

Respuesta termorregulatoria a una exposición de onda plana a 900 MHz

García Fernández, MA., Valenzuela Valdés, J., Martínez González, AM. y Sánchez Hernández, D.
magf@alu.upct.es, juan.valenzuela@upct.es, toni.martinez@upct.es, david.sanchez@upct.es.

Grupo de Ingeniería de Microondas, Radiocomunicaciones y Electromagnetismo. Universidad Politécnica de Cartagena.

Campus Muralla del Mar. Antiguo Cuartel de Antigones. Plaza del Hospital, 1. E-30202 Cartagena (Murcia) España.

Resumen. *En dosimetría electromagnética, las antenas de teléfonos móviles son el problema típico y la exposición a campo lejano ha recibido menos atención. Los límites de seguridad internacional establecen niveles de referencia expresados en términos de intensidad de campo electromagnético (EM), que son evaluados en ausencia de una persona y derivados de la incidencia de onda plana y la exposición a onda continua, que sin embargo está limitada a situaciones de campo lejano. Los principios para derivar estas restricciones y márgenes no están estandarizados plenamente y se emplean valores diversos dependiendo del efecto térmico considerado. En esta contribución se evalúan escenarios de exposición y efectos de respuesta más realistas, incluyendo una exposición a onda plana incidente de 10 W/cm^2 . Se proporciona la Tasa de Absorción Específica para todos los tejidos, y la hibridación entre exposición a campo EM y respuesta termorregulatoria aporta resultados interesantes, como el factor de seguridad térmica adicional que el cráneo representa para el cuerpo humano bajo exposición a campo EM, con posible utilidad en operaciones de cirugía.*

1 Introducción

Siendo el uso de antenas de telefonía móvil el problema típico en dosimetría electromagnética, al evaluar campo electromagnético (EM) las condiciones de exposición empleadas son normalmente las de campo cercano, recibiendo menos atención la exposición a campo lejano, donde las antenas radiantes se colocan lejos del modelo humano, introduciendo correcciones para los frentes de onda no planos producidos [1].

Hoy día los límites de seguridad internacional proveen niveles de referencia expresados en términos de intensidad de campo EM, evaluados en ausencia de una persona, y derivados de incidencia de onda plana y exposición de onda continua, limitada a situaciones de campo lejano. El fundamento para derivar restricciones y márgenes de seguridad no está estandarizado completamente en el mundo, y se emplean valores diversos dependiendo del efecto térmico considerado [2].

En esta contribución se evalúan escenarios de exposición más realistas y sus efectos de respuesta. La onda EM de excitación utilizada en el modelo bajo evaluación es una exposición a onda plana incidente. Siguiendo pautas recientes para estudios de exposición [3], el estudio se lleva a cabo a la intensidad de exposición tan alta como el límite ICNIRP ocupacional, es decir, 10 W/kg a 900 MHz, y se proporciona la Tasa de Absorción Específica (TAE, del inglés *Specific Absorption Rate*, SAR) para todos los tejidos.

2 Métodos y Modelos

Para medir valores de TAE se requieren modelos homogéneos, donde se caracteriza un solo tejido mediante propiedades promediadas sobre un cierto número de tejidos. La elección del tejido equivalente para el modelo homogéneo aún es tema de investigación [4], y algunos estudios usan los tejidos músculo o “2/3 de músculo” mientras que CENELEC recomienda un líquido para simular la cabeza (*Head Simulating Liquid*, HSL) similar al cerebro para pruebas de conformidad.

Existen modelos heterogéneos de hombre, con un número limitado de tejidos [1] o con un gran número de tejidos disponibles [5]. Mientras que para exposición a campo cercano los modelos homogéneos representan una sobreestimación de la TAE respecto a la obtenida con los modelos heterogéneos [6], para exposición a onda plana de campo lejano la situación depende fuertemente de la frecuencia de operación y de la porción del cuerpo bajo prueba. Para la cabeza humana se obtienen valores de campo eléctrico y TAE considerablemente más altos con los modelos heterogéneos [1], debido a la mayor conductividad del tejido tipo músculo respecto a la promediada empleada por los modelos homogéneos.

El modelo de cabeza empleado en este estudio representa los tejidos del Proyecto Humano Visible (*Visible Human Project*) directamente desde el punto de referencia del oído (*Ear Reference Point*, ERP), esto es, a una distancia lateral de 15 mm del

Trago (entrada al canal auditivo, del inglés *Entrance to the Ear Canal*, EEC) [7], como se representa en la Fig. 1. Las propiedades eléctricas y térmicas de los materiales son extraídas de la literatura científica [8]. Se han empleado también modelos homogéneos equivalentes con el propósito de realizar comparaciones.

A pesar de que el objetivo de las directrices de seguridad internacional es proporcionar recomendaciones a los gobiernos para evitar un incremento en la temperatura global del cuerpo y un calentamiento de tejidos excesivamente localizado, los límites de seguridad actuales se derivan de la TAE promediada bajo exposición a campo cercano, es decir, potencia absorbida por el tejido por unidad de masa y valores de campo incidente como una forma de evaluar posibles riesgos para la salud debidos a incrementos de temperatura en zonas críticas, como el cerebelo, donde la temperatura no debe elevarse más de 0.3 °C. Por tanto, además del cálculo de la dosimetría electromagnética, se han propuesto recientemente factores de seguridad térmicos derivados del cálculo preciso de los incrementos de temperatura en el modelo y su comparación directa con los efectos térmicos adversos. Así, la respuesta termorregulatoria humana a la absorción de energía de radiofrecuencia (RF) ha recibido recientemente la atención de la literatura especializada [9].

En esta contribución se han hibridado las ecuaciones de Maxwell con las de transferencia de calor y masa a través de una ecuación de biocalor (*BioHeat Equation*, BHE [10]) modificada:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k_T \nabla T) = \rho SAR + A_0 + B(T_b - T) \quad (1)$$

El modelo térmico incluye conducción y convección térmica, producción de calor metabólico y pérdida de calor del volumen de los tejidos por perfusión sanguínea, de tal forma que se logra el control termorregulatorio en el modelo, que en ausencia de exposición a RF puede mantener una temperatura promedio constante en el cuerpo, ligeramente alterada por la pérdida de calor en la superficie del cuerpo debida al contacto directo con el aire. Las condiciones térmicas en esta contribución se mantienen bajo el ajuste vasomotor, es decir, bajo la temperatura crítica inferior (*Lower*

Critical Temperature, LCT [9]). De este modo, no se evalúa vaporización alguna y la exposición electromagnética severa está fuera de alcance de nuestro estudio, de momento.

3 Resultados Simulados

Como se esperaba, el modelo heterogéneo proporcionó TAE de pico y dosimetría de campo eléctrico ambas más altas, particularmente en el cráneo, pero el incremento de temperatura fue menor en el área del cerebelo respecto a varios modelos homogéneos, tal y como se ilustra en la Fig. 2 y se enumera en la Tabla 1. Esto sugiere que la estructura de tejido multicapa real para seres humanos, particularmente el cráneo, actúa como un protector térmico para el interior del cerebelo y del encéfalo respecto a los campos EM incidentes.

4 Conclusiones

La hibridación entre exposición a campo EM y respuesta termorregulatoria ha proporcionado resultados interesantes, como el factor de seguridad térmica adicional que el cráneo representa para el cuerpo humano bajo la exposición a campo EM. El modelo descrito puede ser útil para operaciones de cirugía como implantes para estimulación del cerebro profundo (*Deep Brain Stimulation*, DBS) donde los electrodos pueden provocar calentamiento en los tejidos en exploraciones realizadas mediante resonancia magnética al evaluar las enfermedades de Parkinson o Alzheimer, o también para evaluar la respuesta de marcapasos, neuroestimuladores o válvulas hidrocefálicas a la exposición a teléfonos móviles.

Hay otros factores a tener en cuenta e incorporar al modelo desarrollado, como sudoración, jadeos, pérdida de calor en los pulmones, capilaridad, vasodilatación, flujo sanguíneo o metabolismo variables, vestimenta, ritmo circadiano, etc. Sin embargo, con los poderosos recursos computacionales disponibles hoy día, no es arriesgado prever la posibilidad de reducir las incertidumbres científicas actuales sobre la exposición humana a campos EM respecto a la respuesta térmica humana, siendo así posible en un futuro cercano derivar restricciones básicas con factores de seguridad más precisos que los actuales.

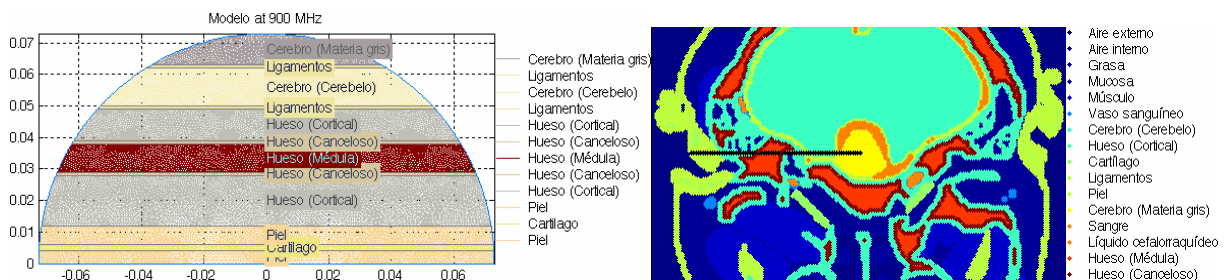


Fig. 1. Estructura multicapa y tejidos del modelo elegidos.

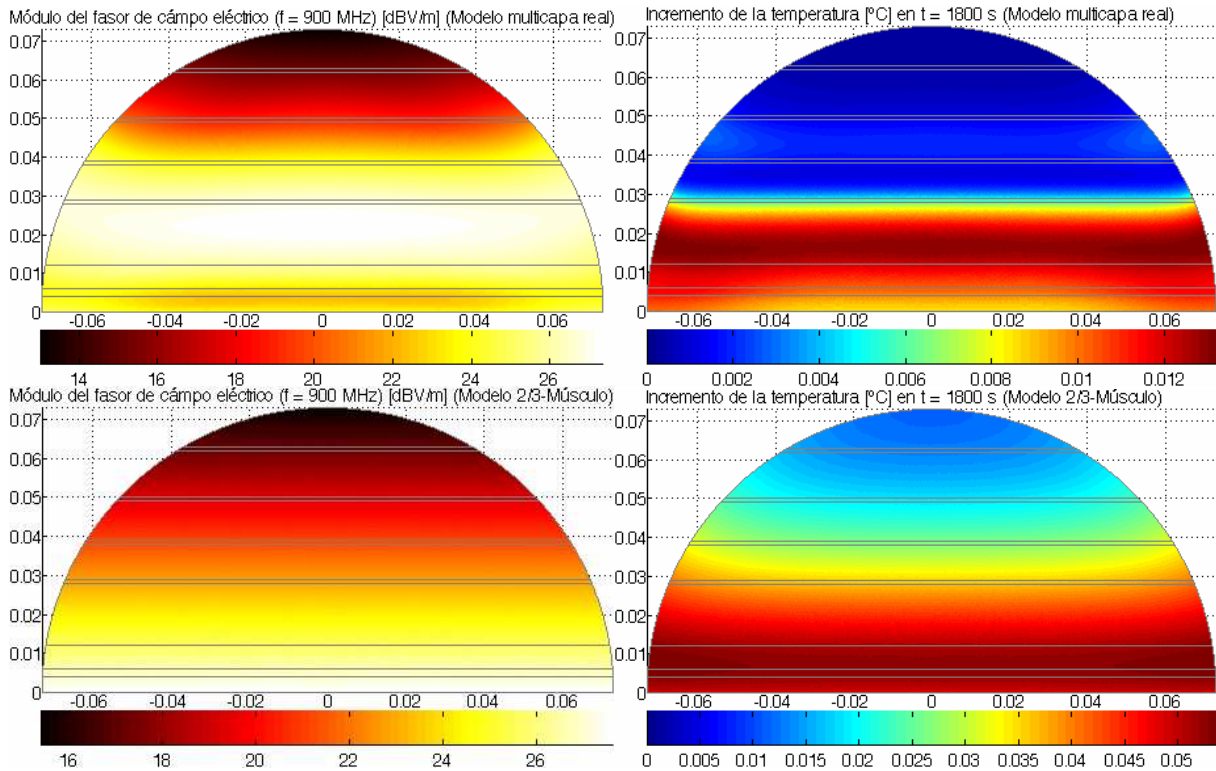


Fig. 2. Distribución de campo eléctrico e incrementos de temperatura en los modelos simulados.

ΔT en el cerebelo (10^{-3} °C)	Máximo (6min)	Medio (6min)	Máximo (30min)	Medio (30min)
Modelo heterogéneo	1.38	0.73	2.05	0.85
Modelo homogéneo (Músculo)	1.93	1.40	9.27	6.34
Modelo homogéneo (2/3-Músculo)	6.04	4.56	23.38	17.23
Modelo homogéneo (HSL)	1.38	1.00	2.97	2.05

Tabla 1. Resultados simulados.

Referencias

- [1] Stuchly, S.S., Kraszewski, A., Stuchly, M., Hartsgrove, G. and Spiegel, R.J., "RF energy deposition in a heterogeneous model of man: Far-field exposures", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 34, pp. 951-957, Dec. 1987.
- [2] Lin, J.C., "Safety standards for human exposure to radio frequency radiation and their biological rationale", IEE Microwave magazine, pp. 22-26, Dec. 2003.
- [3] Kuster, N., Schuderer, J., Christ, A., Futter, P. and Ebert, S., "Guidance for exposure design of human studies addressing health risk evaluations of mobile phones", Bioelectromagnetics, vol. 25, pp. 524-529, 2004.
- [4] Kawai, H. and Ito, K., "Simple evaluation method for estimating local average SAR", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, no. 8, pp. 2021-2029, 2004.
- [5] Christ, A. et al., "A numerical and experimental comparison of human head phantoms for compliance testing of mobile telephone equipment", Bioelectromagnetics, vol. 26, pp. 125-137, 2005.
- [6] Okoniewski, M. and Stuchly, M.A., "A study of the handset antenna and human body interaction", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 44, no. 10, pp. 1855-1864, Oct. 1996.
- [7] IEC 62209-1, "Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures - Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for hand-held devices used in close proximity to the ear (frequency range of 300 MHz to 3 GHz)", 2005.
- [8] Gabriel, C., "Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies", Brooks Air Force, Brooks AFB, TX, Tech. Rep. AL/OE-TR-1996-0037, 1996.
- [9] Adair, E.R., Kelleher, S.A., Mack, G.W. and Morocco, T.S., "Thermophysiological responses of human volunteers during controlled whole-body radio frequency exposure at 450 MHz", Bioelectromagnetics, vol. 19, pp. 232-245, 1998.
- [10] Pennes, H.H., "Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperature in the Resting Human Forearm," J. of Applied Physiology, Vol. 1, pp. 93-102, 1948.