CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS: RETOS PRESENTES Y FUTUROS PARA LA SEGURIDAD Y LA SALUD EN EL TRABAJO

Introducción

Sin olor, inaudibles e invisibles, los campos electromagnéticos (CEM) —emitidos por teléfonos móviles, antenas de radio, enrutadores wifi, líneas eléctricas, etc.— están en todas partes en la sociedad moderna. El número y la variedad de fuentes presentes en hogares, lugares públicos y lugares de trabajo incrementan su presencia. De hecho, en los últimos años han surgido nuevas tecnologías de difusión basadas en los CEM, como una nueva generación de tecnologías de telefonía móvil (la quinta, también conocida como 5G), la transferencia inalámbrica de energía y varias aplicaciones médicas. De hecho, los avances tecnológicos inalámbricos se consideran motores clave para la digitalización del trabajo[1] y la Industria 5.0 (CE, 2022). Estos avances afectan a muchos ámbitos asociados al futuro del trabajo[2], como el internet de las cosas (IdC), el trabajo híbrido y los entornos de trabajo virtuales. También desempeñan un papel crucial en la conducción autónoma, los vehículos aéreos no tripulados (VANT), los sensores y la robótica avanzada. Sin embargo, debido a la omnipresencia de las fuentes de CEM, el debate en torno a estos CEM ha cobrado mayor interés tanto en los círculos científicos como entre el público en general. Además, debido a su rápida implantación y a un mayor uso en entornos profesionales, la Comisión Europea (CE) destacó recientemente la importancia de analizar la exposición de las personas trabajadoras a los campos electromagnéticos, así como los posibles efectos adversos para la salud de esta exposición (CE, 2021).

El presente documento tiene por objeto identificar la evolución emergente y futura de las aplicaciones laborales de los CEM y sus posibles implicaciones para la seguridad y la salud en el trabajo (SST). También pretende poner de relieve la falta de conocimiento relativo a los niveles (seguros) de exposición. Además, el documento formula recomendaciones para que las personas empleadas, las empresas, las personas que trabajan en prevención de riesgos y las responsables de las políticas reduzcan al mínimo los riesgos asociados a la exposición a los CEM. Para obtener información adicional sobre los riesgos y beneficios indirectos en materia de SST de aquellas aplicaciones basadas en CEM relevantes para el futuro del trabajo , se hace referencia a las publicaciones correspondientes de la EU-OSHA[1,2].

¿Qué son los campos electromagnéticos?

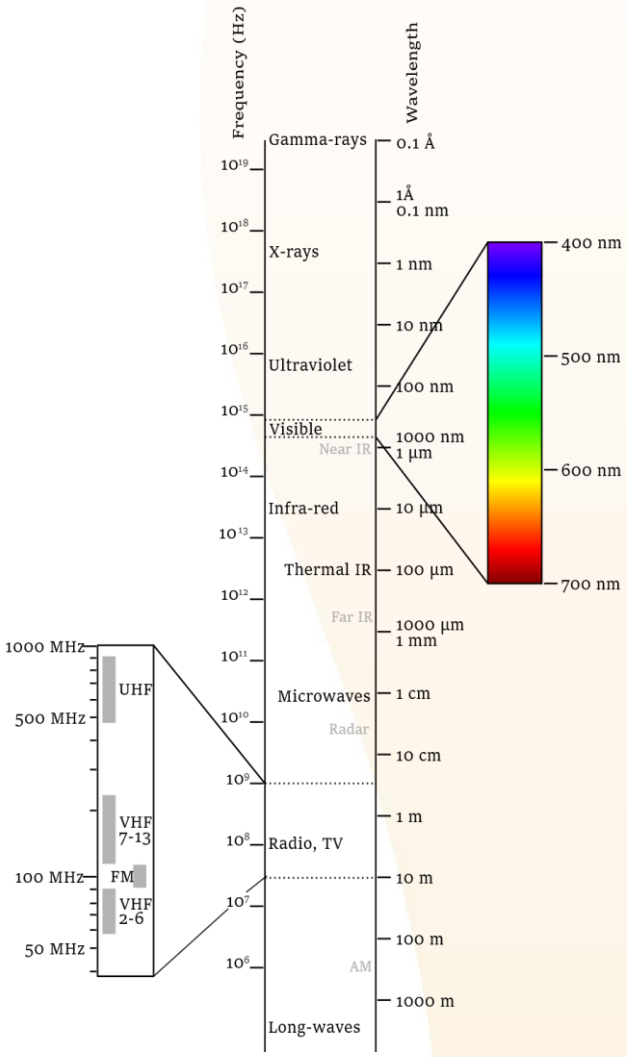
En esencia, los CEM son generados por cargas eléctricas en movimiento y viajan como una combinación de ondas eléctricas y magnéticas oscilantes a la velocidad de la luz. El campo eléctrico surge de las fuerzas que las partículas cargadas ejercen entre sí, mientras que el campo magnético es producido por cargas en movimiento (corrientes eléctricas). Los CEM se caracterizan por su frecuencia o longitud de onda, las características de la señal y su intensidad. La frecuencia, medida en hercios (Hz), se refiere al número de ciclos que completa la onda por segundo. La longitud de onda, medida en metros (m), es la distancia entre dos picos de la onda. Las características de la señal se refieren, por ejemplo, a CEM sinusoidales continuos o pulsados. La intensidad es la energía de la onda, correlacionada con la amplitud (altura del pico) de la onda. El nivel de exposición es la intensidad de la onda incidente en la ubicación del cuerpo, normalmente ponderada (promediada) en función del tiempo, el volumen o el espacio a lo largo de un período, superficie o volumen determinados. Este nivel se mide en términos de densidad de potencia (en vatios por metro cuadrado) o de intensidad del campo

[1] Véase: https://osha.europa.eu/en/themes/digitalisation-work

[2] Véanse los documentos de reflexión de la EU-OSHA que abordan temas relevantes para el futuro del trabajo en: https://osha.europa.eu/en/publications?f%5B0%5D=facet_tags%3A51&f%5B1%5D=publication_type%3A9&search_api_fulltext=&search_api_language_1%5B0%5D=en&sort_by=field_publication_date

eléctrico (en voltios por metro). La frecuencia y la longitud de onda están inversamente relacionadas (figura 1): la longitud de onda (en metros) puede calcularse dividiendo la velocidad de la luz (30 millones de metros por segundo, en vacío) por la frecuencia (en hercios, Hz). Tenga en cuenta que, por lo general, el campo eléctrico y el magnético están acoplados a distancias superiores a 10 longitudes de onda de la fuente; esta región se denomina el campo lejano.

Figura 1: El espectro electromagnético



El rango de frecuencia extremadamente baja (FEB) y parte del rango de frecuencia intermedia (FI) (1 Hz-100 kHz) no se incluyen en esta figura.

Lista de abreviaturas: MHz = megahercio, siendo Hz la unidad de frecuencia, que indica el número de ciclos/ondas sinusoidales por segundo; UHF = frecuencia ultra alta, VHF = frecuencia muy alta; AM = modulación de amplitud; FM = modulación de frecuencia; IR = infrarrojo; m = metro, cm = centímetro; mm = milímetro; µm = micrómetro, nm = nanómetro, Å = ángstrom = 0,1 nm.

Fuente: Wikimedia Commons [Licencia Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.5 Generic]

Existen fuentes naturales y artificiales de CEM. En términos generales, las fuentes artificiales emiten CEM manipulados para transmitir información o energía. Sin embargo, las aplicaciones prácticas son tan variadas como sus frecuencias: desde frecuencias extremadamente bajas (FEB, es decir, frecuencias que oscilan entre 1 Hz y 300 Hz), observadas en la generación de energía, hasta frecuencias intermedias (FI, es decir, frecuencias entre 300 Hz y 10 MHz, con 1 MHz = 10^6 Hz; figura 1) hasta las radiofrecuencias (RF, es decir, frecuencias que oscilan entre 10 MHz y 300 GHz, siendo 1 GHz = 10^9 Hz; figura 1), utilizadas en aplicaciones de radar y comunicaciones móviles.

Es importante señalar que este documento solo tiene en cuenta los CEM con frecuencias de hasta unos pocos terahercios (donde 1 THz = 10^{12} Hz, figura 1), las denominadas ondas de radio (UIT, 2020), que se encuentran por debajo de la región de la luz visible y están dentro de la parte del espectro que se considera no ionizante, por ejemplo, las que carecen de la energía necesaria para eliminar electrones fuertemente unidos a átomos o moléculas (lo que puede provocar daños moleculares y efectos sobre la salud). Esto significa que, además de la luz infrarroja y visible, no se tienen en cuenta aquí otras partes bien conocidas del espectro electromagnético, como la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

Últimas novedades sobre los CEM en el lugar de trabajo

Redes de comunicaciones móviles

La **quinta generación de redes de telecomunicaciones (5G)** funciona a frecuencias no utilizadas anteriormente, algunas de las cuales son significativamente superiores a las utilizadas en generaciones anteriores [hasta 71 GHz (siendo 1 GHz = 10^9 Hz), figura 1]. Introduce avances tecnológicos que permiten que un mayor número de usuarios sean atendidos simultáneamente por la misma estación de base. Esto se consigue dividiendo la energía transmitida en el espacio y enfocándola en forma de haz hacia los usuarios. En la mayoría de los países europeos, los organismos reguladores ya han asignado y subastado las nuevas frecuencias.

La implantación mundial de las redes 5G ha suscitado la desconfianza del público debido a los supuestos riesgos para la salud derivados del aumento de la exposición general a los CEM y del uso de frecuencias más altas (cuyos posibles efectos biológicos aún no se han estudiado a fondo), así como a la desinformación, incluso se han cometido actos de vandalismo contra las infraestructuras (UIT, 2021). Aunque la adición de redes 5G podría aumentar efectivamente la exposición total a los CEM, se espera que esta situación dure mientras las redes de generación anteriores sigan en funcionamiento (CCRSME, 2023 *bis*). Para aliviar las preocupaciones de las personas sobre la 5G y supervisar la repercusión real en la exposición total a campos electromagnéticos de radiofrecuencia, el programa Horizonte de la UE ha financiado cuatro estudios internacionales con el objetivo de evaluar el impacto en la salud y el medio ambiente de la implantación de la 5G, también en entornos profesionales[3]. Estos proyectos comenzaron en 2022 y finalizarán entre 2025 y 2027.

En frecuencias más altas, se requiere un número cada vez mayor de estaciones de base para mantener enlaces inalámbricos de alta calidad. Por lo tanto, se emplean estaciones de base de células pequeñas, situadas en árboles, farolas o edificios a pocos cientos de metros de distancia (CCRSME, 2023 *bis*). Las células pequeñas también se utilizan cada vez más en redes privadas/empresariales[4] y se implantan en grandes fábricas, naves de fabricación, puertos (aéreos), campus, etc.

La combinación de técnicas de transmisión, frecuencias más altas y densificación simultánea de la red que ofrece la 5G permite comunicaciones inalámbricas con (muy) altos rendimientos de datos y (ultra)baja latencia, lo que la convierte en un factor clave para la digitalización del trabajo y muchas aplicaciones laborales futuras. Sin embargo, se prevé que las innovaciones tecnológicas que está introduciendo la 5G no se materialicen plenamente hasta la próxima generación de 6G, cuya puesta en marcha está prevista para 2030. El proyecto insignia de la UE Hexa-X[5] incluso prevé que la 6G se convierta en una tecnología de utilidad general (TUG) en lugar de una simple tecnología habilitadora, potenciando la telepresencia (totalmente inmersiva) como el metaverso; el hermanamiento masivo [es decir, paneles de control en tiempo real y modelos virtuales de dispositivos e instalaciones (de producción)]; la sanidad electrónica para todos; los robots colaborativos (es decir, robots que ayudan a los seres humanos en sus tareas); y la integración total del IdC, con multitud de sensores, tanto dentro como fuera del cuerpo. Esto significa que se espera que la 6G tenga una repercusión de gran alcance en las transformaciones sociales e industriales (Industria 5.0). Para ello, la 6G utilizará partes del espectro radioeléctrico muy por encima de las que utiliza o utilizará la 5G (>100 GHz), lo que no solo permite un rendimiento altísimo, sino que también permite una localización y detección con una precisión de centímetros.

[3] Véase: https://www.emf-health-cluster.eu/
[4] Las redes 5G privadas/empresariales no son de acceso público y son muy seguras.
[5] Véase: https://hexa-x.eu/. La Comisión Europea ha puesto en marcha varias iniciativas emblemáticas para abordar los principales retos científicos y tecnológicos e impulsar la innovación en la UE: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/flagships.

Transición energética

La transición energética en curso a fuentes renovables requiere ampliaciones y mejoras de la red eléctrica (por ejemplo, la implantación de líneas de alta tensión y onduladores), así como una mejor supervisión del consumo instantáneo de energía a nivel individual (por ejemplo, a través de una red inalámbrica de sensores denominados contadores inteligentes). Los riesgos de exposición de las personas trabajadoras (por ejemplo, las personas que trabajan en el ámbito de la construcción, la electricidad y la ingeniería de mantenimiento) y de las personas que trabajan en el desarrollo y mantenimiento de nuevas infraestructuras (energéticas), con una exposición potencialmente elevada debido a las altas corrientes, son bien conocidos y quienes trabajan en las centrales eléctricas parecen ser muy conscientes de los riesgos y de cómo protegerse (Stege *et al*., 2020), aunque las personas subcontratistas de las centrales eléctricas pueden no ser plenamente conscientes de que el personal con funciones de salud, seguridad y medio ambiente podrá instruirlos. Además, los contadores inteligentes suelen contribuir poco a la exposición total a campos electromagnéticos de radiofrecuencia, debido a sus escasas transmisiones y a su ubicación específica (Aerts *et al*., 2019). Por último, las aplicaciones de calefacción (industrial) están cambiando cada vez más de combustibles de hidrocarburos a inducción eléctrica, lo que da lugar a más fuentes de campos magnéticos de baja frecuencia, que pueden ser potencialmente de alta intensidad, pero pueden mantenerse muy por debajo de los valores límite de exposición (CE, 2015a, b).

Transferencia inalámbrica de energía

La transferencia inalámbrica de energía (TIE) se ha convertido en la tecnología líder para la recarga de dispositivos personales (por ejemplo, teléfonos inteligentes y ordenadores portátiles, pero también herramientas eléctricas) y también se investiga o se implanta para productos sanitarios (por ejemplo, marcapasos), vehículos eléctricos, drones y otros vehículos/robots autónomos industriales. La TIE aplica campos electromagnéticos de radiofrecuencia focalizados (haces) o utiliza tecnologías inductivas o resonantes, que emiten campos electromagnéticos a frecuencias entre 10 kHz y 50 MHz (ETSI, 2019). En el primer caso, la energía a través del aire permite el funcionamiento sin interrupciones de dispositivos y maquinaria, robots y drones. En entornos profesionales, la TIE se produce principalmente en el sector del mantenimiento y la reparación, la industria manufacturera, el sector del transporte y la logística y todos los sectores con puestos de trabajo que utilizan la robótica (móvil). La carga inalámbrica de vehículos también se implementará a mayor escala mediante su integración en la infraestructura (de carretera). Por ejemplo, ya se están cargando una variedad de vehículos, como coches, autobuses y camiones, mediante bucles[6] en aparcamientos y paradas de autobús. Además, en un futuro (próximo), los bucles de carga inalámbrica se integrarán en las carreteras para cargar continuamente los vehículos en movimiento. Estudios recientes —aunque no se han realizado en entornos profesionales— indican que la exposición cercana a los sistemas de TIE es inferior a los límites de exposición (Stam, 2022). Sin embargo, los futuros aumentos de la potencia de los sistemas, por ejemplo, para cargar vehículos eléctricos de grandes dimensiones, podrían dar lugar a un aumento de la exposición, especialmente en entornos profesionales.

Asistencia sanitaria

En el ámbito sanitario, las aplicaciones de los CEM tienden a evolucionar hacia métodos más precisos y cada vez más potentes, que a menudo utilizan frecuencias más altas, haces focalizados o potencias (localizadas) más elevadas. Entre los nuevos avances en las herramientas de diagnóstico se incluyen la obtención de imágenes de partículas magnéticas (5-50 kHz) (Billings et al., 2021) —que podría aumentar significativamente la exposición de las personas que trabajan en el ámbito sanitario—, el radar para la obtención de imágenes superficiales (1-60 GHz) (de Waard-Schaltx et al., 2015) y la vigilancia de signos vitales (hasta 120 GHz) (Cardillo y Caddemi, 2020), así como las frecuencias de terahercios para la obtención de imágenes, la espectroscopia y el tratamiento (Amini *et al*., 2021). Además, los nuevos tratamientos cosméticos que utilizan campos electromagnéticos pulsados de baja frecuencia (15 Hz) o radiofrecuencia (27 MHz-5,8 GHz) también podrían suponer un riesgo para quienes trabajan en el ámbito sanitario (Stam, 2022).

[6] Los bucles de carga transfieren energía de forma inalámbrica a través de la inducción electromagnética. Este método también se aplica ampliamente en aparatos domésticos como cepillos de dientes eléctricos y cargadores inalámbricos para teléfonos inteligentes.

Seguridad

Las frecuencias de terahercios y ondas milimétricas también se utilizan en aplicaciones de seguridad y escaneado, como los escáneres de cuerpo completo en los aeropuertos, los escáneres postales y los ensayos no destructivos. Estas aplicaciones pueden diferir significativamente en intensidad: mientras que los niveles de campo en los escáneres de seguridad se limitan a intensidades por debajo de los límites de exposición debido a la exposición de las personas en general, las aplicaciones médicas e industriales pueden utilizar intensidades más elevadas y deben ser utilizadas por personas bien formadas.

Implicaciones de los CEM para la seguridad y salud en el trabajo

Efectos adversos para la salud y regulación y legislación de la exposición a los CEM

La investigación sobre los efectos en la salud de los CEM ha sido amplia, pero las directrices de exposición se centran principalmente en los efectos agudos y a corto plazo. Estos efectos dependen de la frecuencia de los CEM, su intensidad y la duración de la exposición. Por ejemplo, los efectos de la exposición a CEM de baja frecuencia más allá de los límites de exposición en materia de seguridad y la salud en el trabajo incluyen la percepción de la carga eléctrica superficial, la estimulación directa del tejido nervioso y muscular y la inducción de fosfenos retinianos (es decir, destellos de luz falsos). A frecuencias más altas (100 kHz-300 GHz, figura 1), los efectos de la estimulación nerviosa y los cambios en la permeabilidad de las membranas celulares (a niveles de exposición muy elevados) disminuyen, produciéndose posibles aumentos de la temperatura local y del núcleo corporal que inducen los denominados efectos térmicos. Además, se sabe que los CEM también pueden producir efectos indirectos que pueden causar riesgos para la seguridad, como corrientes de contacto, descargas de chispas e interferencias electromagnéticas con implantes médicos o el calentamiento de estos.

Todos estos efectos se entienden bien y constituyen la base de las actuales directrices de exposición establecidas por organismos internacionales, como la Comisión Internacional sobre Protección frente a Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), que ha recopilado las pruebas científicas de los efectos adversos para la salud debidos a la exposición a CEM en tres publicaciones: una para los campos magnéticos estáticos (ICNIRP, 2009), una segunda para la gama de baja frecuencia (es decir, de 1 Hz a 10 MHz) (ICNIRP, 2010), en la que los campos magnéticos y eléctricos deben tratarse por separado, ya que no están acoplados en un único campo electromagnético como ocurre en el campo lejano, puesto que las personas trabajadoras operan fuentes de CEM que en su mayoría aún no están en el campo lejano, y otra para la gama entre 100 kHz y 300 GHz (ICNIRP, 2020). A partir de estas pruebas científicas, la ICNIRP ha establecido límites de exposición conocidos como restricciones básicas y niveles de referencia. Los niveles de referencia se derivan de las restricciones básicas y ofrecen niveles de protección equivalentes, pero son mucho más fáciles de evaluar en los lugares de trabajo. Cabe tener en cuenta que los límites de exposición se definen por frecuencia (banda), y la ICNIRP define un método de ponderación para la exposición simultánea de múltiples fuentes en una ubicación determinada en la misma banda de frecuencia u otras bandas. Para tener en cuenta la incertidumbre científica (incluida la variabilidad en la fisiología térmica de la población y en los niveles de actividad física y las condiciones ambientales), se han aplicado en primer lugar factores de reducción adicionales a las restricciones básicas, que son (cinco veces) menores para la exposición ocupacional que para las personas en general, ya que se considera que estas últimas son más variables en cuanto a edad y estado de salud y no son conscientes o no pueden controlar los riesgos potenciales (ICNIRP, 2020). Se considera que el cumplimiento de los niveles de referencia o las restricciones básicas de la ICNIRP es suficiente para proteger frente a los efectos adversos para la salud establecidos.

Además, las orientaciones y la legislación de la UE sobre la exposición a los CEM se basan en las directrices de la ICNIRP y consisten en la Recomendación 1999/519/CE del Consejo Europeo de 1999 sobre la exposición de las personas en general a los CEM y la Directiva 2013/35/UE de 2013 sobre la exposición ocupacional, que se ha aplicado en todos los Estados miembros desde 2017 con algunas variaciones nacionales.

Varios estudios (por ejemplo, Rijs y Stam, 2019) han explorado los posibles vínculos entre la exposición prolongada a los CEM y diversos problemas de salud, como el cáncer, los problemas reproductivos, los retrasos en el desarrollo y los trastornos neurodegenerativos. Sin embargo, a pesar de las exhaustivas investigaciones, las pruebas científicas siguen sin ser concluyentes, ya que algunos estudios indican una asociación, pero no relaciones causales científicas, como respuestas dosis-efecto, mientras que otros no encuentran ninguna relación significativa (ICNIRP, 2020).

Exposición a los CEM en el lugar de trabajo

La CE ha proporcionado amplia información para ayudar al empresariado a comprender lo que debe hacer para cumplir la Directiva 2013/35/UE en tres guías prácticas no vinculantes (CE, 2015a; 2015b; 2015c), centradas en entornos de trabajo con CEM potencialmente de alta intensidad. Además, existen varias matrices de fuentes y de exposición laboral como referencia (Vila et al., 2017; Migault *et al.*, 2019). Sin embargo, los nuevos avances en las aplicaciones de los CEM descritos anteriormente podrían dar lugar a una exposición adicional, mayor o modificada a los CEM en entornos profesionales, tal y como se describe a continuación.

- La densificación de la red de telefonía móvil (es decir, más antenas de estaciones de base por superficie) está dando lugar a un número creciente de personas que trabajan más cerca de las antenas de telecomunicaciones que antes, en particular cuando se implantan estaciones base de células pequeñas. Esto es cierto en general (por ejemplo, en el caso de las personas que trabajan en el ámbito de los techos y la electricidad), pero más concretamente en el caso de los lugares de trabajo con sus propias redes inalámbricas (es decir, redes privadas/empresariales de telefonía móvil, wifi o sensores), especialmente cuando la cantidad de dispositivos y sensores inalámbricos (personales) está aumentando en estos lugares de trabajo. Los sensores corporales (por ejemplo, para controlar la salud personal o la exposición), en particular, podrían aumentar la exposición a los campos electromagnéticos, aunque de forma localizada (es decir, limitada a la zona del cuerpo en la que se aplica el sensor). Se espera que estas innovaciones tecnológicas sean generalizadas y no estén vinculadas a un sector específico.
- La creciente presencia de sistemas TIE (a gran escala) podría aumentar la exposición a CEM en frecuencias dependientes de la tecnología (véase la sección 3) en los sectores del transporte y la logística (por ejemplo, la conducción de autobuses y camiones). Esto también se aplica a los lugares de trabajo en los que las herramientas personales y los robots/VANT se cargan de forma inalámbrica en plataformas similares a las utilizadas para los teléfonos móviles, pero de mayor tamaño, en lugar de utilizar la carga por contacto.
- La electrificación podría aumentar la exposición a campos magnéticos de baja frecuencia (procedentes de líneas eléctricas de alta tensión, inversores y procesos de calentamiento industrial, como el calentamiento por inducción) (CCRSME, 2023 *ter*).
- Dado que la cantidad de solicitudes de CEM en el sector médico está aumentando, un mayor número de personal médico (incluido el personal no técnico) podría estar expuesto a los CEM en una amplia gama de frecuencias (Stam y Yamaguchi-Sekino, 2017; Turuban, 2023).
- El uso de frecuencias cada vez más altas (no solo en redes de telefonía móvil, sino también en aplicaciones médicas y de escaneado de seguridad) podría dar lugar a un aumento de las exposiciones localizadas, pero superficiales, cuyos riesgos aún no están claros.

Prevención de los riesgos en materia de SST relacionados con los CEM

De conformidad con la Directiva 2013/35/UE de la UE, el empresariado está obligado a evaluar todos los riesgos debidos a las exposiciones a los campos electromagnéticos en el lugar de trabajo y a establecer medidas de prevención adecuadas. En particular, debe garantizar el cumplimiento de los niveles límite de la Directiva. En primer lugar, esto se hace sobre la base de información de fácil acceso: especificaciones compartidas por el fabricante (por ejemplo, si la aplicación específica cumple los requisitos de la legislación pertinente de la UE sobre productos que pueden establecer niveles de seguridad más estrictos que los previstos en la Directiva 2013/35/UE), matrices de fuente o de exposición laboral (Vila *et al.*, 2017; Migault et al., 2019), estudios de revisión o guías prácticas publicadas por la UE, las instituciones nacionales y los organismos de normalización. Por ejemplo, los documentos (CE, 2015 *bis*; 2015 *ter*) contienen listas de equipos y lugares de trabajo que

potencialmente requieren **evaluaciones de riesgos específicas**. También ofrecen orientación sobre la necesidad de evaluar los riesgos de los CEM para las personas trabajadoras que corren un riesgo especial, como los que llevan productos sanitarios activos, como marcapasos (Modenese y Gobba, 2021). Sin embargo, es posible que esta información aún no sea suficiente para evaluar si se cumplirán los valores límite de exposición para las nuevas aplicaciones de CEM emergentes y los riesgos asociados para la salud y la seguridad en el trabajo. En ese caso, deben realizarse mediciones *in situ* o cálculos dosimétricos y compararse con los límites legales, teniendo en cuenta todas las incertidumbres inherentes a ellos.

Si se superan los niveles límite, deben adoptarse medidas de protección y prevención [pueden encontrarse ejemplos en (CE, 2015 *bis*; 2015 *ter*)]. Dado que la intensidad de los CEM disminuye rápidamente con una distancia cada vez mayor de la fuente, la medida de reducción de la exposición más eficaz es aumentar la distancia entre la fuente y la persona. Esto puede lograrse mediante medidas técnicas y organizativas, como barreras, señalización e instrucciones de trabajo. Además, el blindaje es eficaz para todas las formas de CEM, excepto los campos magnéticos de baja frecuencia. La información sobre la reducción de la exposición a los CEM también se facilita en las orientaciones de la CE (CE, 2015 *bis*), incluidas las medidas de diseño de las estaciones de trabajo y las disposiciones relativas a los equipos y métodos de trabajo. Por ejemplo, las bobinas, los transformadores y las plataformas de carga inalámbrica deben ser seguras por diseño cuando se mantienen a cierta distancia de las estaciones de trabajo. No debería ser posible permanecer justo delante de las antenas transmisoras.

Lagunas de conocimiento, necesidades, prioridades y recomendaciones en relación con los CEM y la SST

Investigación científica

Existe una falta general de estudios sobre los efectos para la salud y la intensidad de exposición de los CEM en:

1. las frecuencias utilizadas en tecnologías emergentes para las comunicaciones móviles (es decir, entre 6 y 300 GHz);
2. las frecuencias intermedias utilizadas en la transferencia inalámbrica de energía;
3. las (sub)frecuencias THz utilizadas en nuevas tecnologías de obtención de imágenes y escaneado (y su uso previsto con 6G). Las mayores lagunas en la investigación se refieren a:
    a. los niveles de exposición, especialmente en ocupaciones que utilizan equipos que generan campos magnéticos, eléctricos o electromagnéticos potencialmente fuertes (Turuban, 2023);
    b. los posibles efectos sobre la salud (debido a los posibles mecanismos de interacción biológica) (Jeschke, 2022);
    c. la exposición acumulada a largo plazo a CEM en entornos de trabajo (Hansson Mild, 2023); y
    d. la forma más adecuada de medir la exposición más relevante (Turuban, 2023).

Además, los efectos sobre la salud y los efectos sensoriales debidos a la exposición a campos electromagnéticos pueden variar significativamente entre las personas. La exposición a los campos electromagnéticos está influenciada por diversos factores personales y ambientales, entre los que se incluyen:

- las características personales: anatomía, características corporales, incluidos implantes o pírsines y uso de medicación);
- la postura en el trabajo: la posición y el movimiento del cuerpo durante el trabajo;
- el entorno de trabajo:
    - los materiales de construcción: el hormigón puede atenuar y proteger parcialmente los campos electromagnéticos de radiofrecuencia a través de mallas de hierro, mientras que la madera requiere el uso de apantallamiento;

- el uso de herramientas: el manejo o uso de herramientas (Jeschke, 2023) puede afectar los niveles de exposición.

Esta variabilidad tanto para cada persona como entre ellas induce una incertidumbre sustancial en los estudios actuales de evaluación de la exposición y en las matrices de exposición que utilizan estos datos (Turuban, 2023).

Por lo tanto, se requiere diseñar estudios que utilicen escenarios realistas de exposición en el lugar de trabajo (por ejemplo, exposiciones máximas elevadas seguidas de períodos sin exposición (Hansson Mild, 2023) o exposiciones cercanas a los niveles límite para duraciones de ocho horas o más (Jeschke, 2022) o que recopilen datos descriptivos detallados sobre:

(a) los criterios ocupacionales típicos, como la anatomía de la persona, las posiciones y posturas de trabajo, la actividad física, los entornos hostiles y el manejo de herramientas, en particular aquellas que emiten campos electromagnéticos (Jeschke, 2022);

(b) las características de emisión de CEM (por ejemplo, frecuencia y modulación de las fuentes profesionales (Jeschke, 2022);

(c) las posibles exposiciones a lo largo de la vida laboral (Hansson Mild, 2023); y

(d) los efectos sobre la salud distintos de los ya conocidos (por ejemplo, debido a los efectos térmicos de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia) (Jeschke, 2022).

Estos tipos de estudios mejorarían significativamente la comprensión científica de los niveles y duraciones de exposición a los CEM en toda la diversidad de entornos profesionales y podrían utilizarse como punto de partida más preciso para los estudios epidemiológicos sobre los efectos para la salud debidos a la exposición a los campos electromagnéticos, que por el momento apenas tienen en cuenta la exposición ocupacional. Sin embargo, lo que se requiere son datos individuales a largo plazo sobre los niveles de exposición ocupacional en combinación con otras exposiciones ambientales/profesionales (pertinentes) (por ejemplo, a través de redes de sensores del IdC), para buscar cofundadores o determinantes (Stam y Rijs, 2019; Hansson Mild *et al.*, 2023). Lamentablemente, todavía no se dispone (menudo no lo suficiente) de dispositivos de medición adecuados y de bajo coste para obtener estos datos, que deberán desarrollarse y distribuirse especialmente entre las personas expuestas y muy expuestas.

Política de la UE

Dado que la ICNIRP publicó nuevas directrices en 2020 a las que ya se refieren varias normas técnicas (por ejemplo, IEC 62232: 2023 e IEC TR 63377: 2022) y que la Directiva 2013/35/UE sigue basándose en las directrices de 1998, 2009 y 2010, la situación jurídica se ha vuelto difícil. Por lo tanto, el Comité Científico de los Riesgos Sanitarios, Medioambientales y Emergentes (CCRSME) recientemente emitió un dictamen favorable sobre la necesidad de una revisión técnica de los anexos de la Recomendación 1999/519/CE del Consejo y la Directiva 2013/35/UE en lo que respecta a los campos electromagnéticos de radiofrecuencia (100 kHz a 300 GHz) (CCRSME, 2023a). De hecho, en comparación con las directrices de 1998, las directrices de 2020 también contienen adaptaciones pertinentes para la exposición a fuentes emergentes de campos electromagnéticos, como las telecomunicaciones 5G, basadas en exposiciones breves y localizadas a frecuencias más altas (hasta 300 GHz). Es evidente que la introducción de nuevas tecnologías de CEM está aumentando la complejidad de la evaluación de la exposición a CEM en el lugar de trabajo, lo que requiere un conocimiento cada vez más detallado de los métodos de medición y modelización por parte de las personas que tienen funciones de salud, seguridad y medio ambiente (Jeschke, 2022; Stam, 2022).

Por lo tanto, las consideraciones prácticas pertinentes para la evaluación de la exposición a los CEM en el lugar de trabajo, en relación con la duración de la exposición durante las horas de trabajo a lo largo de décadas, son esenciales para una práctica fiable de evaluación de riesgos en materia de SST (Jeschke *et al.*, 2022). Esas consideraciones aún deben desarrollarse, junto con los dispositivos de medición adecuados, y podrían abordarse en versiones actualizadas de la documentación de la CE (CE, 2015a; 2015b; 2015c) o incluirse en las normas técnicas pertinentes.

Por último, es importante señalar que, aunque la ICNIRP (2020) destaca la importancia de la capacidad sensorial y conductual de las personas trabajadoras para ser conscientes de los posibles riesgos de los campos electromagnéticos de radiofrecuencia y aplicar medidas adecuadas de atenuación de daños, Jeschke *et al*. (2022) señalan acertadamente que la Directiva marco de la UE de 1989

(89/391/CEE) da prioridad a las medidas de protección técnicas y organizativas colectivas sobre las medidas de protección personales (individuales). Sin embargo, en materia de seguridad y salud en el trabajo, es obligatorio realizar evaluaciones de riesgos (individuales) para las personas que corren un riesgo especial. Por lo tanto, se necesitan directrices adecuadas que podrían extenderse fácilmente a todas las personas trabajadoras.

Empresariado, personas trabajadoras y personal experto en materia de seguridad y salud en el trabajo

A pesar de la disponibilidad de matrices de exposición y guías prácticas sobre la exposición a CEM en entornos profesionales (incluidas las medidas de reducción de la exposición), el conocimiento de las personas trabajadoras sobre las fuentes de CEM profesionales y las exposiciones es típicamente bajo (Turuban, 2023). Además, es posible que las personas trabajadoras no los perciban como peligrosos y, por lo tanto, no presten la atención necesaria a la prevención, e incluso puedan percibir las medidas de prevención como un inconveniente (Stege, 2022). Con el fin de informar de manera más eficaz al empresariado, el personal y el personal experto en materia de SST, el empresariado podría proporcionar sensores que midan la exposición a los CEM (Bhatt *et al*., 2022) para que los lleven las personas o se instalen en entornos con CEM de alta intensidad. Estos dispositivos portátiles proporcionarán alertas tempranas, así como los datos necesarios para realizar estudios científicos sobre la exposición ocupacional a los CEM y sus posibles efectos sobre la salud (véase el apartado 5.1). Entre los grupos destinatarios específicos para la supervisión con sensores ponibles se incluyen los miembros del personal que utilizan activamente fuentes de CEM (por ejemplo, personas que trabajan en el ámbito de la fisioterapia y la seguridad) o los que trabajan cerca de ellas, como en el ámbito de la electricidad. Más importante aún, incluye al personal que puede acercarse sin saberlo a fuentes activas de CEM, sin ser consciente de los riesgos potenciales, como el personal de enfermería o de mantenimiento y limpieza. Este último grupo está cobrando cada vez más importancia con la introducción de redes 5G privadas y sistemas TIE.

Aunque las mediciones *in situ* se utilizan ampliamente en la evaluación de la SST en relación con los CEM, si hay motivos para suponer que se superan los niveles límite, es necesario realizar simulaciones y determinaciones numéricas para determinar el cumplimiento de los límites de exposición, lo que ha resultado ser muy difícil para el personal de la seguridad y la salud en el trabajo debido a los costes que conlleva y a los conocimientos especializados que se requieren (Jeschke, 2022). Por lo tanto, existe una demanda de normas generales que permiten un cálculo rápido para garantizar el cumplimiento de los límites. Varios países ya han elaborado dichas directrices; véase, por ejemplo, Bolte y Pruppers (2006).

Observaciones finales

Este documento ofrece una visión general completa de las implicaciones de las aplicaciones emergentes de los CEM en la SST, destacando la omnipresencia de los CEM en los entornos laborales modernos debido a los avances tecnológicos que los convierten en factores clave de la digitalización del trabajo y la Industria 5.0 (incluida la automatización avanzada, la robótica, la virtualización, el trabajo a distancia, las salas de control, etc.).

La evaluación de los riesgos de exposición a los CEM es muy compleja debido a la diversidad de fuentes en términos de frecuencia, intensidad y uso, especialmente en entornos profesionales, así como a la variedad de los correspondientes efectos adversos para la salud. Además, aunque se comprenden bien los efectos agudos de la exposición a CEM de alto nivel en las frecuencias utilizadas actualmente, siguen existiendo controversias y lagunas en el conocimiento de los efectos a largo plazo de las exposiciones de bajo nivel y el uso futuro de frecuencias cada vez más elevadas. Por lo tanto, las normas reglamentarias y las directrices (prácticas) destinadas a proteger a las personas trabajadoras deben actualizarse continuamente, basándose en investigaciones actualizadas. Para ello, se recomienda encarecidamente realizar un seguimiento a largo plazo de los niveles de exposición a los CEM en el lugar de trabajo, en las bandas de frecuencia pertinentes, utilizando sensores tanto fijos como ponibles y en combinación con parámetros de salud de las personas trabajadoras.

En resumen, se requiere un enfoque multidisciplinar para la evaluación de la exposición a los CEM y la prevención de riesgos, que incluya investigaciones específicas para cada ocupación, la adaptación continua de las políticas y una comunicación eficaz entre las partes interesadas en la SST, a fin de

garantizar la salud y la seguridad de las personas trabajadoras en un entorno cada vez más conectado e impulsado por la tecnología inalámbrica.

Agradecimientos

Agradecemos a Rianne Stam (Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de los Países Bajos, RIVM), Stefania Marassi (Derecho, THUAS) y Emanuelle Brun y Annick Starren (EU-OSHA) su revisión crítica y sus fructíferos debates.

Referencias

Amini, T., Jahangiri, F., Ameri, Z., & Hemmatian, M. A. (2021). *A review of feasible applications of THz waves in medical diagnostics and treatments* (Una revisión de las posibles aplicaciones de las ondas THz en diagnósticos y tratamientos médicos). *Journal of Lasers in Medical Sciences*, *12*, e92.

Bhatt CR, Henderson S, Brzozek C, Benke G. (2022) *Instruments to measure environmental and personal radiofrequency-electromagnetic field exposures: An update* (Instrumentos para medir la exposición a campos electromagnéticos de radiofrecuencia ambientales y personales: una actualización). *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 45(3), 687-704. https://link.springer.com/article/10.1007/s13246-022-01146-y

Bolte, J.F.B. & Pruppers, M.J.M., 2006. *Electromagnetic fields in the working environment* (Campos electromagnéticos en el entorno de trabajo) (junio de 2006). *Informe del SZW-RIVM n.º 610015001*, Ministerio de Asuntos Sociales y Empleo (SZW) / Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM). https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/610015001.pdf

Billings, C., Langley, M., Warrington, G., Mashali, F. & Johnson, J. A. (2021). *Magnetic particle imaging: Current and future applications, magnetic nanoparticle synthesis methods and safety measures* (Imágenes de partículas magnéticas: aplicaciones actuales y futuras, métodos de síntesis de nanopartículas magnéticas y medidas de seguridad). *International Journal of Molecular Sciences, 22*.

Cardillo, E., & Caddemi, A. (2020). *A review on biomedical MIMO radars for vital sign detection and human localization* (Una revisión sobre radares MIMO biomédicos para la detección de signos vitales y la localización humana). *Electronics, 9(9)*, artículo 9.

De Waard-Schalkx, I., Stam, R., van der Schaaf, M. & Bijwaard, H. (2015). *Recent developments in medical techniques involving ionising or non-ionising radiation: Update 2014* (Avances recientes en técnicas médicas con radiación ionizante o no ionizante: actualización de 2014). *Informe del RIVM 2014-0070*, Bilthoven, Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente.

EU-OSHA — Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (2023). *Policy brief: Smart digital monitoring systems for occupational safety and health: opportunities and challenges.* (Publicación — Sistemas digitales inteligentes de supervisión de la seguridad y la salud en el trabajo: oportunidades y retos). https://osha.europa.eu/en/publications/smart-digital-monitoring-systems-occupational-safety-and-health-opportunities-and-challenges.

Comisión Europea (CE). (2021). *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones — Marco estratégico de la UE en materia de salud y seguridad en el trabajo 2021-2027 — La seguridad y la salud en el trabajo en un mundo laboral en constante transformación.* COM(2021) 323 final. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52021DC0323

Comisión Europea (CE), Dirección General de Empleo, Asuntos Sociales e Inclusión. (2015 *bis*). *Guía no vinculante de buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2013/35/UE sobre campos electromagnéticos. Volumen 1, Guía práctica.* Bruselas, Bélgica.

Comisión Europea (CE), Dirección General de Empleo, Asuntos Sociales e Inclusión. (2015 *ter*). *Guía no vinculante de buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2013/35/UE sobre campos electromagnéticos. Volumen 2, Estudios de caso.* Bruselas, Bélgica.

Comisión Europea (CE), Dirección General de Empleo, Asuntos Sociales e Inclusión. (2015 *quater*). *Guía no vinculante de buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2013/35/UE sobre campos electromagnéticos. Volumen 3, Guía para las pymes.* Bruselas, Bélgica.

Comisión Europea (CE) (2022). *Industry 5.0: A Transformative Vision for Europe* (Industria 5.0: una visión transformadora para Europa). — Publicación n.º 3 del Grupo de Expertos sobre el Impacto Económico y Social de la Investigación y la Innovación (ESIR). Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, ISBN 978-92-76-43352-1.

Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI). (2019). *ETSI TR 103 493 V1.1.1.: System Reference document (SRdoc); Wireless Power Transmission (WPT) systems operating below 30 MHz* [Documento de referencia del sistema (SRdoc); sistemas de transferencia inalámbrica de energía (TIE) que operan por debajo de 30 MHz]. Sophia Antipolis Cedex, Francia.

Hansson Mild K, Mattsson MO, Jeschke P, Israel M, Ivanova M, & Shalamanova T. (2023). *Occupational exposure to electromagnetic fields–Different from general public exposure and laboratory studies* (Exposición ocupacional a campos electromagnéticos: diferente de la exposición del público en general y de los estudios de laboratorio). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 20(16), 6552.

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). (2020). *Artículos del Reglamento de Radiocomunicaciones: edición de 2020.*

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). (2021). *Executive report ITU regional assessment for Europe on EMF exposure limits and risk communication challenges* (Informe ejecutivo: Evaluación regional de la UIT para Europa sobre los límites de exposición a los campos electromagnéticos y los desafíos de la comunicación de riesgos).

Jeschke, P., Alteköster, C., Hansson Mild, K., Israel, M., Ivanova, M., Schiessl, K., Shalamanova, T., Soyka, F., Stam, R., & Wilén, J. (2022). *Protection of workers exposed to radiofrequency electromagnetic fields: A perspective on open questions in the context of the new ICNIRP 2020 guidelines* (Protección de las personas trabajadoras expuestas a campos electromagnéticos de radiofrecuencia: una perspectiva sobre cuestiones abiertas en el contexto de las nuevas directrices de la ICNIRP 2020). *Frontiers in Public Health*, 10.

Migault, L., Bowman, J. D., Kromhout, H., Figuerola, J., Baldi, I., Bouvier, G., Turner, M. C., Cardis, E., & Vila, J. (2019). *Development of a job-exposure matrix for assessment of occupational exposure to high-frequency electromagnetic fields (3 kHz–300 GHz)* (Desarrollo de una matriz de exposición ocupacional para la evaluación de la exposición ocupacional a campos electromagnéticos de alta frecuencia (3 kHz-300 GHz). *Annals of Work Exposures and Health*, 63(9), 1013-1028.

Modenese, A., & Gobba, F. (2021). *Occupational exposure to electromagnetic fields and health surveillance according to the European Directive 2013/35/EU* (Exposición ocupacional a campos electromagnéticos y vigilancia de la salud de conformidad con la Directiva Europea 2013/35/UE). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1730.

Rijs KJ & Stam R. (2019). Onderzoek naar mogelijke langetermijneffecten van elektromagnetische velden op de gezondheid van werknemers – update 2019 (nvestigación sobre los posibles efectos a largo plazo de los campos electromagnéticos en la salud de los trabajadores: actualización de 2019). *Informe del RIVM* 2019-0010. Bilthoven: RIVM.

Comité Científico de los Riesgos Sanitarios, Medioambientales y Emergentes (CCRSME). (2023a). *Opinion on the need of a revision of the annexes in the Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to radiofrequency (100kHz - 300GHz)* [Dictamen sobre la necesidad de revisar los anexos de la Recomendación 1999/519/CE del Consejo y de la Directiva 2013/35/UE, a la vista de las últimas pruebas científicas disponibles en relación con la radiofrecuencia (100 kHz-300 GHz)].

Comité Científico de los Riesgos Sanitarios, Medioambientales y Emergentes (CCRSME). (2023b). *Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF): 14 Update with regard to frequencies between 1Hz and 100 kHz.* [Posibles efectos sobre la salud de la exposición a campos electromagnéticos (CEM): 14 Actualización respecto a las frecuencias entre 1 Hz y 100 kHz].

Stam, R., & Yamaguchi-Sekino, S. (2018). *Occupational exposure to electromagnetic fields from medical sources* (Exposición ocupacional a campos electromagnéticos de fuentes médicas). *Industrial Health*, *56*(2), 96-105. https://doi.org/10/g8hwgs

Stam, R. (2021). *Occupational exposure to radiofrequency electromagnetic fields* (Exposición ocupacional a campos electromagnéticos de radiofrecuencia). *Industrial Health*, *60*(3), 201-215.

Stam, R. (2022) Bronnen van blootstelling van werknemers aan elektromagnetische velden: Nieuwe ontwikkelingen (Fuentes de exposición de las personas trabajadoras a campos electromagnéticos: nuevos avances). *RIVM-briefrapport 2022-0109*. Bilthoven: RIVM.

Stege, T. A. M., Bolte, J. F. B., Claassen, L., & Timmermans, D. R. M. (2020). *Electromagnetic field exposure in power plants: A qualitative assessment of work safety perceptions among employees* (Exposición a campos electromagnéticos en centrales eléctricas: una evaluación cualitativa de la percepción de la seguridad laboral entre las personas empleadas). *Journal of Risk Research, 23*(12), 1650-1660.

Stege, T. A. M. (2022). *Development of risk communication tools for occupational exposures* (Desarrollo de herramientas de comunicación de riesgos para exposiciones ocupacionales). (Tesis doctoral) Universidad Libre de Ámsterdam (VU) e Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente de los Países Bajos (RIVM), Países Bajos, asesores D.R.M. Timmermans, L. Claassen, J.F.B. Bolte, ISBN 978-94-6421-796-4. Disponible en: https://research.vu.nl/en/publications/development-of-risk-communication-tools-for-occupational-exposure

Turuban, M., Kromhout, H., Vila, J., Vallbona-Vistós, M., Baldi, I., & Turner, M. C. (2023). *Personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields in various occupations in Spain and France* (Exposición personal a campos electromagnéticos de radiofrecuencia en diversas profesiones en España y Francia). *Environment International, 180*, 108156.

Vila, J., Bowman, J. D., Figuerola, J., Moriña, D., Kincl, L., Richardson, L., & Cardis, E. (2017). *Development of a source-exposure matrix for occupational exposure assessment of electromagnetic fields in the INTEROCC study* (Desarrollo de una matriz de exposición-fuente para la evaluación de la exposición ocupacional a campos electromagnéticos en el estudio INTEROCC). *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 27*(4), 398-408.

Autores: Sam Aerts, John Bolte.

Grupo de investigación sobre sistemas de sensores inteligentes, Facultad de Tecnología, Innovación y Sociedad, Universidad de Ciencias Aplicadas de La Haya (THUAS), Países Bajos.

Dirección del proyecto: Annick Starren, Emmanuelle Brun, Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA).

El presente documento de reflexión se ha elaborado por encargo de la EU-OSHA. Su contenido, incluidas las opiniones o conclusiones expresadas, es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja necesariamente las opiniones de la EU-OSHA.

Ni la EU-OSHA ni ninguna persona que actúe en su nombre son responsables del uso que pueda hacerse de la información presentada a continuación.

© Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 2026

Reproducción autorizada siempre que se mencione la fuente.

Para utilizar o reproducir fotos u otro material que no esté en el marco de los derechos de autor de la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo (EU-OSHA), debe solicitarse permiso directamente a los titulares de los derechos de autor.