

# Distancia Natural de Acoplamiento de una Cabeza Humana a una Antena en la Banda C de WiMAX

Miguel Ángel García Fernández<sup>(1)</sup>, Juan Diego Sánchez-Heredia<sup>(1)</sup>, Juan F. Valenzuela-Valdés<sup>(2)</sup>, Antonio M. Martínez-González<sup>(1)</sup>, David A. Sánchez Hernández<sup>(1)</sup>

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

<sup>(2)</sup>EMITE INGENIERIA S.L.N.E. Edificio CEEIM. Campus Espinardo. E-30100 Espinardo (Murcia)  
Teléfono: 968 32 5376 Fax: 968 32 5973  
E-mail: garciafernandez.ma@upct.es

**Resumen.** En esta contribución, un plano coronal de cabeza humana es expuesto a 4 W de potencia radiada por un dipolo de media onda a 5725 MHz, correspondientes a la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima permitida en la Banda C de WiMAX. Se proporcionan tanto la TAE (Tasa de Absorción Específica) como los incrementos de temperatura asociados a la exposición electromagnética, para distintos escenarios. Se evalúa el efecto en el confort térmico de los procesos termorregulatorios humanos. Se presenta un importante efecto de adaptación entre el dipolo y la cabeza humana, así como al cráneo como protector del encéfalo ante tensiones térmicas debidas a exposición a campo EM. Como resultado del estudio, se podrían derivar restricciones básicas más precisas combinando los límites de TAE con la respuesta térmica asociada.

## 1 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 acoplo 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 5725 MHz, al que se le entregan 4 W de potencia, debido a que la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima permitida en la Banda C de WiMAX es de 4 W. En el modelo de cabeza humana, extraído del Proyecto Humano Visible, el hipotálamo fue alineado con el centro del dipolo radiante, ya que el hipotálamo es una de las regiones del encéfalo más sensibles, viéndose seriamente afectada por incrementos de temperatura. 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. 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 hacia el centro del hipotálamo, para el escenario de máximo acoplamiento. 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 de más de 1-2 ° C en cualquier parte del cerebro puede tener efectos adversos para la salud tales como agotamiento por calor y ataque de calor [3], y un incremento de temperatura de tan sólo 0.2-0.3 °C en la región del hipotálamo altera el comportamiento termorregulatorio [3], 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.

## 2 Métodos y Modelos

El código propio fue preparado en combinación con las funciones para el cálculo de ecuaciones en derivadas parciales de MATLAB<sup>®</sup> (PDE), basadas en el Método de Elementos Finitos (MEF). El código fue modificado para proporcionar, mediante condiciones de contorno, un dipolo de media onda como antena radiante. El centro del dipolo fue establecido como origen de coordenadas, y el centro del hipotálamo fue alineado con este origen, tal y como se muestra en la Fig. 1, de modo que la radiación del dipolo fuera centrada en él. Se entrega a la antena una potencia de 4 W. Esta es la máxima Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) permitida en la Banda C de WiMAX. Las características dieléctricas y térmicas de los materiales empleados se han extraído de la literatura

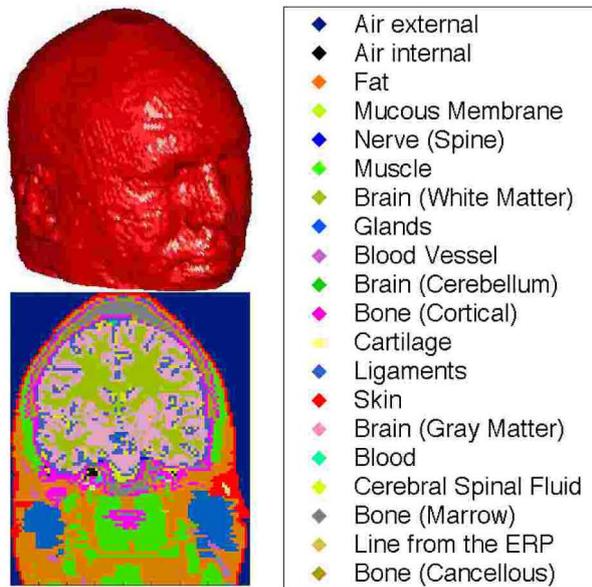


Fig. 1. Modelo de cabeza humana del Proyecto Humano Visible (arriba), plano coronal conteniendo al hipotálamo (abajo) y leyenda (derecha).

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.

### 3 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 0.3  $\lambda$  proporcionó la mejor adaptación de impedancias, con un máximo local de potencia absorbida por la cabeza humana. La Fig. 2 muestra la potencia total absorbida por la cabeza humana para una potencia de 4 W entregada a un dipolo de media onda. Las Fig. 3 y 4 muestran la TAE y los incrementos de temperatura para el escenario en el que se produce acoplamiento máximo (a una distancia de 0.3  $\lambda$  entre el dipolo y la cabeza). Los resultados se presentan para los tejidos encontrados a lo largo de una línea perpendicular al modelo de cabeza, como en [7], y se han obtenido tras 6 minutos de tiempo de exposición, con termorregulación. El fenómeno más importante que puede observarse analizando las figuras anteriores es el efecto de máximo acoplamiento electromagnético entre el dipolo y la cabeza que ocurre a una distancia entre ambos de 0.3  $\lambda$ , que provoca la mayor potencia absorbida por la cabeza y la mayor TAE de pico máxima. Esto es debido a que a esta distancia, la TAE se concentra en los tejidos exteriores al cráneo, provocándose una TAE de pico máxima mayor en dichos tejidos exteriores, pero menor en el cráneo y los tejidos más internos como el cerebro.

Tejido	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\rho$ Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ Calor específico (J/Kg·°C)	$k_T$ Conductividad térmica (W/m·°C)	$A_0$ Producción de calor metabólico (W/m <sup>3</sup> )	$B$ Término asociado al flujo sanguíneo (W/m <sup>3</sup> ·°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	d 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, físicas y térmicas de tejidos del modelo empleado en las simulaciones.

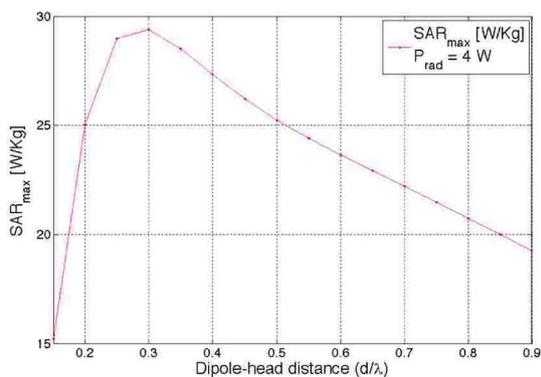


Fig. 1. TAE de pico máxima vs. distancia dipolo-cabeza.

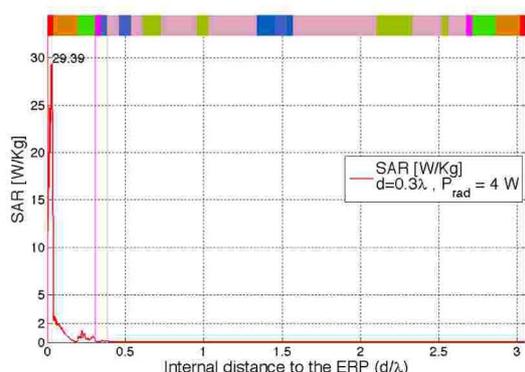


Fig. 2. TAE a lo largo de la línea que pasa por el hipotálamo (para una distancia dipolo-cabeza de  $0.3 \lambda$ )

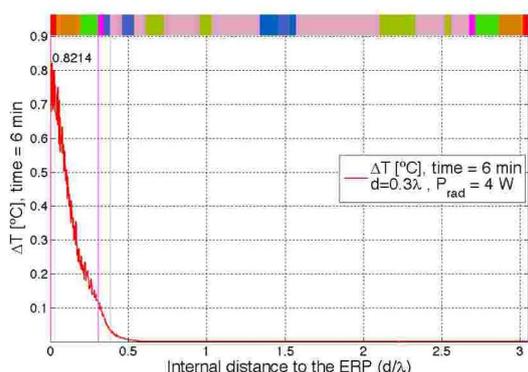


Fig. 3. Incremento de temperatura asociado tras 6 min. de tiempo de exposición.

Esto conlleva un menor incremento de temperatura máximo en el cerebro, que es de los tejidos más sensibles a dichos incrementos térmicos. Por tanto, en la Fig. 3 se observa claramente cómo el cráneo protege al cerebro de la TAE, ya que la TAE de pico desciende abruptamente a partir del cráneo hacia el cerebro, debido al acoplo electromagnético de aquel. 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, el cráneo hace que la TAE y la temperatura decrezcan rápidamente en los tejidos más internos que él. Este papel de protección no es sólo debido a la baja conductividad térmica y alta densidad del cráneo, sino 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 en el encéfalo se mantuvieron por debajo de los  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , es decir, por

debajo del umbral que provoca efectos nocivos, lo que refuerza la validez de las restricciones básicas actualmente vigentes.

## 4 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. 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 [8].

## Referencias

- [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] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) Guidelines, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", Health Physics 74 (4): 494-522; 1998.
- [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] 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).