

# Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

## El espectro electromagnético. Los efectos de la radiación no ionizante y como prevenirlos.

Karina Galache · Wednesday, January 25th, 2023

Categorías: Ciencias Exactas, Zona Abierta

El desarrollo de la tecnología como el wifi, celulares, radios, televisores, entre otros, ha facilitado el desarrollo de las actividades diarias. Lo que probablemente no sabíamos es que estos ejemplos tienen un elemento en común: las denominadas ondas electromagnéticas (OEM).

### Las ondas electromagnéticas

La combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes y perpendiculares uno del otro que se propagan en un medio, generan las OEM (Fig. 1). A diferencia de otro tipo de ondas como el sonido, que requieren un medio material para propagarse, la radiación electromagnética puede viajar en el vacío.

Las formas en que se manifiestan las OEM pueden ser ondas de radio, microondas, radiación infrarroja, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 2022). Cada tipo de OEM se define por su longitud de onda y su frecuencia. La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos puntos en los cuales la onda se repite, y la frecuencia ( $f$ ) representa el número de longitudes de onda completas o repeticiones de la onda por unidad de tiempo.

En el Sistema Internacional de Unidades, la frecuencia se mide en hercios (Hz), esto es, cuantas veces (ciclos) se repite un fenómeno en un segundo. Por ejemplo, si una onda se repite 60 veces sobre segundo tendrá una frecuencia de 60 ciclos sobre segundo o 60 Hz.



Figura 1. Representación de los campos eléctrico ( $E$ ) y magnético ( $B$ ) perpendiculares entre sí, que forman una onda electromagnética con longitud de onda  $\lambda$ , propagándose en la dirección  $k$ .

Las OEM se pueden ordenar en función de su longitud de onda, frecuencia o energía en el denominado espectro electromagnético, que se extiende desde las ondas de radio hasta los rayos gamma (Fig. 2). Como se observa, la energía de la radiación ( $E$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) son inversamente proporcionales, es decir, a mayor longitud de onda menor energía y viceversa. De la

misma manera, a mayor frecuencia menor es la longitud de onda y viceversa.



Figura 2. Espectro electromagnético, algunas fuentes de cada tipo de OEM y la relación de la longitud de onda con diferentes objetos o entidades. <https://www.micochesport.com/451408953?i=181358013>

### La energía de las OEM y sus efectos sobre la salud

Dependiendo de la cantidad de energía y la frecuencia de la OEM, al interactuar con materia puede dividirse en ionizante y no ionizante (Fig. 3). En el caso de la primera, la energía de la OEM es suficiente para extraer electrones de la corteza de los átomos -ionizarlos- y, por lo tanto, producir cambios e incluso daños en la materia inorgánica, orgánica o biológica. En esta categoría se encuentran los rayos X y los rayos gamma.

Por otro lado, la radiación no ionizante que contempla desde las ondas de radio hasta la radiación ultravioleta, no tiene la suficiente energía para producir dicho fenómeno en el átomo, pero puede generar efectos adversos en el cuerpo humano, así como daños en sistemas electrónicos al producir calentamiento de sus componentes (Asociación Nacional de Servicios de Prevención Ajenos (aspren), 2018).



Figura 3. Ejemplos de radiación ionizante y no ionizante. <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion>

Los efectos de la radiación electromagnética en el cuerpo humano dependerá de su frecuencia, intensidad y tiempo de exposición (World Health Organization, 2022). A pesar de que la interacción de los seres vivos con campos electromagnéticos no es novedad, la omnipresencia de dispositivos generadores de OEM y el cambio de hábitos cotidianos ha provocado un incremento de los niveles de exposición, por lo que importa determinar los efectos de la radiación electromagnética sobre la salud.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) afirma que no existen pruebas científicas suficientes de que la exposición a la radiofrecuencia acorte la vida humana o promueva el cáncer, aunque establece que son necesarios más estudios. Por otro lado, los estudios de los efectos térmicos de las OEM en animales han demostrado una disminución de la resistencia y capacidad de realizar tareas mentales. También hay evidencia de que la exposición a campos de radiofrecuencia, suficiente como para aumentar la temperatura de los tejidos en más de 1 °C, puede originar cataratas y diversas respuestas fisiológicas. Estudios sobre la influencia de las OEM en el sistema nervioso han encontrado efectos por ejemplo, sobre la concentración de algunos neurotransmisores en animales expuestos (Hu *et al.*, 2021 ; Aboul Ezz *et al.*, 2013). Los neurotransmisores son la base de los procesos neurológicos, por lo tanto, los efectos de la radiación electromagnética pueden reflejarse en funciones cerebrales como la capacidad de aprendizaje, memoria, e incluso con la aparición de desórdenes tales como depresión, esquizofrenia, Alzheimer y Parkinson.

## Los radares

En el área de las telecomunicaciones, uno de los sistemas con mayor desarrollo desde su invención en la Segunda Guerra Mundial, que utiliza radiación no ionizante es el radar (del inglés **radio detection and ranging**). Su funcionamiento consiste en generar y dirigir ondas electromagnéticas hacia un área determinada para reflejarse en un objetivo (un barco, un avión, un auto), después de lo cual se reciben y procesan para determinar parámetros como posición, velocidad, dirección o altitud del objetivo en la zona.

Existen algunos sistemas muy conocidos en actividades cotidianas como las pistolas de radar utilizadas para medir la velocidad de vehículos; en los deportes, para determinar la velocidad de las pelotas en los juegos de béisbol y de los servicios en los partidos de tenis, hasta sistemas más sofisticados como los radares de navegación, defensa y seguimiento aéreo. La Figura 4 muestra el radar Tzinacan para vigilancia aérea desarrollado y cofinanciado entre el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) y la Secretaría de Marina (SEMAR), a través de los Fondos Sectoriales de Investigación y Desarrollo.



Figura 4. Radar de vigilancia aérea Tzinacan, desarrollado por la Secretaría de Marina Armada de México. <http://www.semar.gob.mx/INIDETAM/proyectos.html>

Por lo general los radares operan en el intervalo de 300 MHz hasta 15 GHz; sin embargo, en algunos casos pueden llegar hasta los 300 GHz. De acuerdo con lo visto, las frecuencias de operación de los radares se encuentran dentro de las radiaciones no ionizantes, pero debido a que las OEM generadas por los radares deben viajar largas distancias para detectar objetivos, la potencia utilizada para producirlas debe ser alta, y debido a esto, los operadores pueden exponerse a algunos de los riesgos derivados de la interacción de la radiación con el cuerpo humano (World Health Organization, 2007). Por ejemplo, algunos sistemas de radar originan las ondas electromagnéticas mediante mecanismos pulsados por lo que la radiación generada no es constante, aunque se ha reportado que estos pulsos producen sonidos que pueden percibirse como un zumbido, un silbido o estallido, cuya exposición prolongada puede crear estrés.

Aunque los reportes sobre los efectos en el sistema reproductor masculino suelen ser contradictorios debido a las diferentes tecnologías de radar, se han registrado incrementos en el porcentaje del esperma patológico y disminución en su movilidad y densidad en operadores de estaciones de radar (Wdowiak et al., 2017). En el caso del sistema reproductor femenino y el embarazo, se han encontrado efectos provocados por la exposición que pueden derivar en desordenes de la reproducción, desde la concepción hasta la etapa blastocisto y el proceso de implantación.

En cuanto a los efectos sobre el sistema circulatorio, hay casos de ansiedad e hipertensión y de prevalencia de enfermedades cardiovasculares en pilotos y operadores de radares expuestos por largo tiempo (Jauchem, 1997; Moen et al., 2013). También hay casos de efectos en la sangre como aumento de glóbulos rojos inmaduros, disminución de leucocitos, aparición y reaparición de aberraciones cromosómicas.

## Regulaciones Internacionales

La Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP) es una organización no gubernamental con reconocimientos de la OMS y la Organización Internacional del Trabajo (OIT), que tiene como objetivo la protección de personas y medio ambiente contra los efectos adversos de la radiación no ionizante (Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris), 2018).

La ICNIRP establece las restricciones para la exposición a campos electromagnéticos en el segmento de radiofrecuencia de 100 kHz a 300 GHz que tiene aplicación en áreas de comunicación (telefonía celular, Wi-Fi, 5G, radio, televisión), medicina (imagen por resonancia magnética), entre otros, con base en múltiples publicaciones científicas internacionales (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), 2020).

Los estándares establecen limitar la potencia absorbida por los tejidos al rango de 0.08 a 0.4  $W \cdot kg^{-1}$ , que se encuentra dentro de la capacidad del cuerpo para evitar un aumento en su temperatura. Junto con esta restricción, es necesario acotar el tiempo de exposición a los campos electromagnéticos y controlar la distancia mínima de operación; empero, existen situaciones donde no es posible cumplir con las restricciones anteriores y, con la finalidad de no exponer a ninguna persona a los posibles efectos adversos de la interacción con las ondas electromagnéticas, la instrumentación de mecanismos de protección personal y estructural es un tema de interés para la comunidad científica.

## Métodos de protección

Desde el descubrimiento de los efectos que pueden provocar los distintos tipos de radiación, ha sido tema de interés el estudio y desarrollo de formas para el bloqueo de las OEM. El uso de metales como el oro, el cobre o el aluminio para crear armaduras que eviten que la radiación generada por los sistemas se propague en el entorno y pueda producir daños a la salud o bien, llegar a áreas susceptibles como circuitos o sistemas electrónicos y ocasionar daños por incidencia electromagnética, se ha mantenido como método tradicional de protección (Fig. 5). No obstante, el uso de metales conlleva diversas desventajas en su implementación, como su elevado costo, el peso extra, además de ser susceptibles a la corrosión y al sobrecalentamiento.



Figura 5. Ejemplo de bloqueo electromagnético en un circuito electrónico utilizando una coraza de aluminio. <https://www.mouser.mx/blog/emc-emi-shielding-explained>

Derivado de la conductividad de los metales, el mecanismo de bloqueo de las OEM es la reflexión de la radiación incidente, aunque existe el problema de que la onda reflejada no pierde energía y se sigue propagando, por lo que puede afectar a personas y componentes que se encuentren en el camino de las OEM reflejadas.

Para solventar estas desventajas se han desarrollado pinturas mezcladas con partículas metálicas, por ejemplo la pintura basada en zinc-nanografito para protección en frecuencias de 8-9 GHz (Prakash et al., 2021), o aquella basada en la combinación de nanopartículas de plata para

protección entre 8-12 GHz (Ghosh et al., 2019). También se han diseñado prendas de vestir que disminuyen la exposición del cuerpo a la radiación, como las utilizadas por el personal médico en el manejo de diversos equipos o las batas empleadas en laboratorios de investigación de antenas (Huang et al., 2020); y finalmente, se han fabricado y evaluado estructuras periódicas (denominadas meta-estructuras), como recubrimientos para proteger diversos espacios y evitar la propagación de la radiación, y así contar con áreas seguras para trabajar con radiación electromagnética. En la Figura 6 se presenta un ejemplo de metamaterial basado en estructuras piramidales para recubrir el interior de una cámara anecoica.



Figura 6. Cámara anecoica con interior recubierto con metamateriales.

Uno de los retos en la actualidad es el desarrollo un método de protección que impida el paso de las OEM en múltiples frecuencias, brindando así protección en intervalos amplios de radiación y que permita, además, cubrir las desventajas de la obstrucción de OEM mediante metales, es decir, que sean ligeros, de bajo costo, que reduzcan o eliminen la reflexión de la radiación, que no sean susceptibles a la corrosión, entre otros. El uso de materiales basados en carbono (grafito, nanotubos de carbono, grafeno) y sus compósitos con partículas metálicas (níquel, cobre, hierro) u óxidos (magnetita, ferritas), para el desarrollo de nuevas propuestas para el bloque de radiación electromagnética ha sido un tema relevante debido a que se combinan materiales con propiedades eléctricas y magnéticas que permiten el acoplamiento de impedancias entre el medio y el material disminuyendo la reflexión de la radiación mediante absorción y conversión de la energía incidente en otro tipo diferente, específicamente en calor, además de reflexiones múltiples internas entre las capas del material que ayudan a disipar la energía de las OEM. La conversión de energía, y por lo tanto la atenuación de las OEM en compósitos magnéticos se atribuye a dos fenómenos resultantes de la interacción de la radiación con los materiales: la rotación molecular (Fig. 7a) y la orientación de dominios magnéticos (Fig. 7b), en ambos casos, a través de la interacción y el proceso de oscilación, parte de la energía es absorbida, transformada y disipada en forma de calor debido a la fricción ya que las moléculas y dominios intentan regresar a su orientación inicial. La generación de calor hace necesario desarrollar y utilizar materiales capaces de disipar el calor.



Figura 7. Mecanismos de atenuación y conversión de energía.

Sin embargo, incluso estos materiales con propiedades electromagnéticas sobresalientes reducen las OEM reflejadas en intervalos específicos y cortos de frecuencia, lo cual limita sus potenciales implementación en aplicaciones prácticas.

Las meta-estructuras, fabricadas con materiales base carbono, surgen como alternativa de solución para solventar las limitantes de los materiales convencionales. Estas estructuras, además de los mecanismos de atenuación de los compósitos base carbono, añaden el fenómeno de reflexiones múltiples a nivel macro debido a su geometría (Fig. 8). Dicho fenómeno incrementa la interacción de la radiación con el material potenciando la absorción y atenuación de la energía. Además de las propiedades esperadas de los compósitos base carbono, se espera que las meta-estructuras atenúen la reflexión de las OEM en intervalos amplios de frecuencia que permita cubrir diferentes regiones del espectro electromagnético y ser utilizadas en distintas aplicaciones tecnológicas.



Figura 8. Fenómenos de interacción de la radiación con meta-estructura tablero de ajedrez.

En un trabajo reciente de nuestro grupo de investigación, se modeló el metamaterial basado en la estructura de tablero de ajedrez (Fig. 9a), en el intervalo de frecuencias de 8-12 GHz, que corresponde al utilizado por algunos radares (Ruiz-Perez et al., 2022). En la estructura se combinan cuadros de ajedrez de dos diferentes alturas, fabricados con un compuesto de óxido de grafeno reducido, magnetita y polipirrol, un polímero conductor de la electricidad. El modelo demostró que, en este material, el acople de impedancias entre el polímero conductor y la magnetita y la dispersión de las ondas en el óxido de grafeno reducido, permiten disipar la energía de las ondas incidentes, tanto por calentamiento (efecto Joule), como por rotación de los dominios magnéticos del material (Fig. 9b), logrando que más del 99.99% de la energía de la OEM incidente se disipe sin reflejarse en un intervalo amplio de frecuencias (Fig. 9c). Como se mencionó, la geometría estructural proporciona interacción adicional con las OEM, incrementando la atenuación en comparación al material estándar en forma de recubrimiento. Este tipo de estructuras podrían fabricarse en gran escala mediante impresión 3D para proteger operarios y equipos de la exposición a las OEM emitidas por un radar. Otros materiales y otras meta-estructuras podrían diseñarse para la protección contra OEM en aplicaciones particulares.



Figura 9. Estructura Chessboard (tablero de ajedrez). a) Modelo 3D. b) Mecanismos de disipación de energía. c) Respuesta de atenuación electromagnética.

## Sumario y perspectivas

Pese a sus enormes beneficios para el desarrollo de la civilización, la exposición a las OEM no ionizantes puede ocasionar efectos negativos en los seres vivos, por lo que hay gran interés científico y tecnológico en el desarrollo de nuevos materiales y nuevos tipos de estructuras que aprovechen los mecanismos de absorción de energía de las ondas electromagnéticas para reducir la cantidad de radiación transmitida y reflejada, lo que permitirá proteger a las personas y a los sistemas electrónicos delicados, además de fabricarse mediante impresión 3D en gran escala.

---

## Trabajo apoyado por el proyecto SIP 2022-0834

---

## REFERENCIAS

Aboul Ezz, H. S., Khadrawy, Y. A., Ahmed, N. A., Radwan, N. M., & El Bakry, M. M. (2013). The effect of pulsed electromagnetic radiation from mobile phone on the levels of monoamine

neurotransmitters in four different areas of rat brain. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 17(13), 1782–1788.

Asociación Nacional de Servicios de Prevención Ajenos (aspren). (2018). *Radiaciones no ionizantes: riesgos y medidas de prevención*. <http://www.aspren.org/radiaciones-no-ionizantes-riesgos-y-medidas-de-prevencion/>

Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris). (2018). *Salud Ambiental-Radiofrecuencias*. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/radiofrecuencias>

Ghosh, S., Ganguly, S., Das, P., Das, T. K., Bose, M., Singha, N. K., Das, A. K., & Das, N. C. (2019). Fabrication of Reduced Graphene Oxide/Silver Nanoparticles Decorated Conductive Cotton Fabric for High Performing Electromagnetic Interference Shielding and Antibacterial Application. *Fibers and Polymers*, 20(6), 1161–1171. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1001-7>

Hu, C., Zuo, H., & Li, Y. (2021). Effects of Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Neurotransmitters in the Brain. *Frontiers in Public Health*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.691880>

Huang, K., Chen, M., He, G., Hu, X., He, W., Zhou, X., Huang, Y., & Liu, Z. (2020). Stretchable microwave absorbing and electromagnetic interference shielding foam with hierarchical buckling induced by solvent swelling. *Carbon*, 157, 466–477. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.10.059>

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. (2022). *El mapa invisible*. <https://www.gob.mx/inin/es/articulos/el-mapa-invisible?idiom=es>

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118(5), 483–524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>

Jauchem, J. R. (1997). Exposure to extremely-low-frequency electromagnetic fields and radiofrequency radiation: cardiovascular effects in humans. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 70(1), 9–21. <https://doi.org/10.1007/s004200050181>

Moen, B. E., Møllerløgken, O. J., Bull, N., Oftedal, G., & Mild, K. H. (2013). Accidental exposure to electromagnetic fields from the radar of a naval ship: a descriptive study. *International Maritime Health*, 64(4), 177–182. <https://doi.org/10.5603/IMH.2013.0001>

Prakash, A., Narayanan, S., Thangavelu, K., Srivastava, A. K., Pandey, M. K., Nagarajan, R., & Bhattacharyya, A. (2021). Functional properties of zinc-nanographite based nanocomposite paints for 2–9 GHz microwave absorption. *Journal of Coatings Technology and Research*, 18(5), 1237–1243. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00484-y>

Ruiz-Perez, F., Estrada, S. M. L., & Briones, F. C. (2022). Tunable, wideband X-band microwave absorbers using variable chessboard surfaces. *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/LEMCPA.2022.3141775>

Wdowiak, A., Mazurek, P. A., Wdowiak, A., & Bojar, I. (2017). Effect of electromagnetic waves on human reproduction. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 24(1), 13–18. <https://doi.org/10.5604/12321966.1228394>

---

World Health Organization. (2007). *Radiation: Radar*.  
<https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-radar>

World Health Organization. (2022). *Radiation and Health*.  
<https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-and-health>

This entry was posted on Wednesday, January 25th, 2023 at 12:00 am and is filed under [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.