamente el producto de la potencia máxima por la ganancia máxima; es la potencia radiada hacia el punto estudiado. Los transmisores celulares están controlados en potencia y no transmiten todo el tiempo a su nivel máximo. En los alrededores de la antena celular y debajo de ella la p.i.r.e. es baja, pues el lóbulo lateral en elevación está muy atenuado en relación con el haz principal de la antena.

En la siguiente Figura se muestran los inmuebles concernidos en una imagen 3D.

FIGURA 3
Contornos tridimensionales de exposición pública general y ocupacional a la DTV



Report SM.2452-03

2.2.3 Intensidad de campo calculada en torno a transmisores móviles terrestres

En la siguiente Figura se observan sólo las señales de enlace descendente: de las estaciones base a los dispositivos móviles. Por norma general, los diagramas celulares pueden ser no directivos en acimut o sectoriales (por ejemplo, tres sectores de 120°).

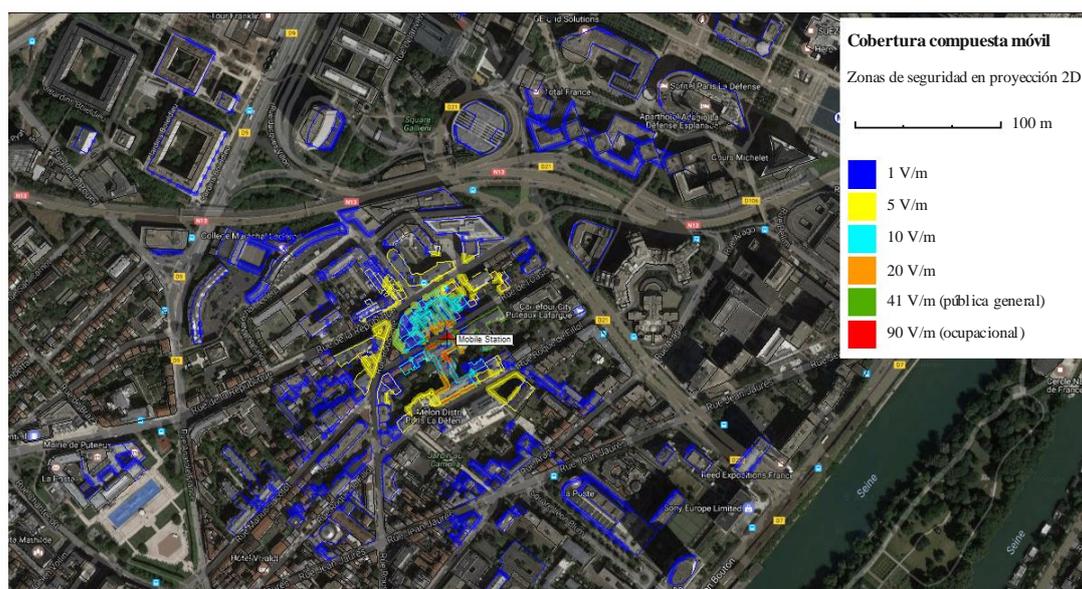
2.2.3.1 Intensidad de campo en torno a transmisores celulares

A 900 MHz, 30 metros por encima de la altura de los tejados, con una potencia de enlace descendente máxima de 100 W y una ganancia de antena (pérdidas incluidas) de 17 dBi, la p.i.r.e. es de 5 kW y el receptor está a 1,5 m por encima del nivel del suelo.

El nivel de referencia ICNIRP para la exposición pública general es de 41 ($1,375f^{1/2} = 1,375 \times 30$) V/m y el nivel de referencia ocupacional es de 90 V/M: $3f^{1/2}$ (MHz). La escala IC es 1, 5, 10, 20, 41 (pública general) y 90 (ocupacional) V/m.

En la Fig. 4 se muestran los inmuebles concernidos.

FIGURA 4

Imagen satelital bidimensional de las distancias de exposición celular

Report SM.2452-04

3 Guía práctica para la medición de CEM a fin de evaluar la exposición de las personas**3.1 Nociones básicas del proceso de medición de CEM**

Las directrices en vigor fijan límites para los efectos de la electroestimulación y el calentamiento térmico. A frecuencias inferiores a 100 kHz, los principales efectos se rigen por la ley de la inducción y la ley de Lapicque para electroestimulación. A frecuencias superiores a 10 MHz el principal efecto es el térmico. En la gama de frecuencias entre 100 kHz y 10 MHz pueden darse ambos efectos. Hay que tener en cuenta que cada efecto ha de evaluarse por separado, pues no se combinan y sus métodos de evaluación son completamente distintos.

El método adecuado para evaluar los efectos de electroestimulación se denomina método de cresta ponderada y se describe en las directrices ICNIRP de 2010. Sólo los sistemas de medición de CEM muy especializados utilizan este método de evaluación. Con los analizadores de espectro comunes no se puede evaluar el efecto de la electroestimulación. Cabe señalar que las directrices ICNIRP 2010 priman sobre las directrices ICNIRP 1998 sólo en lo que respecta a la electroestimulación.

El método de evaluación de la exposición debida al efecto término de los campos electromagnéticos externos se describe en las ecuaciones (9) y (10) de las directrices ICNIRP 1998. En esas ecuaciones se utiliza el valor cuadrático medio (RMS) de la intensidad de campo eléctrico y magnético externo ponderado. El resultado es un valor de exposición normalizado. Son admisibles valores de exposición iguales o inferiores a la unidad. La respuesta en frecuencia del filtro de ponderación es la recíproca de los niveles de referencia, que varían en función de la frecuencia. El tiempo de integración del detector RMS puede ser de hasta 6 minutos para frecuencias inferiores a 10 GHz. Para las frecuencias más altas, el tiempo de integración máximo permisible se reduce con el aumento de la frecuencia. Cabe señalar que pueden utilizarse tiempos de integración más cortos, aunque pueden causar una sobreestimación de la exposición real. Si la fluctuación de nivel del campo evaluado es rápida, en comparación con el tiempo de integración real, no habrá posibilidad de sobreestimación.

Hay que decir que, por encima de 10 MHz, la relación entre los niveles de referencia de los campos eléctrico y magnético es constante y tiene el mismo valor que la impedancia de campo en el espacio libre. Ambos niveles de referencia corresponden también al nivel de referencia de la densidad de potencia. Sin embargo, por debajo de 10 MHz, no hay nivel de referencia de la densidad de potencia y la relación entre los niveles de referencia de los campos eléctrico y magnético es inferior a la impedancia de campo en el espacio libre en lo que respecta a los niveles de referencia para la exposición pública general.

En CEI 62232 se definen tres regiones fuente en torno a una antena transmisora: I, II y III. La región fuente I es el campo cercano reactivo y la parte del campo cercano radiante en que los componentes de potencia reactiva aún no son inapreciables. La región fuente II es la parte del campo cercano radiante en que los componentes de potencia reactiva ya son inapreciables. La región fuente III es el campo lejano. Para la distancia, d_I , que separa las regiones I y II, en el Cuadro A.2 de CEI 62232 se dan los siguientes tres valores conservadores: λ , D y $D^2/4\lambda$, siendo λ la longitud de onda del campo transmitido y D la mayor dimensión de la antena transmisora. El mayor de los tres valores es el que se considera pertinente para d_I , y es una estimación conservadora de la distancia mínima a la que los componentes de potencia reactiva son inapreciables. Dicho de otro modo, a distancias mayores que d_I puede considerarse que la relación entre la magnitud de la intensidad del campo eléctrico y la magnitud de la intensidad del campo magnético, medidas en el mismo punto del espacio, es la impedancia de campo en el espacio libre.

En las regiones fuente II o III sólo se ha de medir el campo eléctrico, pues la exposición al campo magnético es idéntica en gamas de frecuencias superiores a 10 MHz. Sólo en el caso de los valores de referencia de la exposición pública general y en la gama de frecuencias inferior a 10 MHz la exposición al campo magnético es diferente e inferior. En la región fuente I, no obstante, se han de evaluar ambos campos, considerándose pertinente el más elevado de ambos valores. Por encima de 1 GHz en la práctica sólo se evalúa el campo eléctrico, porque en esa gama de frecuencias apenas se dispone de sondas o antenas para medir el campo magnético, ni tampoco se necesitan, pues en la mayoría de los casos la exposición ocurre en las regiones fuente II o III.

Téngase en cuenta que los niveles de referencia de los Cuadros 6 y 7 de ICNIRP 1998 comprenden toda la gama de frecuencias desde CC a 300 GHz. Sólo hasta 1 MHz estos niveles de referencia son pertinentes para el efecto térmico. En las ecuaciones (9) y (10) de las directrices ICNIRP se deja claro que, entre 100 kHz y 1 MHz, los niveles de referencia deben sustituirse por los parámetros c o d . Utilizar los niveles de referencia de los Cuadros 6 y 7 de las directrices ICNIRP por debajo de 1 MHz para evaluar la exposición a efectos térmicos llevaría a una sobreestimación de la exposición real. Con los sistemas de medición de CEM más modernos, las curvas de nivel de referencia de las directrices ICNIRP están disponibles en una versión «sólo efectos distintos de la electroestimulación» y se pueden utilizar para evaluar el cumplimiento sin caer en la sobreestimación.

En las directrices ICNIRP se supone un acoplamiento máximo del campo externo a la persona expuesta, lo que implica que la estimación de la exposición en un punto concreto del espacio debe ser independiente de la polarización y el sentido de propagación del campo externo. En la práctica esto se logra midiendo los valores RMS de tres antenas o sensores ortogonales colocados y calculando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (RSS) isótropa de esos tres valores RMS. Hay sondas isótropas para frecuencias hasta 90 GHz y antenas isótropas para frecuencias hasta 6 GHz.

En las directrices ICNIRP se supone que la intensidad del campo externo no perturbada se media en todo el cuerpo de la persona expuesta antes de compararla con los niveles de referencia, con la condición expresa de que no se rebasen los límites básicos de exposición localizada. Esto significa que, en principio, se puede hacer el promedio en el volumen de un cuerpo humano, pero que en ocasiones se generará una subestimación. Por consiguiente, en la práctica se aplica el siguiente método conservador:

Medir los valores de exposición local en toda la zona de interés sin la presencia de personas y no aplicar la promediación espacial en torno a cada punto de medición, o aplicarla con moderación. Utilizar la exposición máxima como exposición pertinente para la zona de interés. Conviene excluir todos los puntos de medición que se encuentren a menos de 0,5 m de objetos conductores. De este modo puede evitarse la sobreestimación debida al efecto de acoplamiento entre las antenas de medición y los objetos y debida a la doble radiación de los objetos.

En resumen, el método de evaluación ideal de la exposición a efectos distintos de la electroestimulación de campos electromagnéticos externos en la zona de interés puede formularse como sigue:

- Medir los valores RMS cuadrado, isótropo y ponderado de la intensidad de los campos eléctrico y/o magnético en cualquier punto de la zona de interés donde haya probabilidad de exposición de las personas.
- No utilizar la promediación espacial en torno a cada punto o utilizarla moderadamente.
- Asegurarse de que no hay personas expuestas durante la toma de las medidas.
- Excluir las mediciones efectuadas en todo punto que se encuentre a una distancia inferior a 0,5 m de un objeto conductor.
- Utilizar un tiempo de integración RMS no superior al tiempo de integración máximo permitido.
- Tomar medidas durante un periodo suficientemente largo para garantizar que se dará la exposición máxima durante ese periodo.
- Utilizar el valor de exposición máximo de todos los puntos y a lo largo de todo el tiempo de observación como resultado final. Si este resultado es inferior a la unidad, la exposición en la zona de interés es aceptable.

Evidentemente, este método «ideal» no puede aplicarse en la práctica, pues habría que utilizar demasiados puntos en el espacio y el tiempo, pero muestra claramente el objetivo de los métodos de evaluación reales.

Hay otro efecto, el del calentamiento por microondas, cuyos límites ha especificado la ICNIRP, que puede darse en frecuencias superiores a 100 kHz. Este efecto sólo puede ser dominante cuando las señales electromagnéticas tienen un factor de cresta extremadamente alto. En tal caso la envolvente de una señal RF puede ser audible para las personas. Por este motivo las ICNIRP 1998 también contienen valores de referencia adicionales para valores cresta en esta gama de frecuencias. En la práctica, este efecto sólo es pertinente para las señales generadas por sistemas de radar.

Las siguientes cláusulas se concentran en la evaluación del cumplimiento de los límites de efectos distintos de la electroestimulación únicamente, pues la evaluación de los demás límites de la ICNIRP difiere mucho de la evaluación de los efectos térmicos y no es pertinente para la mayoría de transmisores inalámbricos. Se muestra cómo evaluar de manera fiable, precisa y efectiva la exposición.

3.2 Instrumentos de medición con funcionalidades específicas para la evaluación de CEM

3.2.1 Monitores personales

Los monitores de CEM personales están diseñados para que los lleven encima las personas con probabilidad de exponerse a campos electromagnéticos elevados. Los monitores emiten una alerta acústica, óptica o vibratoria cuando se rebasa un determinado umbral de exposición real. Al realizar las mediciones de exposición a CEM es probable que el personal que realiza las mediciones se exponga a CEM elevados. Por consiguiente, conviene llevar un monitor personal durante las mediciones. En la Fig. 5 se muestra un monitor personal para personas que trabajan cerca de antenas.

FIGURA 5

Monitor personal para exposición ocupacional

Report SM.2452-05

3.2.2 Medidores de banda ancha

Los medidores de banda ancha con «sondas conformadas» miden la exposición a CEM directamente, pues obtienen los valores RMS cuadrado, isotrópico y ponderado de la intensidad del campo eléctrico. El tiempo de integración RMS puede oscilar entre 100 ms y unos 10 minutos. Hay sondas conformadas para frecuencias hasta 50 GHz y conformes a varias normas, incluidas ICNIRP 1998 e IEEE C95.1-2005.

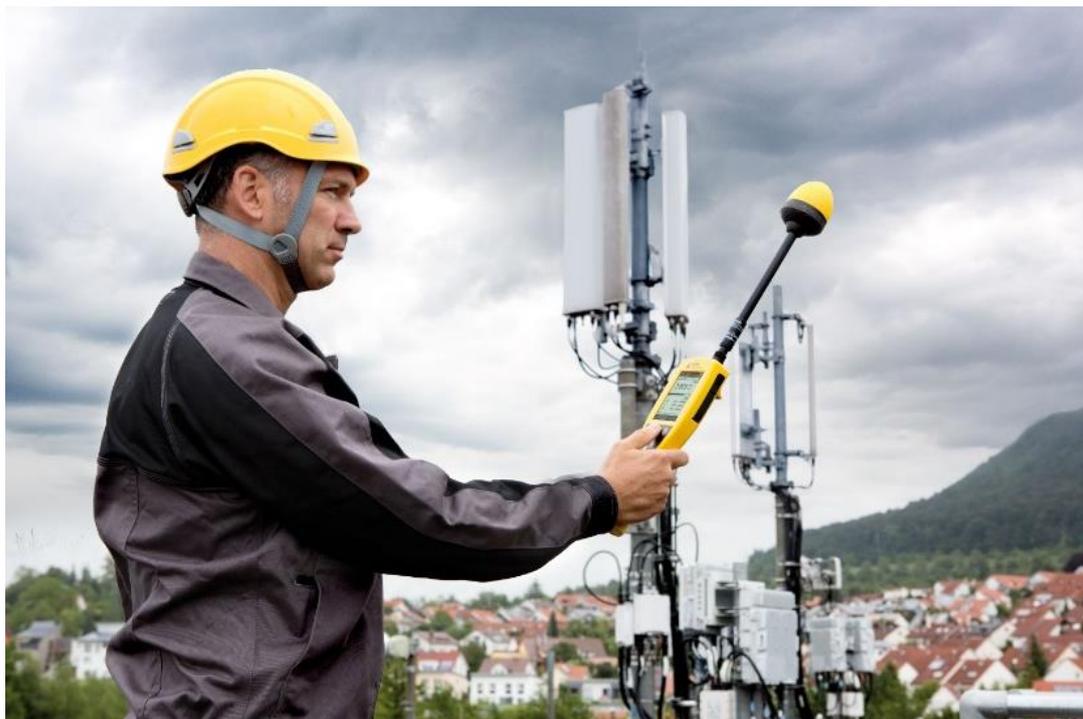
Los medidores de banda ancha para la evaluación de CEM pueden medir valores de exposición muy superiores a la unidad, lo que implica que sus componentes electrónicos deben ser inmunes a intensidades de campo muy elevadas. Eso implica también que el personal que toma las medidas debe poder leer los resultados manteniendo una distancia de seguridad. Por consiguiente, los medidores de banda ancha para la evaluación de CEM suelen disponer de un enlace óptico para mostrar los resultados en un segundo medidor, que sirve de controlador, o en un dispositivo informático cualquiera.

Los medidores de banda ancha resultan muy útiles, pues muestran gráficamente los valores de exposición a lo largo del tiempo y poseen funciones de promediación espacial y máxima retención.

Si se ha de medir la exposición a todos los transmisores pertinente, en la mayoría de los casos basta con tomar todas las medidas con un medidor de banda ancha con sonda conformada. Si se utilizan diodos, en lugar de termopares, como detectores en las sondas, cabe señalar que las señales con factores de cresta elevados pueden causar una fuerte incertidumbre en las mediciones cuando los valores RMS medidos son superiores a la gama RMS verdadera de las sondas. Incluso cuando se ha de medir la exposición a varios transmisores por separado los medidores de banda ancha son muy útiles para obtener una rápida visión de la estructura espacial y temporal de los valores totales de exposición. Una vez conocidos los puntos de mayor exposición y su estructura temporal, puede planificarse más eficazmente un procedimiento de medición selectivo.

También hay medidores de banda ancha con sondas isotrópicas de banda ancha con respuesta de frecuencia uniforme para campos magnéticos hasta 1 GHz y campos eléctricos hasta 90 GHz.

FIGURA 6
Medidor de banda ancha con sonda isotrópica



Report SM.2452-06

3.2.3 Medidores selectivos en frecuencia

Se ha de realizar la medición selectiva en frecuencia cuando se quieren evaluar varios transmisores por separado. Los medidores selectivos de CEM son analizadores de espectro normales o medidores selectivos particulares que no ofrecen las funcionalidades adicionales de los analizadores de espectro normales. Para medir CEM conviene contar con las siguientes funcionalidades:

- portabilidad y funcionamiento con batería;
- inmunidad a intensidades de campo elevadas;
- control remoto (eléctrico u óptico);
- soporte directo de antenas isotrópicas;
- detector RMS con tiempo de integración configurable y función de máxima retención en todos los modos de medición;
- cálculo automático del valor RSS;
- resultados en intensidad de campo y unidades de exposición;
- medición de cada servicio con configuración personalizable;
- desmoduladores para UMTS y LTE;
- opciones de potencia de canal;
- calibración detectable del medidor y las antenas;
- gama de frecuencias mínima de 9 kHz a 6 GHz, preferiblemente de 9 kHz a 18 GHz o 40 GHz, para englobar las nuevas bandas de comunicaciones inalámbricas. Puede ser útil la extensión con mezcladores externos para sistemas inalámbricos, como los dispositivos de corto alcance entre 60 y 66 GHz, los dispositivos inalámbricos de gigabits (WiGig), los radares en automóviles y escáneres.

En la Fig. 7 se muestran medidores selectivos en frecuencia que utilizan antenas isotrópicas.

FIGURA 7

Medidores selectivos en frecuencia para CEM

Analizador de espectro portátil
con antenas isotrópicas de 9 kHz a 6 GHz



Medidor selectivo en frecuencia
para CEM con antena isotrópica



Report SM.2452-07

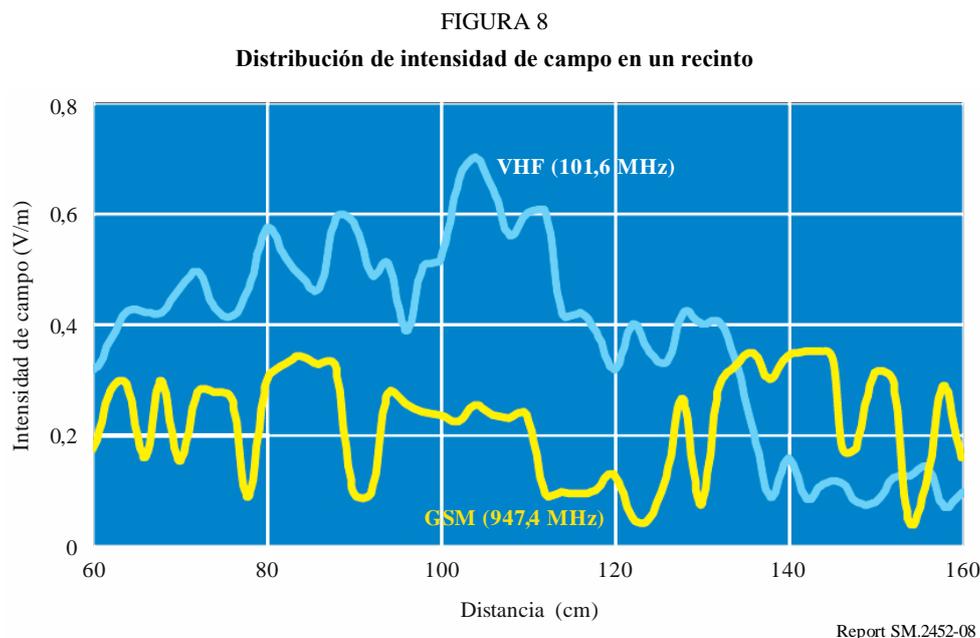
3.3 Reducción del número de puntos de medición en el espacio

La exposición de las personas a campos electromagnéticos puede variar mucho de un punto a otro en el espacio. La distancia con respecto a las antenas transmisoras y el diagrama direccional de estas últimas pueden tener una gran influencia en el nivel de exposición incluso en condiciones de espacio libre. En la realidad también los obstáculos y objetos reflectantes pueden influir mucho en el nivel de exposición entre dos puntos del espacio. Antes de iniciar una campaña de medición es muy conveniente tener una idea general de todos los transmisores potencialmente relevantes y del entorno electromagnético.

Una posibilidad es realizar una inspección óptica de la zona de interés. Como mínimo se verán las antenas transmisoras visibles y podrá evaluarse su potencial pertinencia estimando su potencia de transmisión y diagramas direccionales. También se identificarán los obstáculos y reflectores más importantes. Con esta información podrán identificarse las zonas más pequeñas, donde probablemente los niveles de exposición sean mayores. Esas zonas serán, en particular, las que se encuentren en la visual de los lóbulos principales del diagrama direccional de la antena transmisora. Para las mediciones en interiores hay que tener en cuenta que las ventanas pueden atenuar notablemente los campos electromagnéticos, por lo que, de ser posible, habrán de dejarse abiertas mientras se toman las medidas.

Otra manera de hacerse una idea es realizar una rápida serie de mediciones generales con medidores de banda ancha con sondas conformadas. Si para ello se utilizan sondas de frecuencia uniforme, hay que tener en cuenta que la intensidad de campo espacial máxima está muy correlacionada con la exposición espacial máxima, pero no son idénticas. Si sólo se ha de medir la exposición a un transmisor, y si ese transmisor no es claramente dominante en la exposición total, necesariamente se han de utilizar medidores selectivos en frecuencia para la medición general inicial. En un segundo momento se han de evaluar más detalladas las zonas con altos valores de exposición. Mover la sonda del medidor de banda ancha a una velocidad constante en líneas rectas a lo largo de la zona de fuerte exposición reconocida y observar los gráficos de los valores de exposición registrados a lo largo del tiempo permite conocer la resolución espacial necesaria para detectar los valores máximos en esa misma zona en un segundo momento.

En la Fig. 8 se muestran una señal FM medida a 101,6 MHz y un enlace descendente GSM a 947,4 MHz.



Una vez detectadas las zonas de fuerte exposición, se han de encontrar los valores de exposición máximos locales. Cabe señalar que, según la ICNIRP, es aceptable la promediación espacial en volúmenes moderados. De no hacerse promediación espacial alguna, es posible que se sobreestime notablemente la exposición real. Determinar el valor máximo local con sondas o antenas isotrópicas es fácil. El método más rápido consiste en barrer la zona de fuerte exposición con un movimiento rápido de la sonda o antena utilizando la función de máxima retención. Con el mismo procedimiento puede efectuarse una promediación espacial moderada configurando un tiempo de integración RMS que se ajuste al volumen de integración deseado y a la velocidad real del movimiento. El segundo método es el denominado de cuadrícula: se define una cuadrícula en la zona de fuerte exposición con una resolución espacial suficiente y se mide la exposición en cada uno de los puntos de la cuadrícula. Este método puede combinarse también con la promediación espacial moderada. Para una cuadrícula pequeña de 3 o 6 puntos es una alternativa útil que evita la influencia de la persona que toma la medida. Para cuadrículas grandes este método exige un tiempo considerable.

Para frecuencias superiores a 6 GHz no se dispone todavía de antenas isotrópicas, por lo que para esa gama de frecuencias se utilizan medidores de banda ancha con sondas isotrópicas o analizadores de espectro con antenas bicónicas o direccionales. Encontrar el valor de exposición máximo local con antenas bicónicas o direccionales lleva más tiempo que con sondas o antenas isotrópicas. En la práctica, con esas antenas se suele utilizar el método de batida con el que la posición, la dirección y la polarización de la antena cambian aleatoriamente dentro del volumen estudiado moviendo la antena con la mano. El máximo local se detecta utilizando la función de retención máxima del medidor selectivo o el analizador de espectro durante la batida. El método de cuadrícula con antenas direccionales llevaría demasiado tiempo porque sería necesario cambiar múltiples veces la polarización y dirección de la antena en cada uno de los puntos para garantizar que se obtiene en cada uno de ellos el valor de exposición con máximo acoplamiento del campo a la antena.

3.4 Reducción del tiempo de observación y extrapolación de la exposición máxima

En algunos transmisores la potencia radiada puede variar ampliamente a lo largo del tiempo. En el caso de las estaciones base de servicios móviles celulares, en particular, la potencia transmitida depende mucho de la carga de tráfico real y del comportamiento de los usuarios. Es posible que durante un tiempo de observación de 24 horas no se alcance la potencia máxima porque la carga de tráfico depende también del día de la semana e, incluso, de la estación. Es fundamental reducir el tiempo de observación a un valor razonable en la práctica. Por consiguiente, se suele medir la exposición a algunos componentes de la señal que se transmiten con una potencia que no depende de la carga de tráfico ni del comportamiento del usuario. En un segundo momento se extrapola esa exposición a la que se daría si el transmisor empleara su potencia máxima. Sin embargo, no es necesario realizar la extrapolación si la potencia del transmisor es más o menos constante a lo largo del tiempo. En tal caso, bastan tiempos de observación breves para evaluar la exposición máxima.

3.5 Cómo evaluar la exposición a servicios concretos

Con medidores de banda ancha y sondas conformadas es posible evaluar cómodamente la exposición total actual. Sin embargo, si se ha de evaluar la exposición a varios transmisores por separado, se han de utilizar técnicas de medición selectiva. En las siguientes subcláusulas se explica cómo evaluar la exposición a servicios concretos con técnicas de medición selectiva. Cuando procede se describe el procedimiento de extrapolación.

3.5.1 Método general para servicios en que no procede la extrapolación

No es necesario proceder a la extrapolación con sistemas que transmiten con una potencia más o menos constante, por ejemplo, servicios de radio FM, radio digital y televisión digital terrenal. Esos transmisores pueden evaluarse con mucha facilidad. Puede utilizarse para ello un medidor selectivo en frecuencia. Asimismo, si la p.i.r.e. media transmitida no es constante, puede realizarse el procedimiento de medición siguiente, pero sólo se obtendrá la exposición real, no la máxima.

En primer lugar, se ha de seleccionar el filtro de selección adecuado para capturar casi el 100% de la potencia del canal que se quiere evaluar y la menor potencia posible de los canales adyacentes.

La utilización de filtros de selección gaussianos en modos espectrales puede generar una fuerte incertidumbre en la medición si lo que se miden son sistemas con un espaciado de canal reducido. Esa incertidumbre puede evitarse utilizando opciones de potencia de canal o modos de recepción con filtros de canal adecuados.

A continuación hay que determinar el tiempo de integración adecuado del detector RMS. El tiempo de integración seleccionado ha de ser lo suficientemente largo para reducir las fluctuaciones de la potencia detectada a un valor inapreciable, pero no mucho más largo a fin de acelerar el proceso de medición. También ha de ser más corto que el tiempo de integración máximo permisible de los correspondientes límites de exposición. Por último, el tiempo de integración debe ser lo suficientemente largo para contener, como mínimo 100 muestras.

3.5.2 Métodos para servicios concretos

3.5.2.1 Estaciones base GSM

La red celular GSM es uno de los servicios cuya potencia de transmisión depende mucho de la carga de tráfico y el comportamiento de los usuarios. Como ocurre con todos los servicios, la exposición real puede estimarse con el método general descrito en las cláusulas anteriores, pero el nivel máximo de exposición posible de una estación base también ha de estar determinado por los reguladores u operadores.

Al menos uno de los intervalos de los ocho que conforman una trama GSM se transmite a la máxima potencia por el canal de control de radiodifusión (BCCH) de una célula GSM. Otros intervalos pueden transmitirse a una potencia igual o inferior. Algunos intervalos pueden utilizar la modulación por desplazamiento mínimo gaussiano (GMSK) y otros, velocidades de datos mejoradas para la evolución de las GSM (EDGE). La potencia de los intervalos EDGE fluctúa en torno a la potencia media del intervalo, porque este tipo de modulación genera señales similares a ruido. El tiempo de integración RMS para las mediciones del BCCH debe ser inferior a la duración de un intervalo (577 μ s) para garantizar que se captura sin atenuación la potencia máxima de un único intervalo. El tiempo de integración no debe ser mucho más corto, porque las fluctuaciones de potencia debidas a la modulación EDGE tienen valores entre pequeños e inapreciables. El valor RMS máximo del periodo equivale a la máxima potencia transmitida del BCCH. Una célula transmite también por los canales de tráfico (TCH) a diferentes frecuencias. Se puede extrapolar la exposición máxima posible a todos los canales de una célula GSM. Se trata de la máxima exposición posible al BCCH multiplicada por el número total de canales de frecuencias de la célula que pueden funcionar al mismo tiempo. La exposición a todas las células recibibles en el emplazamiento de interés es la suma de todos los valores de exposición de cada célula.

3.5.2.2 Estaciones base UMTS

La red celular UMTS es también uno de los servicios cuya potencia de transmisión depende mucho de la carga de tráfico y el comportamiento del usuario. Si se desea extrapolar la exposición máxima posible, el método más perfeccionado es el siguiente:

UMTS es un sistema de acceso múltiple por división de código (AMDC). Pueden transmitirse hasta 512 canales de datos por célula. Distintos códigos de canalización dispersan los canales de velocidad de datos relativamente baja a lo ancho del relativamente gran ancho de banda de un canal de frecuencias UMTS. Como cada célula utiliza un código de aleatorización distinto, también es posible separar las señales de distintas células que utilizan el mismo canal de frecuencias. En cada célula hay un canal piloto común primario (P-CPICH), que se transmite con una potencia constante. El proveedor de servicio puede fijar la relación entre la potencia máxima de la célula y la potencia del P-CPICH, que normalmente oscila entre 8 y 15. Así, si se mide la exposición al P-CPICH de una célula concreta y se multiplica por la relación de potencia de la célula, se obtiene la exposición máxima posible a esa célula. La exposición a todas las células es la suma de todos los valores de exposición de cada una de las células.

3.5.2.3 Estaciones base LTE

La red celular LTE es también uno de los servicios cuya potencia de transmisión depende en gran medida de la carga de tráfico y del comportamiento del usuario. Si se desea extrapolar la exposición máxima posible, el método más perfeccionado es el siguiente:

LTE es un sistema de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (MDFO). Puede utilizar el modo dúplex por división de frecuencia (FDD) o dúplex por división de tiempo (TDD). Hay una, dos o cuatro señales de referencia específicas de la célula integradas en la malla de recursos de una trama LTE. El número de señales de referencia es idéntico al número de antenas transmisoras. Cada señal de referencia se transmite únicamente por su antena asociada y con una potencia constante. Cabe señalar que la potencia de transmisión de los símbolos dependientes del tráfico se distribuye equitativamente entre todas las antenas en uso.

El valor medio de la exposición a las señales de referencia específicas de una única célula transmisora de recursos se mide, en un primer momento, para cada una de las antenas y células por separado. A continuación se calcula la suma de todas las antenas utilizadas por cada célula concreta. En tercer lugar se multiplica la suma por un factor de extrapolación y se obtiene la exposición máxima posible a cada célula concreta. La exposición a todas las células es la suma de los valores de exposición de cada una de las células.

De acuerdo con CEI 62232, el factor de extrapolación para las células en modo FDD es el número de subportadoras dividido por un «factor de impulso». El número de subportadoras depende del ancho de banda de la célula únicamente (72, 180, 300, 600, 900 o 1 200 subportadoras para un ancho de banda de 1,4, 3, 5, 10, 15 o 20 MHz). El «factor de impulso» puede depender de la configuración de la célula y, en caso de duda, ha de solicitarse al proveedor de servicio. En muchos casos, el «factor de impulso» correcto, en el sentido de CEI 62232, es idéntico al número de antenas.

Para una célula en modo TDD el factor de extrapolación es el mismo que para la célula en modo FDD, pero multiplicado por un factor de corrección, definido por la relación entre el tiempo utilizado para el enlace descendente dentro de una trama y la longitud de la trama. La relación real puede medirse de manera aproximada con el modo «alcance» de un medidor selectivo, o puede calcularse exactamente si se conocen la configuración enlace ascendente-enlace descendente, la configuración de subtrama especial y la longitud del prefijo cíclico de esa célula concreta. El factor de corrección puede oscilar entre 34/140 y 106/120. En caso de duda, o si el proveedor de servicio no garantiza la continuidad de la configuración enlace ascendente-enlace descendente, se debe utilizar el factor de corrección máximo.

3.5.2.4 Puntos de acceso Wi-Fi

Las redes Wi-Fi son una aplicación cuya potencia de transmisión depende mucho de la carga de tráfico y el comportamiento del usuario. La señal RF MDFO se emite en ráfagas, por lo que todas las portadoras del canal están activas en determinados momentos, dependiendo del tráfico. Por consiguiente, lo más difícil resulta evaluar la exposición en modo reposo, cuando sólo se transmiten secuencias de balizas de 0,5 ms de duración cada pocas decenas de milisegundos. Con el siguiente procedimiento de medición se puede extrapolar la exposición máxima.

La potencia de canal de la señal Wi-Fi se mide continuamente con un tiempo de integración RMS inferior a 0,5 ms. Se determina la potencia de canal máxima a lo largo del tiempo. La potencia máxima de canal ha de convertirse en la correspondiente intensidad de campo. Esta intensidad de campo puede compararse con el límite de exposición. Si el ciclo de trabajo del sistema Wi-Fi se limita a valores inferiores al 100%, se ha de ajustar la exposición máxima en función del ciclo de trabajo.

4 Referencias

Manual de Comprobación Técnica del Espectro de la UIT, Capítulo 5.6

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

Recomendaciones UIT-T

- 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.90: Técnicas de evaluación y procedimientos de trabajo para el cumplimiento de los límites de tensión de la exposición al campo electromagnético del personal de explotación de la red
- K.91: Orientación para la valoración, la evaluación y el seguimiento de la exposición humana a los campos electromagnéticos de las radiofrecuencias

- K Supl.1: UIT-T K.91 – Guide on electromagnetic fields and health
- K Supl.4: UIT-T K.91 – Electromagnetic field considerations in smart sustainable cities
- 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.122: Niveles de exposición a proximidad inmediata de antenas de radiocomunicaciones
- K Supl.9: 5G technology and human exposure to RF EMF
- K Supl.13: Radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels from mobile
- K Supl.14: impact of RF-EMF exposure limits stricter than the ICNIRP or IEEE guidelines
- K Supl.16: Electromagnetic field compliance assessments for 5G wireless networks

ICNIRP

ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), ICNIRP Guidelines, Health Physics, vol.74, pp. 494-522, 1998

ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz), ICNIRP Guidelines, Health Physics, vol.99, pp. 818-836, 2010

IEEE

IEEE Std C95.1-2005: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz

Comisión Electrotécnica Internacional (CEI)

IEC 62232:2017: Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure

5 Glosario y abreviaturas

2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
AGL	Por encima del nivel del suelo (<i>above ground level</i>)
BCCH	Canal de control de radiodifusión (<i>broadcast control channel</i>)
CEI	Comisión Electrotécnica Internacional
CEM	Campo electromagnético
DTM	Cartografía digital (<i>digital terrain mapping</i>)
DTV	Televisión digital (<i>digital TV</i>)
FDD	Dúplex por división de frecuencia (<i>frequency division duplex</i>)
IC	Intensidad de campo
ICNIRP	Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (<i>international commission on non-ionizing radiation protection</i>)
IEEE	Instituto de Ingenieros Electricos y Electrotécnicos (<i>institute of electrical and electronics engineers</i>)
IMT	Telecomunicaciones móviles internacionales (<i>international mobile communications</i>)

LTE	Evolución a largo plazo (<i>long-term evolution</i>)
MDFO	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
OMS	Organización Mundial de la Salud
p.i.r.e.	Potencia radiada isótropa equivalente
P-CPICH	Canal piloto común primario (<i>primary common pilot channel</i>)
RF	Radiofrecuencia
RMS	Valor cuadrático medio (<i>root mean square</i>)
RSS	Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (<i>Root of sum of squares</i>)
TDD	Dúplex por división en el tiempo (<i>time division duplex</i>)
UMTS	Sistema de comunicaciones móviles universales (<i>universal mobile telecommunications system</i>)
WiGig	Gigabit inalámbrico (<i>wireless gigabit</i>)
