



¿Absorbe nuestro cuerpo las ondas electromagnéticas?

Enrique Arribas Garde^a, Josefina Barrera Kalhil^b, Augusto Beléndez Vázquez^c, Jesús González Rubio^d y Alberto Najera López^d

^aDepartamento de Física Aplicada, Escuela Superior de Ingeniería Informática, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España

^bDepartamento de Física y Enseñanza de las Ciencias, Universidade do Estado do Amazonas, Escola Normal Superior, Manaus, AM, Brasil

^cDepartamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante e Instituto Universitario de Física Aplicada a la Ciencia y Tecnología, Alicante, España

^dDepartamento de Ciencias Médicas, Facultad de Medicina, Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España.

ARTICLE INFO

Received: 21 Sept 2013

Accepted: 1 Jan 2014

Keywords:

Enseñanza universitaria
Aprendizaje activo
Ondas de radiofrecuencia
Física experimental

E-mail addresses:

enrique.arribas@uclm.es
josefinabk@gmail.com
a.belendez@ua.es
jesus.gonzalez@catastro.minhap.es
alberto.najera@uclm.es

ISSN 2318-1575

© 2014 Institute of Science Education.
All rights reserved

ABSTRACT

Through a process of active learning ("Tell me and I forget, show me and I remember, involve me and I learn") we intend to focus the attention of our technical university students on electromagnetic waves. Due to the proliferation of cell phones, it makes sense to ask whether our body absorbs electromagnetic radiation, or rather whether we are "transparent" to them. We will concentrate on the RF waves and we will develop a laboratory practice because we are convinced that for an active learning is very convenient to measure a physical quantity related to the learning objective. We will measure the exposition using the dosimeter Satimo EME Spy 140 in three different situations: the isolated dosimeter, the dosimeter between two people and the dosimeter surrounded by water bottles. With the results, and taking into account the people SAR (Specific Absorption Rate) and the water SAR, we will be able to obtain the intensity of the reflected and transmitted wave. From the transmitted intensity we will separate the absorbed into the body (or water, as appropriate) the intensity that can reach the dosimeter and therefore be measured. Only 5% of the initial intensity reaches the dosimeter, 88% being reflected. The 7% missing is the intensity absorbed by our body. As the intensity is shielded by 95% if the dosimeter was actually a mobile phone its coverage would be reduced.

Mediante un proceso de aprendizaje activo ("*Dime y lo olvido, enséñame y lo recuerdo, involúcrame y lo aprendo*") pretendemos focalizar la atención de nuestros alumnos de enseñanzas universitarias técnicas sobre las ondas electromagnéticas. Debido a la proliferación de los teléfonos celulares, tiene sentido preguntarnos si nuestro cuerpo absorbe las radiaciones electromagnéticas o, bien si somos "transparentes" a ellas. Nos concentraremos en las ondas de RF y elaboraremos una práctica de laboratorio porque estamos convencidos de que para un aprendizaje activo es muy conveniente medir alguna magnitud física relacionada con el objetivo de aprendizaje. Mediremos la exposición usando el exposímetro Satimo EME Spy 140 en tres situaciones diferentes: el exposímetro aislado, el exposímetro entre dos personas y el exposímetro rodeado por botellas de agua. Con los resultados obtenidos, y mediante el SAR (*Specific Absorption Rate* o Tasa de absorción específica) de las personas y el SAR del agua, seremos capaces de obtener la intensidad de la onda reflejada y transmitida. De la intensidad transmitida separaremos la parte absorbida por el cuerpo (o por el agua, según el caso) de la intensidad que puede alcanzar el exposímetro y, por tanto, ser medida. Sólo el 5% de la intensidad inicial llegará al exposímetro, siendo reflejado el 88%. El 7% que falta es la intensidad absorbida por nuestro cuerpo. Como la intensidad queda apantallada en un 95% si el exposímetro fuera un teléfono móvil su cobertura podría quedar disminuida.

I. INTRODUCCIÓN

Las ecuaciones de Maxwell nos permiten describir de forma muy detallada y precisa las interacciones en las que estén involucradas tanto cargas eléctricas, en reposo o en movimiento, como corrientes eléctricas mediante el uso de campos eléctricos y magnéticos, uniformes, estacionarios o variables con el tiempo. Estas ecuaciones nos permiten abordar la Electricidad y el Magnetismo de una forma unificada, como dos facetas de una fuerza unificada denominada Electromagnetismo. Las ecuaciones de Maxwell nos muestran como los campos eléctricos y magnéticos interactúan entre sí, mediante sus flujos y sus circulaciones o, de forma equivalente, mediante sus divergencias y sus rotacionales. De las cuatro ecuaciones de Maxwell se puede obtener que tanto el campo eléctrico como el magnético tienen un comportamiento que viene perfectamente controlado por una ecuación de onda (Young, Freedman y Roger 2009; Bauer y Westfall 2011; Tipler y Mosca 2010), que es una ecuación diferencial de segundo en derivadas parciales, totalmente análoga a la ecuación de onda que describe las ondas mecánicas generadas en una cuerda elástica con masa sometida a una tensión.

Las ondas electromagnéticas están constituidas por dos campos, uno eléctrico y el otro magnético, ambos variables con el tiempo y con la posición. Estos campos son perpendiculares entre sí y, al mismo tiempo, perpendiculares a la velocidad de propagación, que en general es rectilínea y su dirección y sentido de propagación viene dado por el producto vectorial del campo eléctrico y el campo magnético. Son ondas transversales que se propagan incluso en el vacío, es decir, no necesitan ningún medio elástico como soporte (a diferencia de las ondas mecánicas). Su velocidad de propagación depende de la permitividad eléctrica del medio y de su permeabilidad magnética. En el vacío, o en el aire, su velocidad de propagación constituye un límite superior a la velocidad a la que se pueda transmitir información entre dos puntos y tiene un valor exacto de 299792458 m/s, que se suele aproximar por $3 \cdot 10^8$ m/s.

Los dos campos están en fase y además no son independientes entre sí, en cada punto del espacio el módulo del campo eléctrico es igual al del campo magnético multiplicado por la velocidad de propagación de la onda electromagnética, lo cual no quiere decir que el campo eléctrico es mucho mayor que el magnético, porque estos campos se miden en unidades diferentes por lo que no se puede comparar su módulo. La existencia de las ondas electromagnéticas fue puesta de manifiesto por el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (fallecido a los 36 años) en Kiel entre los años 1885 y 1888, veinte años después de que James Clark Maxwell las predijera a partir de sus famosas ecuaciones. La contribución de Hertz ha permitido el desarrollo de las telecomunicaciones de una manera que probablemente ni él intuyó (Berkson 1981; Hertz 1893).



FIGURA 1. Sello conmemorativo del centenario del fallecimiento de Heinrich Rudolf Hertz, emitido en 1994 por el servicio postal alemán. Se observan las líneas de campo eléctrico y magnético emitidas por un dipolo eléctrico oscilante.

Las ondas electromagnéticas se pueden producir de dos maneras muy diferentes. Acelerando cargas eléctricas o bien cuando hay transiciones entre los estados electrónicos de átomos y moléculas. Las ondas de radio se producen por corrientes eléctricas oscilantes en las antenas de radio y la frecuencia de las ondas emitidas coincide con la frecuencia de

las oscilaciones de estas corrientes. Las cargas aceleradas también producen ondas electromagnéticas, por ejemplo, cuando los electrones se frenan al interactuar con el campo eléctrico de un núcleo atómico se produce una radiación de frenado (también conocida por la palabra alemana Bremsstrahlung).

A pesar de que todas las ondas electromagnéticas viajan a la misma velocidad, la de la luz, pueden tener un gran abanico de longitudes de onda y frecuencias. Estas dos magnitudes no son independientes entre sí, son inversamente proporcionales, siendo su constante de proporcionalidad la velocidad de propagación. Ejemplos de ondas electromagnéticas son: la luz visible, las ondas de radio, las microondas, las ondas del radar, los infrarrojos (que nuestra piel detecta como calor), los rayos X y los rayos gamma, entre otros.

Las ondas de radiofrecuencia cubren un amplio intervalo de frecuencias. Por convenio están comprendidas entre 3 kHz y 300 MHz y se utilizan en las emisiones de radio AM, FM y televisión. Son ampliamente utilizadas en los radiotelescopios de los astrónomos porque pueden pasar a través de nubes de gas o de polvo que no permiten el paso de la luz visible.

Las microondas tienen una frecuencia comprendida entre los 300 MHz y los 300 GHz y son utilizadas para la transmisión de información en los teléfonos inalámbricos y algunas bandas de los móviles, la televisión digital, los radares o los hornos microondas. Mediante Bluetooth podemos conectar diferentes dispositivos de telecomunicaciones inalámbricos. Bluetooth es la norma actual que define un estándar global de comunicación inalámbrica, que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes equipos mediante un enlace por microondas. También usan las microondas las tecnologías Bluetooth y Wifi. Una red inalámbrica permite conectar varios equipos entre sí sin necesidad de cables ni fibras ópticas, lo hace mediante ondas electromagnéticas de frecuencia 2.4 GHz la misma que la mayoría de los teléfonos inalámbricos.

Tanto las ondas de radiofrecuencia como las microondas se suelen generar mediante circuitos oscilantes. Estas ondas son tremendamente útiles, porque pueden atravesar las paredes y por ellos se usan para las comunicaciones mediante teléfonos móviles y teléfonos inalámbricos. También tienen su aplicación en Medicina, porque la resonancia magnética se basa en la interacción entre la materia, campos magnéticos y ondas de radiofrecuencia.

Los teléfonos móviles y las antenas de telefonía trabajan en unas bandas de frecuencia muy específicas, cercanas a los 835 MHz y los 1.9 GHz. Las conexiones inalámbricas lo hacen cerca de los 2.4 GHz y 5.5 GHz. Estas frecuencias caen dentro del rango de las microondas.

Las ondas electromagnéticas se propagan como frentes de onda esféricos desde la antena o el dispositivo que las emite, sin embargo a una distancia considerable de la antena los frentes de onda se comportan como si fueran planos. Todas las ondas electromagnéticas transportan energía que tiene que ver con la energía del campo eléctrico y la energía del campo magnético y que se representa mediante el denominado vector de Poynting, el cual tiene dimensiones de energía por unidad de superficie y por unidad de tiempo, es decir, de intensidad de una onda. La intensidad de una onda es directamente proporcional al campo eléctrico al cuadrado (el cual se mide en V/m).

El concepto de intensidad de una onda necesita ser comprendido. Supongamos que está lloviendo, ¿cómo podemos decir que llueve mucho o poco, cómo medimos la cantidad de lluvia caída? Podríamos decir que ha estado lloviendo una cierta cantidad de tiempo; pero no es suficiente, necesitamos decir cuánta agua ha caído. Pero no es lo mismo que caigan 20 litros en una tarde que en 10 minutos, y no es lo mismo 20 litros en una playa que en un pequeño jardín. Por tanto debemos introducir una magnitud física que nos indique el agua que ha caído en una superficie de 1 metro cuadrado durante 1 segundo. Ese es el concepto clave, la intensidad de una onda que nos proporciona información sobre la energía que transporta dicha onda a lo largo de una frente de ondas de 1 m^2 y durante un segundo. Es la energía por unidad de superficie y por unidad de tiempo, o lo que es lo mismo, es la potencia por unidad de superficie. Coincide con el módulo del vector de Poynting.

Cuando estamos tumbados en la playa notamos calor, esa energía proviene de las reacciones nucleares generadas en el núcleo del Sol y llegan hasta nosotros mediante unas ondas electromagnéticas emitidas en esos procesos nucleares. La radiación procedente del Sol no tiene una única frecuencia, además de la luz visible y de los rayos infrarrojos llegan también los rayos ultravioleta, UV. La energía de la radiación UV es del orden de la energía de activación de muchas reacciones químicas lo que explica los numerosos efectos químicos que producen. La vida en la Tierra es posible gracias

a la capa de ozono, situada en la estratosfera, que filtra la mayor parte de la radiación UV procedente de Sol. Sin embargo, la radiación UV que alcanza la superficie terrestre puede ocasionar cáncer de piel, inhibición del sistema inmunitario, cataratas y envejecimiento prematuro de la piel, sobre todo en las personas que pasan mucho tiempo al aire libre. Por lo tanto debemos protegernos de una exposición excesiva a los rayos UV porque nos pueden producir quemaduras en la piel y queratoconjuntivitis si recibimos esta radiación en gran cantidad, por lo que debemos utilizar filtros solares que la bloqueen y llevar unas gafas de sol con cristales oscuros y con protector de rayos UV de 400 nm, que es la longitud de onda característica de los UV. Es decir, sabemos por muchos años de experiencia que procedente del Sol hay radiaciones electromagnéticas que son perjudiciales si estamos expuestos a ellas durante un tiempo considerable. Y son perjudiciales porque son absorbidas por nuestro organismo.

II. MOTIVACIÓN

Como decía el científico y estadista Benjamin Franklin: “*Dime y lo olvido, enséñame y lo recuerdo, involúcrame y lo aprendo*”. Esta frase nos debería guiar en la mayor parte del proceso de enseñanza/aprendizaje de la Física, en cualquier nivel educativo. Creemos que es necesario que los estudiantes se pongan al frente de este proceso, que asuman un mayor protagonismo, que aprendan a aprender y que los docentes vayamos explorando nuevas estrategias, sobre todo en las disciplinas científicas (Sokoloff y Thornton 1997; Sokoloff, Thornton y Laws 2007). Las clases magistrales son adecuadas para transmitir las principales leyes de la Física, para realizar algunos cálculos meticulosos; pero los alumnos tienen que ser capaces de desarrollar sus propias competencias y habilidades, para que posteriormente sean capaces de desarrollar una actividad, científica o no, al graduarse.

Aprender es más importante que memorizar, por lo que el aprendizaje de manera activa y autónoma implica un cambio del centro de gravedad desde el profesor hacia el alumno. Los estudiantes participan en su propio proceso de aprendizaje más allá de escuchar las clases magistrales o siendo testigos casi pasivos de demostraciones matemáticas o científicas. Los alumnos aprenden haciendo cosas y están más activos en clases en las que ellos pueden participar y establecer conexiones entre los diferentes conceptos científicos que se manejan a lo largo del curso. Es importante resaltar que las competencias se desarrollan cuando se practican, como los músculos, y cuando se siguen procesos colaborativos para obtener soluciones a los problemas planteados.

La motivación de este trabajo podríamos decir que tienes dos fuertes componentes. Primero surge de la necesidad de intentar visibilizar, tanto como sea posible, y medir la intensidad de una onda electromagnética que forma parte de la mayoría de los temarios de la Física en el primer curso de un Grado de Ciencias o de Ingeniería. Para la medida dicha intensidad usaremos un dispositivo experimental (exposímetro) que, lamentablemente, no es fácil de disponer en el equipamiento básico de un laboratorio de Física General debido a su alto precio, unos 10000 dólares (7500 euros, aproximadamente). Estamos convencidos de que para un aprendizaje activo es muy conveniente medir alguna magnitud física relacionada con el objetivo de aprendizaje, expresarla con sus unidades correctas, sus cifras significativas y, llegado el caso, calcular los posibles errores accidentales cometidos. También puede ser interesante realizar un cambio de escala para que los números manejados sean más fácilmente asimilables y transmisibles para un conocimiento general.

Otra fuerte motivación proviene de que debido a la proliferación de los teléfonos celulares, hay una creciente preocupación entre los ciudadanos sobre los posibles efectos de una exposición prolongada a estas ondas: radiofrecuencia y microondas, que a partir de ahora denominaremos genéricamente como ondas de RF. Pero para que una onda tenga efecto sobre nosotros debemos averiguar si nuestro cuerpo es “transparente” para ese tipo de ondas, si son reflejadas en él y, si penetran, deberíamos saber si son absorbidas por nuestros tejidos orgánicos, por lo que producirían calentamiento del tejido en el que han penetrado. Para intentar responde a estas preguntas debemos primeramente medir la intensidad a la que estamos expuestos y posteriormente la que llega al exposímetro cuando nosotros lo bloqueamos con nuestros cuerpos. Hay que distinguir entre exposición y dosis recibida: para poder evaluar los efectos adversos para la salud de las ondas de RF la magnitud importante a medir no es la exposición a las ondas de RF sino la cantidad de ellas que llegan a nuestro organismo para que allí puedan ejercer un efecto térmico o de otro tipo. La exposición implica el contacto con

las ondas de RF, aquellas que nos rodean, las que interaccionan con nosotros, las que están disponibles para penetrar en nuestro organismo; la dosis, sin embargo, es la cantidad de ondas de RF que realmente son absorbidas por el cuerpo. Son conceptos que pueden provocar confusión pero que deben quedar muy claros, sobre todo después de realizar este experimento.

Así pues, nuestro objetivo principal es el diseño de una actividad experimental para poder visualizar y medir las ondas electromagnéticas (concretamente las de RF) y que los alumnos participen en su propio aprendizaje. Pasemos a continuación a detallar este experimento.

III. EXPERIMENTO

Disponemos de un exposímetro SATIMO EME Spy 140 del cual mostramos una foto en la Figura 2. Tiene unas dimensiones de 168.5 mm (altura) x 79 mm (longitud) x 49.7 mm (anchura) y una masa de 410 g. Es decir, es del tamaño de un bote de gel mediano. Sólo tiene un botón, el de encendido, y se puede acceder a sus datos mediante un cable y una conexión micro USB.



FIGURA 2. Exposímetro Satimo EME Spy 140 utilizado en nuestro experimento.

Su principal característica es que es capaz de medir hasta 14 bandas de frecuencias (de 88 MHz a 5.85 GHz) identificando la contribución de cada emisor al campo total, véase la Tabla I. Un teléfono de los denominados inteligentes puede trabajar en las siguientes frecuencias: 2100, 1800, 900, 850 y 700 MHz, es decir, UMTS (Sistema universal de telecomunicaciones móviles o Universal Mobile Telecommunications System), DCS (Sistema celular digital o Digital Cellular System) y GSM (Sistema global para los comunicaciones móviles o Global System for Mobile communications). La gran mayoría de nuestros teléfono móviles son de los denominados multibanda (pueden trabajar en 3 o 4 bandas, dependiendo de la saturación de llamadas, del país o de la zona geográfica en la que nos encontremos).

El dispositivo tiene una autonomía de 20 días, usando pilas recargables como fuente de alimentación. Es capaz de registrar 12540 medidas en periodos de tiempo de entre 4 y 255 segundos. El propio software proporcionado con el aparato es capaz de realizar presentaciones de resultados y cálculos estadísticos, permitiendo la exportación de las medidas a Excel tanto en $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ como en porcentaje, comparando con los estándares de la International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP 2013).

TABLA I. Las 14 bandas de frecuencias que mide el exposímetro Satimo EME Spy 140.

Banda de RF	Rango de Frecuencias (MHz)
FM	88-108
TV3	174-223
TETRA	380-400
TV4&5	470-530
GSM TX (UL)	880-915
GSM RX (DL)	925-960
DCS TX (UL)	1710-1785
DCS RX (DL)	1805-1880
DECT	1880-1900
UMTS TX (UL)	1920-1980
UMTX RX (DL)	2110-2170
WIFI 2G	2400-2500
WII MAX	3400-3800
WIFI 5G	5150-5850

Queremos utilizar el exposímetro Satimo EME Spy 140 para realizar el experimento en las siguientes etapas:

Etapa 1: Durante 5 minutos el exposímetro realiza unas medidas de la intensidad de las ondas electromagnéticas incidentes de radiofrecuencia y microondas en todas sus bandas disponibles. Estas medidas se realizan en una posición fija y cada 5 segundos, es decir, generamos 60 medidas en cada una de las 14 bandas. En la Figura 3 podemos ver el exposímetro en funcionamiento.

Para facilitar la interpretación de los datos (recordemos que estamos diseñando un experimento para alumnos de los primeros cursos de universidad) hemos tomado la siguiente decisión: aunque el exposímetro mide 14 bandas diferentes, vamos a considerar la intensidad total, sumando las 14 bandas. Con lo cual vamos a manejar un único número por cada medida. Con esta convención, la intensidad de esta primera etapa es 0.0226 W/m^2 . El exposímetro trabaja con mucha mayor precisión, pero consideramos que 4 cifras decimales son suficientes para expresar los resultados en W/m^2 .

**FIGURA3.** Exposímetro midiendo las ondas de RF que inciden sobre él.

Etapa 2: Ahora repetimos las mismas medidas de la etapa 1; pero con nuestros cuerpos rodeando totalmente el exposímetro. Hacemos esto porque queremos ver la influencia que tiene nuestra presencia a la hora de medir la intensidad de las ondas de RF. Como no sabemos por dónde inciden las ondas, lo rodeamos por completo. Nos despojamos de todos

los objetos metálicos: monedas, cinturones, bolígrafos y, por supuesto, de teléfonos celulares. En la Figura 4 podemos ver a dos de los autores del trabajo con el exposímetro entre ellos. La intensidad total medida en esta etapa es de 0.0012 W/m^2 .



FIGURA 4. Exposímetro midiendo las ondas de RF que inciden sobre él estando colocado entre dos de los autores del trabajo. El exposímetro no se puede ver al quedar totalmente emparedado.

Etapa 3: En esta etapa repetimos las mismas medidas de la etapa 2; pero con botellas de agua rodeando totalmente el exposímetro en vez de personas. Queremos ver la influencia que tiene el agua a la hora de medir la intensidad de las ondas de RF. Como la densidad del cuerpo humano es ligeramente superior a la del agua queremos comparar estos valores con los obtenidos en la etapa 2. En las Figura 5 y 6 podemos ver la colocación del exposímetro. La intensidad total medida en este caso es de 0.0017 W/m^2 .



FIGURA 5. Exposímetro midiendo las ondas de RF que inciden sobre él estando rodeado por botellas de agua. Vista cenital.



FIGURA 6. Exposímetro midiendo las ondas de RF que inciden sobre él estando rodeado por botellas de agua. Vista frontal, se ha desplazado una de las botellas para verlo mejor.

Estas medidas las vamos a recapitular en la Tabla II en la que también añadimos los máximos legalmente permitidos en zona urbana. En la segunda columna de esta tabla usamos la unidad del Sistema Internacional para la intensidad de una onda (W/m^2). Como los números que manejamos son bastante pequeños hemos añadido una columna en la que expresamos la intensidad en una unidad más adecuada para que los números sean fácilmente manejados por los alumnos (mW/m^2). Algo análogo se hace en el estudio de los circuitos eléctricos cuando la corriente es muy pequeña y se mide en mA en vez de en A.

TABLA II. Exposición total medida en los tres casos estudiados, usando la unidad del Sistema Internacional y otra más conveniente.

Disposición del exposímetro	Intensidad Total (W/m^2)	Intensidad Total (mW/m^2)
Exposímetro	0.0226	22.6
Exposímetro entre dos personas	0.00121	1.21
Exposímetro rodeado de botellas de agua	0.00166	1.66
Máximo Legal en zona urbana	0.1000	100

IV. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez realizadas las medidas vamos a pasar a analizarlas. Lo primero que debemos comentar es que estamos bastante alejados del máximo legal, no llega ni al 25% de lo máximo permitido en la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha en la que realizamos las medidas. En el apartado de Conclusiones comentaremos un poco más sobre este hecho. Estos resultados serían equivalentes a circular por una autovía en la que el máximo permitido fuera 120 km/h y nuestro automóvil la recorriera con una velocidad de unos 27 km/h. Evidentemente ningún hipotético radar de esa autopista nos impondría una multa por exceso de velocidad.

Los alumnos también participan en el proceso de difundir en su entorno la información científica generada. Por ello es realmente importante que aprendan bien estos conceptos y estos resultados para que puedan transmitirlos a sus amigos, a sus familias. Eso permitirá que el conocimiento científico impregne, poco a poco, en nuestra sociedad.

El segundo hecho destacable es que cuando el exposímetro está emparedado entre dos personas la intensidad que mide pasa de 22.6 a 1.21 mW/m^2 , es decir, la intensidad se ve reducida en un factor 18.7, siendo sólo un 5.4% del valor inicial. Nuestro cuerpo bloquea casi el 95% de la radiación incidente. Luego comentaremos algo más sobre este hecho. Si analizamos el tercer dato, podemos ver que el agua reduce la intensidad de las ondas de RF en un factor 13.6 dejando que sólo el 7.3% de la radiación incidente alcance el exposímetro. Podemos visualizar estos resultados en la Figura 7.

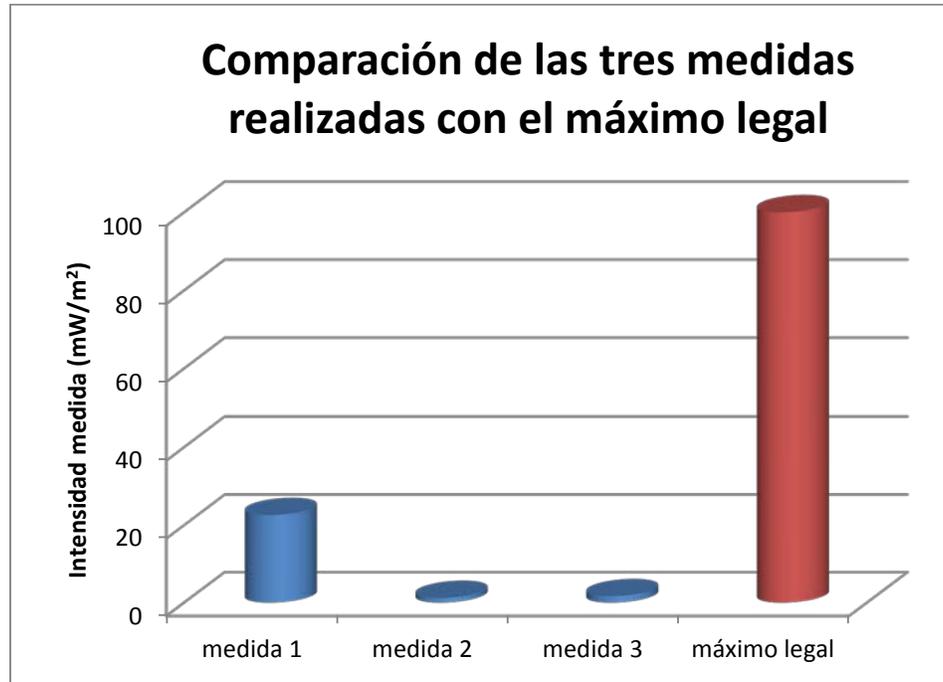


FIGURA 7. Las tres exposiciones medidas comparadas con el máximo legal permitido. La primera corresponde al exposímetro aislado, la segunda es cuando se encuentra entre dos personas y la tercera cuando está rodeado por agua.

Los valores que hemos obtenido para la atenuación producida el cuerpo humano y por el agua, 18.7 y 13.6, son comparables debido que el cuerpo humano es más de un 75% agua. Es lógico, además, que el factor de atenuación del cuerpo humano sea algo mayor, debido a su mayor densidad.

Ahora nos queda una cuestión importante por dilucidar: si al exposímetro sólo llegan 1.21 de los 22.6 mW/m^2 , ¿cuántos de ellos quedan absorbidos por el cuerpo humano? Una respuesta precipitada sería contestar 21.4 que es la intensidad desaparecida. Pero es una buena ocasión para que los alumnos se den cuenta de que las ondas cuando llegan a zona del espacio en la que hay una diferencia de densidad, una frontera entre dos medios, una parte de su intensidad se transmite y la otra se refleja. ¿Podemos averiguar cuánto vale cada una de estas dos contribuciones? Es decir, ¿podemos saber qué parte de la intensidad de una onda de RF se transmite y qué parte se refleja?

Para poder responder a esta pregunta tenemos que usar el SAR (*Specific Absorption Rate* o Tasa de absorción específica) correspondiente. Las ondas de RF son capaces de penetrar en los tejidos orgánicos y les comunican energía debido a las oscilaciones de los átomos que los componen. La profundidad a la que penetran las ondas de RF depende de la frecuencia de la onda y es mayor para frecuencias menores. Esta cantidad de energía absorbida por unidad de masa y de tiempo se denomina SAR y se mide en W/kg . Podemos encontrar bastante información sobre el SAR (Joseph et al. 2010; Joseph et al. 2012; Panagopoulos et al. 2013) y hacer que los alumnos se familiaricen con este nuevo concepto que les será tan útil cuando se traten temas de teléfonos móviles y de ondas de RF. Es adecuado utilizar un valor estándar de $11.5 \mu\text{W}/\text{kg}$ para el SAR de un adulto, que está muy por debajo del que se necesitaría para producir efectos adversos a la salud, fundamentalmente de origen térmico, el cual debería ser por lo menos de $4 \text{ W}/\text{kg}$.

Ahora hay que ponerse manos a la obra y hacer cálculos. Supondremos la radiación es isotrópica y por ello consideramos que alrededor del exposímetro tenemos un cilindro de radio 25 cm y una altura de 20 cm (ligeramente superior a la altura del exposímetro). Ese cilindro es el que corresponde a la materia que las dos personas, entre las cuales está el exposímetro, aportan como apantallamiento de la radiación. El volumen de este cilindro es de 0.039 m^3 , tiene una superficie lateral de 0.31 m^2 y una masa de 41 kg. Si multiplicamos la masa por el SAR obtendremos la potencia absorbida por ese cilindro, el resultado es $470 \mu\text{W}$. Si ahora dividimos por la superficie lateral del cilindro obtenemos la intensidad que es absorbida por este cilindro, 1.5 mW/m^2 .

La intensidad incidente es la del primer experimento, 22.6 mW/m^2 , la que absorbe el cilindro es 1.5 mW/m^2 y el exposímetro detecta 1.21 mW/m^2 al exposímetro. Mediante la ley de conservación de la energía podemos obtener la intensidad reflejada por el cuerpo humano, es decir, la diferencia entre 22.6, 1.5 y 1.21; el resultado es 19.9 mW/m^2 . Por tanto un 88% de la intensidad incidente es reflejado y un 12 % es transmitido. De ese 12% que se transmite, llega un 44% al exposímetro, redondeando, un 5% de la intensidad total de la onda es medida por el detector. Sólo el 7% de la intensidad a la que estamos expuestos es absorbida por nuestro cuerpo. Estos resultados lo podemos visualizar en la Figura 8, mostrando los porcentajes aquí comentados.

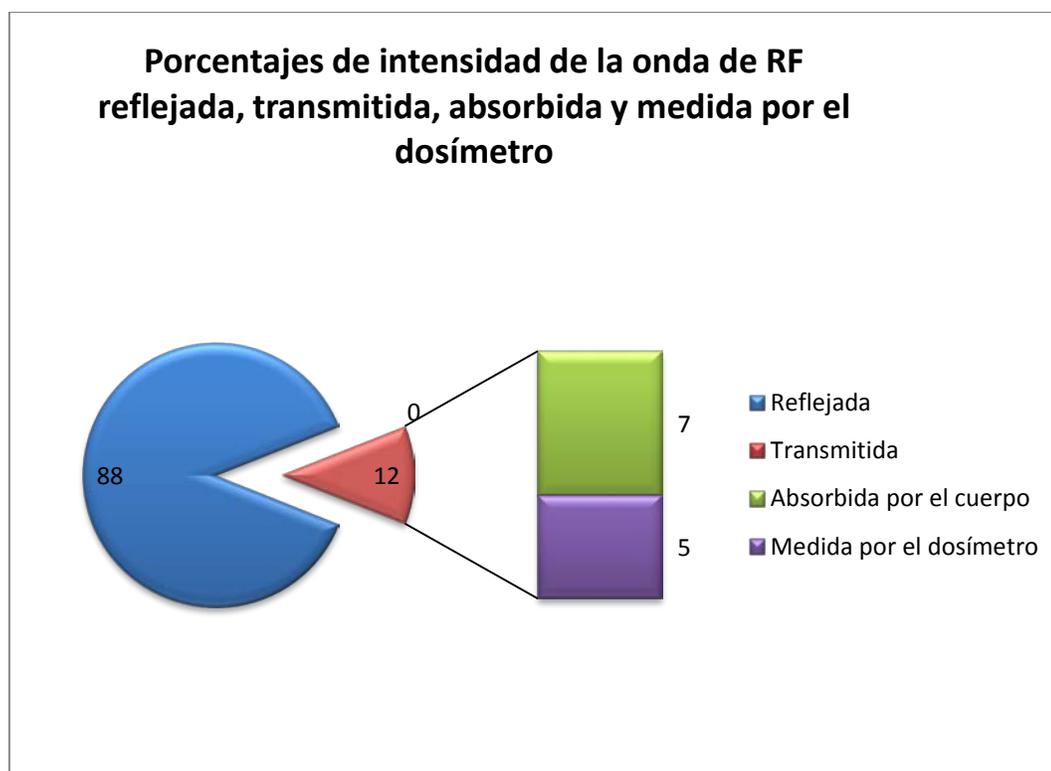


FIGURA 8. Porcentajes de la intensidad de las ondas de RF reflejada (88%) y transmitida (12%). Parte de la onda transmitida es absorbida por el cuerpo (7%) y otra parte llega al exposímetro y es medida (5%).

Para el agua los resultados son semejantes, un 87% de reflexión, un 13% de transmisión, alcanza el exposímetro el 7% del total y un 6% del total es absorbido por el agua.

V. CONCLUSIONES

Hemos diseñado una práctica para estudiantes universitarios de los primeros cursos con la intención de comprobar si las ondas electromagnéticas son absorbidas por el cuerpo humano. Nos hemos concentrado en las ondas de RF debido a la

proliferación de los teléfonos móviles y de las comunicaciones inalámbricas, presentes en numerosas actividades de nuestra vida cotidiana.

Una vez realizadas las medidas y analizados los resultados, obtenemos que el 7% de la radiación incidente es absorbida por nuestro cuerpo y sólo el 5% alcanza el exposímetro cuando éste se encuentra entre dos personas. Estos valores son del 6% y el 7%, respectivamente, cuando el exposímetro está rodeado por botellas de agua mineral. Usando los conceptos de exposición y dosis, si la exposición a las ondas de RF tiene un valor normalizado a 100, la dosis recibida es de 7. Absorbemos, pues, una pequeña parte de las ondas de RF a las que estamos expuestos, siendo la mayor parte de ellas reflejadas por nuestro cuerpo.

Este hecho es importante, pues nos indica la influencia considerable del cuerpo humano (o del agua, o de cualquier otro medio) en la transmisión de una onda. Si el exposímetro fuera un teléfono móvil a él sólo llegaría el 5 o el 7% de las ondas de RF circundantes, por lo que su cobertura telefónica podría quedar comprometida. Así pues, ni el cuerpo humano ni el agua son “transparentes” a las ondas de RF, en nosotros se refleja un porcentaje elevado de ellas, una pequeña parte es absorbida y otra pequeña parte nos atraviesa. Sabemos que para la luz visible nuestro cuerpo no es transparente, la bloqueamos por completo, una parte la absorbemos y otra la reflejamos. Lo mismo pasa con los infrarrojos (IR), los bloqueamos, no podemos usar el mando a distancia de un televisor si hay una persona entre el emisor de los IR (el mando) y el receptor de IR del televisor.

Por otro lado queremos comentar que la legislación autonómica de Castilla-La Mancha, plasmada en la ley 8/2001 (véase http://www.uclm.es/profesorado/alnajera/CEP-CEP-CER/docs/Ley8-2001_CLMb.pdf) del 28-6-2001 para a Ordenación de las instalaciones de Radiocomunicación en Castilla-La Mancha es una de las más restrictivas del mundo con un límite de 100 mW/m^2 que es el valor más pequeño de los de nuestro entorno, en un factor 20. Además fija ese valor para todas las frecuencias en vez de especificar un valor para cada banda de frecuencias. Aun así hemos usado este valor en la Tabla 2 y Figura 7 para comparar nuestras medidas con las máximas legales.

Recordemos que, por simplificar, sólo hemos decidido trabajar con la intensidad total de las 14 bandas que mide nuestro exposímetro, sin distinguir qué tipo de frecuencia es la que es más absorbida y cual menos. Esto lo dejamos para un posterior estudio, más detallado.

AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo ha sido financiado con un Proyecto de Investigación concedido por la Consejería de Educación y Ciencia de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y, además, por un convenio de colaboración con la Fundación de CajaSol, actualmente “La Caixa”. Uno de los autores, A.B.V., agradece el apoyo del Vicerrectorado de Tecnologías de la Información de la Universidad de Alicante a través del proyecto GITE-09006-UA.

REFERENCIAS

- Bauer, Wolfgang & Westfall, Gary D. (2011). Física para ingeniería y ciencias, McGraw-Hill Education, México.
- Berkson, William. (1981). Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein, Alianza Editorial, Madrid.
- Hertz, Heinrich Rudolf. (1893). Electric waves: being researches on the propagation of electric action with finite velocity through space (traducido por David Evans Jones). Ithica, New York: Cornell University Library. 10-ISBN 1-4297-4036-1; 13-ISBN 978-1-4297-4036-4.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). <http://www.icnirp.de/>, Julio de 2013.
- Joseph, Wout *et al.* (2010). “Estimation of Whole-Body SAR From Electromagnetic Fields Using Personal Exposure Meters”, *Bioelectromagnetics* 31, 286-295.

Joseph, Wout *et al.* (2012). “Between-Country Comparison of Whole-Body SAR from Personal Exposure Data in Urban Areas”, *Bioelectromagnetics* 33, 682-694.

Ley 8/2001, http://www.uclm.es/profesorado/alnajera/CEP-CEP-CER/docs/Ley8-2001_CLMb.pdf, Julio de 2013.

Panagopoulos, Dimitris J. & Johansson, Olle & Carlo, George L. (2013). “Evaluation of Specific Absorption Rate as a Dosimetric Quantity for Electromagnetic Fields Bioeffects”, *PLOS One* volume 8, e62663, www.plosone.org.

Sokoloff, David R. & Thornton, Ronald K. (1997). “Using Interactive Lecture Demonstrations to Create an Active Learning Environment”, *The Physics Teacher* 35: 6, 340.

Sokoloff, David R. & Thornton, Ronald K. & Laws, Priscilla W. (2007). “Real Time Physics: Active Learning Labs Transforming the Introductory Laboratory”, *Eur. J. of Phys.*, S83-S94.

Tipler, Paul A. & Mosca, Gene. (2010). *Física para la Ciencia y la Tecnología*, 6ª Edición, volumen 2, página 926, Editorial Reverté, Barcelona.

Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. (2009). *Física Universitaria*, Decimosegunda edición del libro clásico de los autores Sears y Zemansky, Addison-Wesley, Pearson Education, México.