

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Proyecto Fin de Carrera

Caracterización Técnica Y Definición De Procedimiento De  
Elaboración De Mapas De Niveles De Emisiones  
Radioeléctricas En Base A La Directiva 2013/35/UE.



Autor: Antonio de Gea Martínez  
Director: Antonio Martínez González  
Cartagena, julio de 2014

<b>Autor</b>	Antonio de Gea Martínez
<b>Contacto autor</b>	<a href="mailto:antonio.degea@gmail.com">antonio.degea@gmail.com</a>
<b>Director</b>	Antonio Martínez González
<b>Contacto director</b>	<a href="mailto:toni.martinez@upct.es">toni.martinez@upct.es</a>
<b>Título</b>	Caracterización Técnica Y Definición De Procedimiento De Elaboración De Mapas De Niveles De Emisiones Radioeléctricas En Base A La Directiva 2013/35/UE
<b>Title</b>	Technical Definition Of The Calculation Procedure Of Radioelectric Emission Levels According To The Directive 2013/35/UE
<b>Descriptores</b>	Exposición humana, exposición ocupacional, límites de exposición, niveles de exposición, dosimetría, test de cumplimiento, límites de seguridad, distancia de seguridad, medición, campo electromagnético, tasa de absorción específica (SAR), campo incidente, campo cercano, propagación electromagnética, trazado de rayos
<b>Key Words</b>	<i>Human exposure, occupational exposure, exposure limits, exposure levels, dosimetry, compliance testing, safety limits, safety distance, measurement, electromagnetic field, specific absorption rate (SAR), incident field, near field, electromagnetic propagation, ray tracing</i>
<b>Resumen</b>	<p>Desarrollo de una metodología de base científica para la verificación y/o adaptación al cumplimiento de la nueva directiva comunitaria 2013/35/UE sobre exposición de trabajadores a campos de naturaleza electromagnética</p>
<b>Titulación</b>	Ingeniero de Telecomunicación (B.O.E. 22/08/2000)
<b>Departamento</b>	Grupo de Electromagnetismo y Materia
<b>Fecha de presentación</b>	Julio de 2014

*A mi madre, a mi padre y  
a mi abuela.*

# Índice

Introducción .....	5
Planteamiento .....	5
Objetivos .....	6
Fases del proyecto.....	7
Estado de la ciencia .....	8
Posibles Efectos Biológicos de los EMCs .....	8
EMCs y Salud Pública.....	11
Investigaciones de la OMS .....	13
Investigaciones de la ICNIRP .....	15
Estudios de la UE .....	16
Marco normativo .....	18
Evolución de la legislación.....	18
Estado actual de la legislación.....	22
Pautas para la evaluación de entornos laborales .....	23
Introducción .....	23
Procedimiento .....	24
Desarrollo del estudio .....	29
Radiador no intencionado.....	29
Horno microondas simplificado .....	29
Solid Works.....	30
CST Microwave Studio.....	31
Horno doméstico comercial .....	38
Análisis de resultados en Matlab .....	45
Radiador intencionado .....	51
Entorno laboral .....	51
Análisis de los niveles .....	52
Cálculo del perímetro de seguridad .....	52
Aislamiento de la zona de riesgo .....	56
Medición en las zonas próximas .....	57
Auditorías de verificaciones anuales.....	58
Adopción de buenas prácticas en materia de exposición laboral.....	59
Criterios para la adquisición de equipos .....	59
Disposición del área de trabajo.....	59
Mantenimiento de los equipos .....	60
Formación sobre los riesgos de los campos electromagnéticos.....	61
Señalización e información de seguridad y salud .....	61

Conclusiones .....	62
ANEXO I .....	63
ANEXO II .....	64
ANEXO III .....	69
Referencias.....	73

# Introducción

## Planteamiento

Desde que se comenzó a desarrollar la tecnología de las ondas electromagnéticas, ésta no ha dejado de evolucionar, ganando especial importancia y avanzando a una velocidad vertiginosa desde mediados del siglo XX.

La utilización de este tipo de energía se ha visto incrementada considerablemente en la industria actual, debido a las numerosas ventajas que presenta frente a otras alternativas, ya que constituye una fuente de energía limpia, rápida, eficaz y controlable, además de suponer un consumo energético muy bajo, una de sus características más importantes y valoradas.

La convergencia de estas y otras características en la energía electromagnética ha propiciado en gran medida la amplia difusión de las tecnologías que hacen uso de ellas en muchos y muy diversos sectores, permitiendo a las empresas y a los consumidores obtener buenos resultados con un coste muy bajo y en un tiempo considerablemente inferior al de los procesos alternativos.

Podemos encontrar numerosos ejemplos de utilización de las ondas electromagnéticas en procesos cotidianos de la industria y el hogar, en aplicaciones tan extendidas como las radiocomunicaciones, la radiodifusión, la industria armamentística, aplicaciones de radar, procesos de curado de materiales sintéticos, calentamiento de diversos materiales y alimentos, secado de fibras textiles, cuero, corcho, tabaco, etc., y en un sinnúmero de aplicaciones en la industria farmacéutica y en biología. Un aspecto destacable también es que resultan imprescindibles en medicina en el diagnóstico, tratamiento y curación de numerosas enfermedades.

Como ya ha ocurrido en tantas ocasiones en otros campos de la ciencia, el desarrollo de la tecnología de las ondas electromagnéticas ha aumentado a una velocidad tan elevada, y sus aplicaciones han resultado tan numerosas y prácticas, que inevitablemente su evolución ha tenido que ser acompañada con los correspondientes estudios sobre sus posibles efectos en los seres vivos y, concretamente, en la salud de los seres humanos. La realización de este tipo de estudios resulta imprescindible y de extrema importancia, ya que dada la presencia cotidiana de fuentes de energía electromagnética en la vida diaria de las personas y en los entornos laborales de ciertos trabajadores, resulta indispensable conocer completamente cómo pueden afectar dichos agentes para garantizar así la seguridad y la salud de la sociedad.

Hoy en día la sociedad está más sensibilizada en este aspecto, en gran medida debido a la falta de información y a la percepción de un riesgo sobre los posibles efectos adversos que los campos electromagnéticos puedan tener sobre la salud, que en la mayoría de casos, no está debidamente justificado. Esta sensibilización ha propiciado el incremento de la importancia de la seguridad tanto en entornos públicos como en todo tipo de procesos industriales, implantándose diversas medidas de protección y prevención en todos los niveles, con el fin de asegurar unas condiciones de exposición saludable para la sociedad en general, y para los trabajadores en particular, que es el ámbito que nos ocupa en este proyecto fin de carrera.

Y precisamente con esta finalidad han surgido nuevas normativas y especificaciones<sup>[1] [2] [3] [4] [5]</sup> que limitan las radiaciones que se realizan al exterior de forma que se garantice la seguridad

del personal que participa en todo tipo de procesos industriales, de acciones científicas o médicas, así como de los ciudadanos que por circunstancias ocasionales puedan verse expuestos a estas fuentes de energía.

La industria de las ondas electromagnéticas y, más concretamente, de las microondas se ha tenido que ajustar a unos niveles de radiación que vienen fijados por normativas de obligado cumplimiento, las cuales, debido a su relativa novedad y todavía corto tiempo de vida, se encuentran en continuo período de revisión e implantación.

Por estos motivos surge la necesidad de elaboración de un procedimiento y una metodología válidos que guíen a los empresarios y a los técnicos en los procesos de análisis, verificación y certificación de los entornos y las actividades industriales y laborales, con el fin de ajustarse convenientemente a las directrices de protección de los trabajadores y a las normativas, ya que estas normativas de reciente o próxima implantación comienzan siendo directivas que, si bien establecen pautas y regulaciones que deben ser cumplidas, en la mayoría de los casos no proporcionan un procedimiento concreto a la hora de realización de los estudios pertinentes, la evaluación de los resultados y su presentación y correcta interpretación

En el artículo 3 de la derogada Directiva 2004/40/CE <sup>[1]</sup> a la cual sustituye la actual 2013/35/UE se indicaba que *“Mientras no existan normas europeas armonizadas del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (Cenelec) que regulen todas las situaciones de evaluación, medición y cálculo pertinentes, los Estados miembros podrán servirse de otras normas o directrices que posean una base científica para evaluar, medir y/o calcular la exposición de los trabajadores a los campos electromagnéticos”*, y por este motivo diferentes agencias de certificación y normalización iniciaron el desarrollo de diferentes guías de evaluación, como la guía *“UNE 215002:2010 IN”*<sup>[6]</sup> elaborada por AENOR.

## Objetivos

El cometido de este Proyecto Fin de Carrera (PFC) es el desarrollo una metodología de base científica que sirva como procedimiento genérico para el proceso de análisis, adaptación y verificación de los sistemas, instalaciones industriales y entornos laborales para la nueva normativa europea de inminente implantación que hace referencia a la exposición ocupacional de los trabajadores a campos electromagnéticos (Directiva 2013/35/UE).

Estos análisis estarán destinados a la realización de informes de certificación que garanticen el cumplimiento la citada normativa o, en su caso, a la búsqueda de las medidas de acción y corrección necesarias para asegurar que así se cumpla.

## Fases del proyecto

Para el desarrollo de este PFC se plantean las siguientes fases:

1. Estudio del estado de la ciencia en el campo de interés.
2. Estudio de la normativa vigente sobre exposición de trabajadores a campos electromagnéticos en entornos laborales.
3. Recopilación y estudio de documentación similar sobre certificaciones radioeléctricas en otros ámbitos.
4. Análisis, evaluación y selección de las herramientas CAD de simulación por software necesarias o convenientes para la realización de los análisis pertinentes y la debida interpretación y presentación de los resultados. Se pretende ofrecer al menos una alternativa válida para el desarrollo del procedimiento.
5. Estudio de los instrumentos de medida necesarios para la realización de certificaciones radioeléctricas que complementen los resultados de la simulación por software. Se pretende ofrecer al menos una alternativa válida.
6. Desarrollo de un caso práctico del procedimiento mediante simulación por software.
7. Desarrollo de un caso práctico del procedimiento mediante medición instrumental.



## Estado de la ciencia

Hasta bien entrado el siglo XX no se tuvieron en cuenta los efectos de los campos electromagnéticos (EMC) en los seres vivos y la salud de los seres humanos, excepto en los casos en que se debiesen a fuentes radiactivas (emisiones ionizantes). Fue a partir del último tercio del siglo cuando comenzó a surgir en la población el temor a los posibles efectos de otros campos electromagnéticos de inferior energía (las emisiones no ionizantes), como por ejemplo los debidos a líneas de alta tensión, y también a otros emisores como los de radio o las antenas de telefonía móvil.

Aunque hasta día de hoy no se ha podido demostrar de forma científica la existencia de efectos nocivos de los EMC sobre la salud de las personas, sí que se empezó a considerar la necesidad de tomar medidas de protección preventivas tanto en la legislación como en la práctica frente a las radiaciones no ionizantes debido a que, por ejemplo, la OMS clasifica los EMC dentro del grupo 2B en su lista de posibles agentes nocivos [7].

## Posibles Efectos Biológicos de los EMCs

El medio ambiente emite energía electromagnética en forma de ondas a través de fuentes naturales, y también mediante numerosas fuentes artificiales. Dichas ondas no son sino campos eléctricos y magnéticos que oscilan y se influyen recíprocamente y de diversas formas con sistemas biológicos tales como células, plantas, animales o seres humanos. Para entender mejor esa influencia recíproca de la que hablamos es importante conocer las propiedades físicas de las ondas que forman el espectro electromagnético.

Existen varias formas de caracterizar a las ondas electromagnéticas, ya sea por su energía, por su longitud o por su frecuencia. Estos tres parámetros están interrelacionados entre sí, y a su vez condicionan el efecto que puede tener el campo sobre un determinado sistema biológico. La frecuencia de una onda electromagnética es el número de veces que el campo cambia su sentido en una unidad de tiempo y en un punto determinado. Dicha frecuencia se mide en ciclos por segundo, también llamados “hercios”.

La frecuencia está estrechamente relacionada con la longitud de la onda, ya que cuanto más corta es dicha longitud, más alta es la frecuencia. Por ejemplo, la zona intermedia en una banda de radiodifusión de amplitud modulada tiene una frecuencia de un millón de hercios, es decir, 1 MHz, y esta frecuencia se corresponde con una longitud de onda de aproximadamente 300 metros. Por otro lado, los hornos de microondas domésticos funcionan a una frecuencia de 2,45 gigahercios, que se corresponden a una longitud de onda de 12 centímetros.

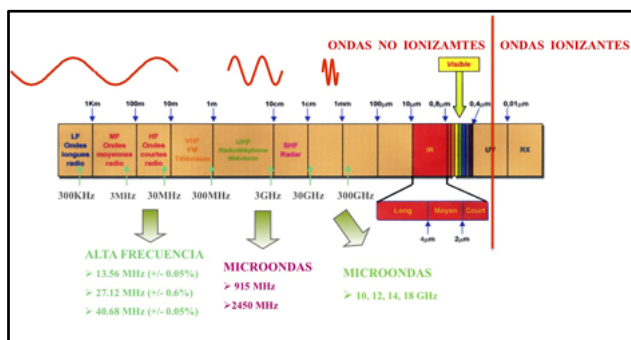


Figura 1. Espectro radioeléctrico.

Las ondas electromagnéticas están formadas por paquetes de energía denominados fotones. Cada uno de estos paquetes contiene una energía que es directamente proporcional a la frecuencia de la onda, de manera que a mayor frecuencia de la onda, mayor es la cantidad de energía que contiene cada fotón. Los factores que determinan el efecto que tienen las ondas electromagnéticas sobre los sistemas biológicos son la intensidad de campo y la energía que contiene cada fotón.

Se denomina “campos electromagnéticos” a las ondas electromagnéticas de baja frecuencia, que son las que contienen menor energía, y las ondas de mayor energía (o muy alta frecuencia) se denominan “radiaciones electromagnéticas”. Así, según sea su frecuencia y su energía, podemos clasificar las ondas electromagnéticas en radiaciones ionizantes o no ionizantes.

Las radiaciones ionizantes agrupan a las ondas electromagnéticas cuya frecuencia es extremadamente alta, como la de los rayos X o los rayos gamma, que tienen una energía suficiente como para causar la ionización de las moléculas rompiendo los enlaces atómicos que las mantienen unidas, es decir, la conversión de los átomos o partes de moléculas en iones con carga eléctrica positiva o negativa.

La zona del espectro electromagnético cuya energía no es lo suficientemente alta como para conseguir romper los enlaces atómicos constituye, en general, las denominadas radiaciones no ionizantes. De entre este tipo de radiaciones podemos citar la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, la zona de los campos de radiofrecuencia y microondas, los campos de frecuencias muy bajas y, finalmente, los campos estáticos (eléctricos y magnéticos).

Aunque las radiaciones no ionizantes, incluso las que tienen una intensidad alta, no son capaces de producir ionizaciones en un sistema biológico, sí que se ha comprobado que dichas radiaciones causan otros efectos biológicos, tales como el calentamiento, cambios en las reacciones químicas o la inducción de corrientes de naturaleza eléctrica en los tejidos y las células.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que estos efectos biológicos que pueden producir las ondas electromagnéticas no son necesariamente perjudiciales para la salud de las personas. Es de suma importancia comprender la diferencia entre los efectos biológicos y los que son perjudiciales para la salud.

El efecto biológico se produce cuando podemos percibir cambios fisiológicos detectables en un sistema biológico a consecuencia de las ondas electromagnéticas, mientras que el efecto perjudicial para la salud se da cuando el efecto biológico sobrepasa la capacidad normal que tiene el organismo para poder compensarlo, produciéndose de este modo el origen de un proceso patológico.

Existen efectos biológicos inocuos, como por ejemplo una reacción orgánica que produzca el aumento del riego sanguíneo en la piel como respuesta a un pequeño calentamiento producido por el sol. Del mismo modo hay efectos que resultan provechosos, como la luz solar directa en un día frío, e incluso existen efectos que son beneficiosos para la salud, como el papel de la radiación solar en la producción de vitamina D por el organismo. Sin embargo, también existen otros efectos biológicos perjudiciales o molestos como las quemaduras solares o la estimulación muscular involuntaria.

Los campos electromagnéticos del orden de radiofrecuencia producen calentamiento e inducen corrientes eléctricas en los tejidos, y también se tiene constancia de otros efectos biológicos de los que todavía no se han obtenido conclusiones precisas de ningún tipo <sup>[9]</sup>. Los campos de frecuencias superiores a 1 megahercio producen, sobre todo, calentamiento al provocar el desplazamiento de iones y moléculas de agua por el medio en el que están inmersos. La energía de estas frecuencias produce pequeñas cantidades de calor, incluso a niveles muy bajos, pero que son neutralizadas por los procesos de regulación de la temperatura normales del organismo sin que el individuo se percate de ello.

Los campos de frecuencias inferiores a 1 megahercio inducen sobre todo cargas y corrientes eléctricas capaces de estimular tejidos celulares como los nervios o los músculos. La presencia de corrientes eléctricas en el organismo es una parte normal de las reacciones químicas propias de su funcionamiento, pero si los campos electromagnéticos inducen corrientes que sobrepasen en un grado demasiado alto los niveles naturales para el organismo, entonces es posible que se generen efectos que sean perjudiciales para la salud.

En el caso de los campos eléctricos y magnéticos de frecuencias extremadamente bajas, la acción principal que producen en los sistemas biológicos es la inducción de corrientes y de cargas eléctricas. Basándose únicamente en esta acción, no se pueden explicar efectos sobre la salud humana <sup>[9]</sup>.

Por último, la acción principal de los campos eléctricos y magnéticos estáticos en los sistemas biológicos es la inducción de cargas y corrientes eléctricas, habiéndose comprobado también que la existencia de efectos que pueden resultar nocivos para la salud solo son posibles en campos de intensidades muy elevadas <sup>[9]</sup>.

Por su parte, los campos magnéticos estáticos conservan su intensidad prácticamente en el mismo nivel tanto dentro como fuera del cuerpo. En el caso de que estos campos sean muy intensos pueden producirse alteraciones en el riego sanguíneo o también modificaciones de los impulsos nerviosos normales. Sin embargo, este tipo de inducciones magnéticas tan elevadas no se dan en los entornos normales de la vida diaria.

Debido a todo lo expuesto anteriormente, se han elaborado y adoptado directrices y normas internacionales <sup>[2] [15]</sup> con la finalidad de asegurar que la exposición de los seres humanos a los campos electromagnéticos no tenga efectos perjudiciales para la salud, y que los equipos que generan dichos campos sean inocuos y no se produzcan interferencias con otros aparatos por su utilización. Todas estas normativas se han comenzado a elaborar después de que numerosos grupos de investigadores y científicos que buscan pruebas sobre la repetición de los efectos perjudiciales para la salud hayan estudiado todas las publicaciones científicas al respecto. Tras un exhaustivo análisis, estos grupos recomiendan una serie de directrices que permiten a los diversos órganos nacionales e internacionales con competencias en esta materia elaborar las normas prácticas <sup>[8] [9] [10]</sup>.

Existe una organización no gubernamental reconocida de forma oficial por la OMS en el sector de la protección contra las radiaciones no ionizantes denominada Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP, la cual ha elaborado un conjunto de directrices internacionales sobre los límites de exposición humana para todo el rango de campos electromagnéticos, incluso para la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja <sup>[15]</sup>.

## EMCs y Salud Pública

En los entornos públicos y laborales existen numerosas fuentes de campos de radiofrecuencia, como por ejemplo las pantallas y monitores, de 3 a 30 KHz, los transmisores de radio AM, de 30 KHz a 3 MHz, calentadores de inducción, de 300 KHz a 3 MHz, termoselladores, instrumental para diatermia, de 3 a 30 MHz, transmisores de radio FM como los intercomunicadores, de 30 a 300 MHz, teléfonos móviles, televisores, hornos domésticos, radares, aparatos para comunicaciones por satélite y por microondas, de 3 a 30 GHz y las siempre presentes radiaciones solares, de 3 a 300 GHz.

La superficie de la piel absorbe campos de frecuencias superiores a los 10 gigahercios, por lo que la energía que alcanza los tejidos interiores es muy débil. El nivel dosimétrico básico para campos de frecuencias superiores a los 10 GHz es la intensidad de campo medida como densidad de potencia en unidades de vatios por metro cuadrado. Los campos que pueden producir efectos perjudiciales para la salud como cataratas oculares o quemaduras en la piel son campos con densidades de potencia superiores a los  $1000 \text{ W/m}^2$  <sup>[17]</sup>. Dichas cantidades de energía, que no tienen lugar en la vida diaria,, pueden encontrarse por ejemplo en las proximidades de radares muy potentes, y las normativas actuales prohíben la presencia de personas en esas zonas.

Cuando se superan los 10 GHz de frecuencia, las ondas son absorbidas por la superficie más externa de la piel, por lo que los tejidos internos apenas llegan a recibir energía.

Entre 1 MHz y 10 GHz de potencia, los campos penetran en los tejidos expuestos produciendo un calentamiento debido a la energía absorbida. La frecuencia del campo será la que determine su profundidad de penetración en los tejidos, que es mayor cuanto menor es la frecuencia.

La medida de absorción de energía procedente de campos de radiofrecuencia por los tejidos se mide como el coeficiente de absorción específica por una masa de tejido determinada (Specific Absorption Rate o SAR). Este coeficiente se mide en unidades de vatios por kilogramo (W/Kg), y se define principalmente para campos de frecuencias comprendidas entre 1 MHz y 10 GHz aproximadamente.

Típicamente, una persona podría tolerar una exposición (sobre todo el cuerpo) cuando se trata de Exposición Humana a Campos Electromagnéticos de energía de microondas de 4 W/kg o 4 J/kg/s durante períodos indefinidos de tiempo. Una exposición sobre todo el cuerpo de 4 W/kg es de hecho, como se ha comprobado, el umbral que una vez superado puede producir efectos adversos en varias especies de animales. Estos efectos están claramente asociados con un calentamiento excesivo de los tejidos biológicos <sup>[20]</sup>.

La mayoría de efectos adversos para la salud que pueden producirse por la exposición a los campos de entre 1 MHz y 10 GHz se asocian a otro tipo de procesos de calentamiento inducido, que producen aumentos de la temperatura de los tejidos en más de 10 °C. En general, el calentamiento producido en los tejidos humanos puede provocar distintas respuestas fisiológicas y de regulación de la temperatura y, concretamente, causar un deterioro de la capacidad para desarrollar diversas tareas mentales o físicas, siendo más dificultosas a medida que la temperatura aumenta <sup>[18]</sup>.

Por otro lado, en frecuencias inferiores a 1 MHz, los campos no producen un calentamiento apreciable. Inducen corrientes y campos eléctricos en los tejidos, y se miden en unidades de densidad de corriente, en amperios por metro cuadrado ( $A/m^2$ ). Para estos campos inferiores a aproximadamente 1 MHz, las cantidades dosimétricas se miden en densidad de corriente. En los procesos biológicos vitales, las numerosas reacciones químicas que se producen lo hacen a aproximadamente  $10 \text{ mA}/m^2$ , mientras que las densidades de corriente inducida que pueden perturbar el funcionamiento normal del organismo y causar reflejos musculares involuntarios exceden los  $100 \text{ mA}/m^2$  [19].

Los estudios científicos disponibles hoy en día no arrojan resultados concluyentes acerca de la relación entre la exposición a campos electromagnéticos y la aparición de enfermedades como el cáncer, por lo que la comunidad científica considera poco probable que dicha exposición a campos pueda originar o favorezca el desarrollo de ninguna de las variantes de esta enfermedad.

Los diversos estudios realizados en animales no han aportado datos relevantes sobre una posible relación de la exposición a CEM con la aparición de tumores. Numerosos estudios epidemiológicos sobre la salud humana han examinado también la posible relación entre la exposición humana a los campos electromagnéticos y un aumento del riesgo de la aparición de tumores. Estos estudios todavía no han aportado información suficiente para poder evaluar convenientemente el riesgo producido en los seres humanos como consecuencia de la exposición a los campos de radiofrecuencias, ya que hasta la fecha los resultados han sido contradictorios. La explicación a este hecho puede encontrarse en las diferencias en el diseño, la realización y la interpretación de los estudios, así como en la identificación de poblaciones que estén notablemente expuestas a la acción de campos electromagnéticos y la evaluación de esa exposición. Con el fin de fomentar la coordinación de las investigaciones en este sector surge el Proyecto Internacional CEM (*“EMF Project”*) puesto en marcha por la OMS [21].

Se ha comprobado experimentalmente que la exposición a campos de radiofrecuencia de baja intensidad es capaz de alterar la actividad eléctrica del cerebro en diversos animales, como gatos y conejos, debido a que aunque estos campos no tienen una energía suficiente para producir calentamiento, sí son capaces de modificar la movilidad de los iones de calcio [22]. También ha sido posible comprobar este efecto en tejidos y células aisladas, y otros estudios han notificado que la acción de los campos de radiofrecuencia puede cambiar el ritmo de multiplicación de las células, alterar la actividad de las enzimas o interferir en el ADN celular. Aun así, estos efectos no están debidamente demostrados, como tampoco lo están sus consecuencias en la salud humana, de manera que no se conoce lo suficiente como para restringir por este motivo la exposición humana a los campos.

### **Interferencias electromagnéticas**

Muchos equipos electrónicos de uso cotidiano, como por ejemplo los teléfonos móviles, son capaces de producir interferencias de naturaleza electromagnética en otros aparatos eléctricos. Por este motivo es importante ser precavidos al utilizar este tipo de aparatos eléctricos y electrónicos en zonas particularmente sensibles como por ejemplo, en proximidades a equipos electro-médicos en zonas hospitalarias y de cuidados intensivos. Es raro que aparatos como los teléfonos móviles puedan causar interferencias con otros aparatos médicos como los marcapasos o los audífonos, pero en ocasiones puede ocurrir. En estos casos especiales son las

personas afectadas las que deben contactar con su médico para que les ayude a determinar la sensibilidad de estos aparatos a dichos efectos.

En la naturaleza también encontramos fuentes que radian campos de radiofrecuencia, pero sus potencias específicas son muy bajas. Por ejemplo, la fuente natural principal son los rayos solares, y su intensidad es inferior a  $0,01 \text{ mW/m}^2$ .

Las fuentes domésticas de campos de radiofrecuencia más habituales son los teléfonos móviles, los hornos de microondas, las alarmas antirrobo, los monitores de ordenador y los televisores. De entre todos estos elementos, son los hornos de microondas los que en principio tienen la capacidad para originar los mayores niveles de campo, pero están regulados por unas normas de calidad del producto que limitan convenientemente sus fugas <sup>[23]</sup>.

También encontramos equipos generadores de campos de radiofrecuencia en la industria. Son muy comunes en procesos industriales tales como los calentadores dieléctricos que se utilizan para la laminación de maderas o el sellado de plásticos, los calentadores por corrientes de inducción y los hornos de microondas industriales. Los aparatos de diatermia quirúrgica utilizados en el tratamiento del dolor y la inflamación de los tejidos y también los equipos de electrocirugía para cortar y soldar tejidos son otros ejemplos frecuentes de este tipo de fuentes.

En estos casos, existe un riesgo de que el personal profesional que trabaja con estos sistemas y equipos sufra una exposición excesiva a los campos que producen, sobre todo en las prácticas relacionadas con calentamiento industrial o sellado industrial mediante radiofrecuencia, o en la utilización de los equipos de diatermia. Los campos existentes en las zonas próximas al equipo utilizado en el entorno laboral pueden ser superiores a varias decenas de vatios por metro cuadrado. Todos estos niveles de exposición están debidamente reglamentados a nivel nacional e internacional <sup>[2][15]</sup>.

Por lo tanto, se pone nuevamente de manifiesto la existencia de normativas internacionales que limitan la emisión de las señales electromagnéticas producidas por dichos sistemas.

### Investigaciones de la OMS

En el año 1996, la Organización Mundial de la Salud (OMS) inició un proyecto a nivel internacional con la finalidad de evaluar los posibles efectos de la exposición de los seres humanos a los campos electromagnéticos. Este proyecto es conocido como "The International EMF Project" <sup>[21]</sup> o "Proyecto Internacional CEM", y se programó con una duración de por lo menos 5 años, permitiendo trabajar conjuntamente a organismos internacionales y diversas instituciones científicas con la finalidad de alcanzar conclusiones científicas con una base bien fundamentada.

El proyecto CEM de la OMS aborda los problemas sanitarios que se derivan de la exposición a campos de radiofrecuencias y de microondas, así como los de frecuencias extremadamente bajas, electrostáticos y magnetostáticos. Esta iniciativa pretendía resolver las dudas sobre los distintos efectos biológicos y las posibles consecuencias para la salud de la exposición a estos campos.

## **Campos ELF (frecuencia extremadamente baja)**

La utilización de la energía es imprescindible en la vida actual, y los campos eléctricos y magnéticos se encuentran presentes siempre en sus proximidades, tanto en su propio transporte, desde el punto de origen hasta el de consumo, como en cualquier forma de utilización. Sin embargo, es necesario preguntarse si estos campos eléctricos y magnéticos pueden tener efectos negativos para la salud.

Investigadores científicos de la IARC (*“International Agency for Research on Cancer”*) formaron un grupo de trabajo para revisar la información existente sobre la posible relación entre la exposición humana a campos eléctricos y magnéticos de frecuencia extremadamente baja y la aparición de enfermedades concretas. Desarrollaron un sistema de clasificación y catalogaron los campos electromagnéticos como “posiblemente carcinógenos para los seres humanos” basándose en estudios sobre epidemiología de leucemia infantil. Sin embargo, para otras variantes de esta afección tanto en niños como en adultos, los campos fueron catalogados como “no clasificables”, en unos casos por información insuficiente y, en otros, por ser inconsistente.

La clasificación citada como “posiblemente carcinógenos para los seres humanos” se utiliza para mostrar que existe un agente para el que se encuentran evidencias limitadas de ser carcinógenos en humanos y tampoco hay evidencias suficientes para la carcinogenicidad en animales de laboratorio. Para ilustrar mejor este concepto se pueden citar otros elementos que se encuentran en este grupo (el grupo 2B), como por ejemplo el café, el aceite de cacahuete o el extracto de la hoja de aloe vera <sup>[7]</sup>. Ésta es la clasificación más leve de las categorías que utiliza la IARC. Además, se puede citar que por ejemplo, las bebidas alcohólicas se encuentran clasificadas en el grupo 1 (agentes carcinógeno en humanos).

Los CEM interactúan con los tejidos biológicos induciendo corrientes eléctricas que tienen una intensidad mucho menor que las creadas por el propio organismo vivo en su funcionamiento natural normal. Sin embargo, en 1979 aparecieron los primeros estudios epidemiológicos que trataron de relacionar la inmersión en campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja con el desarrollo de ciertos tipos de alteraciones en la salud, particularmente de la leucemia infantil. No obstante, no hay pruebas de que estos campos puedan causar un daño directo a las moléculas biológicas o al ADN celular, y los científicos consideran muy improbable que los campos electromagnéticos de esta frecuencia tengan algo que ver con su aparición en un organismo sano. Sin embargo, cabe preguntarse si es posible la influencia en el desarrollo de la enfermedad, una vez que haya aparecido por otras causas. Diversos estudios realizados utilizando animales de laboratorio sugieren que estos campos no son capaces de iniciar ni de favorecerlo (IARC).

Hoy en día la exposición del público general y de los trabajadores a los campos electromagnéticos sigue aumentando, y como consecuencia la preocupación pública ha ido incrementándose también debido a este aumento de los emisores de radiofrecuencia, al igual que la preocupación con las líneas de alta tensión.

Actualmente existen gran cantidad de estudios científicos sobre los posibles efectos de los campos de radiofrecuencia sobre la salud de los seres humanos en todos los rangos de frecuencia, tanto los de frecuencias extremadamente bajas, los hornos de microondas, los aparatos de transmisión de datos, etc.

A día de hoy, la gran mayoría de estudios epidemiológicos con campos emitidos por equipos de uso cotidiano y otros dispositivos semejantes llevan todos a la misma conclusión, y es que éstos no suponen un riesgo para la salud pública. Además, los estudios celulares realizados utilizando campos electromagnéticos que hayan mostrado efectos biológicos han sido muy escasos y no han sido confirmados de forma independiente por distintos laboratorios.

### Investigaciones de la ICNIRP

La Comisión Internacional para la Protección de Radiaciones No-Ionizantes, más conocida por su acrónimo en inglés ICNIRP, trató de hacer un resumen de los estudios epidemiológicos sobre los efectos de los campos electromagnéticos en salud humana en un documento titulado "Epidemiología de los efectos sobre la salud de la exposición a campos de radiofrecuencia". En este artículo, el organismo pone de manifiesto la existencia de numerosos estudios referentes a trabajos sobre la exposición ocupacional y, más recientemente, sobre la exposición residencial. También destaca la existencia de trabajos relacionados con la utilización de teléfonos móviles, especialmente enfocados hacia alteraciones cerebrales, aunque los resultados de dichos estudios no alcanzan conclusiones reseñables ni arrojan pruebas evidentes sobre relaciones de causa y efecto vinculadas a la exposición a los campos.

Queda de manifiesto, por tanto, que los resultados de estos estudios no son concluyentes, ni ofrecen relaciones claras de causa y efecto entre la exposición a los campos y los efectos negativos sobre la salud. Sin embargo también es importante destacar que dichos estudios presentan claras deficiencias para poder encontrar las relaciones de causa y efecto.

Este organismo también indica que la interacción de los campos electromagnéticos con los sistemas biológicos puede ser de dos tipos: térmica y no térmica. De este modo, para campos de frecuencias inferiores a los 100 KHz se inducen corrientes en los sistemas biológicos con una intensidad que es proporcional al tamaño y variación de la intensidad del campo magnético con el tiempo, mientras que los campos eléctricos inducidos generan variaciones de potencial en las membranas celulares. Para frecuencias entre los 100 KHz y los 10 MHz tiene lugar una transición entre los efectos de inducción de corrientes y los efectos térmicos. Por encima de los 10 MHz prevalecen los procesos relacionados con los efectos térmicos <sup>[11]</sup> <sup>[14]</sup>.

### Diversos estudios epidemiológicos

La gran mayoría de los estudios epidemiológicos publicados se han desarrollado en el ámbito de la exposición del público general a los campos electromagnéticos, siendo más limitados estos estudios para los entornos laborales.

### Campos electromagnéticos VLF

Gran parte de las investigaciones han estado centradas en la salud infantil, así como en la exposición ocupacional en cuanto a su relación con los posibles efectos en adultos. Sin embargo no existen pruebas de laboratorio en estudios celulares o de animales, por lo que en muchos casos los resultados son inconsistentes con los datos que podemos encontrar en la bibliografía y, en el mejor de los casos, arrojan una alta incertidumbre.



Tampoco ha sido posible encontrar evidencias reales que asocien el desarrollo de alteraciones cerebrales en adultos con la exposición residencial a campos electromagnéticos en los pocos estudios que han ido destinados a este fin.

La mayoría de los estudios han estado centrados en la búsqueda de la relación entre los tumores cerebrales y la exposición laboral, sobre todo en aquellos casos en los que los trabajadores están sometidos a campos especialmente intensos. Algunos trabajos han tratado de relacionar casos de leucemia con la permanencia en proximidades de líneas de alta tensión [24] concluyendo que no hay un mecanismo biológico aceptado para explicar los resultados epidemiológicos, y que las relaciones obtenidas pueden ser fruto de la casualidad o de errores.

### **Campos electromagnéticos de radiofrecuencia**

Para este tipo de campos, los estudios epidemiológicos han arrojado resultados negativos en la relación de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia, como por ejemplo los campos que producen los teléfonos móviles, y algunos de sus efectos específicos buscados como el tumor cerebral, el neuroma acústico o el de la glándula salivar.

#### Estudios de la UE

Basándonos en los estudios de laboratorio realizados a nivel celular sobre los efectos de los campos electromagnéticos a que nos exponen las tecnologías cotidianas existentes (desde las frecuencias extremadamente bajas y utilizadas para el transporte de la energía a través de la corriente eléctrica hasta los campos de radiofrecuencia necesarios para el transporte de información con grandes anchos de banda), solo se puede afirmar que es un terreno todavía muy desconocido.

Es por este motivo que la Unión Europea puso en marcha un proyecto a nivel europeo denominado "Interphone", con la intención de resolver algunas de las incertidumbres existentes en este ámbito.

La epidemiología, que trata sobre el estudio estadístico de las relaciones entre un fenómeno y la posible causa que lo provoca, es el primer campo que se estudia en el terreno de la prevención de riesgos para la salud. Sin embargo, para poder llegar a conclusiones válidas, su estudio debe prolongarse lo suficiente en el tiempo y constar de un número de casos de ensayo lo suficientemente amplio y significativo como para que los resultados sean relevantes. En los estudios anteriores a este proyecto, los datos epidemiológicos relacionados con la exposición a los campos involucraban a poblaciones restringidas, y con condiciones completamente diferentes, de manera que con una metodología tan poco unificada, no era posible llegar a conclusiones determinantes.

El método propuesto por la UE consistía en la creación de equipos de investigadores y científicos especialistas de diferentes países y en diferentes áreas con la finalidad de que el estudio fuese lo más amplio posible de forma que se evitasen las diferencias regionales. Los estudios estuvieron centrados en diferentes variantes de enfermedades craneales, es decir, gliomas y meningiomas, tumores salivares, como los de las glándulas parótidas, y tumores del nervio acústico, como los neurinomas, así como las enfermedades del sistema linfático, como los linfomas.

Se seleccionaron poblaciones en las que la convivencia con el uso de la telefonía móvil se situaba en el intervalo de los cinco a los diez años, y en personas activas de los 30 a los 59 años. Tras un análisis de este sesgo de la población se encontraron alrededor de seis mil casos de gliomas y meningiomas, más de mil casos de neurinomas del nervio auditivo y alrededor de seiscientas personas con tumores en las glándulas salivares. Estos datos a su vez fueron contrastados con la facturación de los operadores móviles, así como con las características de las tecnologías de red y de los equipos utilizados. Sin embargo, los resultados no permitieron sacar relaciones causa-efecto concluyentes.

En nuestro organismo, la parte más expuesta a la radiación es el aparato auditivo, por lo que es el órgano en el que se estudia en primer lugar la cuestión de los posibles efectos de los campos producidos por las distintas tecnologías de telefonía móvil. Las investigaciones realizadas para el proyecto europeo "GUARD" (Efectos adversos potenciales de los teléfonos celulares GSM en la audición) alcanzaron conclusiones tranquilizadoras.

El hecho de que, después de varios años de trabajo, ninguno de los estudios realizados haya desembocado en resultados esclarecedores que sirvieran para indicar la nocividad de los teléfonos móviles en las regiones auditivas o en otros órganos debe aumentar la confianza de todos en el uso de esta tecnología.

## Marco normativo

Diversas organizaciones gubernamentales y no gubernamentales llevan tiempo trabajando en estándares para la regularización de las condiciones de exposición a fuentes de campos electromagnéticos.

Estos estándares han sido desarrollados para definir niveles de exposición a radiaciones no ionizantes compatibles con la salud. A nivel internacional, las directrices desarrolladas por la ICNIRP son las más importantes hoy en día. Estas directrices, al igual que en otros estándares internacionales, basan sus restricciones por un lado en la densidad de corriente para campos electromagnéticos de baja frecuencia y, por otro lado, en la densidad de potencia y SAR (Specific Absorption Rate) para alta frecuencia (10 GHz).

En las últimas dos décadas se han realizado diferentes publicaciones en materia legal sobre las exposiciones del público general y de los trabajadores a los campos electromagnéticos, como la recomendación del Consejo de la Unión Europea de 12 de julio de 1999, donde se recogen las conclusiones de la Comisión Internacional para la Protección frente a Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP) o la Directiva 2013/35/UE.

Posteriormente a dicha publicación se han seguido desarrollando y tratando de actualizar las normativas, aunque no está siendo una tarea fácil debido a la falta de estudios concluyentes en este ámbito.

En España, en el año 2001, se hizo público el Real Decreto 1066/2001 en el que se recogen los límites de emisión para radiaciones no ionizantes, siguiendo lo establecido en la recomendación del Consejo de la UE y de la ICNIRP, y más adelante, tras varias publicaciones y correcciones, se ha aprobado y publicado finalmente la Directiva 2013/35/UE que recoge las disposiciones mínimas de seguridad y salud aplicables a profesionales expuestos a campos electromagnéticos.

### Evolución de la legislación

La Comunicación de la Comisión Europea establece un programa de acción para la aplicación de la carta comunitaria de los derechos sociales fundamentales de los trabajadores. En dicho programa prevé el establecimiento de unas disposiciones mínimas de salud y de seguridad en el ámbito de la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos.

Por lo tanto, y según dictan el Tratado de los Estados de la Unión Europea, el Parlamento Europeo y el Consejo, los gobiernos pueden elaborar Directivas mediante las cuales se establezcan una serie de disposiciones mínimas que vayan destinadas al fomento de la mejora de los entornos laborales de los trabajadores, y que garanticen un nivel de protección mayor para su salud y seguridad.

Esas Directivas a las que se ha hecho referencia son disposiciones normativas de Derecho comunitario, las cuales vinculan a todos los Estados de la Unión o, en su caso, a los estados destinatarios, en la consecución de resultados u objetivos concretos en un plazo de tiempo determinado.

No obstante, las Directivas permiten a las autoridades internas de los Estados la debida elección de la forma y los medios adecuados a tal fin, con el requisito de evitar establecer trabas de carácter administrativo, financiero o jurídico que obstaculicen la creación y el desarrollo de pequeñas y medianas empresas.

En septiembre del año 1990, el Parlamento Europeo adoptó una resolución sobre el programa de acción de protección de los trabajadores en entornos laborales en la que invitaba a la Comisión, entre otras cosas, a elaborar una Directiva específica en el ámbito de los riesgos relacionados con el ruido y las vibraciones y con cualquier otro agente físico en el lugar de trabajo.

En una primera etapa, el Parlamento Europeo y el Consejo adoptaron la Directiva 2002/44/CE, de 25 de junio de 2002, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (vibraciones) (decimosexta Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/ CEE).

Más tarde el Parlamento Europeo y el Consejo adoptaron la Directiva 2003/10/CE, de 6 de febrero de 2003, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (ruido).

A continuación, se consideró necesario establecer medidas que protegieran a los trabajadores de los riesgos asociados a los campos electromagnéticos, debido a sus efectos en la salud y la seguridad de los trabajadores, por lo que se elaboró La Directiva 2004/40/CE, la cual fue aprobada en Estrasburgo el 29 de abril de 2004, estableciendo unos requisitos mínimos y permitiendo a los Estados miembros la opción de mantener o adoptar disposiciones más favorables para la protección de los trabajadores, en particular fijando, para los campos electromagnéticos, valores inferiores para los valores que dan lugar a una acción o los valores límites de exposición.

Sin embargo, en el año 2006, la comunidad médica manifestó a la Comisión su preocupación por la aplicación de la anterior Directiva. Los valores límite de exposición establecidos restringirían, de forma desproporcionada, la utilización y el desarrollo de la técnica de imagen por resonancia magnética (IRM), considerada actualmente como un instrumento imprescindible para el diagnóstico y tratamiento de diversas enfermedades y cuyo beneficio en el ámbito médico está fuera de toda duda.

Posteriormente, otros sectores industriales también manifestaron su preocupación sobre la incidencia de la Directiva en sus actividades.

Ante estas preocupaciones, la Comisión adoptó una serie de medidas. En aras de la transparencia, entró en contacto con los Estados miembros y el Parlamento Europeo y les informó sobre las medidas que había previsto adoptar. En este contexto, pidió a los Estados miembros que le comunicaran las posibles dificultades derivadas de la aplicación de la Directiva. Además, inició un estudio para evaluar la incidencia real de las disposiciones de la Directiva en los procedimientos médicos que utilizan la IRM. Los resultados de este estudio debían estar disponibles a comienzos de 2008 y ser comunicados a los Estados miembros y al Parlamento Europeo.

Mientras tanto, se publicaron los resultados de un estudio iniciado por el Gobierno británico sobre la evaluación de los campos electromagnéticos en torno a los aparatos de IRM (Assessment of electromagnetic fields around magnetic resonance imaging (MRI) equipment), así como los comentarios sobre las posibles restricciones de la IRM derivadas de una Directiva europea (Comments concerning possible MRI restrictions due to implementation of a EU Directive), formuladas por el Consejo de salud de los Países Bajos (Gezondheidsraad) en cooperación con el organismo equivalente en Bélgica. Estos dos documentos, cuyo nivel científico es elevado, confirmaron la posibilidad de una interferencia de los valores límite que establece la Directiva con las prácticas médicas que utilizan la IRM.

Además, la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (International Commission for Non-ionising Radiation Protection o ICNIRP) está reexaminando actualmente las directrices sobre los campos magnéticos estáticos y los campos de baja frecuencia que varían con el tiempo, en las que se fundamentaba en un principio la Directiva.

En ambos casos, unas nuevas recomendaciones contemplarían muy probablemente, para los campos de baja frecuencia, valores límite menos estrictos que los que estipula la Directiva. Las nuevas recomendaciones de la ICNIRP se esperaban respectivamente para noviembre de 2007 y otoño de 2008.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) también trabaja actualmente en la revisión de sus criterios de salubridad ambiental para los campos electromagnéticos a fin de incorporar los últimos estudios científicos disponibles.

De esta forma, el plazo para la incorporación de la Directiva 2004/40/CE al Derecho nacional de los Estados miembros estaba prevista para el 30 de abril de 2008, de manera que pudiese tener en cuenta la evolución mencionada. Este retraso de cuatro años en la fecha de entrada en vigor permitiría:

- un análisis completo de los estudios, incluido el iniciado por la Comisión, sobre las consecuencias negativas posibles de los valores límite de exposición establecidos por la Directiva para el uso médico de la IRM;
- esperar los resultados de la revisión de las recomendaciones de la ICNIRP y tener en cuenta los “criterios de salubridad ambiental para los campos electromagnéticos” de la OMS sobre la base de los últimos estudios científicos sobre los efectos para la salud humana de los campos electromagnéticos publicados desde la adopción de la Directiva y, por último;
- realizar un análisis de impacto pormenorizado de las disposiciones de la Directiva y proponer una revisión de la Directiva para garantizar a la vez un elevado nivel de protección de la salud y de la seguridad de los trabajadores y el mantenimiento y desarrollo de las actividades médicas e industriales que utilicen campos electromagnéticos.

Sin embargo, antes de alcanzar la fecha anteriormente citada, se volvió a presentar una propuesta de moratoria que se limitaría a aplazar la fecha de incorporación de la Directiva hasta el 30 de abril de 2012, para dar el tiempo necesario al completo análisis de su impacto, entre otros aspectos, en la utilización de la IRM y para adaptarla a los nuevos conocimientos científicos.

Esta propuesta no simplificaba el marco legislativo, sólo buscaba el aplazamiento de la fecha de incorporación de la Directiva 2004/40/CE al Derecho Nacional.

Estos cuatro años adicionales para incorporar al Derecho nacional las disposiciones de la Directiva se volvían a justificar por los temores manifestados y, en parte, confirmados, de una incidencia desproporcionada de los valores límite de exposición fijados por la Directiva en la continuidad de las prácticas médicas que utilizan la imagen médica por resonancia magnética, y por la necesidad de brindar a la comunidad científica el tiempo necesario para evaluar los últimos estudios científicos relativos a los efectos en la salud de las radiaciones electromagnéticas, que son los que sustentan los valores límite y las disposiciones de la Directiva.

Las sociedades científicas comunitarias recibieron con agrado una vez más la decisión del Parlamento Europeo de posponer otros cuatro años la puesta en marcha de la nueva directiva sobre campos electromagnéticos que, a su juicio, podría haber puesto en peligro la realización de ciertas pruebas médicas, como la resonancia magnética.

Entre ellas, la Organización Europea del Cáncer (ECCO) apoyó el voto mayoritario del parlamento comunitario a favor de retrasar la puesta en marcha de la Directiva 2004/40/EC sobre Agentes Físicos (Campos Electromagnéticos). Esta institución destaca el papel primordial que la resonancia, que se habría visto afectada por la nueva norma, tiene para el diagnóstico, seguimiento y control de los tratamientos contra el cáncer.

El siguiente paso legislativo requeriría la votación de esta cuestión por parte del Consejo de Ministros europeo, previsto para los últimos días de febrero de ese año.

La norma fue diseñada con el objetivo de fijar ciertos límites en los campos electromagnéticos para proteger a los trabajadores sanitarios que manipulan estos dispositivos. Sin embargo, en la práctica, estos umbrales todavía impedían el uso de estos aparatos en la mayor parte de las unidades de radiodiagnóstico.

La directiva preveía que los profesionales sanitarios no pudieran atender a los pacientes mientras se les hace la prueba; lo que supondría que, en la práctica, no se podría hacer una resonancia a niños, ancianos, personas especialmente frágiles o que estén anestesiadas (intraoperatoria), y recuerdan que la alternativa, es decir, recurrir a radiografías, sería menos precisa y probadamente más peligrosa.

Desde que se conoció la intención de ponerla en marcha, las asociaciones de profesionales y pacientes han argumentado que no existen estudios suficientes que demuestren que la exposición a la radiofrecuencia en los rangos que utiliza la RM sea peligrosa para la salud humana.

Varias organizaciones, como ECCO o la Alianza por la Resonancia Magnética, anunciaron que aprovecharían también esta moratoria para implicarse decididamente en la colaboración con la Unión Europea en la búsqueda de estudios científicos que puedan ser finalmente determinantes. Otra organización sanitaria, también anunció su intención de colaborar en esta tarea.

Sin embargo, algunos países ya habían comenzado a incluir la normativa en su legislación nacional, por lo que las organizaciones pidieron a la Comisión Europea que interviniese para evitar disparidades. Además, se subrayó que la seguridad de los profesionales sanitarios que trabajan con estos dispositivos de radiodiagnóstico ya está regulada por varias directivas comunitarias, como la 93/42/EEC o la IEC/EN 60601-2-33.

#### Estado actual de la legislación

A modo de resumen, la Directiva 2004/40/CE fue modificada por la Directiva 2008/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, en virtud de la cual se pospuso cuatro años el plazo de transposición de la primera, y posteriormente por la Directiva 2012/11/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, en virtud de la cual se pospuso dicho plazo de transposición hasta el 31 de octubre de 2013.

Esos aplazamientos permitirían a la Comisión presentar una nueva propuesta y los colegisladores podrían adoptar una nueva directiva basada en datos más recientes y rigurosos.

Finalmente, la aprobación y publicación de la Directiva 2013/35/UE supuso la derogación de la Directiva 2004/40/CE, debiendo los Estados miembros poner en vigor las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a lo establecido en dicha Directiva a más tardar el **1 de julio de 2016**.

# Pautas para la evaluación de entornos laborales

## Introducción

Para facilitar la prestación de un conveniente nivel de protección contra los efectos adversos para la salud y los riesgos para la seguridad que puedan ser consecuencia de la exposición a campos electromagnéticos es adecuado utilizar un sistema que se base en valores límite de niveles de exposición y niveles de actuación, los cuales se definen a continuación:

- Valor de exposición que da lugar a una acción: Terminología aplicada en la Directiva 2013/35/UE para referirse al nivel de los parámetros directamente medibles, tales como la intensidad de campo magnético (H) que, respetando dichos niveles, garantizará conformidad con los correspondientes valores límite de exposición.
- Valores límite de exposición: Terminología aplicada en la Directiva 2013/35/UE para referirse a los límites de la exposición a los campos electromagnéticos basados directamente en los efectos sobre la salud conocidos y consideraciones biológicas.

Tanto los valores límite de exposición como los valores que dan lugar a una acción, están basados en efectos inmediatos para la salud provenientes de absorciones de radiación a corto plazo como la estimulación de los nervios periféricos y músculos, los choques eléctricos y las quemaduras causadas por tocar objetos conductores, y la generación de temperaturas elevadas en los tejidos como consecuencia de la absorción de energía durante la exposición a campos electromagnéticos. El cumplimiento de estos límites garantizará que los trabajadores expuestos a campos electromagnéticos estén protegidos contra todo efecto nocivo conocido para la salud.

No obstante, un sistema de este tipo puede entrar en conflicto con condiciones específicas que se dan en determinadas actividades, como la utilización de las técnicas de resonancia magnética en el sector médico. Por tanto, es necesario tener en cuenta estas condiciones particulares.

Por otra parte, se aconseja evitar la duplicación de evaluaciones cuando el material de trabajo cumple los requisitos establecidos en la correspondiente normativa de la Unión sobre productos, en la que se fijan unos niveles de seguridad siempre más estrictos que los de las normativas. Esto permitirá simplificar la evaluación en un gran número de casos.

Sin embargo, es posible que en determinados casos y en circunstancias debidamente justificadas, se excedan solo temporalmente los valores límite de exposición establecidos en la Directiva. En tales casos, los empresarios deben tomar las medidas necesarias para volver a cumplir los valores límite de exposición lo antes posible.



## Procedimiento

La planificación y realización de evaluaciones, mediciones y cálculos necesarios para la elaboración de las certificaciones de ambientes electromagnéticos en entornos laborales deberán ser llevadas a cabo por **servicios o personas competentes a intervalos adecuados**, siempre teniendo en cuenta las directrices establecidas en las directivas 2013/30/UE y 89/391/CEE relativas a los servicios o personas competentes necesarios y a la consulta y participación de los trabajadores.

Los datos obtenidos en la evaluación, la medición o el cálculo del nivel de exposición se conservarán en una forma adecuada que permita garantizar el seguimiento y su consulta posterior, con arreglo a la normativa y práctica nacionales.

No será necesario realizar la evaluación de la exposición en los lugares de trabajo abiertos al público, siempre que ya se haya procedido a una evaluación conforme a las disposiciones sobre limitación de la exposición del público en general.

Los pasos necesarios para la realización de las mencionadas certificaciones se detallan a continuación:

### 1. Revisión de características técnicas de los artefactos

En el caso de que la maquinaria o los artefactos que producen la existencia de ambientes radioeléctricos artificiales en los entornos de trabajo se ajusten a la correspondiente normativa de la Unión y dispongan de las certificaciones adecuadas, se podrá tener en cuenta los niveles de emisión y otros datos relacionados con la seguridad que el fabricante o distribuidor facilite para el material, utilizándolos como fuente válida para la realización de las simulaciones o cálculos oportunos, siempre que sea aplicable a las condiciones de exposición en el lugar de trabajo o en las instalaciones.

Si no se dispone de la citada información, o si el material no se ajusta a los estándares de calidad determinados por la Unión, será necesaria la realización de mediciones como se indica en apartado siguiente.

### 2. Realización de mediciones con instrumentación específica

Si el cumplimiento de los valores límite de exposición no puede determinarse de manera fiable basándose en información fácilmente accesible, la evaluación de la exposición se realizará basándose en **mediciones o cálculos**.

Se deberá identificar y evaluar los campos electromagnéticos en el lugar de trabajo, teniendo en cuenta las normas o directrices aplicables que facilite el Estado, incluidas las bases de datos sobre exposiciones.

Para ello se deberá utilizar en cada caso el instrumental de medición apropiado a los aparatos y fuentes de radiación, teniendo en cuenta la naturaleza, potencia y frecuencia de las emisiones generadas.

En este caso, la evaluación tendrá en cuenta las incertidumbres relativas a las mediciones o cálculos, como los errores numéricos, la modelización de fuentes, la geometría espectral y las

propiedades eléctricas de tejidos y materiales determinadas con arreglo a las buenas prácticas correspondientes.

### 3. Evaluación de excepciones

Si la exposición supera los niveles de actuación, el empresario tomará medidas correctoras o que limiten la exposición de los trabajadores, a menos que la evaluación realizada demuestre que no se superan los valores límite de exposición correspondientes y que pueden descartarse los riesgos para la seguridad, o que se está sujeto a alguna de las excepciones estipuladas por la normativa, como las citadas a continuación:

- a) la exposición podrá superar los valores límite de exposición si está relacionada con la instalación, el ensayo, el uso, el desarrollo, el mantenimiento o la investigación de equipos de imágenes por resonancia magnética (IRM) para pacientes en el ámbito sanitario, siempre y cuando se cumplan todas las condiciones siguientes:
  - a. que, habida cuenta del estado de la técnica, se hayan aplicado todas las medidas técnicas u organizativas,
  - b. que las circunstancias justifiquen debidamente la superación de los valores límite de exposición,
  - c. que se hayan tenido en cuenta las características del lugar de trabajo, el equipo de trabajo o las prácticas de trabajo, y
  - d. que el empresario demuestre que los trabajadores siguen estando protegidos contra los efectos adversos para la salud y contra los riesgos para la seguridad, en particular asegurándose de que se siguen las instrucciones de uso seguro facilitadas por el fabricante de conformidad con la Directiva 93/42/CEE, relativa a los productos sanitarios
- b) los Estados miembros podrán autorizar que se aplique un sistema de protección equivalente o más específico para el personal que trabaje en instalaciones militares operativas o que participe en actividades militares, incluidos los ejercicios militares internacionales conjuntos, siempre que se prevengan los efectos adversos para la salud y los riesgos para la seguridad;
- c) los Estados miembros podrán permitir, en circunstancias debidamente justificadas y solo en tanto se mantenga la debida justificación, que se superen temporalmente los valores límite de exposición en sectores específicos o para actividades específicas ajenas al ámbito de aplicación de las letras a) y b). A efectos de la presente letra, se entenderá por «circunstancias debidamente justificadas» aquellas en las que se cumplan los siguientes criterios:
  - a. que la evaluación de los riesgos haya puesto de manifiesto que se han superado los valores límite de exposición,
  - b. que, habida cuenta del estado de la técnica, se hayan aplicado todas las medidas técnicas u organizativas,
  - c. que se hayan tenido en cuenta las características del lugar de trabajo, el equipo de trabajo o las prácticas de trabajo, y
  - d. que el empresario demuestre que los trabajadores siguen estando protegidos contra los efectos adversos para la salud y contra los riesgos para la seguridad, también mediante el uso de normas y directrices comparables, más específicas y reconocidas internacionalmente

#### 4. Adopción de medidas correctoras

El empresario elaborará y aplicará un plan de actuación que incluya medidas técnicas u organizativas destinadas a evitar que la exposición supere los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud o con efectos sensoriales, teniendo en cuenta, en particular:

- a) otros métodos de trabajo que conlleven una exposición menor a campos electromagnéticos;
- b) la elección de equipos que generen campos electromagnéticos menos intensos, teniendo en cuenta el trabajo al que se destinan;
- c) medidas técnicas para reducir la emisión de campos electromagnéticos, incluido, cuando sea necesario, el uso de sistemas de bloqueo, el blindaje o mecanismos similares de protección de la salud;
- d) medidas adecuadas de delimitación y acceso, como señales, etiquetas, marcas en el suelo, barreras para limitar o controlar el acceso;
- e) en caso de exposición a campos eléctricos, medidas y procedimientos para controlar las descargas de chispas y las corrientes de contacto, mediante métodos técnicos y formación de los trabajadores;
- f) programas adecuados de mantenimiento de los equipos de trabajo, los lugares de trabajo y los puestos de trabajo;
- g) el diseño y la disposición de los lugares y puestos de trabajo;
- h) la limitación de la duración e intensidad de la exposición, y
- i) la disponibilidad de equipos adecuados de protección personal

#### 5. Certificación o Evaluación de Riesgos

A partir de la evaluación de los riesgos, los lugares de trabajo en los que exista la posibilidad de que los trabajadores vayan a estar expuestos a campos electromagnéticos que superen los niveles de actuación se señalarán adecuadamente. Las zonas en cuestión se identificarán adecuadamente y se limitará el acceso a ellas en caso necesario.

Cuando el acceso a estas zonas esté limitado adecuadamente por otros motivos y los trabajadores estén informados de los riesgos derivados de campos electromagnéticos, no serán necesarias señalizaciones ni restricciones de acceso específicas para los campos electromagnéticos.

En el caso en que no sean aplicables las medidas anteriormente citadas, se adoptarán medidas específicas de protección, como la formación de trabajadores y el uso de medios técnicos y de protección personal, por ejemplo la puesta a tierra de los objetos de trabajo, la conexión de los trabajadores con los objetos de trabajo (conexión equipotencial), y, cuando corresponda, el uso de calzado aislante, guantes y ropa de protección.

En cualquier caso, el empresario deberá disponer de una evaluación de los riesgos de conformidad con el artículo 9, apartado 1, letra a), de la Directiva 89/391/CEE, y determinará las medidas que deban adoptarse para la adecuada protección de los trabajadores.

## 6. Información y formación de los trabajadores

Aquellos trabajadores que puedan verse expuestos a riesgos derivados de campos electromagnéticos en el trabajo deben recibir toda información y formación necesarias sobre el resultado de la evaluación de los riesgos, tales como:

- j) los valores y conceptos de los valores límite de exposición y los niveles de actuación, los posibles riesgos asociados y las medidas preventivas adoptadas;
- k) los posibles efectos indirectos de la exposición;
- l) los resultados de la evaluación, la medición o los cálculos de los niveles de exposición a campos electromagnéticos;
- m) la forma de detectar los efectos adversos para la salud derivados de la exposición y el modo de informar sobre ellos;
- n) la posibilidad de que surjan síntomas y sensaciones pasajeros relacionados con los efectos en el sistema nervioso central o periférico;
- o) las circunstancias en las que los trabajadores tienen derecho a una vigilancia de la salud;
- p) las prácticas de trabajo seguras para reducir al mínimo los riesgos derivados de la exposición;
- q) los trabajadores con riesgos particulares.

## 7. Seguimiento y revisiones periódicas

Cuando un trabajador informe de síntomas transitorios, el empresario actualizará, si fuera necesario, la evaluación de riesgos y las medidas de prevención. Entre los síntomas transitorios pueden encontrarse:

- r) percepciones sensoriales y efectos en el funcionamiento del sistema nervioso central en la cabeza, producidos por campos magnéticos variables en el tiempo,  
y
- s) efectos del campo magnético estático, como vértigo y náuseas

Además, si un trabajador informa de un efecto indeseado o inesperado para la salud, o en cualquier caso en que se detecte una exposición superior a los valores límite de exposición, el empresario velará por que el trabajador afectado reciba los exámenes médicos o la vigilancia individual de la salud adecuados, de conformidad con la normativa y práctica nacionales.

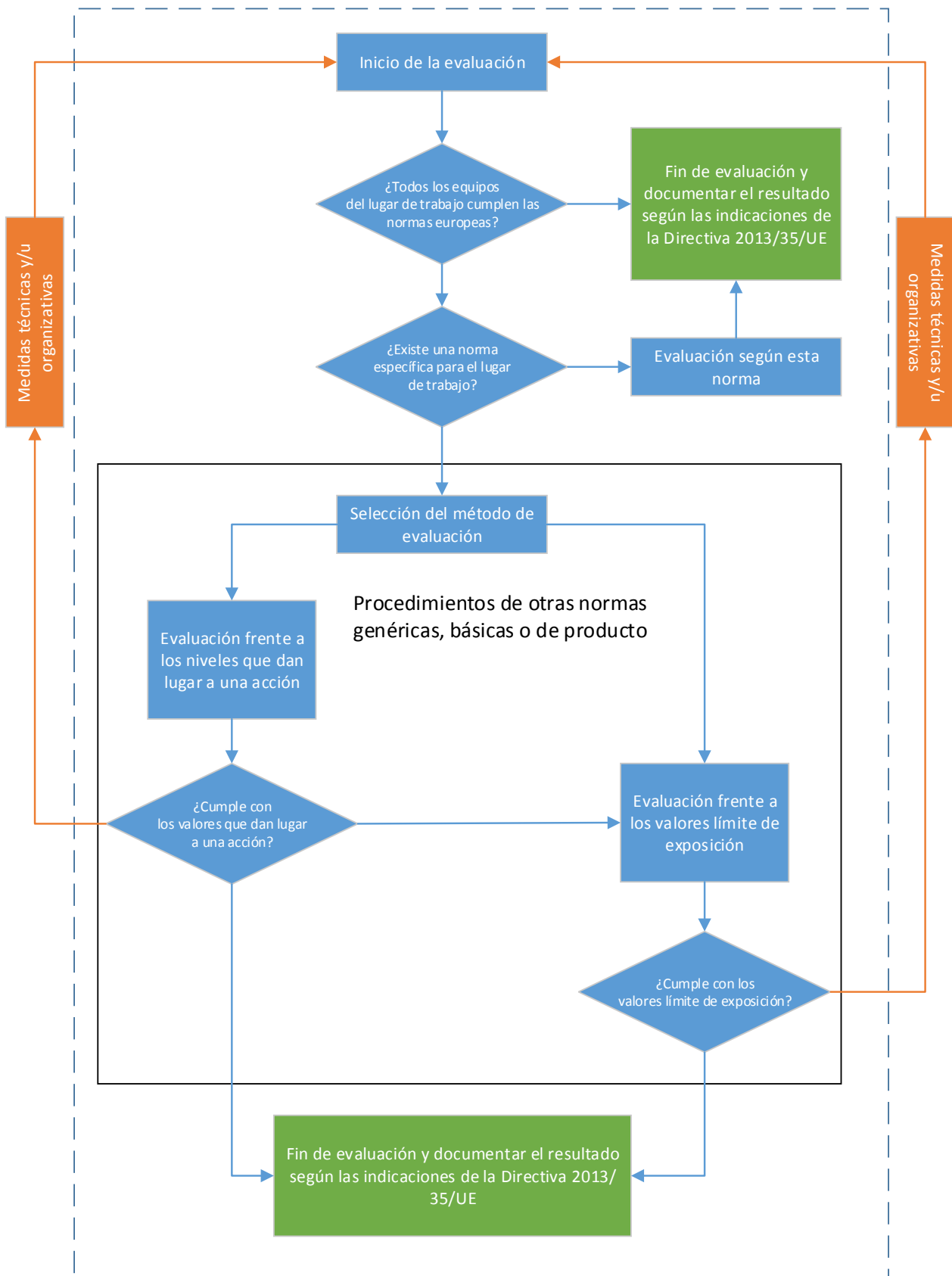


Figura 2. Proceso de evaluación conforme a la Norma UNE-EN 50499:2009

## Desarrollo del estudio

El estado actual de la normativa sigue dejando numerosos aspectos poco definidos. Si bien facilita una serie de directrices y provee de valores para las diferentes magnitudes que deben satisfacerse basándose en los estudios más recientes de las autoridades científicas reconocidas a nivel mundial, no facilita una metodología ni un procedimiento concreto para la realización de los estudios.

Por este motivo AENOR está trabajando en la elaboración de la guía de evaluación AEN/CTN 215 de equipos y métodos de medida relacionados con los campos electromagnéticos en el entorno humano, la cual está orientada a definir los métodos de ensayo y equipos de medida relacionados con los campos electromagnéticos de 0 Hz a 300 GHz, en el entorno humano.

A continuación se realiza el desarrollo y análisis detallado de un procedimiento válido para la realización de los citados estudios.

Existen diferentes tipos de sistemas y equipos susceptibles de ser sometidos a las pruebas de certificación radioeléctrica referente a niveles de exposición próximos a los mismos. Existirán casos en los que el sistema radiante no esté diseñado con la finalidad de radiar al exterior, y por lo tanto las fugas que se produzcan se deban a escapes como consecuencia del deterioro, de un mal diseño por parte del fabricante, de algún posible defecto en la línea de producción del sistema o de un error en el proceso del control de calidad.

En otros casos el sistema bajo estudio podrá ser un sistema radiante intencionado, como el caso de antenas comunicaciones o radiodifusión.

En cada caso, el análisis se realizará de forma específica para cada tipo de finalidad, y por lo tanto, las restricciones que se propongan o las soluciones que se encuentren serán de distinta naturaleza.

La intencionalidad del estudio es el desarrollo de un proceso genérico, aunque nos apoyaremos en ejemplos prácticos de forma que sea más sencillo ilustrar los diferentes pasos de que constará el proceso.

### Radiador no intencionado

En este caso se ha escogido un horno microondas doméstico, que resulta conveniente para el análisis previo tanto por sus dimensiones como por la mayor facilidad para comparar los resultados con la realidad.

### Horno microondas simplificado

En primer lugar se realiza el diseño de una cavidad resonante como un cubo de material conductor perfecto abierto en una de las caras, de forma que se asemeje a un horno microondas doméstico.

La cavidad será alimentada por una de las guías de ondas más usadas en calentamiento por microondas, cuyo tamaño estándar es de 8,6 x 4,3 cm para sus dimensiones internas de la sección transversal a la dirección de propagación. Es el modelo WR-340.

Sobre la cara abierta de la cavidad se situará una puerta realizada también en conductor eléctrico perfecto (PEC), y se simularán diferentes tipos de ajuste.

Además, para las simulaciones, se colocará en el interior de la cavidad una carga de agua de 250 ml, según el proceso estándar para los análisis de fugas electromagnéticas.

## Solid Works

Para el desarrollo del diseño a simular se ha elegido una herramienta profesional de diseño asistido por ordenador. Las aplicaciones de simulación generalmente ofrecen herramientas para el diseño y desarrollo de las geometrías a simular. Sin embargo, estos entornos no suelen estar orientados al diseño, por lo que la interfaz de trabajo no proporciona la versatilidad de una herramienta específicamente ideada para este fin.

Por otro lado, los fabricantes y las empresas de construcciones y mecanizados no generan ni modifican sus diseños en estas herramientas, sino que utilizan software específicos para ese fin tales como Solid Works, Autocad, Solid Edge, Iron CAD, etc., por lo que es conveniente abordar el proceso de exportación y adaptación de los diseños de estas herramientas al entorno que utilizaremos para la simulación de los campos.

La herramienta elegida para el análisis ha sido Solid Works, por ser una herramienta muy versátil y ampliamente extendida en la industria del mecanizado y la fabricación, y es frecuente encontrar los diseños de máquinas y aparatos comerciales profesionales en este entorno, algo que resultará muy útil a la hora de introducir modificaciones en las geometrías.

En la siguiente ilustración se muestra el diseño de una primera aproximación a la construcción virtual de la cavidad de microondas con la muestra de agua en su interior para simular posteriormente en una herramienta de simulación electromagnética.

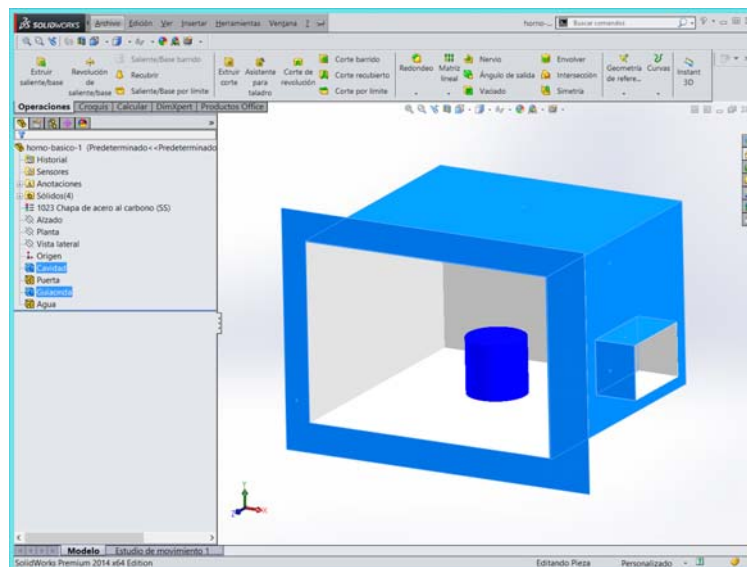


Figura 3. Diseño de cavidad resonante en Solid Works.

## CST Microwave Studio

CST Microwave Studio, es una herramienta especializada para la simulación de componentes en alta frecuencia. Sus aplicaciones abarcan desde comunicaciones móviles, diseño sin hilo e integridad de la señal, hasta diseño y análisis de campos electromagnéticos en general. Los diversos problemas electromagnéticos se resuelven mediante la Técnica de Integración Finita (TIF), consistente en la reformulación discreta de las ecuaciones de Maxwell en su forma integral. De esta manera, se permite la simulación de problemas reales de campos electromagnéticos, con un amplio rango de frecuencias y geometrías complejas.

Se ha escogido esta herramienta de simulación entre otras alternativas, además de por estar muy extendida, porque incluye técnicas de simulación eficiente para los campos magnéticos que reducen en gran medida el número de operaciones y cálculos a realizar, de forma que el software es menos exigente con los requisitos de hardware requeridos para realizar las simulaciones, a la vez que reduce el tiempo necesario para las mismas.

CST Microwave Studio facilita una serie de herramientas para la construcción de las estructuras y diseños a simular, y también provee de un sistema para la importación de modelos almacenados en otros formatos populares de dibujo computerizado.

Aunque la mejor opción es utilizar siempre datos en el formato nativo de la aplicación en la que vamos a trabajar, dada la amplia oferta del mercado, es siempre necesario tener la capacidad de poder importar la mayor cantidad de tipos de fichero diferentes y poder adaptarlos al formato de la aplicación destino, como se muestra a continuación.

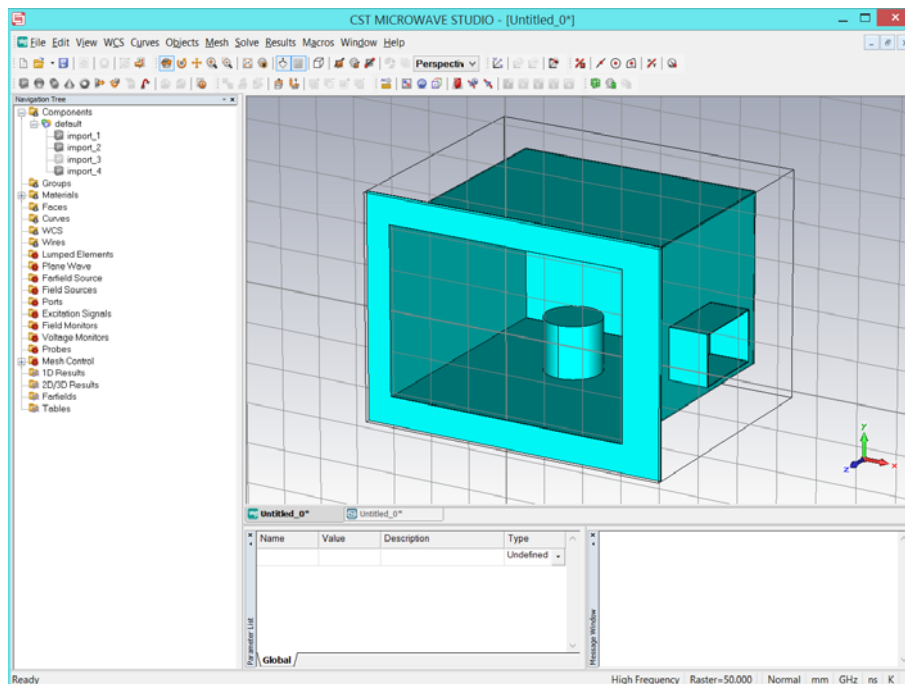


Figura 3. Estructura de dibujo computerizado importada en CST Microwave Studio.

La figura anterior muestra el estado inicial del flujo de trabajo una vez que se realiza la importación de la geometría en un formato de dibujo computerizado genérico.



El primer detalle que salta a la vista es que no se ha respetado la estructura de materiales del diseño original. CST es capaz de reconocer las geometrías de los sólidos importados en los formatos más populares, como SAT, STL, IGES, STEP, etc., pero hay una información importante que no se puede mantener debido a las diferencias entre los formatos propietarios, referente a los materiales de cada componente de la geometría importada. Por este motivo es necesario realizar modificaciones para asignar a cada componente el material apropiado con el fin de que la simulación sea lo más precisa posible.

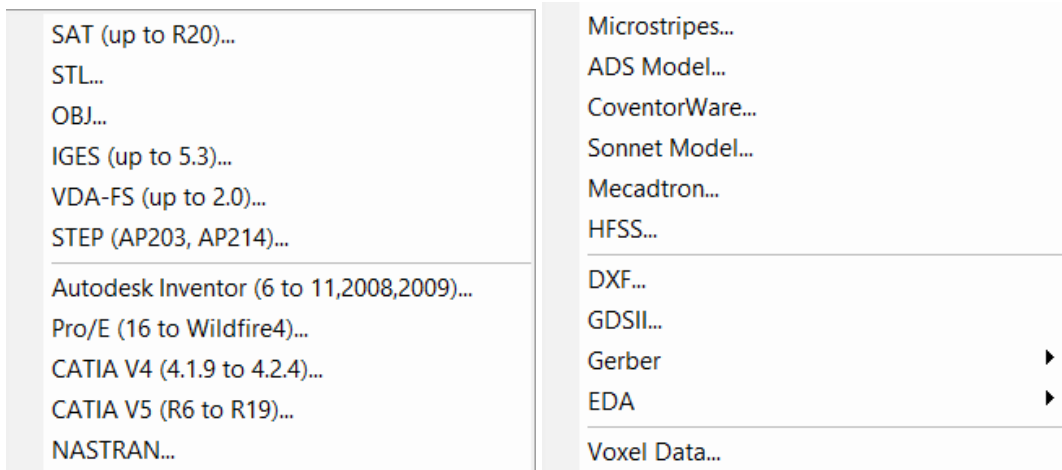


Figura 4. Formatos de importación de CST Studio Suite.

A continuación, en la imagen, se muestra cómo queda la estructura una vez se ha establecido correctamente los materiales a cada parte de la estructura. En este caso simplificado se utilizan solamente tres tipos de material:

- Conductor eléctrico perfecto (PEC) para las paredes de la estructura
- Agua para la carga de muestra necesaria para la simulación de fugas
- Vacío para el entorno alrededor de la estructura de simulación

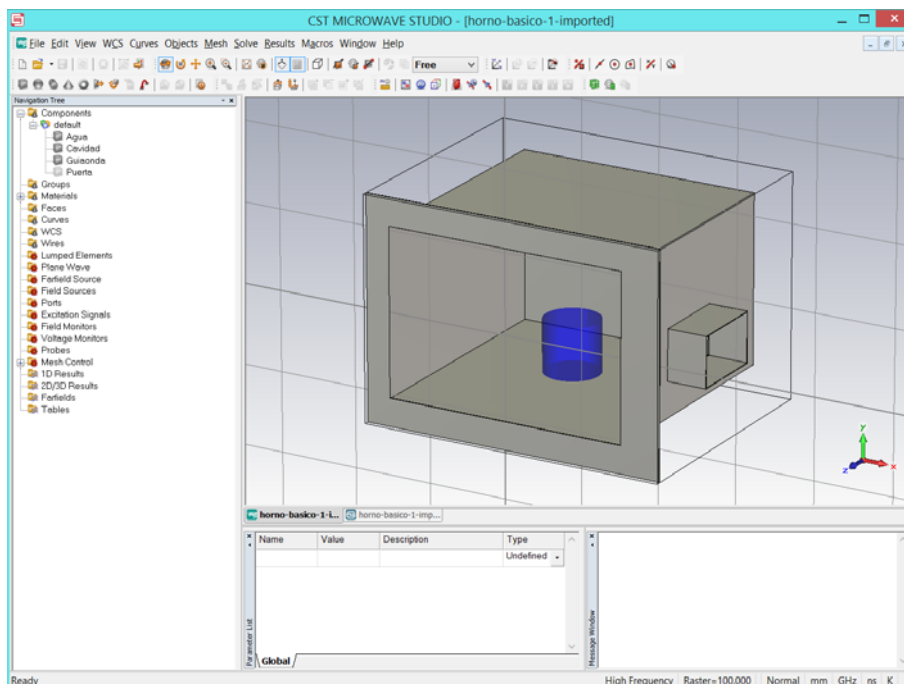


Figura 5. Cavidad resonante en CST Microwave Studio con materiales asignados.

Con el fin de asemejar la anterior estructura a un horno microondas convencional, se cierra el diseño anterior por su parte frontal con una lámina de PEC que simula ser la puerta del horno.

También se ha añadido el puerto de guíaonda para alimentar la cavidad, que es la fuente energética proporcionada por CST más conveniente para este tipo de simulación.

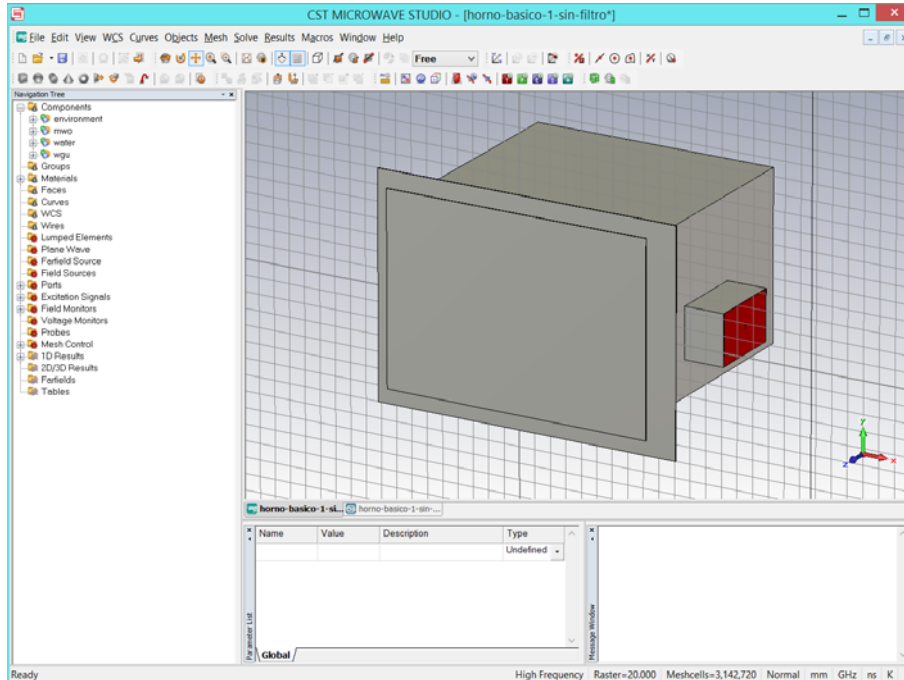
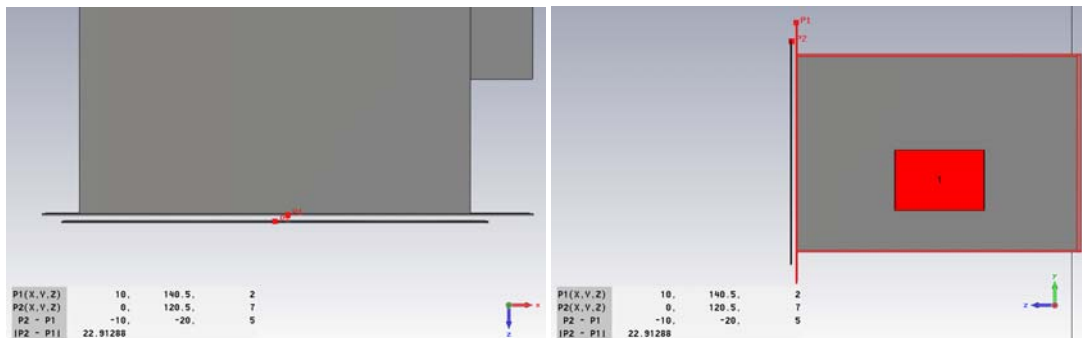


Figura 6. Cavidad resonante con puerta delantera y puerto de alimentación.

Dadas las propiedades físicas de propagación de las ondas, si la estructura metálica se cierra herméticamente no sería posible que se produjesen escapes del campo hacia el exterior, por lo que se ha dejado un espacio de 5 mm de separación en el ajuste entre la puerta y la cavidad



Figuras 7 y 8. Vistas de planta y lateral de separación puerta-cavidad.

El tipo de algoritmo de resolución escogido para el caso en estudio es el transitorio “transient solver”. Este es un tipo de simulación muy flexible en el dominio del tiempo, capaz de resolver cualquier tipo de parámetros S o problemas de antenas.

Realiza la simulación de la estructura a partir del puerto (o puertos) previamente definidos usando una señal de banda ancha. De esta manera la simulación permite obtener los parámetros S para el rango de frecuencias deseado y, opcionalmente los patrones de campo eléctrico y/o magnético a las frecuencias deseadas a partir de una única simulación.

En la siguiente figura se muestra la configuración escogida para la simulación transitoria. En este caso excitaremos un único modo, a la frecuencia de 2,45 GHz, que es la utilizada para el calentamiento por microondas.

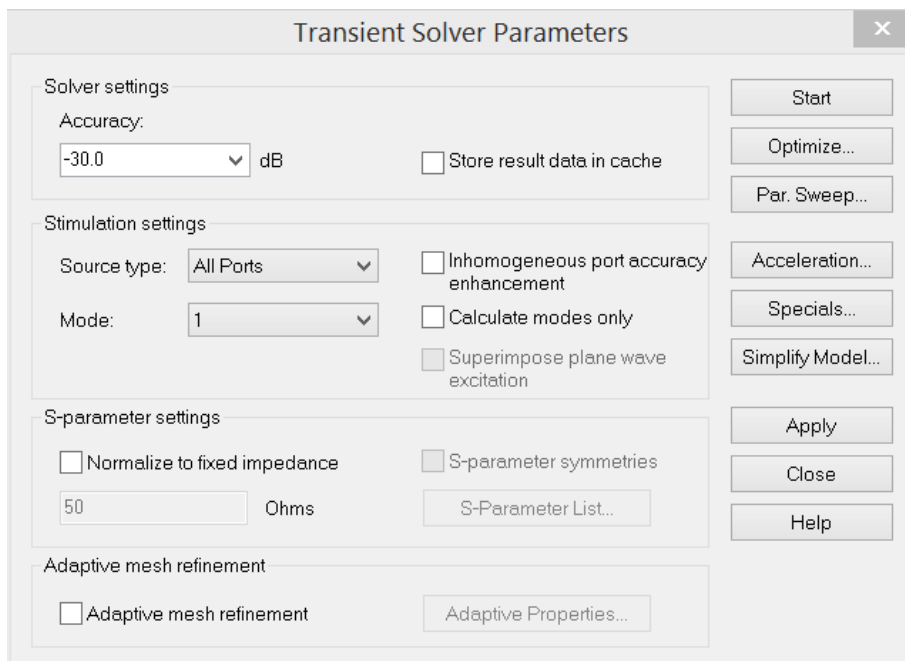


Figura 9. Configuración de la simulación en CST Microwave Studio.

En las siguientes imágenes se muestran los resultados de la simulación, donde se pueden apreciar las fugas de la estructura debidas a la separación entre la puerta y la cavidad resonante.

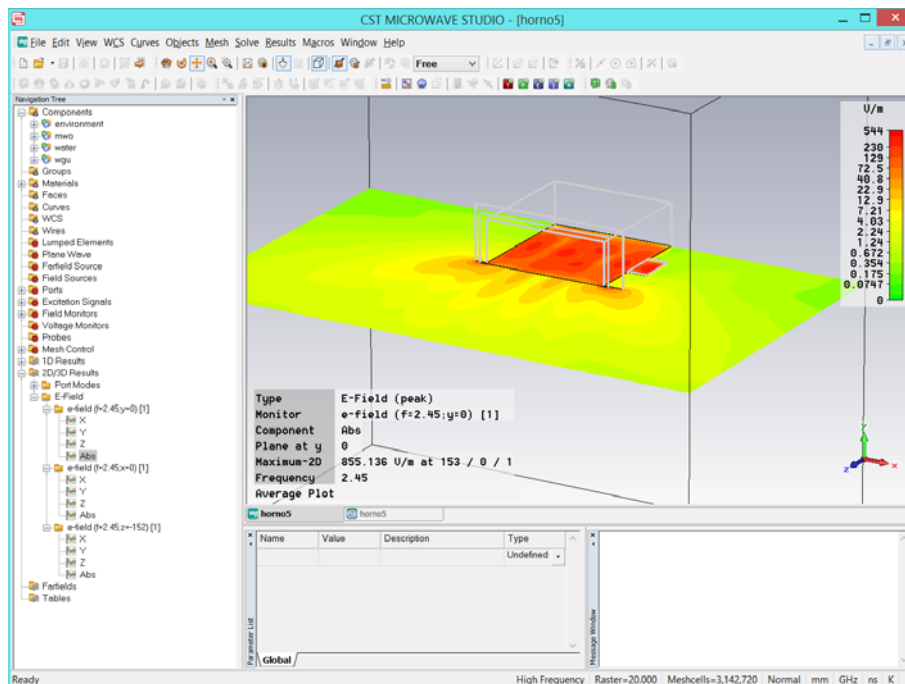
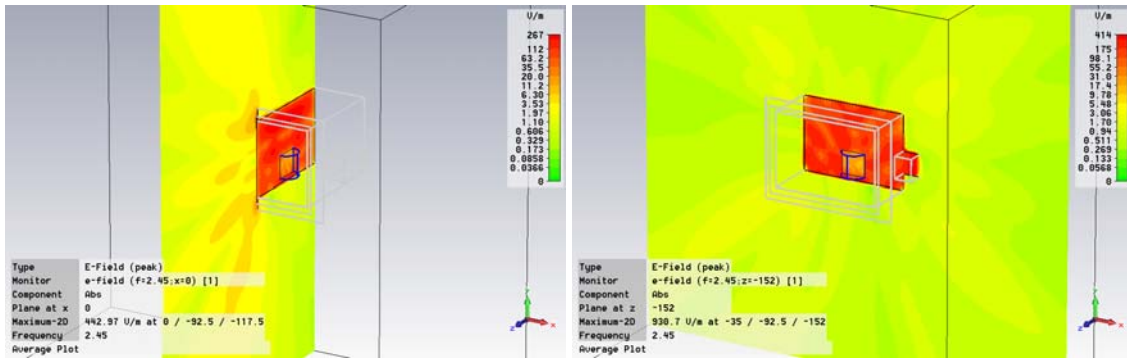


Figura 10. Resultado de la simulación en el plano X-Z.



Figuras 11 y 12. Resultado de la simulación en los planos Y-Z y X-Y.

El objetivo es la localización de las zonas donde se sobrepasan los valores límite de exposición definidos en la Directiva 2013/35/UE, y encontrar el modo de reducir los niveles en esas zonas o bien hallar soluciones alternativas.

Como en este caso la fuga se produce por la abertura que queda alrededor de la puerta, podemos tratar de solucionar el problema utilizando una puerta que incorpore un filtro diseñado para evitar este escape.

En este y otros casos en los que las propuestas resulten ser modificaciones de los sistemas o de los entornos laborales que supongan acometer acciones complejas o que requieran una inversión de capital, es conveniente tener la oportunidad de realizar previamente estudios o simulaciones que permitan prever si la solución propuesta será efectiva.

Siguiendo este principio, realizamos el diseño de una puerta que incluye un filtro de microondas como propuesta para solucionar las fugas excesivas. La construimos una herramienta CAD, en este caso Solid Works que es uno de los entornos bajo análisis:

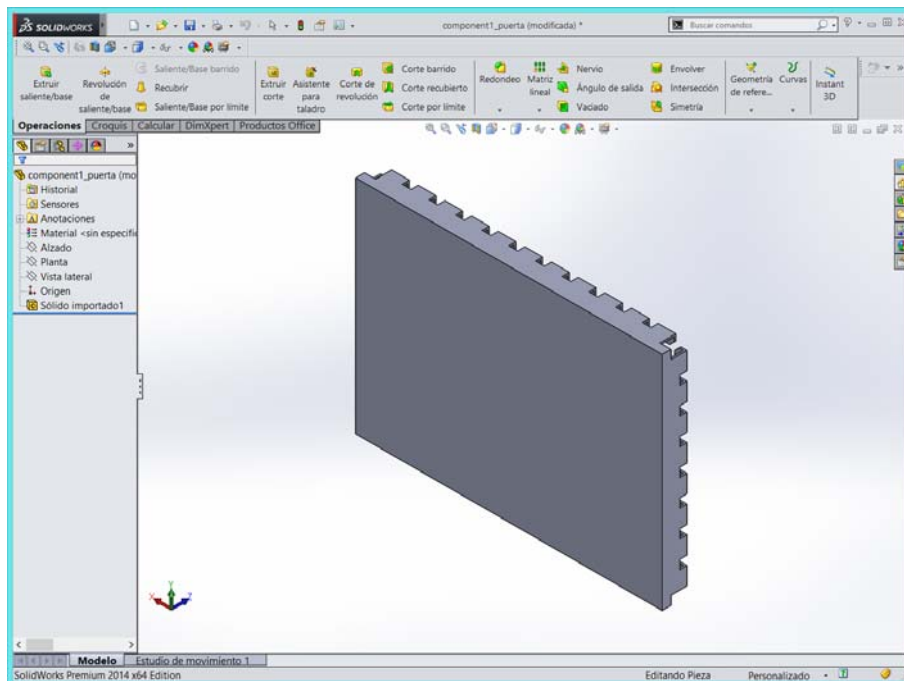
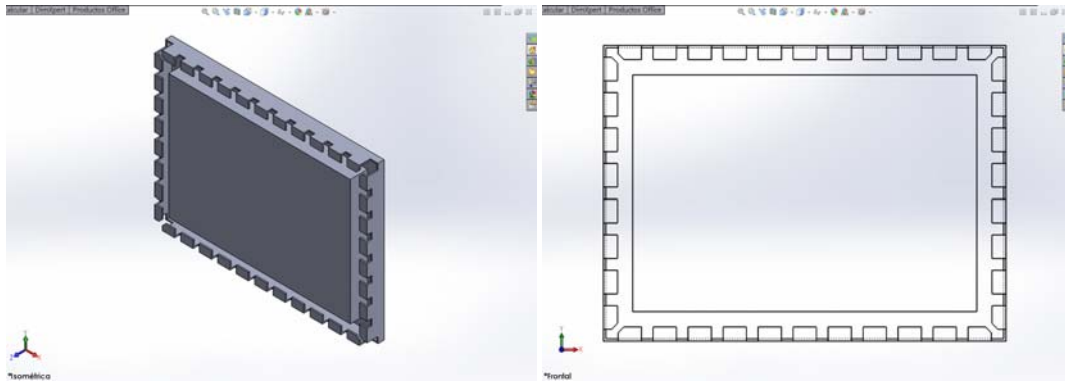


Figura 13. Diseño de puerta con filtro en Solid Works.



Figuras 14 y 15. Vista perspectiva y trasera de la puerta con filtro en Solid Works.

Una vez realizado el diseño de la pieza, o bien la modificación de la estructura del entorno que se propone como solución, volvemos a exportar el diseño a CST Studio para realizar una nueva simulación comparativa.

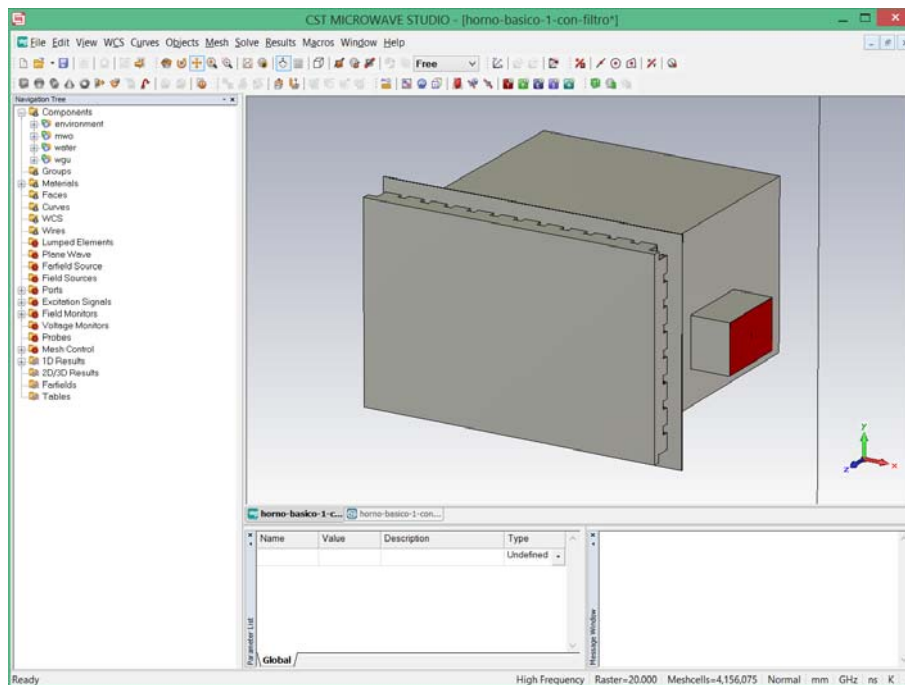
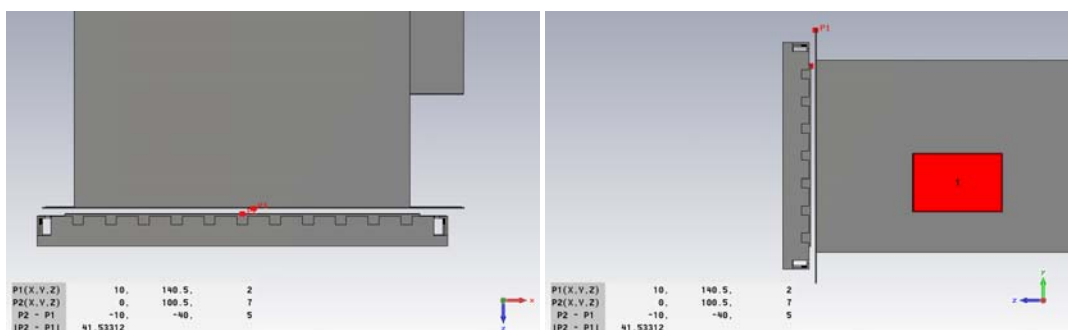


Figura 16. Incorporación de puerta con filtro a la cavidad en CST.

Para que los resultados sean comparables, se da la misma separación que en el caso anterior, 5 mm entre la puerta y la cavidad.



Figuras 17 y 18. Vistas de planta y lateral de la separación puerta-cavidad.

Utilizando los mismos parámetros que en la simulación anterior, obtenemos el siguiente resultado en este caso:

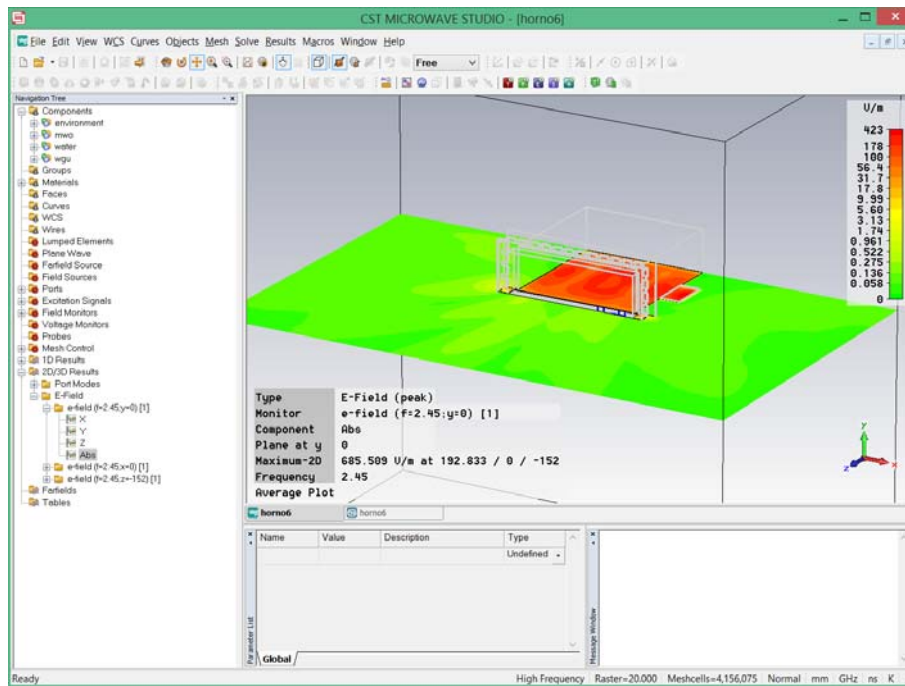
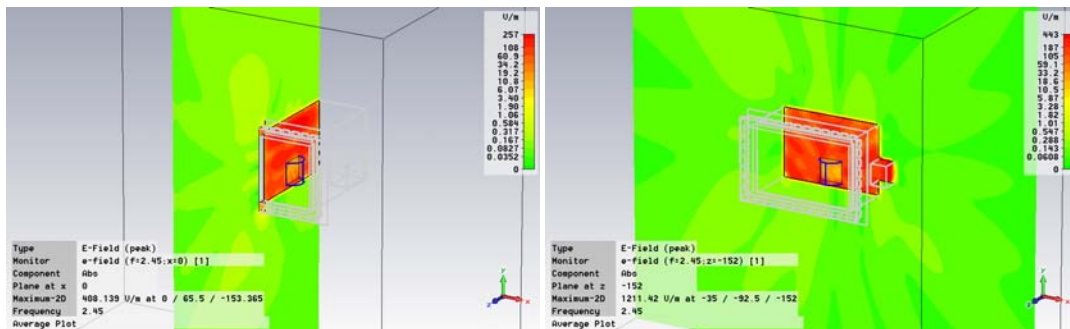


Figura 19. Resultado de la simulación en el plano X-Z.



Figuras 20 y 21. Resultado de la simulación en los planos Z-Y y X-Y.

A la vista de los resultados anteriores, en un primer análisis visual, se comprueba que en este caso las fugas se han reducido aplicando la solución propuesta.

Sin embargo en este primer análisis se han obviado algunos detalles importantes, como la geometría real de un aparato comercial y la potencia utilizada para la simulación, ya que no se han tenido en cuenta valores reales. A continuación se trata de mejorar la simulación aplicándola a un caso más real.



## Horno doméstico comercial

En el siguiente paso se aborda la simulación y estudio de una geometría más realista. Partimos en este caso de un modelo de microondas más detallado ofrecido por el fabricante en un formato universal para diseños CAD, el formato IGES, por lo que si no son necesarias modificaciones complejas, podemos abordar el proceso directamente desde CST.

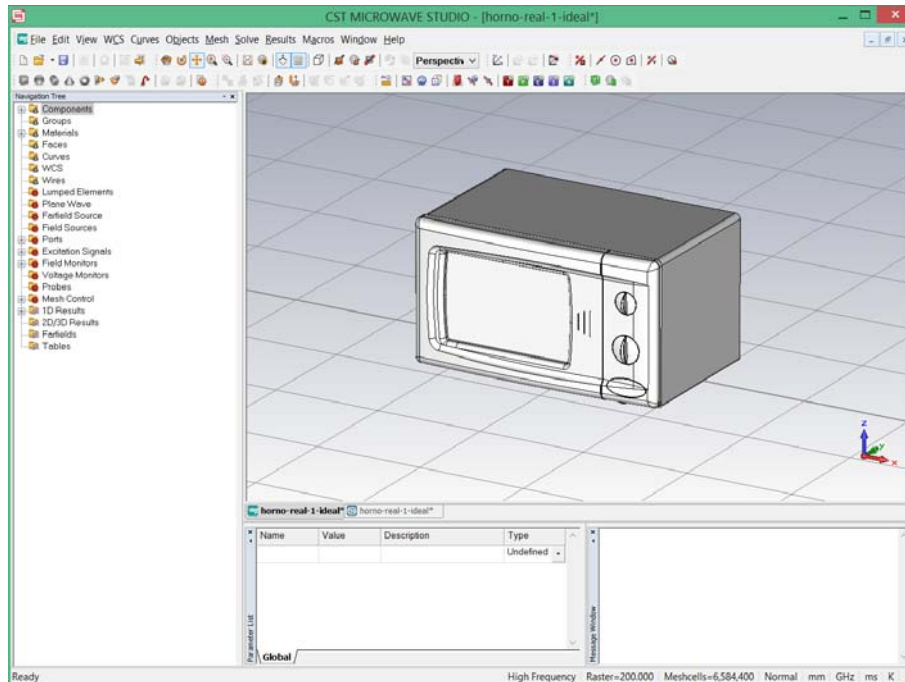
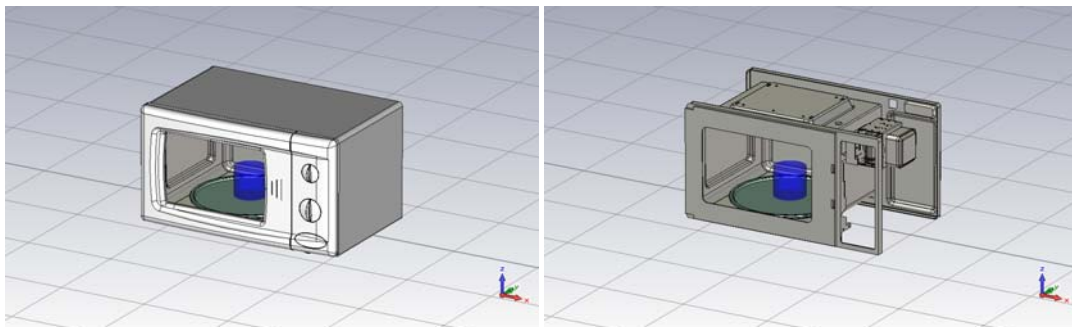


Figura 22. Importación de horno microondas realista en CST Microwave Studio.



Figuras 23 y 24. Vistas de la estructura interior de la cavidad y la carga de agua.

Del mismo modo que en el caso anterior, ha sido necesario introducir modificaciones en los materiales de las distintas partes de la estructura. En este caso se han definido algunos materiales más:

- Metal conductor perfecto para la estructura de la cavidad
- Cristal para el plato giratorio
- Agua para la carga de muestra
- Plástico para distintas partes de la carcasa

En las imágenes a continuación se muestran los resultados de la simulación. En la primera de ellas se representa la estructura alámbrica del microondas para que se pueda interpretar más fácilmente la orientación y dimensiones de los valores de campo obtenidos como resultado.

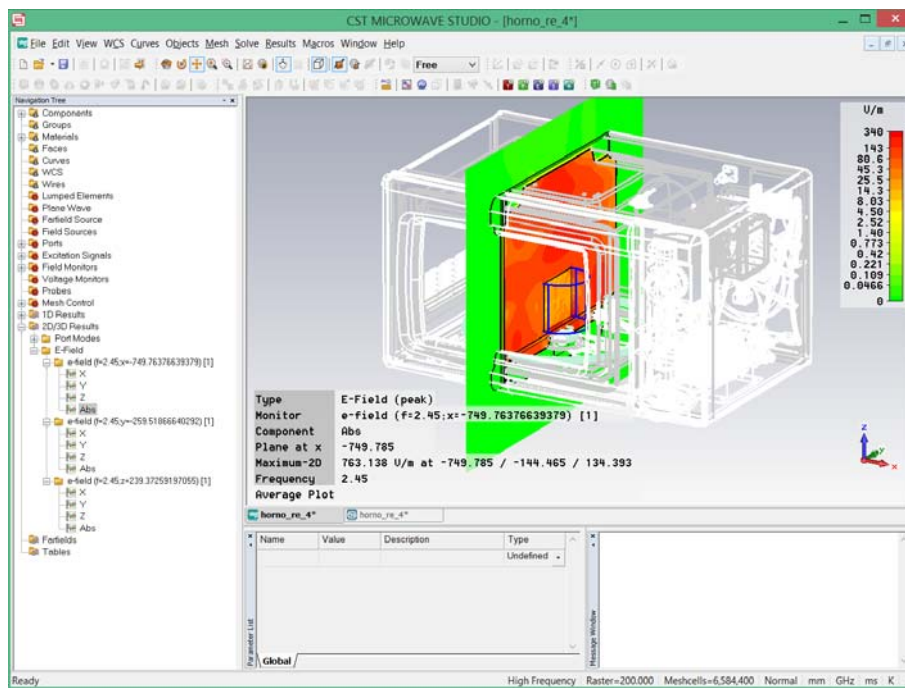
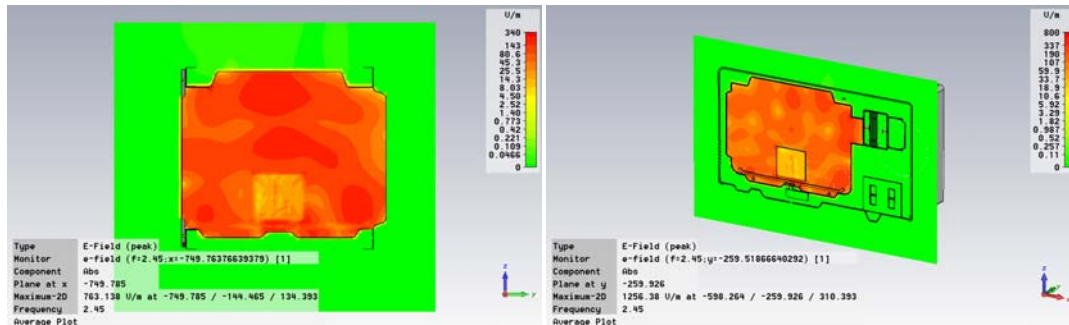


Figura 25. Resultado de la simulación en el plano Z-Y.



Figuras 26 y 27. Resultado de la simulación en los planos Z-Y y Z-X.

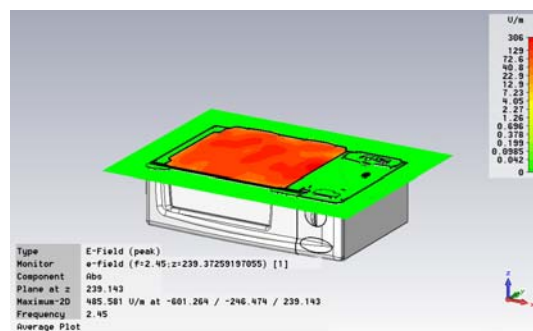


Figura 28. Resultado de la simulación en el plano X-Y.

De la observación de los resultados de la simulación anterior se desprende que no hay ningún escape de energía fuera de la cavidad. Esto ha ocurrido porque en el modelo CAD del diseño



ofrecido por el fabricante, la cavidad está herméticamente sellada y todas las juntas son perfectas, algo que no ocurre en la realidad. Salvo la puerta ¡!

Tras una observación física del aparato, se determina que debido a las propias limitaciones mecánicas de la estructura, existe una delgada brecha entre la puerta y el resto de la estructura, por la zona de las juntas. Por lo tanto, tratamos de llevar estas observaciones al modelo para realizar una nueva simulación más realista.

La separación introducida en este caso es de 5 mm, como puede observarse en la siguiente figura, en la que se muestra la vista de planta del diseño en la que se han aislado la cavidad resonante, el magnetrón y la parte metálica de la puerta:

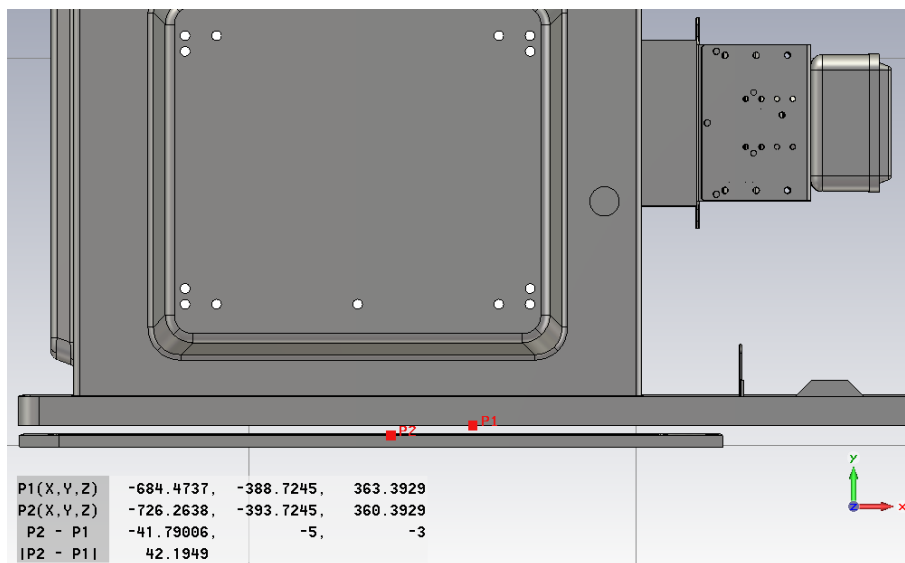


Figura 29. Vista de planta de la separación puerta-cavidad.

Una vez introducidos los cambios mencionados, se vuelven a realizar las simulaciones.

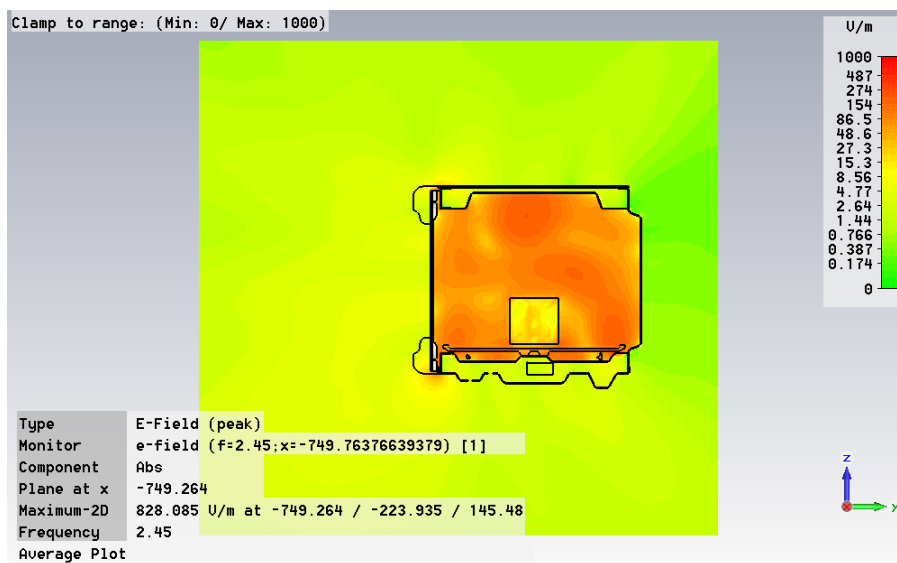
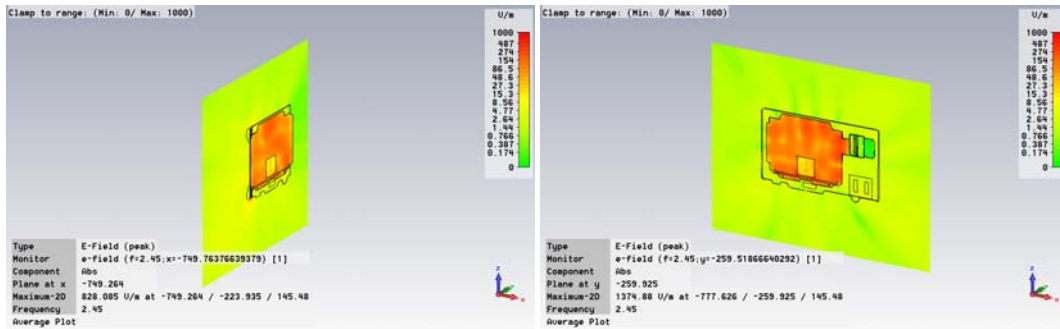


Figura 30. Resultado de la simulación en el plano Z-Y.



Figuras 31 y 32. Resultado de la simulación en los planos Z-Y y Z-X.

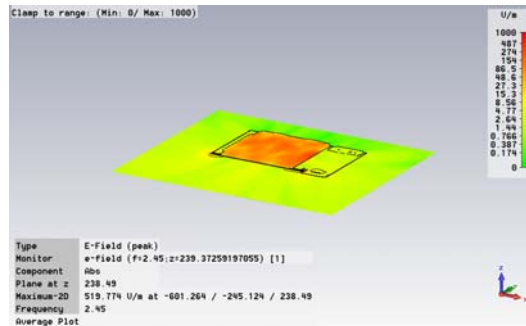
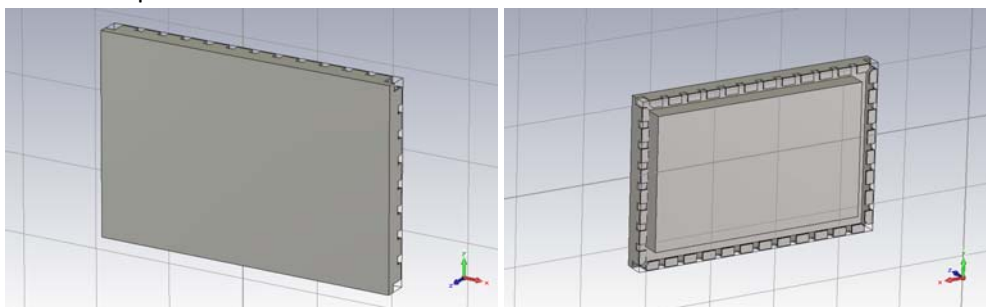


Figura 33. Resultado de la simulación en el plano X-Y.

En la observación de los resultados de la simulación se aprecia que en este caso sí que se produce el escape de energía fuera de la cavidad afectando al espacio alrededor del horno. Las escalas de los niveles de campo se han establecido todas entre los valores 0 y 1000 V/m de forma lineal. Estos no son los valores para un horno real, caso que se detallará más adelante, sino que se han establecido así a modo comparativo para esta parte del estudio.

Una vez más se realiza el diseño de una puerta que incluye un filtro de microondas para sustituirla por la puerta original y comprobar si esta es una opción viable para reducir las fugas y alcanzar el cumplimiento de la normativa.



Figuras 34 y 35. Vistas de la puerta con filtro importada en CST Microwave Studio.

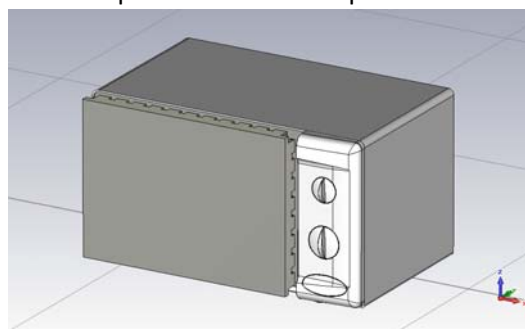


Figura 36. Vista de la colocación de la puerta con filtro en la estructura del horno.

También en este caso se deja una separación entre la puerta y la cavidad metálica de 5 mm para que los resultados sean comparables a los obtenidos con la puerta sin filtro.

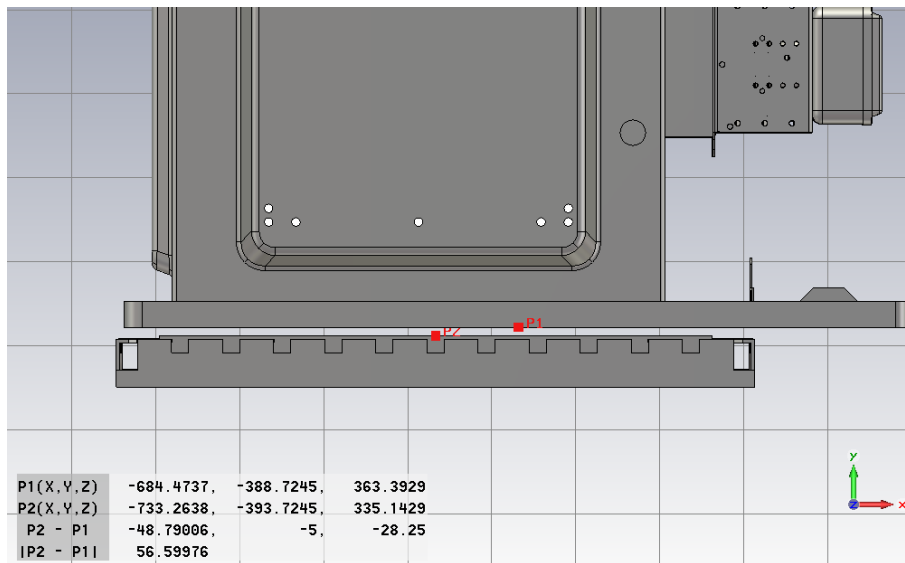


Figura 37. Vista de planta de la separación puerta- cavidad.

Tras ejecutar el solucionador en su análisis transitorio en el dominio del tiempo obtenemos los resultados que se muestran a continuación. En la primera imagen se muestra la estructura alámbrica del microondas para dar una visión más intuitiva de los resultados obtenidos:

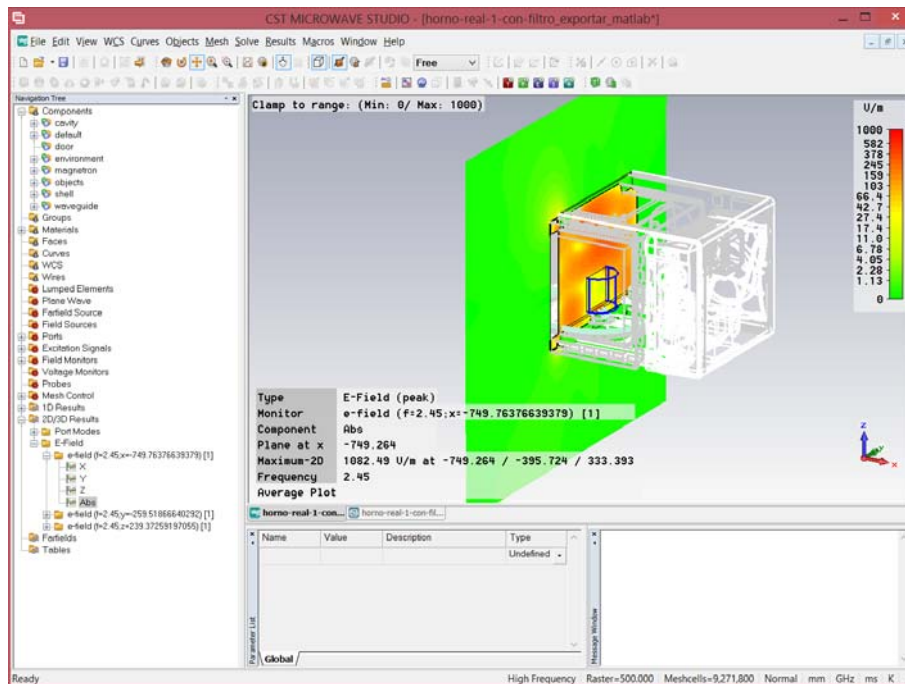


Figura 38. Resultado de la simulación con puerta con filtro en el plano Z-Y.

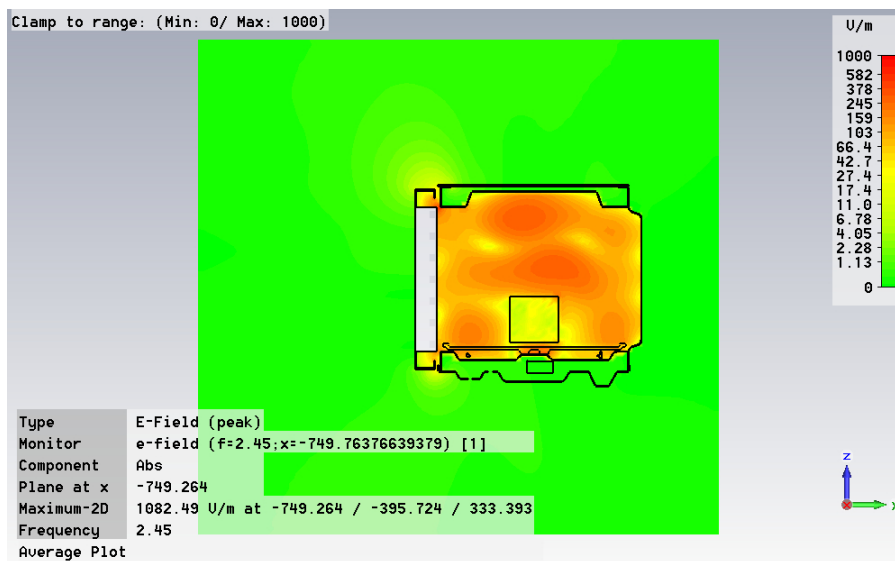
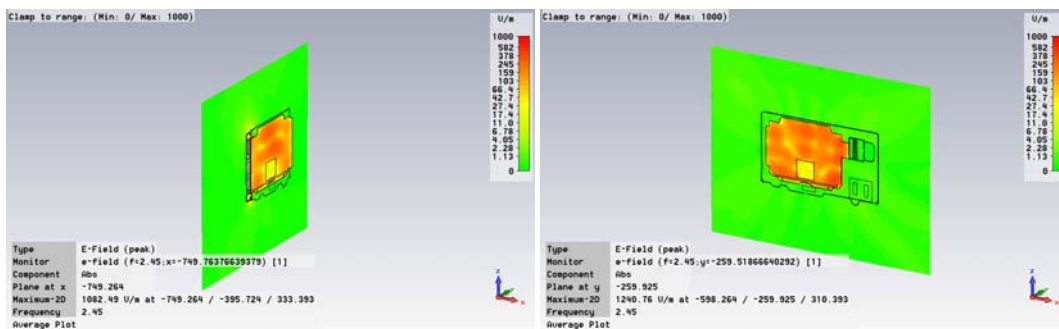


Figura 39. Resultado de la simulación en el plano Z-Y.



Figuras 40 y 41. Resultado de la simulación en los planos Z-Y y Z-X.

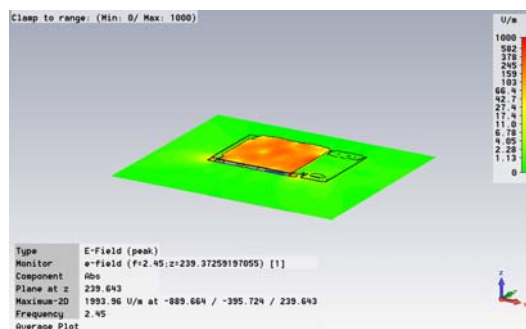
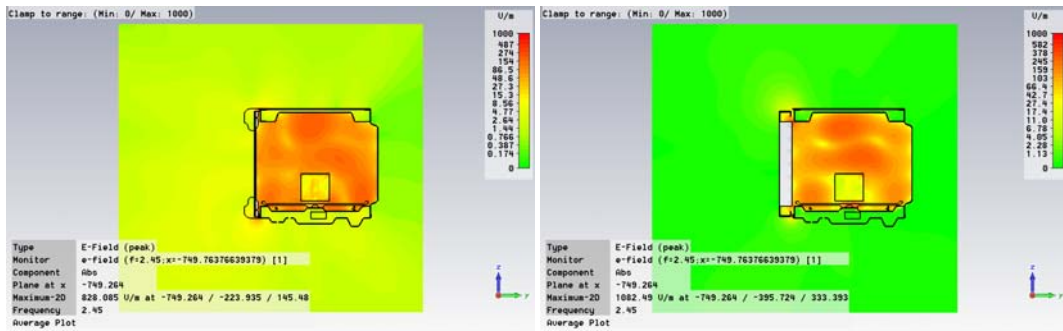


Figura 42. Resultado de la simulación en el plano X-Y.

Vista comparativa de los resultados:



Figuras 43 y 44. Vista comprativa de los resultados de la simulación con puerta sin filtro (izda.) y con filtro (dcha.)

A la vista comparativa de estos resultados observamos que se aprecia una disminución significativa en las fugas en el caso de la puerta con filtro.

No obstante, es aconsejable utilizar alguna otra herramienta para determinar con mayor precisión cuales son los valores de campo en el espacio alrededor de la cavidad, ya que de lo que se trata no es únicamente de disminuir las fugas, sino de comprobar si éstas están en condiciones de cumplir con la normativa vigente.

En el siguiente apartado utilizaremos Matlab para realizar estos cálculos.

## Análisis de resultados en Matlab

CST utiliza una potencia de 1 W para realizar los cálculos de las simulaciones, pero esta no es la potencia de una fuente de un horno microondas doméstico real, sino que en un horno como el analizado en el ejemplo, la potencia se encuentra entre 800 y 1200 W. Por lo tanto, será necesario operar con los resultados obtenidos a fin de obtener los niveles de campo más próximos a la realidad.

Para la realización de los cálculos mencionados utilizaremos Matlab, una potente herramienta de software matemático que ofrece infinitas opciones de cálculo. A su vez, utilizaremos las herramientas que proporciona Matlab para obtener una representación gráfica más conveniente al propósito del estudio.

### Exportación de CST a Matlab

CST ofrece varias opciones de exportación de los resultados de las simulaciones. Para la finalidad perseguida la opción más interesante es la exportación de los valores obtenidos a un fichero de texto, que es un formato que podremos manejar también en Matlab con facilidad.

Para esta tarea CST ofrece un intérprete de lenguaje “Visual Basic for Applications”, conocido por su acrónimo VBA. La tarea de exportación de los resultados es bastante repetitiva, sobre todo cuando realizamos varias simulaciones o cuando queremos exportar los valores obtenidos para diferentes monitores de campo. Gracias al intérprete de VBA podemos escribir un script que nos ayude a automatizar la mayor parte de estas operaciones.

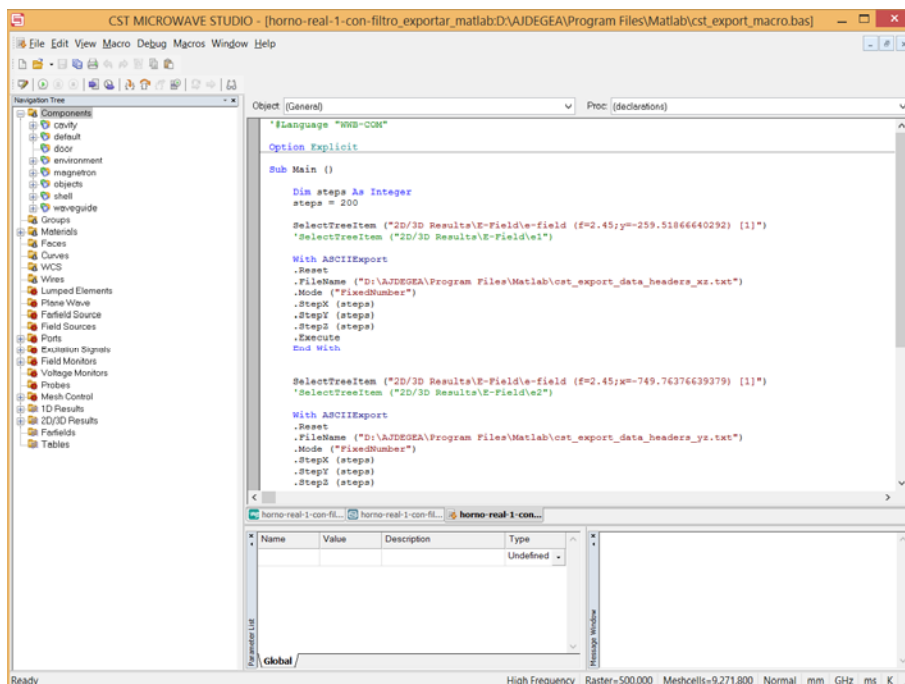


Figura 45. Intérprete de lenguaje VBA en CST Microwave Studio.

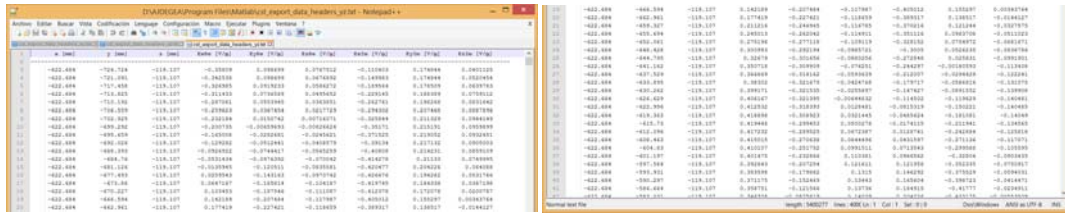


Figura 46. Formato de exportación de resultados de CST Microwave Studio.

### Tratamiento de los ficheros en Matlab

Una vez tenemos los ficheros ASCII con los resultados de la simulación, los importaremos desde Matlab y trabajaremos con ellos hasta obtener la salida deseada.

Los pasos generales a realizar serán los siguientes:

- Importación de los datos en Matlab
- Edición del formato creando las matrices apropiadas
- Realización del escalado de potencia
- Representación gráfica de los resultados

Para el escalado de potencia, se parte del valor de campo eléctrico E1 en voltios por metro (V/m) proporcionado por el simulador, al cual se le aplica el siguiente desarrollo matemático:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z}$$

$$P_2 = K \cdot P_1$$

$$E_2 = \sqrt{P_2 \cdot Z}$$

$$E_2 = \sqrt{K \cdot P_1 \cdot Z}$$

$$E_2 = \sqrt{K \cdot \frac{E_1^2}{Z} \cdot Z}$$

Y, finalmente:

$$E_2 = \sqrt{K \cdot E_1^2}$$

Donde P es la potencia en vatios (W), E es el campo eléctrico en voltios por metro (V/m), K es el factor de escala adimensional y Z es la impedancia del medio.

Para el caso analizado en el ejemplo de un horno microondas comercial tomaremos un valor de potencia de 1000 vatios, por lo que el factor K será igual a 1000.

## Representación gráfica de los resultados en Matlab

Horno real con puerta sin filtro

En la siguiente figura se representa el campo generado por la fuente del horno:

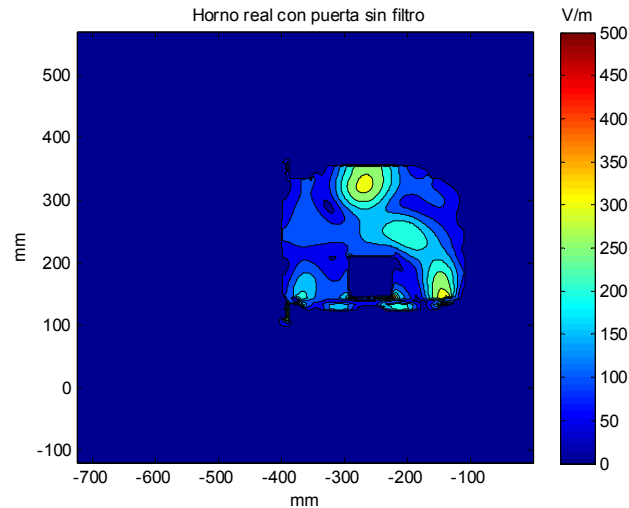


Figura 47. Vista lateral derecha del horno real con puerta sin filtro en escala lineal.

Los valores de la escala se dan en voltios por metro, pero dado que el campo se atenúa rápidamente al alejarse de la fuente y de la cavidad resonante será necesario utilizar una presentación alternativa que nos permita ver los niveles en el exterior con mayor precisión.

Se ha optado por representarlos utilizando una escala logarítmica, de manera que se dé un mayor peso a los valores más bajos

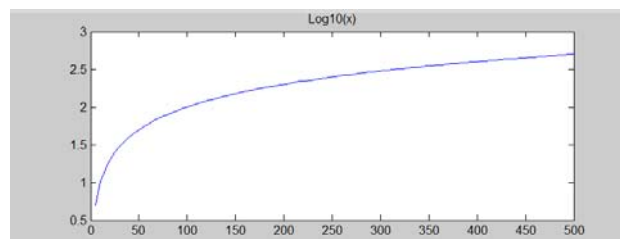


Figura 48. Representación gráfica de la función logaritmo decimal.

Tras aplicar la citada transformación, obtenemos los siguientes resultados:



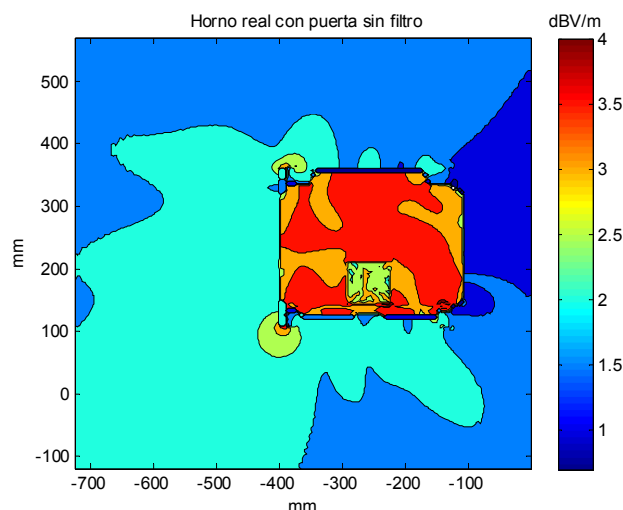


Figura 49. Vista lateral derecha del horno real con puerta sin filtro en escala logarítmica.

En este caso es más sencillo apreciar las diferentes zonas donde varían los niveles de campo.

Sin embargo, para poder obtener conclusiones, se deben comparar los niveles obtenidos tras el desarrollo realizado con los niveles límites estipulados por las normativas, con la finalidad de comprobar si efectivamente se están superando dichos valores o, por el contrario, se está infringiendo y es necesario aplicar las medidas correctoras.

La frecuencia de funcionamiento del horno microondas es de 2,45 GHz, para la cual la directiva 2013/35/UE establece un límite de 140 V/m, como puede apreciarse en el siguiente cuadro, el cual puede encontrarse en el texto original de la directiva y el Anexo III al final de este documento:

Cuadro B1

Niveles de actuación (NA) para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos comprendidas entre 100 kHz y 300 GHz

Intervalo de frecuencias	NA (E) de intensidad del campo eléctrico [ $Vm^{-1}$ ] (RMS)	NA (B) de densidad de flujo magnético [ $\mu T$ ] (RMS)	NA (S) de densidad de potencia (en $Wm^{-2}$ )
$100 \text{ kHz} \leq f < 1 \text{ MHz}$	$6,1 \times 10^2$	$2,0 \times 10^6/f$	—
$1 \leq f < 10 \text{ MHz}$	$6,1 \times 10^8/f$	$2,0 \times 10^6/f$	—
$10 \leq f < 400 \text{ MHz}$	61	0,2	—
$400 \text{ MHz} \leq f < 2 \text{ GHz}$	$3 \times 10^{-3} f^{1/2}$	$1,0 \times 10^{-5} f^{1/2}$	—
$2 \leq f < 6 \text{ GHz}$	$1,4 \times 10^2$	$4,5 \times 10^{-1}$	—
$6 \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	$1,4 \times 10^2$	$4,5 \times 10^{-1}$	50

En la siguiente imagen, que representa un corte de la vista lateral derecha del horno, se resalta en color rojo toda la zona del espacio que sobrepasa los 140 V/m estipulados por la normativa.

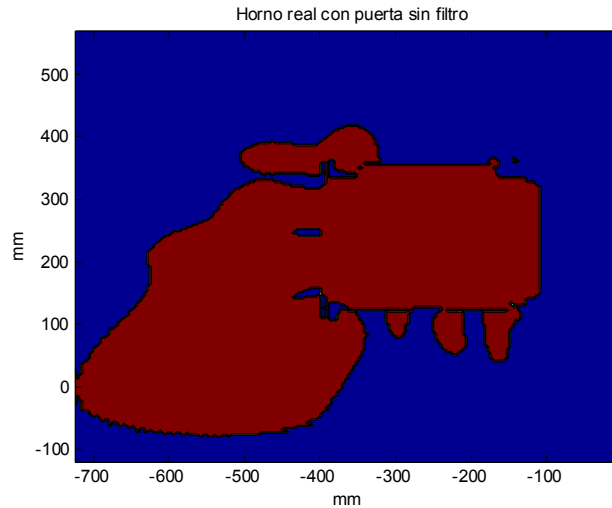
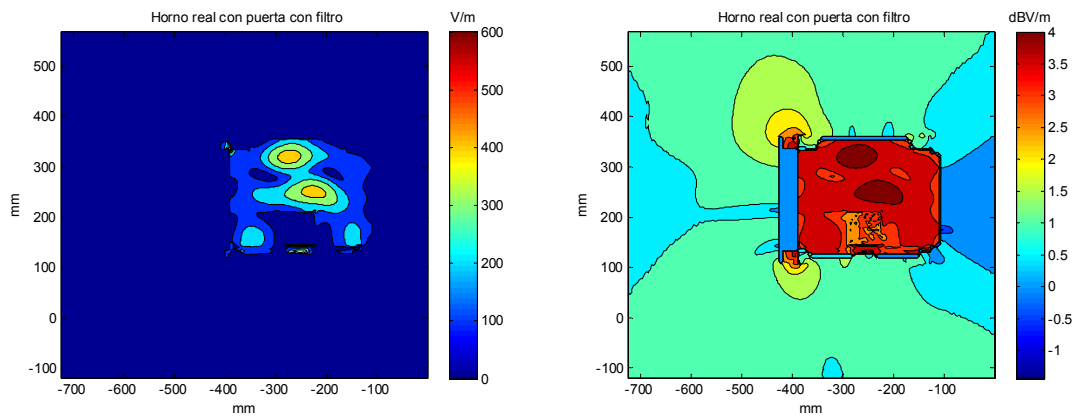


Figura 50. Vista lateral derecha del horno con representación de la zona donde se superan los niveles de actuación.

En este caso se aprecia que la zona que no cumple con los niveles límite se extiende 30 cm (desde los 400 a los 700 milímetros) por delante de la estructura exterior del horno, por lo que es necesario tomar medidas correctoras.

#### Horno real con puerta con filtro

A continuación se presentan los resultados de aplicar todo el procedimiento anterior a la simulación de la estructura a la que se adaptó la puerta que incluye el filtro.



Figuras 51 y 52. Horno real con puerta con filtro en escala lineal (izda.) y logarítmica (dcha.).

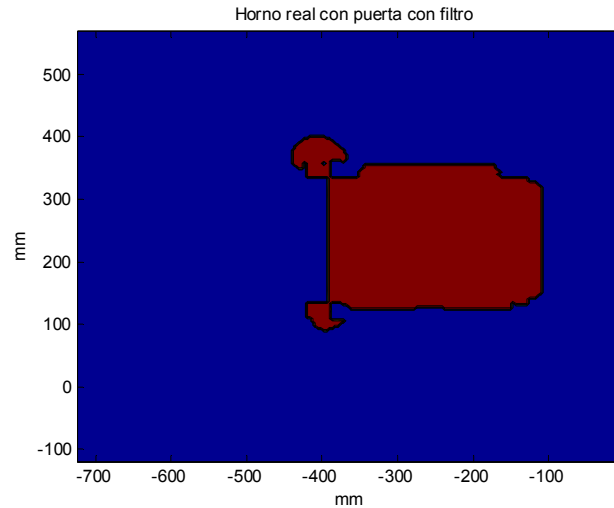
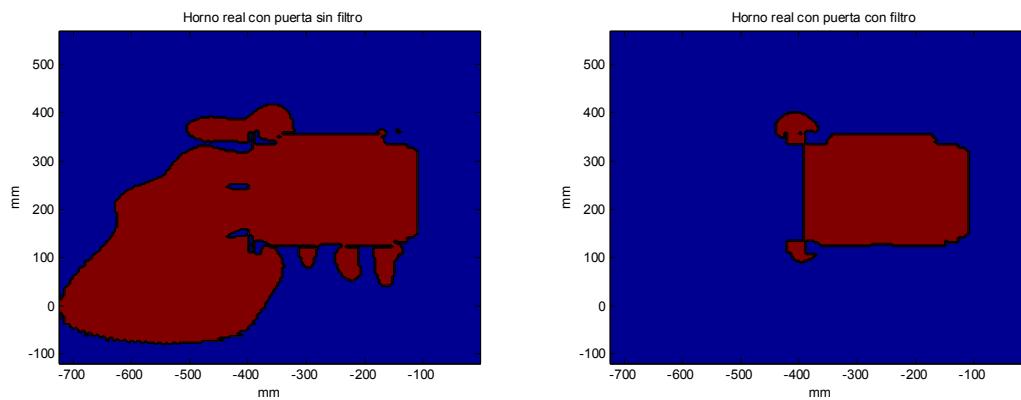


Figura 53. Vista lateral derecha del horno con representación de la zona donde se superan los niveles de actuación.

#### Comparación de los resultados



Figuras 54 y 55. Comparación de las zonas que superan los niveles de actuación en el horno con puerta sin filtro (izda.) y con filtro (dcha.)

En las dos ilustraciones superiores se puede observar la diferencia en la extensión de la zona que no cumple los niveles máximos estipulados entre el horno con la puerta sin filtro (izquierda) y con filtro (derecha).

A la vista de los resultados anteriores se puede determinar que la medida correctora propuesta puede ser llevada a la práctica, dado que según el estudio realizado, se puede concluir que es una medida viable.

## Radiador intencionado

En este apartado se realiza el análisis de un escenario con dispositivos radiantes intencionados, por lo que no es posible utilizar elementos que eviten las fugas de dichos artefactos, ya que su funcionalidad es precisamente la de radiar potencia, de manera que en este caso el estudio debe enfocarse desde una perspectiva diferente.

## Entorno laboral

El emplazamiento elegido para el análisis es un recinto de telecomunicaciones, muy común en entornos rurales principalmente, y que puede albergar gran cantidad de elementos radiantes de distintas tecnologías tanto instaladas sobre la propia caseta como en las torretas fijadas en sus inmediaciones.



Figura 56. Recinto de telecomunicaciones.

Los técnicos instaladores trabajan muy frecuentemente en estos recintos y torretas, realizando tareas de instalación, mantenimiento y configuración en de equipos y conexiones, teniendo también que trepar por las torretas mientras que los artefactos están en funcionamiento, de manera que exponen zonas muy sensibles como los ojos o el sistema auditivo a niveles de campo que, en principio, desconocemos si superan los límites establecidos para los trabajadores.

Para asegurar y controlar que los niveles de exposición de los trabajadores a campos electromagnéticos se encuentran dentro de los límites establecidos, se deben poner en marcha diferentes mecanismos de control por parte de las administraciones y de las propias empresas.

Entre los mecanismos que aseguren el control y el seguimiento exhaustivo de estas instalaciones debe estar:

- La realización de una inspección de la estación base por parte de los servicios de control e inspección de la Administración, especialmente orientado a comprobar que no se superan los límites de actuación y de exposición
- El establecimiento de la elaboración de planes de control e inspección por parte de los servicios técnicos de la Administración y la obligatoriedad de las compañías operadoras de remitir a la Administración un informe anual que conste que no se han superado los límites de exposición

#### Análisis de los niveles

Para la certificación laboral de emplazamientos de radiocomunicaciones (telefonía móvil, FM, TDT, LMDS, etc.) se debe seguir una rigurosa metodología estructurada en tres fases fundamentales, las cuales se ilustran con un ejemplo a continuación.

#### Cálculo del perímetro de seguridad

Para el cálculo de las zonas de seguridad se tienen en cuenta las características de los elementos radiantes así como los niveles de actuación y límites de exposición establecidos por la normativa.

Se debe calcular un volumen de protección alrededor de la zona de riesgo, que se realiza teniendo en cuenta el peor caso, es decir, teniendo en cuenta los niveles de campo máximos en el área y los de máxima potencia de los equipos radiantes, aunque no siempre estén configurados para trabajar a dicha potencia.

Los volúmenes de protección podrán tener forma de paralelepípedo, cilíndrica o la más conveniente en cada caso.

En el caso bajo análisis encontramos gran diversidad de tecnologías instaladas en la torreta de telecomunicaciones. Para determinar los volúmenes de seguridad para los trabajadores es necesario analizar elemento por elemento todos los dispositivos radiantes a fin de elaborar el mapa de zonas que superan los límites establecidos por la ley.



Figura 57. Torre de telecomunicaciones.

A modo de ejemplo se realizarán los cálculos para uno de los elementos más potentes instalados en la torreta, contemplando el peor caso, que será el de la máxima potencia que es capaz de radiar el dispositivo según las especificaciones del fabricante.

El elemento escogido es un enlace inalámbrico punto a punto compuesto por el transmisor Ubiquiti Rocket M5 de 5 GHz montado con un plato AIRMAX RD-5G30 5GHz RocketDish de 30dBi de ganancia isotrópica.



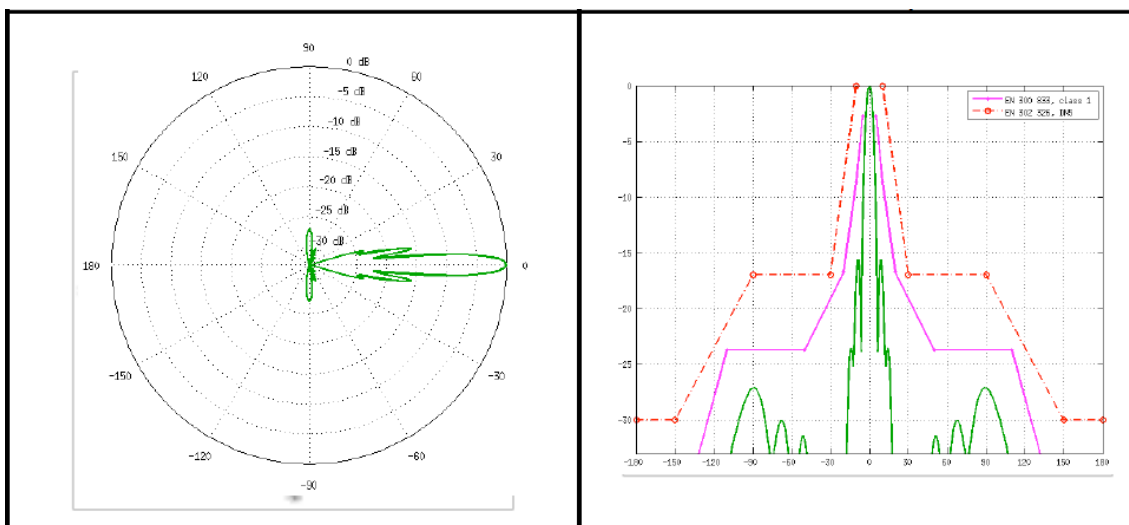
Figura 58. Sistema escogido para el análisis.



Figuras 59 y 60. Transmisor Ubiquiti Rocket M5 de 5 GHz y plato AIRMAX RD-5G30 5GHz.

Según las especificaciones del fabricante, el transmisor es capaz de transmitir con una potencia de hasta 27 dBm (500mW), y la antena montada sobre este transmisor tiene una ganancia isotrópica de 30dBi.

En este caso, y debido a la geometría de la antena, los cortes en los planos vertical y horizontal del diagrama de radiación son idénticos:



Figuras 61 y 62. Diagramas de radiación del plato AIRMAX RD-5G30 5GHz.

En primer lugar calculamos la PIRE de la antena, sumando las contribuciones de la serie de elementos conectados, es decir, la potencia del transmisor ( $P_{tx}$ ), las pérdidas del cable ( $L_{tx}$ ), y la ganancia isotrópica de la antena ( $G_{iso}$ ):

$$PIRE = P_{tx} - L_{tx} + G_{iso} = 27 - 1 + 30 = 56\text{dBm} \rightarrow 398,11 \text{ W}$$

Para la frecuencia del transmisor, el valor de  $E_{max}$  según la normativa es de 140 V/m, por lo que partimos de ese dato para calcular la densidad de potencia máxima  $S_{max}$  que contempla la Directiva:

$$W/m^2 = (V/m)^2 / 377$$

Por lo tanto,  $140 V/m : 377 = 52 W/m^2 = S_{max}$

La tipología de las antenas que se emplearán en la futura estación radioeléctrica aconseja la utilización como volumen de referencia de un cilindro cuyas dimensiones calculadas se definen desde la parte más externa de los elementos radiantes, como se muestra en la siguiente figura:

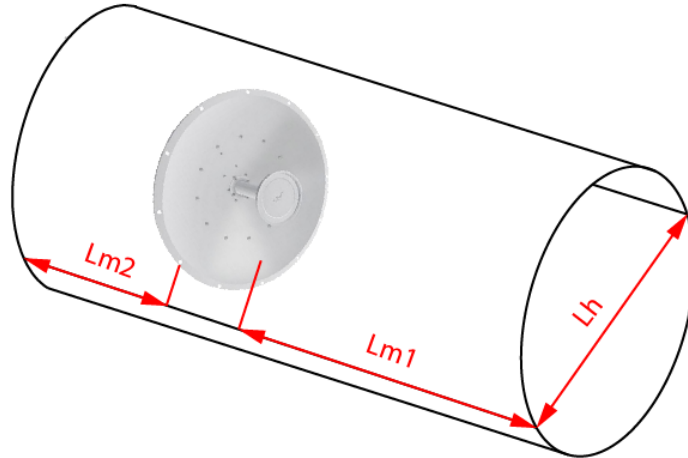


Figura 63. Volumen de referencia cilíndrico.

Todas las dimensiones del cilindro se calculan a partir del valor de la distancia de referencia,  $D_{max}$ :

$$D_{max} = \sqrt{\frac{M \cdot PIRE}{4 \cdot \pi \cdot S_{max}}}$$

Siendo:

- M es un factor de corrección que toma distintos valores en función del entorno:
  - $M = 1$  si se considera ausencia de reflexión.
  - $M = 2.56$  en condiciones típicas de reflexión.
  - $M = 4$  en el caso de reflexión total de un rayo.
- PIRE es la potencia isotrópica radiada equivalente en una dirección determinada, y se puede expresar como la potencia máxima de transmisión por la ganancia de la antena.

$$PIRE = P_{max} \cdot G(\theta, \phi)$$

- $S_{max}$  es la máxima densidad de potencia permitida para las frecuencias de trabajo.

Conocida  $D_{max}$ , la dimensión del paralelepípedo hacia la dirección de máxima radiación,  $L_{m1}$ , se obtiene simplemente haciendo:

$$L_{m1} = D_{max}$$

El resto de dimensiones se obtienen a partir de las siguientes relaciones:

$$L_{m2} = D_{max} \cdot \sqrt{G(\theta_A)} \cdot \cos(\theta_A)$$



$$L_{H1} = H_{ant} + 2 \cdot D_{max} \cdot \sqrt{G(\theta_{H1})} \cdot \text{sen}(\theta_{H1})$$

$$L_{H2} = H_{ant} + 2 \cdot D_{max} \cdot \sqrt{G(\theta_{H2})} \cdot \text{sen}(\theta_{H2})$$

$$L_h = \max\{L_{H1}, L_{H2}\}$$

Los ángulos  $\theta_A$ ,  $\theta_{H1}$  y  $\theta_{H2}$  son los ángulos en que la proyección sobre el eje del corte correspondiente del diagrama de radiación es máxima.

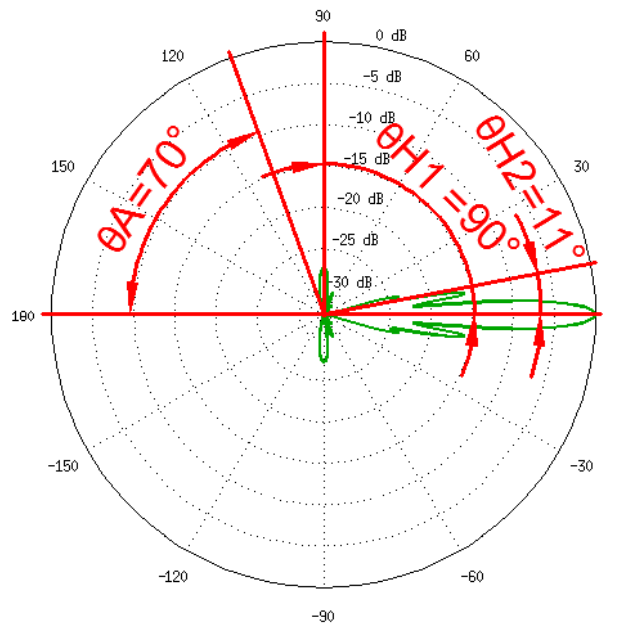


Figura 64. Representación sobre el diagrama de radiación de los ángulos  $\theta_A$ ,  $\theta_{H1}$  y  $\theta_{H2}$ .

A continuación se muestran las dimensiones del cilindro de seguridad para el dispositivo radiante analizado:

Lm1 (m)	1,2489
Lm2 (m)	0,0097
Lh (m)	0,2475

Y con ellas podemos delimitar sobre un plano o sobre el espacio el volumen que define la zona que supera los límites de actuación, como se indica en el siguiente apartado.

#### Aislamiento de la zona de riesgo

Una vez delimitadas las áreas donde se superan los límites de actuación o de exposición a campos electromagnéticos, se debe restringir el acceso o marcar debidamente dichas áreas tal y como queda recogido en la normativa de riesgos laborales, además de informar convenientemente a los trabajadores.

En casi todas las instalaciones se buscan zonas alejadas de los puntos de acceso frecuente para ubicar los equipos y materiales, de forma que el trabajador no tenga que cruzar constantemente las áreas que superan los umbrales definidos.

## Medición en las zonas próximas

Los recintos de telecomunicaciones habitualmente tienen gran cantidad de sistemas instalados, por lo que no siempre es viable ni práctico el cálculo de los volúmenes de seguridad para cada elemento radiante.

Además sería necesario sumar adecuadamente las componentes de todos los elementos que contribuyen a los niveles electromagnéticos en cada punto del espacio.

Por lo tanto, en estos casos, resulta más práctico realizar mediciones con equipamiento de medida de campos eléctricos y magnéticos.

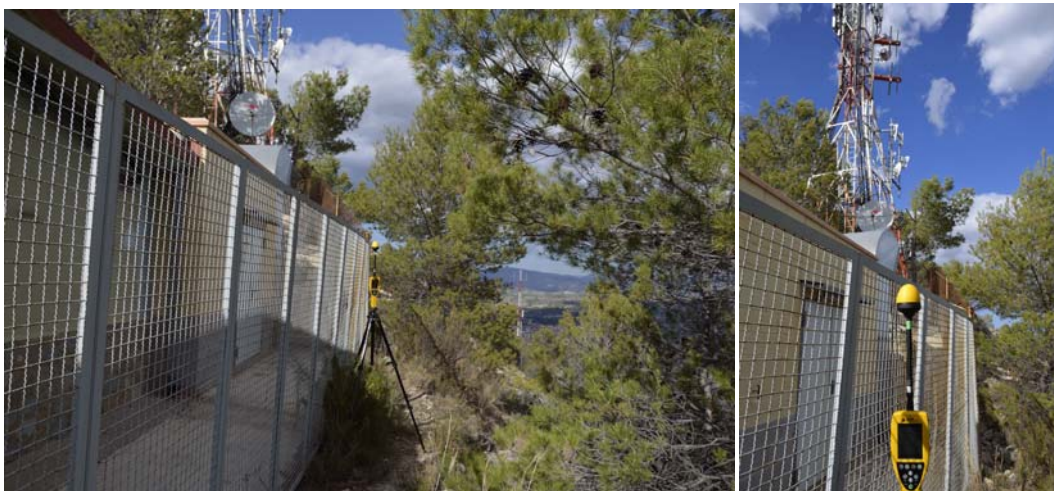
Para ello, en primer lugar, es necesario realizar un análisis rápido de las distintas tecnologías instaladas, con el fin de verificar que todas ellas emiten en un rango de frecuencias que esté dentro del ancho de banda que abarca la sonda que se utilizará para las mediciones.

En un primer estudio del ambiente radioeléctrico se puede utilizar una sonda con gran ancho de banda, utilizando como límite de actuación el más restrictivo de toda la banda de frecuencias a que es sensible la sonda utilizada.

Si se cumple con las especificaciones, no es necesario discriminar el análisis por frecuencias, pero en caso de que no se cumpla con el valor más restrictivo, será necesario realizar un estudio más detallado utilizando aparatos medidores que sean capaces de discriminar por frecuencias.

En este caso encontramos instalados dispositivos de telefonía móvil en banda GSM, DCS y UMTS, sistemas de FM, sistemas TDT, enlaces inalámbricos punto a punto de 5.8 GHz y antenas LMDS de 3,5 y 6 GHz, por lo que utilizaremos una sonda isotrópica con un ancho de banda que abarca desde los 100 KHz a los 6 GHz de frecuencia. .

Las mediciones deberán realizarse promediando el valor de campo en un intervalo de 6 minutos, tomando una muestra cada segundo.



Figuras 65 y 66. Ubicación del medidor de campo eléctrico durante las mediciones.

En caso de que se superen los límites establecidos, deberán tomarse medidas adecuadas a cada caso, como por ejemplo:

- Utilización de equipos radiantes más modernos con mejor eficiencia,
- Delimitación de las áreas mediante indicaciones en el suelo,
- Utilización de vestimenta de protección por parte del trabajador,
- Limitación del tiempo de exposición en la zona que supera los límites,
- Desconexión de los elementos radiantes durante el período en que el trabajador debe estar presente,
- Otras medidas que puedan resultar oportunas en cada caso.

Auditorías de verificaciones anuales

En el marco de los planes de inspección, se deben realizar auditorías de las certificaciones presentadas por las empresas, con el objetivo de examinar y verificar “in situ” la validez de la información aportada, así como su perdurabilidad a lo largo del tiempo.

## Adopción de buenas prácticas en materia de exposición laboral

Incluso en aquellos casos en los que se cumpla con los límites de actuación y de exposición en los entornos laborales, es siempre recomendable adoptar una serie de buenas prácticas que contribuyan a la mejor protección de los trabajadores en los entornos laborales.

Con carácter general, se podrá conseguir una reducción relevante del nivel de exposición considerando los siguientes aspectos:

- Selección y mantenimiento de equipos radiantes. Todo equipo irá provisto de un manual técnico y siempre que sea posible irá dotado de un dispositivo de retardo para su puesta en marcha (temporizador), o tener la precaución de conectarlo a distancia cuando el trabajador ya no se encuentra en sus inmediaciones. El mantenimiento se adecuará a lo previsto en el citado manual técnico provisto por el fabricante.
- Ubicación de equipos y orientación de elementos radiantes. Es preferible que los equipos se ubiquen en cabinas o casetas alejadas y que el elemento radiante se sitúe a una distancia mínima de seguridad, respecto a las áreas más próximas de trabajo más frecuente. La mejor disposición del conjunto del equipo es ubicar las consolas de mandos y los puestos de trabajo en una orientación opuesta a las direcciones de radiación siempre que sea posible.
- Formación e información sobre las condiciones de riesgo y las pautas de trabajo para minimizar el nivel de exposición.

## Criterios para la adquisición de equipos

Antes de adquirir un nuevo equipo, se debe verificar:

- Marcado CE y Declaración CE de Conformidad.
- Manual de instrucciones en español.

Considerando las indicaciones del manual, se valorarán:

- Las instrucciones de uso y mantenimiento técnico.
- Los aspectos sobre conservación y limpieza.
- Las contraindicaciones absolutas y relativas.
- Las interferencias electromagnéticas.

Es conveniente que los equipos de radiantes dispongan de un temporizador de puesta en marcha o algún sistema de puesta en marcha remoto.

## Disposición del área de trabajo

El área de trabajo deberá estar situada lejos de la zona donde se encuentren los elementos radiantes, o bien orientada en la dirección de menor radiación de los equipos. Con esta disposición se puede delimitar y señalar con más eficacia las zonas donde los niveles de campo son más altos.

Se debe evitar una concentración elevada de elementos radiantes en una ubicación muy próxima, siendo recomendable repartirlos en distintos emplazamientos o torretas de manera que los niveles de campo no puedan sumarse fuertemente.

Las consolas de mandos y los equipos controladores, racks de conexiones, etc., se ubicarán en zonas alejadas a ser posible de donde se ubican los elementos radiantes.

Se deben tener en cuenta las indicaciones de los fabricantes referentes a las posibles interferencias electromagnéticas que pueden producirse entre equipos de trabajo relativamente próximos. Estas indicaciones suelen estar relacionadas con:

- La dirección de la radiación
- Las distancias mínimas a observar entre diferentes equipos.

Se considerarán las indicaciones de los fabricantes de equipos en relación a la presencia física de personas evitando así exposiciones innecesarias.

Aumentar la distancia entre el foco emisor y el trabajador es una de las medidas preventivas básicas para reducir la exposición a los campos electromagnéticos.

Se recomienda que el material auxiliar, tales como las sillas, mesas, estanterías, etc., sea de materiales aislantes o no conductores para evitar su calentamiento o posible interacción con los campos y los trabajadores.

#### Mantenimiento de los equipos

Para garantizar un mantenimiento efectivo de los equipos es recomendable implementar un inventario y un libro de mantenimiento, en los que se consideren los aspectos que se indican a continuación;

- En el inventario de los equipos de trabajo debe constar la siguiente información:
- Nombre y clase de equipo.
- Marca, modelo, nº de serie y nº de inventario.
- Año de fabricación y de adquisición.
- Declaración CE de Conformidad y Marcado CE.
- Disponibilidad de manual de instrucciones en castellano.

En el libro de mantenimiento de los equipos debe figurar:

- Equipo de trabajo, marca, modelo, nº de serie y nº de inventario.
- Partes críticas y cuestiones a revisar.
- Fecha de la revisión, responsable de la misma y firma.
- Fecha de la próxima revisión.
- Firma del responsable del área correspondiente

## Formación sobre los riesgos de los campos electromagnéticos

Los profesionales deben recibir una información y formación sobre los riesgos derivados de su exposición a los campos electromagnéticos.

Incluirá el resultado de la evaluación de riesgos y en particular de:

- El concepto de los valores límite de exposición y de los valores de exposición que dan lugar a una acción utilizados en la evaluación y de los riesgos potenciales asociados.
- El resultado de los niveles de exposición medidos o calculados.
- La forma de detectar los efectos adversos para la salud debidos a la exposición laboral.
- Los criterios de vigilancia de la salud.
- Las prácticas de trabajo seguras para reducir la exposición.

Señalización e información de seguridad y salud

La señalización e información en la zona de trabajo irá destinada especialmente a personas sensibles, tales como profesionales en período de gestación, portadores de materiales de osteosíntesis metálicos o de dispositivos médicos electrónicos.

Señalizar el acceso a áreas con campos más elevados.

Reforzar el nivel de información mediante carteles indicativos sobre la existencia de determinados riesgos, prohibiciones u obligaciones.

## Conclusiones

El principal objetivo de los límites de exposición a campos electromagnéticos establecidos en las recomendaciones y guías de instituciones como la ICNIRP y en las diferentes normativas que se han ido adoptando a lo largo del tiempo es el de proteger a las personas de los efectos adversos de la salud conocidos, tanto los directos como los indirectos, de la exposición a dichos campos.

Dichos límites están basados en los efectos a corto plazo, efectos inmediatos en la salud tales como estimulación de los músculos y nervios periféricos, calentamiento de los tejidos tisulares procedente de la absorción de energía por exposición a campos electromagnéticos así como descargas y quemaduras causadas por el contacto con objetos conductores. No existen hasta la fecha evidencias científicas que permitan establecer una relación causa-efecto con ningún otro tipo de influencia sobre la salud de los seres humanos.

Por tanto, las restricciones establecidas tanto en las guías de buenas prácticas como en las normativas están basadas en los datos científicos recogidos hasta la fecha de su publicación y teniendo en cuenta el grado de conocimiento científico actual, proporcionando un adecuado nivel de protección a la exposición de campos electromagnéticos de 0 a 300 GHz.

Las diferentes recomendaciones y directivas que se han venido publicando y actualizando en las últimas décadas han derivado en la actual aprobación de la Directiva 2013/35/UE, que debe ser adoptada por los Estados comunitarios y puesta en vigor a más tardar el 1 de julio de 2016.

Diferentes organizaciones, instituciones y comisiones están trabajando en el desarrollo de manuales que definan procedimientos para la estimación y medición de los niveles de campo de forma acorde a los requerimientos de la normativa, pero en la actualidad son todavía documentos de trabajo que no describen un método definitivo.

En este estudio se ha propuesto un procedimiento que es una alternativa práctica para la medición y/o estimación de los niveles de campo en entornos laborales orientado a la elaboración de los correspondientes informes de certificación, ofreciendo una metodología de base científica válida y mostrando las herramientas necesarias para completar los estudios pertinentes mencionados.

A la vista de los resultados preliminares obtenidos, en los cuales se han analizado geometrías sencillas de maquinarias conocidas como el horno microondas o una antena de plato punto a punto, se prevé que en entornos laborales reales con distribuciones y maquinarias más específicas, el desarrollo del estudio y análisis de los resultados aumentará en complejidad, haciéndose necesario combinar las simulaciones por software con mediciones in situ, y siendo necesario un elevado nivel de conocimientos para la debida interpretación de los resultados.

# ANEXO I

## MAGNITUDES FÍSICAS RELATIVAS A LA EXPOSICIÓN A CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS

Para describir la exposición a campos electromagnéticos se utilizan las magnitudes físicas siguientes:

Intensidad de campo eléctrico (E): magnitud vectorial que corresponde a la fuerza ejercida sobre una partícula cargada independientemente de su movimiento en el espacio. Se expresa en voltios por metro ( $Vm^{-1}$ ). Es preciso distinguir entre el campo eléctrico ambiental y el campo eléctrico presente en el cuerpo (*in situ*) como resultado de la exposición al campo eléctrico ambiental.

Corriente en las extremidades ( $I_L$ ): corriente en las extremidades de una persona expuesta a campos electromagnéticos dentro del intervalo de frecuencias comprendido entre 10 MHz y 110 MHz como resultado del contacto con un objeto en un campo electromagnético, o el flujo de las corrientes capacitivas inducidas en un cuerpo expuesto. Se expresa en amperios (A).

Corriente de contacto ( $I_C$ ): corriente que aparece cuando una persona entra en contacto con un objeto en un campo electromagnético. Se expresa en amperios (A). Se produce una corriente de contacto en estado estacionario cuando una persona está en contacto continuo con un objeto en un campo electromagnético. En el proceso del establecimiento de dicho contacto, puede producirse una descarga de chispas con corrientes transitorias asociadas.

Carga eléctrica (Q): magnitud adecuada utilizada para la descarga de chispa; se expresa en culombios (C).

Intensidad de campo magnético (H): magnitud vectorial que, junto con la densidad de flujo magnético, determina un campo magnético en cualquier punto del espacio. Se expresa en amperios por metro ( $Am^{-1}$ ).

Densidad de flujo magnético o inducción magnética (B): magnitud vectorial definida en términos de fuerza ejercida sobre cargas en movimiento que se expresa en teslas (T). En el espacio libre y en la materia biológica, la densidad de flujo magnético y la intensidad de campo magnético se pueden utilizar indistintamente según la equivalencia intensidad de campo magnético  $H = 1 Am^{-1}$  igual a densidad de flujo magnético  $B = 4\pi \cdot 10^{-7} T$  (alrededor de 1,25 microteslas).

Densidad de potencia (S) es una magnitud adecuada que se utiliza para frecuencias muy altas, cuando la profundidad de penetración en el cuerpo es baja. Es el cociente de la potencia radiante que incide perpendicular a una superficie, dividida por el área de esta superficie. Se expresa en vatios por metro cuadrado ( $Wm^{-2}$ ).

Absorción específica de energía (SA) es una energía absorbida por unidad de masa de tejido biológico; se expresa en julios por kilogramo ( $Jkg^{-1}$ ). En la presente Directiva se utiliza para establecer límites para los efectos de la radiación de microondas pulsátil.

Tasa de absorción específica de energía (SAR) sobre la totalidad del cuerpo o sobre una parte de este, es la tasa de energía que es absorbida por unidad de masa de tejido corporal. Se expresa en vatios por kilogramo ( $Wkg^{-1}$ ). El SAR de cuerpo entero es una medida ampliamente aceptada para relacionar los efectos térmicos adversos con la exposición a las radiofrecuencias. Junto al SAR medio de cuerpo entero, los valores SAR locales son necesarios para evaluar y limitar una acumulación excesiva de energía en pequeñas partes del cuerpo como consecuencia de unas condiciones especiales de exposición. Como ejemplo de esas condiciones pueden citarse: la exposición de una persona a radiofrecuencias en valores inferiores de MHz (por ejemplo, de calentadores dieléctricos), o de personas expuestas al campo cercano de una antena.

De entre estas magnitudes, pueden medirse directamente la densidad de flujo magnético (B), la corriente de contacto ( $I_C$ ), la corriente en las extremidades ( $I_L$ ), la intensidad de campo eléctrico (E), la intensidad de campo magnético (H) y la densidad de potencia (S).



## ANEXO II

### EFFECTOS NO TÉRMICOS

#### VALORES LÍMITE DE EXPOSICIÓN Y NIVELES DE ACTUACIÓN EN EL INTERVALO DE FRECUENCIAS ENTRE 0 Hz Y 10 MHz

##### A. VALORES LÍMITE DE EXPOSICIÓN

Los valores límite de exposición inferiores a 1 Hz (cuadro A1) son límites para un campo magnético estático que no resulta afectado por el tejido corporal.

Los valores límite de exposición para frecuencias comprendidas entre 1 Hz y 10 MHz (cuadro A2) son límites para los campos eléctricos inducidos en el cuerpo a partir de la exposición a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo.

Valores límite de exposición de densidad de flujo magnético externo de 0 a 1 Hz

Los valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales son los valores límite de exposición para condiciones de trabajo normales (cuadro A1); están relacionados con los vértigos y otros efectos fisiológicos relacionados con alteraciones del órgano humano del equilibrio resultantes principalmente del desplazamiento dentro de un campo magnético estático.

Los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud en condiciones de trabajo controladas (cuadro A1) son aplicables temporalmente durante un turno de trabajo cuando así lo justifique la práctica o el proceso, siempre que se hayan adoptado medidas preventivas, como el control de los movimientos y la información a los trabajadores.

Cuadro A1

#### Valores límite de exposición (VLE) de densidad de flujo magnético externo ( $B_0$ ) de 0 a 1 Hz

	VLE relacionados con efectos sensoriales
Condiciones de trabajo normales	2 T
Exposición localizada en las extremidades	8 T
	VLE relacionados con efectos para la salud
Condiciones de trabajo controladas	8 T

Valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud para una intensidad de campo eléctrico interno comprendida entre 1 Hz y 10 MHz

Los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud (cuadro A2) se relacionan con la estimulación eléctrica de todos los tejidos del sistema nervioso central y periférico del cuerpo, incluida la cabeza.

Cuadro A2

#### Valores límite de exposición (VLE) relacionados con efectos para la salud para una intensidad de campo eléctrico interno comprendida entre 1 Hz y 10 MHz

Gama de frecuencias	VLE relacionados con efectos para la salud
$1 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$1,1 \text{ Vm}^{-1}$ (pico)
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$3,8 \times 10^{-4} f \text{ Vm}^{-1}$ (pico)

Nota A2-1: «f» es la frecuencia expresada en hercios (Hz).

Nota A2-2: Los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud para un campo eléctrico interno son valores espaciales de pico en el cuerpo entero de la persona expuesta.

Nota A2-3: Los valores límite de exposición son valores de pico en el tiempo, que son iguales a los valores cuadráticos medios (RMS) multiplicados por la raíz cuadrada de 2 para los campos sinusoidales. En el caso de los campos no sinusoidales, la evaluación de la exposición efectuada de conformidad con el artículo 4 debe basarse en el método de la ponderación de picos (filtrado en el dominio de tiempo) explicado en las guías prácticas a que se hace referencia en el artículo 14; no obstante pueden aplicarse otros procedimientos de evaluación de la exposición científicamente probados y validados, siempre que den resultados aproximadamente equivalentes y equiparables.

Valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales para una intensidad de campo eléctrico interno comprendida entre 1 Hz y 400 Hz

Los valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales (cuadro A3) se relacionan con los efectos de un campo eléctrico sobre el sistema nervioso central en la cabeza, esto es, fosfenos retinianos y cambios transitorios de poca importancia en algunas funciones cerebrales.

Cuadro A3

**Valores límite de exposición (VLE) relacionados con efectos sensoriales para una intensidad de campo eléctrico interno comprendida entre 1 Hz y 400 Hz**

Intervalo de frecuencias	VLE relacionados con efectos sensoriales
$1 \text{ Hz} \leq f < 10 \text{ Hz}$	$0,7/f \text{ Vm}^{-1}$ (pico)
$10 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$0,07 \text{ Vm}^{-1}$ (pico)
$25 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$	$0,0028 f \text{ Vm}^{-1}$ (pico)

Nota A3-1: «f» es la frecuencia expresada en hercios (Hz).

Nota A3-2: Los valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales para un campo eléctrico interno son valores espaciales máximos en la cabeza de la persona expuesta.

Nota A3-3: Los valores límite de exposición son valores de pico en el tiempo, que son iguales a los valores cuadráticos medios (RMS) multiplicados por la raíz cuadrada de 2 para los campos sinusoidales. En el caso de campos no sinusoidales, la evaluación de la exposición realizada de conformidad con el artículo 4 se basará en el método de la ponderación de picos (filtrado en el dominio de tiempo) explicado en las guías prácticas a que se hace referencia en el artículo 14; no obstante, pueden aplicarse otros procedimientos de evaluación de la exposición científicamente probados y validados, siempre que den resultados aproximadamente equivalentes y comparables.

## B. NIVELES DE ACTUACIÓN

Las siguientes magnitudes y valores físicos se utilizan para definir los niveles de actuación (NA), cuyos valores se establecen de tal forma que se garantice, mediante una evaluación simplificada, el respeto de los valores límite de exposición pertinentes o valores a partir de los que deben adoptarse las medidas de protección o de prevención pertinentes precisadas en el artículo 5:

- NA (E) inferiores y NA (E) superiores para una intensidad de campo eléctrico E de campos eléctricos variables en el tiempo, como se especifica en el cuadro B1,
- NA (B) inferiores y NA (B) superiores de densidad de flujo magnético B de campos magnéticos variables en el tiempo, como se especifica en el cuadro B2,
- NA (I<sub>C</sub>) para la corriente de contacto, como se especifica en el cuadro B3,
- NA (B<sub>0</sub>) de densidad de flujo magnético de campos magnéticos estáticos, como se especifica en el cuadro B4.

Los niveles de actuación corresponden a valores de campos eléctricos y magnéticos calculados o medidos en el lugar

de trabajo en ausencia del trabajador.

#### Niveles de actuación para la exposición a campos eléctricos

Los niveles de actuación inferiores (cuadro B1) para los campos eléctricos externos se basan en el mantenimiento del campo eléctrico interno por debajo de los valores límite de exposición (cuadros A2 y A3) y en la limitación de las descargas de chispa en el entorno de trabajo.

Por debajo de los niveles de actuación superiores, el campo eléctrico interno no supera los valores límite de exposición (cuadros A2 y A3) y se evitan las descargas de chispa molestas, siempre que se adopten las medidas de protección previstas en el artículo 5, apartado 6.

#### Cuadro B1

##### Niveles de actuación (NA) para exposiciones a campos eléctricos comprendidos entre 1 Hz y 10 MHz

Intervalo de frecuencias	NA (E) inferior de intensidad del campo eléctrico [Vm-1] (RMS)	NA (E) superior de intensidad del campo eléctrico [Vm-1] (RMS)
$1 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$
$25 \leq f < 50 \text{ Hz}$	$5,0 \times 10^5/f$	$2,0 \times 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1,64 \text{ kHz}$	$5,0 \times 10^5/f$	$1,0 \times 10^6/f$
Intervalo de frecuencias	NA (E) inferior de intensidad del campo eléctrico [Vm-1] (RMS)	NA (E) superior de intensidad del campo eléctrico [Vm-1] (RMS)
$1,64 \leq f < 3 \text{ kHz}$	$5,0 \times 10^5/f$	$6,1 \times 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1,7 \times 10^2$	$6,1 \times 10^2$

Nota B1-1: «f» es la frecuencia expresada en hercios (Hz).

Nota B1-2: Los NA (E) inferiores y NA (E) superiores son los valores cuadráticos medios (RMS) de la intensidad del campo eléctrico que son iguales a los valores de pico divididos por la raíz cuadrada de 2 para un campo sinusoidal. En caso de campos no sinusoidales, la evaluación de la exposición realizada de conformidad con el artículo 4 se basará en el método de la ponderación de picos (filtrado en el dominio de tiempo) explicado en las guías prácticas a que se hace referencia en el artículo 14; no obstante, pueden aplicarse otros procedimientos de evaluación de la exposición científicamente probados y validados, siempre que den resultados aproximadamente equivalentes y comparables.

Nota B1-3: Los niveles de actuación representan los valores máximos calculados o medidos en la posición del cuerpo del trabajador. Esto entraña una evaluación moderada de la exposición y un cumplimiento automático de los valores límite de exposición en todas las condiciones de exposición no uniformes. Con el fin de simplificar la evaluación del cumplimiento de los valores límite de exposición, llevada a cabo de conformidad con el artículo 4, en condiciones no uniformes particulares, se establecerán criterios para la obtención del promedio espacial de los campos medidos basados en una dosimetría bien establecida en las guías prácticas mencionadas en el artículo 14. En el caso de una fuente muy localizada situada a una distancia de algunos centímetros del cuerpo, el campo eléctrico inducido se determinará dosimétricamente caso por caso.

## Niveles de actuación para exposiciones a campos magnéticos

Los niveles de actuación inferiores (cuadro B2) son para frecuencias por debajo de los 400 Hz derivadas de los valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales (véase cuadro A3) y niveles de actuación para frecuencias por encima de los 400 Hz, derivados de los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud para los campos eléctricos internos (cuadro A2).

Los niveles de actuación superiores (cuadro B2) proceden de los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud del campo eléctrico interno relacionado con la estimulación eléctrica de los tejidos del sistema nervioso periférico y autónomo en la cabeza y el tronco (cuadro A2). El respeto de los niveles de actuación elevados garantiza que no se superen los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud, pero no excluye los efectos relacionados con los fosfenos retinianos y cambios transitorios de poca importancia en la actividad cerebral si la exposición de la cabeza supera los niveles de actuación inferiores para exposiciones a frecuencias inferiores o iguales a 400 Hz. En ese caso, será de aplicación el artículo 5, apartado 6.

Los niveles de actuación para la exposición de las extremidades se derivan de los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud para los campos eléctricos internos relacionados con la estimulación eléctrica de los tejidos en las extremidades, teniendo en cuenta que el campo magnético se acopla más débilmente a las extremidades que al cuerpo entero.

Cuadro B2

### Niveles de actuación (NA) para exposiciones a campos magnéticos en el intervalo entre 1 Hz y 10 MHz

Intervalo de frecuencias	NA (B) inferior para densidad de flujo magnético [ $\mu$ T] (RMS)	NA (B) superior para densidad de flujo magnético [ $\mu$ T] (RMS)	NA para densidad de flujo magnético para una exposición de las extremidades a un campo magnético localizado [ $\mu$ T] (RMS)
$1 \leq f < 8$ Hz	$2,0 \times 10^5/f^2$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$8 \leq f < 25$ Hz	$2,5 \times 10^4/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$25 \leq f < 300$ Hz	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3,0 \times 10^5/f$	$3,0 \times 10^5/f$	$9,0 \times 10^5/f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

Nota B2-1: «f» es la frecuencia expresada en hercios (Hz).

Nota B2-2: Los niveles de actuación inferiores y los niveles de actuación superiores son los valores cuadráticos medios (RMS) que son iguales a los valores de pico divididos por la raíz cuadrada de 2 para un campo sinusoidal. En el caso de campos no sinusoidales, la evaluación de la exposición realizada de conformidad con el artículo 4 se basará en el método de la ponderación de picos (filtrado en el dominio de tiempo) explicado en las guías prácticas a que se hace referencia en el artículo 14; no obstante, pueden aplicarse otros procedimientos de evaluación de la exposición científicamente probados y validados, siempre que den resultados aproximadamente equivalentes y equiparables.

Nota B2-3: Los niveles de actuación para la exposición a los campos magnéticos representan valores máximos en la posición del cuerpo del trabajador. Esto entraña una evaluación moderada de la exposición y un cumplimiento automático de los valores límite de exposición en todas las condiciones de exposición no uniformes. Con el fin de simplificar la evaluación del cumplimiento de los valores límite de exposición, llevada a cabo de conformidad con el artículo 4, en condiciones no uniformes particulares, se establecerán criterios para la obtención del promedio espacial de los campos medidos basados en una dosimetría bien establecida en las guías prácticas mencionadas en el artículo 14. En el caso de una fuente muy localizada situada a una distancia de algunos centímetros del cuerpo, el campo eléctrico inducido se determinará dosimétricamente caso por caso.

Cuadro B3

**Niveles de actuación (NA) para la corriente de contacto  $I_C$**

Frecuencia	NA ( $I_C$ ) corrientes de contacto [mA] en estado estacionario (RMS)
Hasta 2,5 kHz	1,0
$2,5 \leq f < 100$ kHz	0,4/f
$100 \text{ kHz} \leq f \leq 10\,000$ MHz	40

Nota B3-1: «f» es la frecuencia expresada en kHz.

Niveles de actuación para la densidad de flujo magnético de campos magnéticos estáticos

Cuadro B4

**Niveles de actuación (NA) para la densidad de flujo magnético de campos magnéticos estáticos**

Riesgos	NA ( $B_0$ )
Interferencias con dispositivos médicos activos implanta-	0,5 mT
Riesgo de atracción y proyección en campos periféricos de fuentes de campos intensos (> 100 mT)	3 mT

# ANEXO III

## EFFECTOS TÉRMICOS

### VALORES LÍMITE DE EXPOSICIÓN Y NIVELES DE ACTUACIÓN EN EL INTERVALO DE FRECUENCIAS ENTRE 100 kHz Y 300 GHz

#### A. VALORES LÍMITE DE EXPOSICIÓN

Los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud para las frecuencias comprendidas entre 100 kHz y 6 GHz (cuadro A1) son los valores límite de energía y de potencia absorbida por unidad de masa de tejido corporal generadas por la exposición a campos eléctricos y magnéticos.

Los valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales para las frecuencias comprendidas entre 0,3 y 6 GHz (cuadro A2) son los valores límite de energía absorbida en una pequeña masa de tejido en la cabeza procedente de la exposición a campos electromagnéticos.

Los valores límite de exposición relacionados con efectos para la salud para las frecuencias superiores a 6 GHz (cuadro A3) son los valores límite de densidad de potencia de una onda electromagnética incidente sobre la superficie del cuerpo.

*Cuadro A1*

#### Valores límite de exposición (VLE) relacionados con efectos para la salud para exposiciones a campos electromagnéticos comprendidos entre 100 kHz y 6 GHz

VLE relacionados con efectos para la salud	Valores SAR promediados a lo largo de un periodo cualquiera de seis minutos
VLE relativo al estrés térmico del cuerpo entero, expresado como SAR promediado del cuerpo	0,4 Wkg <sup>-1</sup>
VLE relativo al estrés térmico localizado en la cabeza y tronco, expresado como SAR localizado del cuerpo	10 Wkg <sup>-1</sup>
VLE relativo al estrés térmico en las extremidades, expresado como SAR localizado de las extremidades	20 Wkg <sup>-1</sup>

Nota A1-1: La masa promediada de SAR localizado constituye una porción cualquiera de 10 g de tejido contiguo; el SAR máximo obtenido de esta forma debe ser el valor que se utilice para estimar la exposición. Estos 10 g de tejido deben ser una masa de tejido contiguo con propiedades eléctricas prácticamente homogéneas. Al especificar que se trata de una masa de tejido contiguo, se reconoce que este concepto puede utilizarse en la dosimetría informatizada, aunque puede presentar dificultades a la hora de efectuar mediciones físicas directas. Puede utilizarse una simple masa de tejido de forma geométrica cúbica o esférica.

Valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales para las frecuencias comprendidas entre 0,3 GHz y 6 GHz

Estos valores límite de exposición relacionados con efectos sensoriales (cuadro A2) están relacionados con la prevención de los efectos auditivos causados por exposiciones de la cabeza a las radiaciones de microondas pulsantes.

Cuadro A2

**Valores límite de exposición (VLE) relacionados con efectos sensoriales para la exposición a campos electromagnéticos de frecuencias comprendidas entre 0,3 GHz y 6 GHz**

Intervalo de frecuencias	Absorción de energía específica localizada (AE)
$0,3 \leq f \leq 6 \text{ GHz}$	$10 \text{ mJkg}^{-1}$

Nota A2-1: La masa considerada para evaluar la AE localizada es de 10 g de tejido.

Cuadro A3

**Valores límite de exposición (VLE) relacionados con efectos sobre la salud para la exposición a campos electromagnéticos comprendidos entre 6 GHz y 300 GHz**

Intervalo de frecuencias	VLE relacionados con efectos para la salud relativos a la densidad de potencia
$6 \text{ GHz} \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	$50 \text{ Wm}^{-2}$

Nota A3-1: La densidad de potencia media se mide sobre una superficie expuesta cualquiera de  $20 \text{ cm}^2$ . Las densidades de potencia máxima espacial promediadas para  $1 \text{ cm}^2$  no deberán ser superiores a 20 veces el valor de  $50 \text{ Wm}^{-2}$ . Las densidades de potencia comprendidas entre 6 y 10 GHz deben promediarse para cualquier período de seis minutos. Las densidades de potencia medias para frecuencias superiores a 10 GHz se calcularán un período de tiempo de  $68/f^{1,05}$  minutos (en el que «f» es la frecuencia expresada en GHz) con el fin de compensar una reducción progresiva de la profundidad de penetración a medida que aumenta la frecuencia.

## B. NIVELES DE ACTUACIÓN

Las siguientes magnitudes y valores físicos se utilizan para definir los niveles de actuación, cuyo valor se establece de forma que se garantice, mediante una evaluación simplificada, el respeto de los valores límite de exposición pertinentes o los valores a partir de los que deben adoptarse las medidas de protección o de prevención pertinentes precisadas en el artículo 5:

- NA (E) para una intensidad de campo eléctrico E de un campo eléctrico variable en el tiempo (véase el cuadro B1),
- NA (B) de densidad de flujo magnético B de un campo magnético variable en el tiempo (véase el cuadro B1),
- NA (S) para la densidad de potencia de las ondas electromagnéticas como se especifica en el cuadro B1,
- NA ( $I_C$ ) para la corriente de contacto como se especifica en el cuadro B2,
- NA ( $I_L$ ) para las corrientes en las extremidades como se especifica en el cuadro B2.

Los niveles de actuación corresponden a los valores de campo calculados o medidos en el lugar de trabajo en ausencia del trabajador, como valor máximo en la ubicación del cuerpo o de la parte especificada del cuerpo.

Niveles de actuación para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos

Los NA (E) y NA (B) se derivan de los SAR o de valores límite de exposición de densidad de potencia (cuadros A1 y A3) sobre la base de los niveles relativos a los efectos térmicos internos causados por la exposición a un campo

eléctrico y magnético (externo).

Cuadro B1

**Niveles de actuación (NA) para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos comprendidas entre 100 kHz y 300 GHz**

Intervalo de frecuencias	NA (E) de intensidad del campo eléctrico [ $\text{Vm}^{-1}$ ] (RMS)	NA (B) de densidad de flujo magnético [ $\mu\text{T}$ ] (RMS)	NA (S) de densidad de potencia (en $\text{Wm}^{-2}$ )
$100 \text{ kHz} \leq f < 1 \text{ MHz}$	$6,1 \times 10^2$	$2,0 \times 10^6/f$	—
$1 \leq f < 10 \text{ MHz}$	$6,1 \times 10^8/f$	$2,0 \times 10^6/f$	—
$10 \leq f < 400 \text{ MHz}$	61	0,2	—
$400 \text{ MHz} \leq f < 2 \text{ GHz}$	$3 \times 10^{-3} f^{1/2}$	$1,0 \times 10^{-5} f^{1/2}$	—
$2 \leq f < 6 \text{ GHz}$	$1,4 \times 10^2$	$4,5 \times 10^{-1}$	—
$6 \leq f \leq 300 \text{ GHz}$	$1,4 \times 10^2$	$4,5 \times 10^{-1}$	50

Nota B1-1: «f» es la frecuencia expresada en hercios (Hz).

Nota B1-2: El  $[\text{NA (E)}]^2$  y el  $[\text{NA (B)}]^2$  medios deben promediarse para un período de seis minutos. Para los impulsos

RF, la densidad de potencia de pico media calculada para la duración del impulso no deberá exceder de 1 000 veces el valor NA (S) correspondiente. Para los campos de frecuencias múltiples, el análisis se basa en la suma, tal como se explica en las guías prácticas a que se hace referencia en el artículo 14.

Nota B1-3: Los NA (E) y los NA (B) representan los valores máximos calculados o medidos en la posición del cuerpo del trabajador. Esto entraña una evaluación moderada de la exposición y un cumplimiento automático de los valores límite de exposición en todas las condiciones de exposición no uniformes. Para simplificar la evaluación del cumplimiento de los valores límite de exposición, llevada a cabo de conformidad con el artículo 4, en condiciones no uniformes particulares, en las guías prácticas mencionadas en el artículo 14 se establecerán criterios para la obtención del promedio espacial de los valores de los campos medidos basados en una dosimetría sólidamente establecida. En el caso de una fuente muy localizada situada a una distancia de unos pocos centímetros del cuerpo, el cumplimiento de los valores límite de exposición se determinará dosimétricamente caso por caso.

Nota B1-4: La densidad de potencia se debe promediar sobre una superficie expuesta cualquiera de  $20 \text{ cm}^2$ . Las densidades de potencia máxima espacial promediadas para una superficie de  $1 \text{ cm}^2$  no deberán ser superiores a los valores de  $50 \text{ Wm}^{-2}$ . Las densidades de potencia comprendidas entre 6 y 10 GHz deben promediarse para cualquier período de seis minutos. Las densidades de potencia medias superiores a 10 GHz se calcularán para un período de tiempo de  $68/f^{1,05}$  minutos (donde «f» es la frecuencia expresada en GHz), con el fin de compensar una reducción progresiva de la profundidad de penetración a medida que aumenta la frecuencia.

Cuadro B2

**Niveles de actuación (NA) para las corrientes de contacto en estado estacionario y las corrientes inducidas en las extremidades**

Intervalo de frecuencias	NA ( $I_C$ ) corrientes de contacto en estado estacionario [mA] (RMS)	NA ( $I_L$ ) corrientes inducidas en una extremidad [mA] (RMS)
$100 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ MHz}$	40	—
$10 \text{ MHz} \leq f \leq 110 \text{ MHz}$	40	100

Nota B2-1: El  $[\text{NA (I}_L)]^2$  medio debe promediarse para un período de seis minutos.





## Referencias

### Normativa

- [1] Directiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo y del Consejo
- [2] Directiva 2013/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo
- [3] Real Decreto 1066/2001 de 28 de septiembre
- [4] Orden Ministerial CTE/23/2002 de 11 de enero
- [5] Ordenanza 12027 del Ayto. de Murcia, Boletín 174, Página 41922
- [6] Guía para la evaluación de la exposición de los trabajadores a los campos electromagnéticos en relación con la Directiva 2004/40/CE.
- [7] Agents classified by the IARC monographs, volumes 1–109 (<http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>)

### Exposición a campos

- [8] IEEE (2006) IEEE C95.1-2005 "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz"
- [9] Review of the Scientific Evidence for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (0.300 GHz), NRPB, Volume 15 No.3 2004
- [10] Base stations & wireless networks: Exposures & health consequences, Mike Repacholi, Emilie van Deventer and Paolo Ravazzanni. OMS 2007.
- [11] The Possible Harmful Biological Effects of Low-Level Electromagnetic Fields of Frequencies up to 300 GHz, Institution of Engineering and Technology, 2012
- [12] Electromagnetic fields and health, Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [13] Informe Sobre La Exposición Del Público En General A Las Emisiones Radioeléctricas De Estaciones De Radiocomunicación. Año 2009. MITyC.
- [14] Informe Del CCARS Sobre Radiofrecuencias Y Salud (2007-2008)
- [15] Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos ( hasta 300 ghz), ICNIRP
- [16] Formulas for Unit Conversion Charts - Bob Dahse
- [17] EMF & RF Safety Levels - A Comparative Guide ScanTech 214.912.4691
- [18] Occupational Exposure to Hot Environments, NIOSH 1986
- [19] Kinouchi Y, Yamaguchi H and Tenforde T S (1996). Theoretical analysis of magnetic field interactions with aortic blood flow. Bioelectromagnetics, 17, 21–32
- [20] Exposición Humana A Campos Electromagnéticos. Grupo de Ingeniería de Microondas y Radiocomunicaciones, Noviembre 1999
- [21] EMF Project, WHO (<http://www.who.int/peh-emf/project/en/>)
- [22] Electromagnetic fields act *via* activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects. Martin L. Pall.
- [23] UNE-EN 60335-2-25:2012. Aparatos electrodomésticos y análogos. Seguridad. Parte 2-25: Requisitos particulares para hornos microondas incluyendo los hornos microondas combinados.
- [24] Childhood disease in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study, 2 June 2005.

### Simulación

- [1] Análisis dosimétrico de fugas de hornos microondas, Peio López, Leire Azpilicueta, Erik Aguirre, Silvia de Miguel, Victoria Ramos, FranciscoFalcone
- [2] Solid Works User's Manual
- [3] CST Studio Suite 2013 web seminars
- [4] CST Microwave Studio User's Manual
- [5] Matlab User's Manual