



Documentación

NTP 522: Radiofrecuencias y microondas (I): evaluación de la exposición laboral

Radiofréquences et microondes. Évaluation des expositions laboral
Radio frequencies and microwaves. Occupational exposure evaluation

Redactor:

Pablo Luna Mendaza
Licenciado en Ciencias Químicas

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO

Objetivo

Los principios físicos sobre los que se asienta la evaluación de las radiaciones electromagnéticas, las magnitudes a medir así como sus efectos sobre el ser humano, se relataron ya en la Nota Técnica de Prevención **NTP-234**, y la mayor parte del contenido resiste el paso del tiempo, por lo que es conveniente su lectura previa a la de este documento. No obstante, la aparición de un criterio de valoración normalizado Norma ENV-50166/2 (Exposición humana a campos electromagnéticos de 10 kHz a 300 GHz) que entonces no existía, requiere hacer algunos comentarios de esta norma, que en principio puede ser una referencia en nuestro país para la evaluación de las exposiciones laborales o extralaborales. En la siguiente Nota Técnica de Prevención, se señalan algunas medidas de prevención aplicables a este tipo de exposiciones.

Aunque la denominación de las radiaciones según su frecuencia varía según diferentes clasificaciones, la mencionada norma abarca aquéllas cuya frecuencia se sitúa entre 10 kHz y 300 GHz. y las denomina Radiofrecuencias. En realidad abarca las bandas que habitualmente se denominan Radiofrecuencias (RF) y Microondas (MO)

Fundamentos de la evaluación

Restricciones básicas fisiológicas

La evaluación a través de esta norma se sostiene en el establecimiento de ciertas restricciones básicas fisiológicas, que son valores máximos de magnitudes que pueden ser generadas en el organismo expuesto a radiaciones RF-MO y que podrían ocasionar la aparición de efectos adversos para la salud. Las restricciones básicas en las que se basa la evaluación son:

Densidad de corriente inducida (J)

La presencia de un campo eléctrico en el interior del organismo generado por un campo eléctrico o un campo magnético externo variable en el tiempo induce una corriente eléctrica cuya densidad de corriente (J) es proporcional a los valores de la intensidad del campo eléctrico (E) o magnético (H) respectivamente y a la frecuencia según las

expresiones siguientes:

$$J = k f E \quad (1)$$

$$J = \sigma r \pi f \mu H \quad (2)$$

En la ecuación (1), k es un factor en el que interviene la forma, constitución y orientación de la masa sobre la que actúa E y f es la frecuencia en hercios.

En la ecuación (2), s es la conductividad del medio, r es el radio de la supuesta espira que atraviesa perpendicularmente el campo magnético, m es la permeabilidad magnética y f es la frecuencia de la variación sinusoidal de H.

Para la aplicación de la ecuación (1) se acepta un valor $k = 10^{-8}$ S/Hz m (Siemens/Hercio metro). En la ecuación (2) se toma un valor de $\sigma = 0.6$ S/m, un radio de 0.1 m y un valor de $m = 4\pi 10^{-7}$ H/m. Estos valores son aceptables para la zona del corazón.

Para frecuencias de valores entre 10kHz y 10 MHz, la corriente inducida no debe exceder del valor $J = f/100$ mA/m², con lo que aplicando las expresiones (1) y (2) nos arroja valores de $E = 1000$ V/m y $H = 42.2$ A/m.

Estos son los valores de referencia ambientales de las magnitudes medibles E y H que si no se sobrepasan cumplirán la Restricción Básica J.

Tasa de absorción específica o Specific Absortion Rate (SAR)

Los tejidos pueden ver incrementada su temperatura debido a la absorción de energía (en forma de calor) transmitida por las radiaciones electromagnéticas de frecuencias entre 10 kHz y 300 Ghz. Se establece preventivamente que el aumento de 1 °C de la temperatura es el máximo aceptable para evitar efectos adversos para la salud (efectos térmicos). La energía necesaria para aumentar la temperatura de un cuerpo se puede expresar como:

$$Q = \Delta T C_e m$$

siendo Q la energía necesaria para aumentar en ΔT la temperatura de un cuerpo de masa m y calor específico C_e .

La velocidad con que aumenta la temperatura será:

$$\Delta T/\Delta t = Q m / \Delta t C_e$$

donde $Q/\Delta t$ será la potencia calorífica necesaria, para generar tal gradiente de temperatura. Tal potencia expresada por unidad de masa se denomina SAR (specific absortion rate) y sus unidades son W/kg.

$$C_e \Delta T/\Delta t = SAR \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la diferente composición de los tejidos que forman el organismo, también los valores de C_e son variables. Se sabe que un valor máximo de la $SAR = 4$ W/kg durante más de 6 minutos, promediado en todo el cuerpo, es suficiente para elevar 1 °C la temperatura de los tejidos, por lo que se propone un valor máximo admisible (restricción

básica) resultante de aplicar un coeficiente de seguridad de 10, esto es $SAR \leq 0.4 \text{ W/kg}$.

La SAR existente se puede calcular teóricamente a través de simulaciones complejas mediante diversos métodos que recoge la bibliografía, pero en la práctica es difícil obtener ese dato. Las ecuaciones básicas son, para la determinación de SAR además de la (3), las siguientes:

$$SAR = \sigma (E_i)^2 / \rho \quad (4)$$

$$SAR = J^2 / \rho \sigma \quad (5)$$

siendo σ la conductividad en Siemens/m, ρ la densidad del tejido corporal en kg/m^3 , J el valor de la densidad inducida de corriente eléctrica en Amperios /m, y E_i el campo eléctrico en el interior del organismo, en Voltios/m, todos ellos referidos al tejido corporal correspondiente.

A partir del valor máximo aceptado de la $SAR = 0.4 \text{ W/kg}$, se deducen los valores de intensidad del campo eléctrico y magnético externos que sirven de referencia como valores a no superar.

Al efectuar el promedio de la SAR en todo el cuerpo, podrían darse valores muy altos en zonas pequeñas sin superar por ello la media de 0.4 W/kg . En tal sentido no es tolerable cualquier valor local, por lo que se proponen limitaciones adicionales para proteger zonas poco refrigeradas, como son aquéllas pobremente vascularizadas (cristalino, testículos, etc.).

Las limitaciones adicionales a la SAR promedio, se refieren a pequeñas zonas del cuerpo (10 gramos de masa, supuesta forma de cubo) y se diferencian las manos, muñecas, pies y tobillos ($SAR \leq 20 \text{ W/kg}$) y resto de zonas del cuerpo ($SAR \leq 10 \text{ W/kg}$)

Absorción específica o Specific Absortion (SA)

Esta limitación a la energía disipada en muy cortos periodos de tiempo pretende prevenir efectos «auditivos» que aunque se consideran dentro de los posibles efectos generados por las RF como de bajo nivel, fueron ya, en los años 40, descritos por trabajadores expuestos a RF-MO, en lo que se llamaba coloquialmente «oír el radar» y que se traduce en silbidos o zumbidos.

La absorción de radiación de RFMO en un material dieléctrico, puede producir energía acústica a través de diferentes mecanismos entre los que se destacan la fuerza electrocompresiva (deformación elástica en presencia de un campo electromagnético) y tensión termoelástica (expansión debida al incremento de temperatura). Estos mecanismos pueden producir ondas de presión a nivel del oído interno que son interpretadas como un sonido. Parece demostrado que el aumento brusco de temperatura produce la expansión de fluidos del sistema auditivo (tensión termoelástica), con generación de ondas de presión, siendo éste el mecanismo más importante inductor de la sensación de ruidos. La intensidad de este mecanismo es función de la energía total recibida por pulso, cuando estos duran menos de $30 \mu\text{s}$ de duración.

Por este motivo se añade una restricción básica que se denomina Specific Absortion (SA) a $SA = 10 \text{ mJ/kg}$ que es la energía por unidad de masa máxima a recibir en radiación pulsada de $30 \mu\text{s}$ o menos. Este valor de energía equivale a una SAR de 333 W/kg (0.01

Julios/kg multiplicado por $30 \cdot 10^{-6}$ segundos). La relación entre esta SAR para pulsos y la SAR máxima para larga duración promediada en todo el cuerpo (0.4 W/kg) es de 833. Dado que la SAR es función del cuadrado de los valores de E y H externos, se obtienen los valores de referencia máximos ambientales de E y H para pulsos, multiplicando los correspondientes a periodos de más de 6 minutos de duración por un factor próximo a 29 (raíz cuadrada de 833).

Valoración de los resultados

Valores de referencia ambientales

Son valores de las magnitudes medibles en el ambiente, intensidad del campo eléctrico (E) en V/m, intensidad del campo magnético (H) en A/m y densidad de potencia de la onda (S) en W/m^2 . Las relaciones y medición de estas variables se explicó suficientemente en la mencionada **NTP-234** (1989). Los valores de referencia no deben ser sobrepasados pero se permite una ligera desviación en casos especiales cuando se demuestre que no se sobrepasan las restricciones básicas correspondientes. Esto se debe a que los valores de referencia se corresponden con los respectivos valores propuestos como máximos para las restricciones básicas teniendo en cuenta las situaciones más desfavorables (p.e. polarización de E y H mas desfavorable).

Los valores de referencia, que se muestran en las tablas 1 y 2, dependen de la frecuencia de las ondas y de la duración de la exposición. La tabla 1 muestra dichos valores para emisión continua y en la tabla 2 figuran los límites para la radiación pulsada de duración de los pulsos igual o menor de 30 microsegundos (μs).

Tabla 1. Valores de referencia para exposiciones de duración $t \geq 6$ minutos

FRECUENCIA (MHz)**	INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO (V/m)*	INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO (A/m)*	DENSIDAD DE POTENCIA (W/m^2)*
0,01-0,038	1000	42	-
0,038-0,61	1000	1,6/f	-
0,61-10	614/f	1,6/f	-
10-400	61,4	0,16	10
400-2.000	$3,07 \cdot f^{1/2}$	$8.14 \cdot 10^{-3} \cdot f^{1/2}$	f/40
2.000-150.000	137	0,364	50
150.000-300.000	$0,354 \cdot f^{1/2}$	$9.4 \cdot 10^{-4} \cdot f^{1/2}$	$3,334 \cdot 10^{-4} \cdot f$

*Valores RMS **f en MHz

Tiempo de exposición y ponderación temporal

Se denomina exposición continua si el tiempo de exposición $t \geq 6$ minutos y de corta duración si es $t < 6$ minutos.

Se distinguen así mismo las exposiciones a radiación pulsante en las que la duración de los pulsos es menor de $30 \mu\text{s}$ ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$). Además se valoran de forma distinta aquellas exposiciones de frecuencias menores de 700 kHz que duran igual o menos de 100

milisegundos.

La ponderación de las exposiciones en el tiempo se lleva a cabo de la siguiente forma: Cuando la duración de la exposición es igual o menor de 100 ms y la frecuencia es menor de 700 kHz, donde predomina el efecto debido a la corriente inducida, las magnitudes que intervienen son la intensidad del campo eléctrico (E) y la intensidad del campo magnético (H), y el tiempo de ponderación es de $T = 0.1$ segundos.

Los valores de E y H medios ponderados en el tiempo que deben utilizarse son respectivamente,

$$\bar{E} = \frac{1}{T} \sum_i E_i T_i \quad (6)$$

$$\bar{H} = \frac{1}{T} \sum_i H_i T_i \quad (7)$$

$$T = 0,1 \text{ s}$$

Por encima de frecuencias de 38 kHz para el campo magnético y 610 kHz para el eléctrico, donde predomina el efecto debido a la SAR (efecto térmico), las magnitudes que tienen mayor importancia son los cuadrados de la intensidad del campo eléctrico (E) y la intensidad del campo magnético (H), y el tiempo de ponderación es de $T = 6$ minutos. Los valores medios de E, H ó S (densidad de potencia) deben ser comparados con los respectivos valores de referencia máximos (tabla 1).

$$A_t = 10^{\frac{L_{At}}{10}} = 10^{\frac{10 \log \frac{P_e}{P_t}}{10}} = \frac{P_e}{P_t} \quad (8)$$

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_i H_i^2 T_i} \quad (9)$$

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_i S_i^2 T_i} \quad (10)$$

Las magnitudes E, H ó S correspondientes a pulsos ($T \leq 30 \mu\text{s}$) se valoran comparando directamente con los valores de referencia de la tabla 2.

Tabla 2. Valores de referencia para exposiciones a radiación pulsada ($t \leq 30 \mu\text{s}$)

FRECUENCIA (MHz)**	INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO (V/m)*	INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO (A/m)*	DENSIDAD DE POTENCIA (W/m ²)*
0,01-0,23	4.760	200	-
0,23-3,73	4.760	1.6/f	-
3,73-10	17.750/f	46/f	-
10-400	1775	4,6	8.160
400-2.000	88,8.f ^{1/2}	0,23.f ^{1/2}	20,4.f
2.000-150.000	3.970	10,3	40.890
150.000-300.000	10,3.f ^{1/2}	2,66·10 ⁻² .f ^{1/2}	0,274.f

* Valores máximos (pico) **f en MHz

Ejemplo de aplicación

Evaluar el riesgo higiénico debido a la presencia de radiación electromagnética de un individuo que controla el funcionamiento de un horno de secado mediante RF de frecuencia 27 MHz. Durante la mayor parte de la jornada se halla a 2 metros de distancia del horno debiendo aproximarse de vez en cuando para realizar breves intervenciones en la alimentación y descarga. De la observación del proceso se determina que en las peores condiciones (periodos de 6 minutos de máxima exposición) permanece 20 segundos junto al horno donde las mediciones ambientales arrojan valores de $E = 140$ V/m y $H = 0.3$ A/m, 200 segundos a 50 cm del horno donde $E = 32$ V/m y $H = 0.07$ A/m, y el resto (140 segundos) a 2 metros del horno, donde $E = 15$ V/m y $H = 0.04$ A/m.

A partir de las ecuaciones (8) y (9) se calcula:

$$A_t = 10^{\frac{L_{At}}{10}} = 10^{\frac{10 \log \frac{P_e}{P_t}}{10}} = \frac{P_e}{P_t} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{360} (140^2 \times 20 + 32^2 \times 200 + 15^2 \times 140)} = 41,8 \text{ V/m}$$

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_i H_i^2 T_i} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{360} (0,3^2 \times 20 + 0,07^2 \times 200 + 0,04^2 \times 140)} = 0,09 \text{ A/m}$$

De la tabla 1 se extraen los valores de referencia para $f = 27$ MHz, $E = 61.4$ V/m y $H = 0.16$

A/m. Se puede concluir que si las condiciones no varían no se superará la restricción básica de la $SAR \leq 0.4 \text{ W/kg}$ establecida para los riesgos derivados del incremento térmico de los tejidos.

Exposiciones simultáneas a una o más fuentes

Estrictamente hablando, a frecuencias inferiores a 10 MHz los campos eléctricos y magnéticos son capaces de inducir corrientes eléctricas por lo que sus respectivas contribuciones deberían ser adicionadas. Para ello se suman los respectivos valores de las magnitudes intensidad del campo eléctrico (E) e intensidad del campo magnético (H) estandarizadas al valor límite (L_i) correspondiente según se indica en la tabla 1:

$$\sum_i \frac{E_i}{L_{i,E}} + \sum_i \frac{H_i}{L_{i,H}} \leq 1 \quad (11)$$

Debe tenerse en cuenta que los sumatorios indicados tienen en cuenta E_i y H_i si provienen de una sola fuente o de varias.

Por otra parte existirá aditividad respecto al valor final de la SAR (efecto térmico) de las radiaciones de frecuencias entre 10 kHz y 300 GHz y son las magnitudes E y H al cuadrado las que intervendrán por lo que se aplicará:

$$\sum_i \left(\frac{E_i}{L_{i,E}} \right)^2 \leq 1 \quad (12)$$

$$\sum_i \left(\frac{H_i}{L_{i,H}} \right)^2 \leq 1 \quad (13)$$

Como que a frecuencias entre 10 kHz y 10 MHz se solapan los efectos de inducción de corriente eléctrica y cesión de calor, se opta por el criterio más restrictivo en cada caso. Como norma que facilita la evaluación se utiliza la ecuación (11) para frecuencias menores de 700 kHz y las (12) y (13) para frecuencias superiores a ese valor.

La existencia de pulsos provenientes de diferentes fuentes de emisión se evalúa a través de las siguientes expresiones:

$$\sum_i \frac{E_i}{L_{i,E}} \leq 1 \quad (14)$$

$$\sum_I \frac{H_i}{L_{i,H}} \leq 1 \quad (15)$$

siendo L_i los respectivos niveles de referencia para valores “pico” que se muestran en la tabla 2

Ejemplo de aplicación

En el servicio de rehabilitación de un hospital se utilizan diversas técnicas de diatermia para la aplicación localizada de calor a los pacientes. Se dispone en concreto de una unidad de terapia de onda corta con generador de 27 MHz que puede trabajar en continuo o en radiación pulsada cuyos impulsos duran 400 μ s y cuya frecuencia de impulsos es de 200 Hz. Se dispone además de un generador de microondas de frecuencia de emisión $f = 2450$ MHz en modo continuo. Ambas unidades se hallan localizadas en compartimentos contiguos. Debido al reducido espacio de que dispone el Servicio de rehabilitación y a la acumulación los diferentes instrumentos se producen a menudo exposiciones en puntos cercanos a las unidades de RF y MO de forma que se simultanea la presencia de ondas de 27,12 MHz y 2450 MHz con valores medidos para la primera $E = 40$ V/m y $H = 0,07$ A/m en continuo y en forma de pulsos de $E = 100$ V/m y $H = 0,2$ A/m. Siendo para la segunda, de $E = 70$ V/m y $H = 0,08$ A/m. Dichas exposiciones pueden durar más de 6 minutos. Valorar el riesgo por exposición a radiaciones electromagnéticas del personal del servicio sometido a esas condiciones.

Ya que las frecuencias que intervienen son netamente superiores a 700k Hz predomina el efecto térmico por lo que la exposición depende de los valores E^2 y H^2 . Teniendo en cuenta lo indicado en cuanto a exposición a dos fuentes simultáneas (ecuaciones 12 y 13) y suponiendo dos situaciones diferentes:

CASO 1) Emisión simultanea de RF continua y MO

$$\sum_I \left(\frac{E_i}{L_{i,E}} \right)^2 = \left(\frac{40}{61,4} \right)^2 = \left(\frac{70}{137} \right)^2 = 068 < 1$$

$$\sum_I \left(\frac{H_i}{L_{i,H}} \right)^2 = \left(\frac{0,07}{0,016} \right)^2 = \left(\frac{0,08}{0,364} \right)^2 < 1$$

CASO 2) Emisión simultánea de RF pulsada y MO

El valor de E y H provenientes de la radiación RF pulsada de 27.12 MHz se obtiene del valor de esas magnitudes en los pulsos la duración del pulso y la frecuencia de repetición de los pulsos, teniendo en cuenta además, que la exposición se pondera en 6 minutos, pero que el valor de la media de E y H se mantiene en ciclos de 1 segundo:

$$\bar{E} = E \times \frac{200 \text{ pulsos}}{s} \times \frac{400 \times 10^{-6}}{\text{pulso}} = 100 \text{ V/m} \times 0,08 \text{ V/m}$$

$$\bar{H} = H \times 0,08 = 0,22 \text{ A/m} \times 0,08 = 0,016 \text{ V/m}$$

Los pulsos duran más de 30 μ s, por lo que se valora en función de los valores de la tabla 1. Aunque el tiempo por pulso es menor de 100ms, la frecuencia de las ondas es netamente superior a 700 kHz, por lo que la valoración es por efecto térmico.

Aplicando las ecuaciones 12 y 13

$$\sum_T \left(\frac{E_i}{L_{i,E}} \right)^2 = \left(\frac{8}{61,4} \right)^2 = \left(\frac{70}{137} \right)^2 = 0,3 < 1$$

$$\sum_T \left(\frac{H_i}{L_{i,H}} \right)^2 = \left(\frac{0,016}{0,16} \right)^2 + \left(\frac{0,08}{0,364} \right)^2 = 0,06 < 1$$

De lo que se concluye que no se superan los valores de referencia en las condiciones mencionadas. Deberán evitarse no obstante, las exposiciones de trabajadores que debido a sus condiciones individuales no se pueda garantizar su seguridad con los valores de referencia aplicados (p.e embarazo, enfermedad, marcapasos, etc.)

Bibliografía

(Véase la siguiente **NTP Radiofrecuencias y microondas (II): control de la exposición laboral**)