

Sistema experimental para el estudio de la dosimetría en multifrecuencia

Álvarez Folgueiras M.⁽¹⁾, Miñana Maiques M. M.⁽²⁾, Moreno Piquero E.⁽¹⁾, Jorge Barreiro F.J.⁽³⁾,
López Martín E.⁽³⁾, Ares Pena F.J.⁽¹⁾

E-mail: marcos.alvarez@usc.es, minana@speag.com, eduardo.moreno@usc.es,
fcojavier.jorge@usc.es, melena.lopez.martin@usc.es, francisco.ares@usc.es.

⁽¹⁾ Dpto. de Física Aplicada, Fac. de Física, Campus Sur, Universidad de Santiago de Compostela, 15782, Santiago de Compostela.

⁽²⁾ SPEAG Schmid & Partner Engineering AG, Zurich, Switzerland

⁽³⁾ Dpto. de Ciencias Morfológicas, Fac. de Medicina, Campus Norte, Universidad de Santiago de Compostela, 15782, Santiago de Compostela.

Abstract- Multiple simultaneous exposures to electromagnetic signals from various sources (multiple frequencies with high bandwidth) is the real scenario in our daily life. In this study, we investigated the non thermal SAR (Specific Absorption Rate) in vivo rats exposed at multiple signals to electromagnetic (EM) fields -at frequencies of 900 and 2.450 MHz-, and 2 W power. The corresponding experimental system (ES) consisted of: two vector signal generators, a directional coupler, a spectrum analyzer, a signal mixer, a power meter, and the GTEM chamber itself -where the animal was located with the help of an appropriate holder.

The 1g mean SAR values in the different anatomical regions of the nervous system and whole-body of the rat were estimated from experimental power measurements, and with the aid of a FDTD software tool. These novel protocols of radiation will be used to investigate biological effects on the small animals.

I. INTRODUCCIÓN

Los campos electromagnéticos están presentes como una parte vital de nuestra vida diaria, la existencia de antenas en la calle junto con las convencionales de telefonía móvil constituye un escenario real en el que un gran número de personas están expuestas a multifrecuencias de diversas fuentes electromagnéticas (múltiples frecuencias con grandes anchos de banda).

La investigación de los bioefectos causados por la presencia de señales simultáneas, es un campo prácticamente desconocido en el bioelectromagnetismo. La normativa establece para el cálculo del SAR (Tasa de absorción específica) de múltiples señales, criterios que en ningún caso están basados en la experimentación [1]. Hay por tanto una gran inseguridad de la eficacia de las restricciones legales a éste respecto, ya que existe un vacío en el conocimiento de la respuesta biológica a la acción de señales simultáneas de radiofrecuencia (RF).

Los escasos estudios que hay a este respecto no determinan con claridad los potenciales riesgos en la salud que envuelven la exposición múltiple a la radiofrecuencia (RF). Algunos estudios llevados a cabo en distintas poblaciones no determinaron una relación entre síntomas crónicos como dolor de cabeza, alteraciones en el sueño en adultos [2] o en niños [3] y la exposición a varias frecuencias. Tampoco se ha establecido que la interacción de varias señales de

modulación inalámbrica cause alteraciones celulares en embriones durante la gestación [4].

La escasa información de los efectos biológicos que tienen lugar como resultado de la interacción de múltiples señales de RF en los seres vivos contrasta con una gran preocupación de la sociedad y de diversas entidades gubernamentales [5] por la contaminación electromagnética a la que se somete diariamente a nuestra población a edades cada vez más tempranas.

En éste trabajo nos planteamos los siguientes objetivos:

1) La descripción del diseño y puesta a punto del sistema experimental de radiación que permitirá la exposición de animales pequeños en una cámara GTEM, sometidos a la interacción simultánea de varias señales de radiofrecuencia, con múltiples generadores. Para ello se aplicarán frecuencias que habitualmente son usadas por sistemas inalámbricos de comunicación 900 y 2450 MHz. 2) Posteriormente se llevó a cabo un estudio de la dosimetría realizando un cálculo de la tasa de absorción específica (SAR) en el cuerpo y en el cerebro de los animales aplicando el método FDTD con el programa comercial SEMCAD [6]. La puesta a punto de éste sistema experimental de radiación, abrirá un campo de estudios biológicos en modelos animales aplicando estos novedosos protocolos de radiación.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

A continuación se describen tanto la configuración del sistema utilizado durante los experimentos como el método de experimentación en sí y la simulación requerida para estimar los valores de SAR de los animales.

A. Descripción del Sistema Experimental de Radiación

En la Fig. 1 se observa el sistema experimental. Se disponen que dos Generadores de Señales Vectoriales (GSV Frec #1 y GSV Frec #2) cada uno genera una señal sinusoidal pura de 900 MHz y 2450 MHz, respectivamente, regulada a la potencia requerida durante la irradiación. La salida procedente de ambos generadores se conecta a un Mezclador de señales (ME) para pasar la señal al Amplificador (AMP). Una vez la señal es amplificada esta se introduce en el Acoplador Direccional (AD) para pasarla directamente a la

Cámara de Radiación GTEM en donde se encuentra la rata R, convenientemente posicionada en la zona de máxima uniformidad de campo [7], e inmovilizada mediante el cepo de metacrilato CR. El AD permite medir los valores de potencia incidente P_{IN} mediante el Medidor de Potencia (MP) pudiendo establecer de esta forma la potencia de entrada deseada al sistema. Además, es posible medir la potencia reflejada P_{REF} , monitorizando y obteniendo el valor mediante el Analizador de Espectros AE.

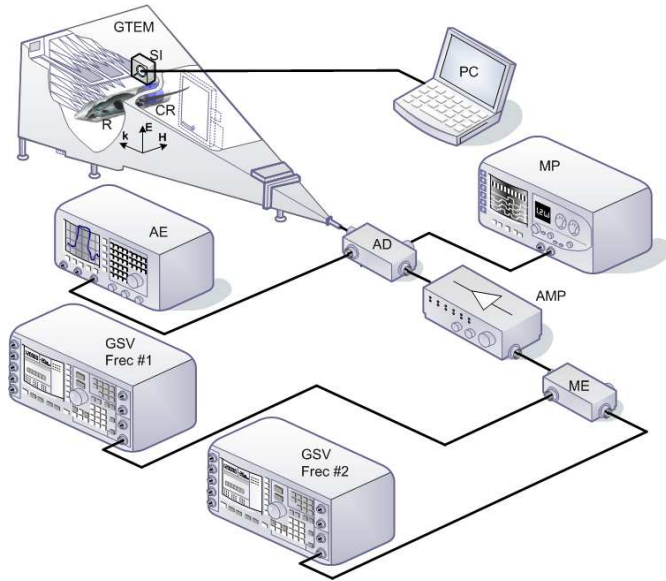


Fig. 1. Esquema del sistema utilizado. GTEM: Cámara GTEM Schaffner 250; GSV Frec #1: Generador Vectorial de Señales Agilent E8267D (250 KHz-20 GHz) funcionando a 2.45 GHz; GSV Frec #2: Generador Vectorial de Señales Agilent E4438C (250 KHz-4 GHz) funcionando a 900 MHz; AMP: Amplificador Amplifier Research 15S1G3 (0.8-3 GHz); AD: Acoplador Direccional NARDA 3282B-30 (800-4000 MHz); AE: Analizador de Espectro Agilent E4407B (9 KHz-26,5 GHz); MP: Medidor de Potencia Agilent E4418B; ME: Mezclador de Señales Agilent 11636A; CR: Cápsula Contenedora de la Rata Bajo Prueba; SI: Sonda Isotrópica de medidas EF Cube.

El uso del AE permite observar el tipo de onda incidente en la cámara, comprobando la pureza espectral de la sinusoide utilizada en este experimento.

Se observa que el campo incide sobre R en la dirección \mathbf{k} , con los vectores \mathbf{E} y \mathbf{H} posicionados perpendicular y paralelamente al eje principal de R, respectivamente. Consecuentemente, la zona izquierda de R recibe la máxima amplitud de campo, produciendo apantallamiento sobre la zona derecha.

Para la medida del campo se utiliza la Sonda Isotrópica (SI) que nos proporciona el valor de pico del mismo. Esta medida se realiza sin colocar la rata en el interior de la cámara y usando los valores deseados en las señales de entrada. De esta forma podemos precisar el comportamiento de la cámara en la zona de medida. Este valor será utilizado posteriormente para conseguir realizar una simulación más objetiva de la cámara GTEM, utilizando para ello tres frentes de ondas plana que reproducirán los datos obtenidos con la sonda. Además, se ha comprobado si los valores obtenidos con la SI

concuerdan con los que recomienda el fabricante de la cámara, mediante la expresión [7]:

$$E = \sqrt{Z_0 P_{TR} / (h^2 \zeta)} \quad (1)$$

siendo h la altura de la bóveda (*septum*) en la zona de exposición (posición de la CR), ver Fig. 1, P_{TR} la potencia de entrada en la GTEM ($=P_{IN}-P_{REF}$), $Z_0=50 [\Omega]$ la impedancia de entrada de la GTEM, y ζ un coeficiente que depende del rizado del campo dentro de la zona de posicionamiento de CR, considerado igual a 2 [7]. Se ha observado que existe cierta concordancia, pero dicha fórmula no considera que el campo eléctrico no sólo tiene la componente que aparece en la Fig. 1, por lo que se ha optado por usar los valores medidos con la sonda isotrópica ya que resultan más precisos.

B. Descripción del Tratamiento de los Animales.

Para poder llevar a cabo este estudio experimental se expusieron 40 ratas a la radiación de la cavidad GTEM, dividiéndolas en 4 grupos diferentes (10 ratas en cada grupo), de acuerdo al siguiente esquema experimental:

- Grupo 1: Animales irradiados a 900 MHz y 2W de potencia.
- Grupo 2: Animales irradiados a 2450 MHz y 2W de potencia.
- Grupo 3: Animales irradiados a 900MHz y 2450 MHz a una potencia de 1W respectivamente y simultáneamente.
- Grupo 4: Animales control no irradiados.

Los animales, convenientemente inmovilizados mediante CR, (ver Fig.1), fueron irradiados individualmente durante 1 hora (Grupos 1-3). En el Grupo 4 se colocaron los animales igualmente en el CR el mismo tiempo sin ser sometidos a la radiación.

C. Descripción de las Simulaciones.

Los valores de SAR se han estimado con la ayuda del SEMCAD X [6], un software de simulación basado en el método FDTD, según se ha comentado anteriormente. Para ello, se utilizó un modelo numérico de rata Sprague-Dawley de 198,3 gramos (modelo R8, [6]), ensamblada en cortes de 1,15 mm (obtenidos con imágenes de resonancia magnética) y compuesta por 60 tejidos diferentes. El modelo numérico fue simulado con ondas planas incidiendo sobre la zona izquierda del animal, de tal forma que los campos simulados se correspondan con los medidos con la sonda isotrópica (SI). La onda plana más intensa es la que tiene el campo magnético \mathbf{H} paralelo a su eje principal (ver Fig.1). Las simulaciones (ejecutadas en un PC de escritorio con procesador Intel Core i7 a 3.2 GHz, 16 GB de RAM y tarjeta aceleradora de cálculo Nvidia Tesla C1060) se realizaron a 900 y 2450 MHz, con un mallado de 2.5 y 20.3 millones de celdas volumétricas, obteniéndose tiempos de cómputo de 20 y 35 minutos, respectivamente.

Las estimaciones del SAR fueron obtenidas mediante un factor de corrección aplicado a los valores obtenidos con las simulaciones numéricas, en proporción al peso de la rata numérica respecto de los pesos de los animales utilizados durante la experimentación, es decir:

$$SAR_E = SAR_S \times W_S / W_E \quad (2)$$

donde SAR_E es la estimación del SAR experimental, SAR_S es el valor de SAR obtenido durante la simulación, $W_S=198,3$ [g] es el peso del modelo numérico, y W_E [g] es el peso del animal bajo experimentación.

III. RESULTADOS

A. Estimaciones de SAR.

Se irradiaron los animales con una $P_{TR}=2$ [W], colocados en la posición de la bóveda con $h=0.215$ [m].

	Región Anatómica	SAR _S [W/kg]		
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Sistema Nervioso	Cavidad cerebral	0.0911	0.0933	0.1154
	Hemisferios cerebrales	0.0902	0.0749	0.1009
	Hipófisis	0.2088	0.2633	0.3139
	Cerebelo	0.2152	0.0981	0.1551
Cuerpo	Músculo	0.1601	0.0654	0.1130
	Timo	0.2880	0.0637	0.1755
	Testículos	0.0902	0.2870	0.2165
	Grasa	0.0323	0.0195	0.0266
	Lengua	0.1215	0.2402	0.1740

Tabla 1. Listado de valores de SAR experimental para una rata de 198 g estimados mediante simulación, en determinadas zonas anatómicas de la rata.

Grupo	f [MHz]	P _{TR} [W]	E _m [V/m]	W _E [g]	SAR _E [W/kg]	
					Cuerpo	Cerebro
2	900	2	47.5	182.9	0.1587	0.0951
					218.8	0.1134
					198.7	0.1029
3	2450	2	40.2	198.1	0.0601	0.0340
					243.7	0.0419
					224.7	0.0386
4	900	1	34.4	153.4	0.0879	0.0844
					306.3	0.1685
					230.8	0.1269

Tabla 2. Listado resumen de valores de SAR experimental estimados mediante simulación, ver ec. (2).

En la Tabla 1 se presentan los resultados de SAR_S relativo en el cuerpo del modelo numérico de rata para distintas zonas anatómicas de interés. En la Tabla 2 se presentan los resultados de SAR_E estimados, ver ec. (2), para los distintos grupos de animales radiados (Grupos 1 a 3, ver Sección II.B). Los valores de SAR_E en cerebro y cuerpo corresponden a los valores promediados espacialmente en 1 [g] de tejido.

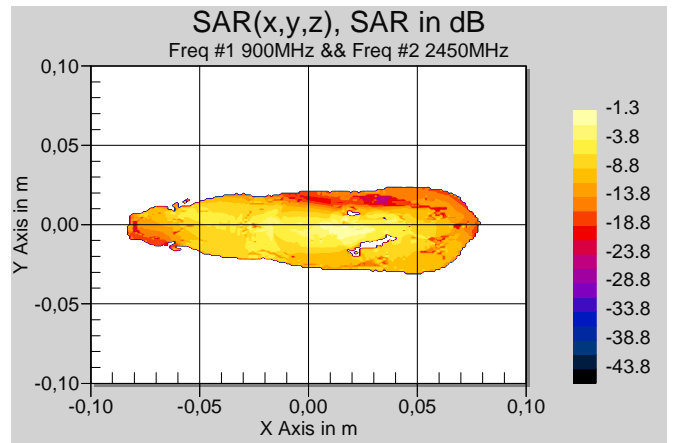


Fig. 2. Distribución del SAR relativo [ver ec. (2)] en el animal en un corte horizontal (z=constante, vista superior) a la altura media de su cerebro. Esta distribución es aplicable a la potencia establecida durante las experimentaciones. Escala en dB normalizada.

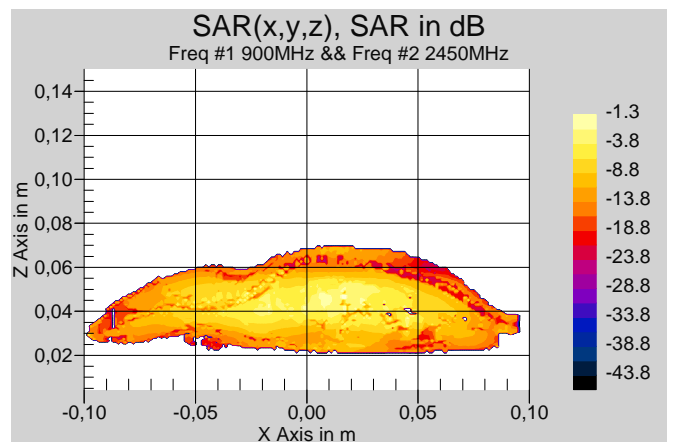


Fig. 3. Distribución del SAR_S en un corte vertical (plano principal y=constante), coincidente con el eje de la rata. Esta distribución es aplicable a la potencia establecida durante las experimentaciones. Escala en dB normalizada.

Las Figs. 2 y 3 presentan el patrón de SAR_S relativo en el cuerpo del modelo numérico de la rata cuando es radiada por las dos frecuencias (900MHz y 2450MHz), y en las que se observa cierta uniformidad en la distribución, con ciertos puntos de asimetría, consecuencia directa de la incidencia de la radiación sobre la zona izquierda del animal y de la propia asimetría en la distribución de sus órganos.

IV. CONCLUSIONES

La puesta a punto del sistema de radiación experimental y la obtención de valores de SAR en los distintos tejidos de la rata, permitieron determinar los primeros índices biológicos de la exposición a la radiación de multifrecuencia en éstos mamíferos.

Estos primeros datos de dosimetría deben de ser contrastados en un futuro, con otros efectos biológicos ya que pueden interferir de alguna forma en la salud de los seres vivos.

Todos los resultados obtenidos de este estudio tienen una aplicación directa en relación a la legislación de la exposición de radiación no ionizante en los seres vivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Dirección General de Investigación y Desarrollo de la Xunta de Galicia por los proyectos 09TIC006206PR y INCITE09E2R206059ES que financiaron parte de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1]. REAL DECRETO 1066/2001, publicado el 28 de septiembre de 2001 en el Boletín Oficial de Estado.
- [2]. S. Thomas, A. Kühnlein, S. Heinrich, G. Praml, D. Nowak, R. von Kries, and K. Radon, "Personal exposure to mobile phone frequencies and well-being in adults: A cross-sectional study based on dosimetry", *Bioelectromagnetics*, 29, págs. 463-470, 2008.
- [3]. S. Thomas, A. Kühnlein, S. Heinrich, G. Praml, R. von Kries, and K. Radon, "Exposure to mobile telecommunication networks assessed using personal dosimetry and well-being in children and adolescents: the German mobile study." *Environmental Health*. <http://www.ehjournal.net/content/7/1/54>
- [4]. H. J. Lee, J. S. Lee, J. K. Pack, H. D. Choi, N. Kim, S. H. Kim, Y. S. Lee, "Lack of teratogenicity after combined exposure of pregnant mice to CDMA and WCDMA radiofrequency electromagnetic fields", *Radiation Research*, 172(5), págs. 648-52, 2009
- [5]. ICNIRP, International Commission on Non-ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*, Vol. 74, págs. 494-522, 1998.
- [6]. Schmid & Partner Engineering AG, "Reference manual for the SEMCAD simulation platform for electromagnetic compatibility, antenna design and dosimetry", 2010. Disponible en www.semcad.com.
- [7]. Schaffner Electrottest GmbH, "GTEM Test Cells", 2005, catálogo de la cámara GTEM, disponible en www.schaffner.com.