

# ESTUDIO DE LA CABEZA HUMANA COMO CAVIDAD RESONANTE

Miguel Ángel García Fernández<sup>(1)</sup>, David Sánchez Hernández<sup>(1)</sup>

magf@alu.upct.es, david.sanchez@upct.es

<sup>(1)</sup> Dpto. de Tecnologías de la Información y Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena. Plaza del Hospital, 1. E-30202 Cartagena (Murcia) España.

**Abstract-** The rationale for deriving basic restrictions to electromagnetic field exposure and their associated safety margins is not fully standardized and diverse values are employed depending upon the thermal effect being considered. With the recent capabilities of modern computers, hybrid Maxwell's and heat-transfer equations have been solved for the human exposure to electromagnetic field problem. In this contribution, a human head is exposed to 125 mW of power at 1800 MHz (corresponding to a GSM-Power Class 1, divided by 8 slots of time). Peak SAR values along a coronal plane containing the Ear Reference Point, and its effects on temperature increase, have been observed. A matching effect and the skull being a protection for thermal stress due to intense electromagnetic field exposure have been confirmed, validating previous studies suggesting that a combined electromagnetic-thermal basic restrictions would represent more accurate safety limits, reducing the uncertainties for deriving the reference levels.

## I. INTRODUCCIÓN

Los límites de seguridad internacionales frente exposición a campo electromagnético (EM) proporcionan niveles de referencia expresados en términos de intensidad de campo EM, que se evalúan en ausencia de una persona. Se derivan usando condiciones de peor caso de acoplamiento electromagnético, pero también de exposición a onda plana y continua, que se limita a situaciones de campo lejano. El fundamento para derivar restricciones básicas y sus márgenes de seguridad asociados no está estandarizado completamente y se emplean diversos valores dependiendo del efecto térmico considerado para derivar la restricción básica [1]. En esta contribución se utiliza un dipolo de media onda como antena fuente a una frecuencia de 1800 MHz, al que se le entregan 125 mW de potencia, debido a que el límite de potencia para terminales móviles GSM-1800 es de 1W, y estos irradian 1 de cada 8 slots. En el modelo de cabeza humana, extraído del Proyecto Humano Visible, el Punto de Referencia del Oído (PRO) fue alineado con el centro del dipolo radiante. Mediante una integración propia de las ecuaciones de Maxwell y de las ecuaciones de calor se evaluaron los efectos de la respuesta termorregulatoria humana a la exposición a campo EM. La posibilidad de poder derivar consecuencias térmicas de la exposición a campo EM ha aparecido recientemente con la combinación de las diversas ecuaciones necesarias y la capacidad de potentes ordenadores. Los resultados se expresan en términos Tasa de Absorción Específica (TAE) y aumento de temperatura máximo para cada tejido encontrado a lo largo de una línea perpendicular a la cabeza desde el PRO, para

diferentes escenarios de exposición. Otros autores también han encontrado la respuesta térmica a la exposición a campo EM como un método adecuado y complementario a los límites de seguridad existentes [2]. Debido a que un aumento de temperatura mayor que 1° C en cualquier parte del cerebro conllevaría agotamiento o golpe de calor, y un aumento de 0.2-0.3 °C en la región del hipotálamo alteraría el comportamiento termorregulatorio, el estudio directo de la respuesta térmica del cuerpo humano a la exposición a campo electromagnético se ha convertido en una línea reciente de la investigación. Con los resultados presentados en esta contribución podemos concluir que las restricciones básicas actuales se podrían complementar por límites derivados de la temperatura, para poder conseguir mejor comprensión y aplicabilidad de los factores de seguridad ya establecidos por principio de precaución en todas las recomendaciones y estándares de seguridad.

## II. MÉTODOS Y MODELOS

El código propio fue preparado en combinación con las funciones para el cálculo de ecuaciones en derivadas parciales de MATLAB® (PDE). El código fue modificado para proporcionar, mediante condiciones de contorno, un dipolo de media onda como antena radiante. El ERP está situado a una distancia lateral de 15 mm del trago (entrada al canal auditivo) [3], según lo representado en Fig. 1.

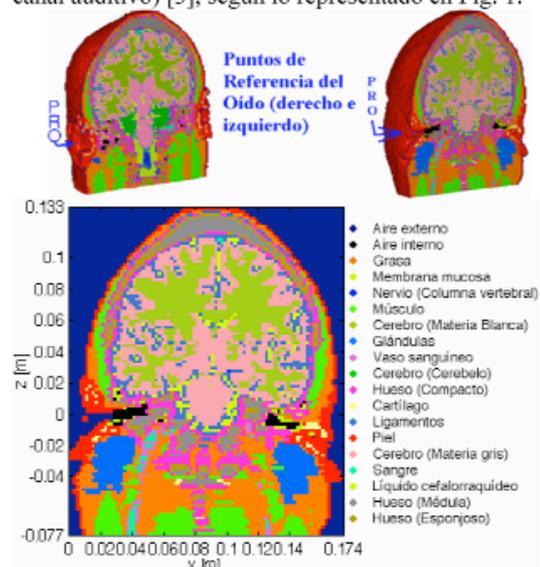


Fig. 1. Plano coronal del modelo de cabeza del Proyecto Humano Visible.

Tejido	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ Calor específico (J/Kg $\cdot$ °C)	$k_T$ Conductividad térmica (W/m $\cdot$ °C)	$A_0$ Producción de calor metabólico (W/m <sup>3</sup> )	$B$ Término asociado al flujo sanguíneo (W/m <sup>3</sup> $\cdot$ °C)
Cerebro (Cerebelo)	46.11	1.709	1038	3687	0.57	10040	56490
Cerebro (Materia Blanca)	37.01	0.915	1038	3600	0.50	2820	15890
Cerebro (Materia Gris)	50.08	1.391	1038	3687	0.57	10040	56490
Hueso (Poroso)	19.34	0.588	1920	2150	0.30	2510	14120
Hueso (Compacto)	11.78	0.275	1990	1650	0.30	0	0
Hueso (Médula)	5.37	0.069	1040	2700	0.22	5020	28230
Sangre	59.37	2.044	1058	3840	0.49	0	0
Vaso sanguíneo	43.34	1.066	1040	3553	0.46	1600	9000

Tabla 1. Propiedades dieléctricas y térmicas de los tejidos del modelo de simulación.

El centro del dipolo fue establecido como origen de coordenadas, y el Punto de Referencia del Oído fue alineado con este origen de modo que la radiación del dipolo fuera centrada en ella. Se entrega a la antena una potencia de 125 mW, potencia media máxima a la que emiten los terminales comerciales de GSM-1800, debido a emitir durante 1/8 del tiempo con 1 W de potencia como máximo. Las características dieléctricas y térmicas de los materiales empleados se han extraído de la literatura y algunos se enumeran en la Tabla 1 [4]. Después de calcular la TAE, se evalúa el incremento de temperatura para todos los tejidos resolviendo la ecuación biocalor [5] modificada:

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

donde  $T_b$  es la temperatura de la sangre, tomada igual a 37 °C. El modelo térmico desarrollado incluye difusión térmica, producción de calor metabólico y perfusión sanguínea. Se puede conseguir control termorregulatorio en el modelo de cabeza en tiempo real, pudiendo mantener una temperatura constante en ausencia de exposición a radiofrecuencia (RF), ligeramente alterada por la pérdida de calor en la superficie del cuerpo debido al íntimo contacto con el aire. Las condiciones de contorno se establecieron mediante la ecuación:

$$\hat{n} \cdot k_T \cdot \nabla T = h_T \cdot (T_r - T) \quad (2)$$

teniendo una temperatura ambiente ( $T_r$ ) de 23 °C y un coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_T$ ) de 7 W/(m<sup>2</sup> · °C) para todas las interfaces piel-aire, y una temperatura  $T_r = T_b = 37$  °C y un coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_T$ ) de 70 W/(m<sup>2</sup> · °C) para la interfaz cuello-resto del cuerpo.

En esta contribución, las condiciones térmicas se mantienen bajo el ajuste vasomotor, es decir, bajo la temperatura crítica inferior (TCI) [6]. De esta forma, no se evalúa vaporización y una exposición electromagnética severa está fuera del alcance de esta contribución, es decir, se evita la transferencia de masa y sus mecanismos de transferencia de calor asociados.

### III. RESULTADOS SIMULADOS

Al variar la distancia entre el dipolo y la cabeza se ponen de manifiesto los efectos de adaptación [7]. Para el plano seleccionado, la distancia de 0.29  $\lambda$  proporcionó la mejor

adaptación de impedancias, con la mayor absorción de potencia en la cabeza humana. Se encontró un mínimo de potencia absorbida por la cabeza a una distancia de 0.22  $\lambda$ . La Fig. 2 muestra la potencia total absorbida por la cabeza humana (en rojo) y por motivos de comparación, la potencia total radiada por un dipolo de media onda ante el mismo modelo de cabeza humana, utilizando un software comercial ampliamente validado (SEMCAD).

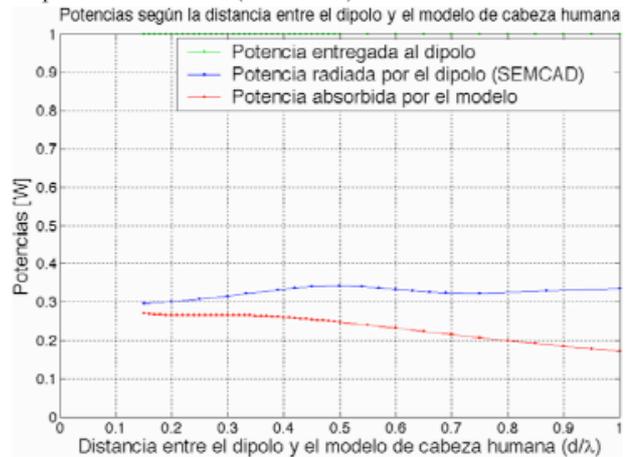
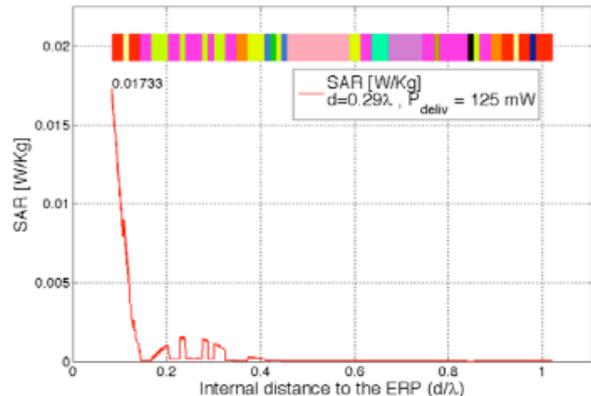


Fig. 2. Potencia absorbida en función de la distancia dipolo-cabeza.

Las Fig. 3, 4, 5 y 6 muestran la TAE y los incrementos de temperatura, para cuatro escenarios, radiando tanto a 0.29  $\lambda$  como a 0.22  $\lambda$ , como distancia entre el dipolo y la cabeza, distancias a las cuales se producen acoplamiento máximo y mínimo, respectivamente.


 Fig. 3. TAE para los tejidos encontrados desde el PRO (a 0.29  $\lambda$  del dipolo).

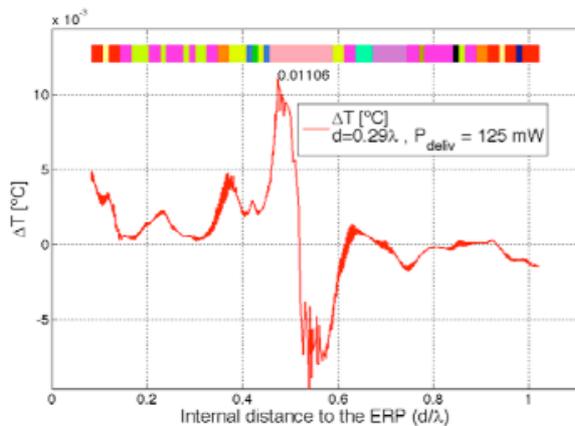


Fig. 4. Incremento de temperatura correspondiente tras 6 min. de exposición.

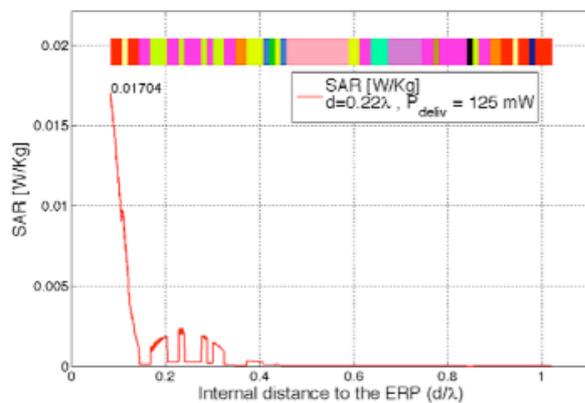


Fig. 5. TAE para los tejidos encontrados desde el PRO (a 0.22 λ del dipolo).

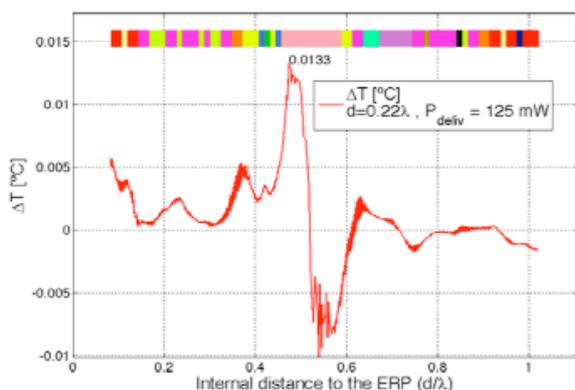


Fig. 6. Incremento de temperatura correspondiente tras 6 min. de exposición.

Los resultados se presentan para los tejidos encontrados a lo largo de una línea horizontal que va perpendicular al modelo de cabeza desde el PRO, como en [7], y se han obtenido tras 6 minutos de tiempo de exposición, con termorregulación.

Puede observarse claramente, analizando las figuras anteriores que, aún estando en el caso de mayor acoplamiento electromagnético (a 0.29 λ), y de tener una mayor TAE de pico máxima, el incremento de temperatura es menor que en el caso de menor acoplamiento (a 0.22 λ), siendo esta diferencia de alrededor de un 20%.

En las Fig. 3 y 5 se observa claramente cómo el cráneo protege al cerebro de la TAE, tal y como se esboza en [8], ya que la TAE de pico desciende abruptamente a partir del cráneo hacia el cerebro. (En la leyenda de la Fig. 1 puede apreciarse como la piel se representa en color rojo, el cráneo en magenta y el cerebro, materia gris, en rosa pálido). Este fenómeno refuerza la teoría de que el cráneo actúa como protector electromagnético del cerebro, ya que cuando la cabeza está adaptada a la fuente (caso de 0.29 λ de distancia dipolo-cabeza), el cráneo hace que la TAE y la temperatura decrezcan rápidamente en los tejidos más internos que él. Este papel de protección no es tan sólo debido a la baja conductividad térmica y alta densidad del cráneo, sino más bien al efecto de adaptación que se produce en los modelos de cabeza multicapa realistas a ciertas distancias fuente-cabeza.

Cabe destacar que los incrementos de temperatura se mantuvieron por debajo de los 0.2 °C, es decir, por debajo del umbral que provoca efectos nocivos, lo que refuerza la validez de las restricciones básicas actualmente vigentes.

#### IV. CONCLUSIONES

Aunque el modelo desarrollado es 2-D y por lo tanto las conclusiones derivadas aquí no se pueden ampliar directamente a modelos 3-D más complicados, la hibridación entre exposición a campo electromagnético y la respuesta termorregulatoria humana ha proporcionado resultados interesantes. La naturaleza protectora del cráneo se ha reafirmado, y la necesidad de restricciones básicas basadas en TAE y temperatura, con respecto a la protección humana bajo exposición a campo electromagnético, se ha confirmado. Hay muchos factores por considerar en el modelo termorregulador empleado, tal como pérdida de calor por sudoración, capilaridad, vasodilatación, metabolismo o flujo sanguíneo variables, ritmos circadianos o incluso alteraciones en la respuesta termorregulatoria misma debidas al aumento de la temperatura en el hipotálamo proporcionado por la energía de radiofrecuencia depositada, etc. Con los poderosos recursos computacionales disponibles hoy en día, sin embargo, no es arriesgado considerar la posibilidad de reducir las incertidumbres científicas actuales respecto a la exposición humana a campos electromagnéticos, reconocidas ya empleando los factores de protección y los escenarios de acoplamiento de peor caso al derivar límites de seguridad, usando la respuesta térmica humana. La adopción de una restricción básica que implique directamente el incremento de temperatura (con niveles de referencia distintos para las diversas partes del cuerpo de acuerdo con sus sensibilidades al calor), en combinación con los límites basados en la TAE ya existentes, podría ser más precisa para el escenario de exposición del ser humano a campo EM [9].

#### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada parcialmente por la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia, a través de una ayuda del Programa Séneca.

## REFERENCES

- [1] Lin, J.C., "Safety standards for human exposure to radio frequency radiation and their biological rationale", IEE Microwave Magazine, pp. 22-26, Dec. 2003.
- [2] Bernardi, P. et al., "SAR distribution and temperature increase in an anatomical model of the human eye exposed to the field radiated by the user antenna in a wireless LAN", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 12, pp. 2074-2081, 1998.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Adair, E.R. et al., "Thermophysiological responses of human volunteers during controlled whole-body radio frequency exposure at 450 MHz", Bioelectromagnetics, vol. 19, pp. 232-245, 1998.
- [7] Christ, A. et al., "The dependence of electromagnetic far-field absorption on body tissue composition in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no.5, pp. 2188-2195, 2006.
- [8] García-Fernández, M. A. et al., "Thermoregulatory Response to Electromagnetic Plane-Wave Exposure at 900 MHz", Proceedings of The European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), p.657.1, Nov. 2006.
- [9] Samaras T.; Regli P.; Kuster N., "Electromagnetic and heat transfer computations for non-ionizing radiation dosimetry", Physics in Medicine and Biology, Vol. 45, Nr. 8, 2000, pp. 2233-2246 (14).