

Respuesta termorregulatoria de usuario en la banda de GSM 1800

M. A. García-Fernández^{#1}, J. F. Valenzuela-Valdés^{#2}, D. Sánchez-Hernández^{#3}

[#]Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones

Universidad Politécnica de Cartagena, Campus Muralla del Mar, E-30202 Cartagena Spain

Teléfono: 968 32 5376 Fax: 968 32 5973

E-mail: garciafernandez.ma@upct.es

Resumen. En esta contribución, un plano coronal de cabeza humana, extraído del Proyecto Humano Visible (PHV), es expuesto a 1 W de potencia radiada por un dipolo de media onda a una frecuencia de 1800 MHz. La combinación mediante software propio de las ecuaciones de Maxwell y de un modelo termorregulatorio humano proporciona tanto la TAE (Tasa de Absorción Específica) como los incrementos de temperatura asociados a la exposición electromagnética, para todos los tejidos del modelo a lo largo de la dirección de propagación, para varias distancias entre el dipolo y la cabeza humana. 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, recientemente disponible, debida a la exposición a campo EM.

1 Introducción

En dosimetría electromagnética, el fundamento para derivar las restricciones básicas y sus márgenes de seguridad asociados no está completamente estandarizado y se emplean diversos valores dependiendo del efecto térmico considerado para derivar la restricción básica [1]. 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. En esta contribución se ha utilizado como elemento radiante un dipolo de media onda a una frecuencia de 1800 MHz, al que se le entrega una potencia tal que se logre una potencia radiada al espacio libre (no absorbida por el modelo) de 1 W, con el objetivo de mantener una determinada calidad de servicio. Este nivel de potencia fue escogido debido a que es el límite de potencia para terminales móviles GSM-1800. El dipolo sirve de fuente de exposición a un plano coronal de cabeza humana extraído del Proyecto Humano Visible (PHV), con el Punto de Referencia del Oído (PRO) alineado con el centro del dipolo. La posibilidad de poder derivar consecuencias térmicas de la exposición a campo electromagnético (EM) ha salido a la luz sólo recientemente con la combinación de las diversas ecuaciones necesarias y la capacidad de potentes ordenadores. La combinación mediante software propio de las ecuaciones de Maxwell y de un modelo termorregulatorio humano proporciona tanto la Tasa de Absorción Específica (TAE, del inglés *Specific Absorption Rate*, SAR) como los incrementos de temperatura asociados a la exposición electromagnética, además de servir para evaluar la

relación entre ambos. Como en [2], se ha encontrado una distancia crítica a la cual el modelo de cabeza humana adapta su impedancia con la del dipolo empleado como elemento radiante, causando una considerable TAE e incremento térmico. Otros autores han encontrado también la respuesta térmica a exposición a campo EM como un método adecuado y complementario a los existentes límites de seguridad [3]. Debido a que un incremento de temperatura superior a 1 °C en cualquier parte del cerebro provocaría un golpe de calor, y un incremento de 0.2-0.3 °C en la región del hipotálamo alteraría la respuesta termorregulatoria, con los resultados presentados en esta contribución queda claro que 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.

2 Métodos y Modelos

El software propio fue preparado en combinación con los algoritmos de resolución de ecuaciones diferenciales parciales de MATLAB[®], y calcula las componentes del campo EM en cualquier modelo bidimensional, teniendo como fuente un dipolo de cualquier longitud. Debido a las características 2D de los algoritmos de MATLAB[®], para resolver el campo EM se emplearon coordenadas cilíndricas y simetría en ϕ , obteniendo por separado las componentes E_ρ y E_z , siendo E_ϕ despreciable al ser la fuente de radiación un dipolo. El modelo de cabeza humana desarrollado en esta investigación representa un plano coronal de cabeza humana, extraído del Proyecto Humano Visible (PHV), incluyendo al Punto de Referencia del Oído (PRO), el cual está a una

distancia lateral de 15 mm del Trago (entrada al canal auditivo) [4], tal y como se muestra en la Fig. 1. Se estableció el centro del dipolo como origen de coordenadas, y el PRO fue alineado de manera que se enfocara en él la radiación del dipolo.

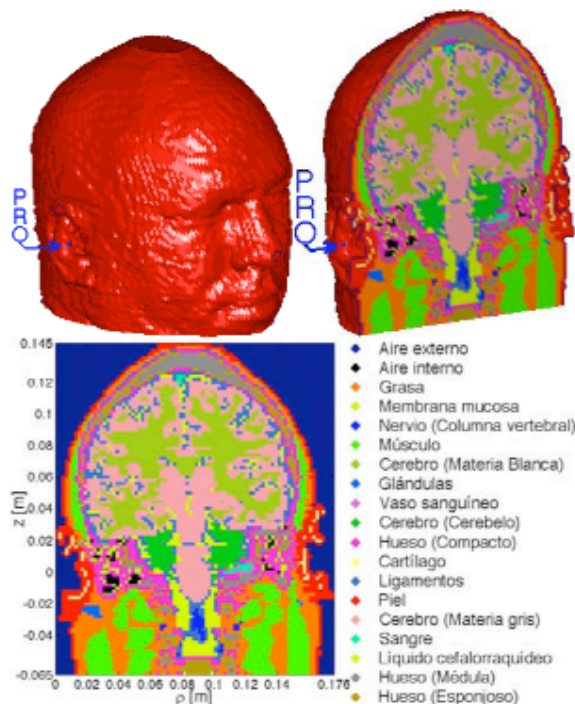


Fig. 1. Modelo de cabeza humana del Proyecto Humano Visible (arriba-izquierda), plano coronal conteniendo al PRO y leyenda (abajo-derecha).

La potencia radiada al espacio libre (no absorbida por el modelo) fue establecida igual a 1 W, variando la potencia entregada en función de la adaptación de impedancias. Las propiedades eléctricas y térmicas de los materiales empleados se extrajeron de la literatura, y algunas se muestran en la Tabla 1 [5]. Tras calcular la TAE, se evalúa el incremento térmico para todos los tejidos resolviendo la ecuación bioenergética modificada [6],

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

donde T_b es la temperatura sanguínea, tomada igual a 36.5 °C. Las condiciones de contorno fueron establecidas mediante un coeficiente de transferencia de calor convectivo (h_T) de 10.5 W/(m² °C) y una temperatura ambiente de 25 °C.

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

En esta contribución, las condiciones térmicas se mantienen bajo el ajuste vasomotor, es decir, bajo la temperatura crítica inferior [7]. 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

A pesar del objetivo de las directivas de seguridad internacional de proporcionar recomendaciones a los gobiernos para evitar tensión térmica de cuerpo completo y excesivo calentamiento local de tejidos, los límites de seguridad actuales se derivan en términos de TAE promediada, esto es, potencia absorbida por el tejido por unidad de masa y valores de campo incidente, como una manera de prevenir posibles riesgos para la salud debido a incrementos térmicos en zonas críticas. Como ejemplo, el hipotálamo no debe sobrepasar un incremento térmico de 0.2-0.3 °C [8] o se alteraría la respuesta termorregulatoria. En las simulaciones se evalúa la relación entre la configuración de exposición EM y las implicaciones térmicas. La variación de la distancia dipolo-cabeza produce algunos efectos de adaptación de impedancia [2]. Para el plano seleccionado, la distancia de $\lambda/7$ provocó la mejor adaptación, con la mayor absorción por la cabeza humana. De hecho, se requirió entregar 33 W de potencia al dipolo para mantener constante la preseleccionada potencia radiada al espacio libre de 1 W. A pesar de que sistemas comerciales GSM-UMTS limitan la potencia máxima de salida, algunos como TETRA pueden no limitarla, y por tanto, es interesante analizar en profundidad los resultados.

Tejido	ϵ_r	σ (S/m)	ρ Densidad (Kg/m ³)	c_p Calor específico (J/Kg•°C)	k_T Conductividad térmica (W/m•°C)	A_0 Producción de calor metabólico (W/m ³)	B Término asociado al flujo sanguíneo (W/m ³ •°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, físicas y térmicas de tejidos del modelo empleado en las simulaciones.

En la Fig. 2 se representa el efecto de adaptación. Si tenemos un sistema en el que se proporciona una determinada calidad de servicio, sería interesante observar la TAE normalizada respecto de las potencias entregada y radiada al espacio libre (no absorbida por el modelo). Esto se representa en las Fig. 3 y 4. El efecto de adaptación de impedancia se observa claramente en la Fig. 3, donde la TAE de pico normalizada respecto a la potencia entregada tiene un mínimo para una distancia dipolo-cabeza de aproximadamente $\lambda/7$. Este fenómeno es menos abrupto si la normalización se realiza respecto de la potencia radiada al espacio libre (Fig. 4), donde se obtienen valores mayores de TAE de pico máxima.

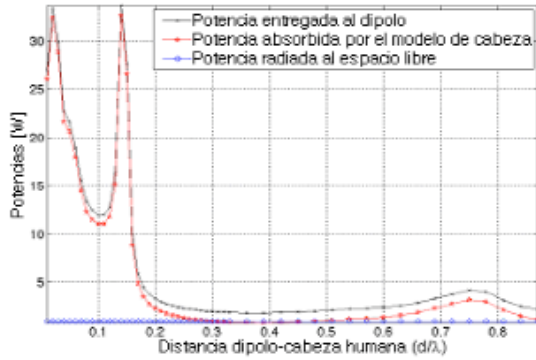


Fig. 2. Potencias entregada, absorbida y radiada al espacio en función de la distancia dipolo-cabeza.

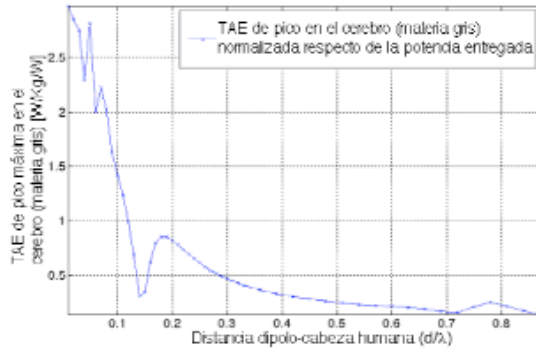


Fig. 3. TAE de pico en el cerebro (materia gris) normalizada respecto de la potencia entregada.

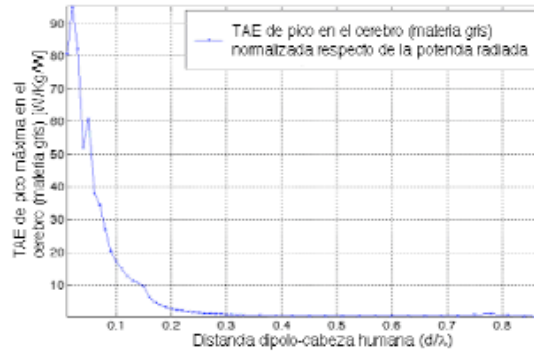


Fig. 4. TAE de pico en el cerebro (materia gris) normalizada respecto de la potencia radiada.

Los resultados de TAE e incremento térmico para una distancia dipolo-cabeza de 10 mm se muestran en la Tabla 2 y se representan en la Fig. 5. Se necesitó entregar una potencia de 19 W para mantener la potencia radiada (no absorbida) igual a 1 W. Los resultados se presentan para los tejidos encontrados a lo largo de una línea horizontal perpendicular al modelo de cabeza desde el PRO, como en [2]. Mientras que la TAE normalizada respecto de la potencia entregada siempre se mantiene por debajo de los límites de seguridad, se pueden encontrar algunos incrementos térmicos en torno a 1 °C, más concretamente en el tejido cartilaginoso. Esto sugiere que el incremento térmico, ahora disponible gracias a técnicas de computación avanzadas, podría ser empleado para complementar las actuales restricciones a exposición electromagnética basadas en la TAE. Cabe destacar que la naturaleza protectora del cráneo frente a la exposición a campos EM, descrita en [9], ha sido validada aquí. El cráneo sufre incrementos térmicos mayores que otros tejidos, debido a su baja conductividad térmica, pero esto previene que el calor sea transferido de manera efectiva al cerebro, donde podría ser potencialmente peligroso.

4 Conclusiones

Aunque el modelo desarrollado en esta contribución es bidimensional y por tanto las conclusiones aquí derivadas no pueden ser extendidas directamente a modelos tridimensionales más complicados, la combinación de la

Tejido	TAE promediada por tejido, normalizada respecto de la potencia entregada	ΔT de pico tras 6 min.	ΔT de pico tras 30 min.
Cerebro (Cerebelo)	0.005415	0.047672	0.058327
Cerebro (Materia Blanca)	0.016916	0.708660	1.080720
Cerebro (Materia Gris)	0.024830	1.663100	2.927550
Hueso (Poroso)	0.003367	1.023300	2.503340
Hueso (Cortical)	0.006274	3.562570	6.403150
Hueso (Médula)	0.000546	0.790331	2.072100
Piel	0.294709	10.742800	13.378900
Sangre	0.000200	0.000372	0.000903
Vaso sanguíneo	0.000038	0.000175	0.000338

Tabla 2. TAE e incremento térmico

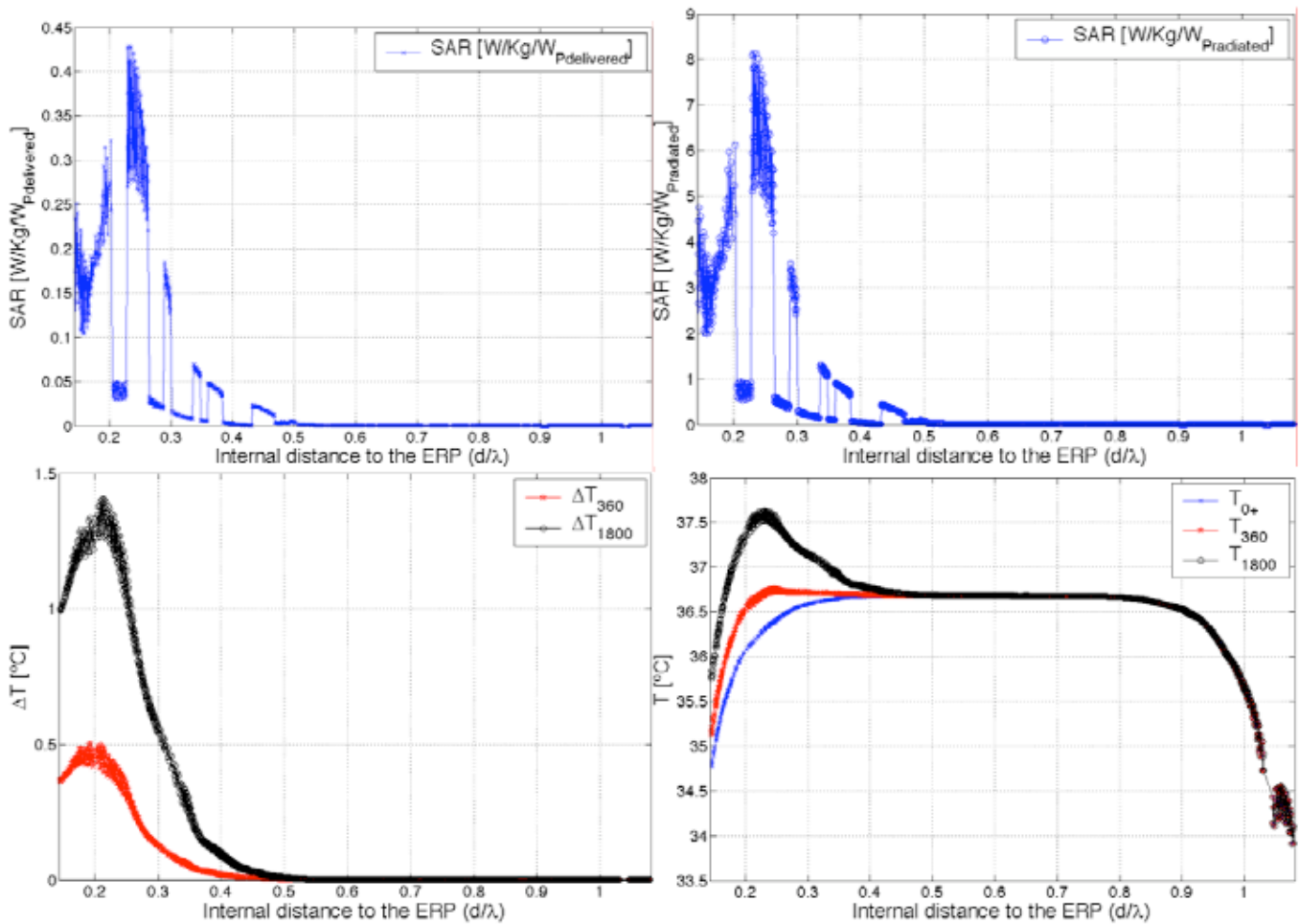


Fig. 5. TAE normalizada respecto de la potencia entregada y radiada al espacio libre (no absorbida por el usuario), incremento térmico tras 6 min. y 30 min., y temperatura a lo largo de los tejidos desde el PRO.

exposición a campo electromagnético con la respuesta termorregulatoria humana ha proporcionado algunos resultados interesantes. Se ha reafirmado la naturaleza protectora del cráneo, y se han encontrado algunos incrementos térmicos por encima de 1 °C en tejidos del cerebro. Todavía hay muchos otros factores a tener en cuenta en el modelo desarrollado, tales como sudoración, respiración, pérdidas de calor variables en los pulmones, capilaridad, vasodilatación, flujo sanguíneo o metabolismo variables, vestimenta, ritmo cardíaco o incluso alteraciones en la propia respuesta termorregulatoria debidas a que se incremente la temperatura en el hipotálamo por la energía de RF depositada, etc. Sin embargo, con los potentes recursos computacionales disponibles hoy no es arriesgado concebir la posibilidad de reducir las incertidumbres científicas actuales respecto a exposición humana a campos EM, ya reconocidos, mediante el empleo de los factores de protección y escenarios de peor caso de acoplo electromagnético, cuando se derivan los límites de seguridad, mediante

el uso de 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. El modelo descrito puede ser útil para operaciones de cirugía relativamente nuevas como implantes para estimulación cerebral profunda (ECP, del inglés *Deep Brain Stimulation*, DBS) donde los electrodos pueden provocar calentamiento en los tejidos si se realizaran exploraciones mediante resonancia magnética para evaluar las enfermedades de Parkinson o Alzheimer. También puede ser útil para la correcta evaluación de respuestas del cuerpo a marcapasos o a cardioversores desfibriladores implantables (CDI) durante la pulsación de RF, o para la evaluación de la respuesta de neuroestimuladores o válvulas hidrocefálicas a la exposición a teléfonos móviles.

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.

Referencias

- [1] Lin, J.C., "Safety standards for human exposure to radio frequency radiation and their biological rationale", *IEEE Microwave magazine*, pp. 22-26, Dec. 2003.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Ghandi, O.P., Lazzi, G., Furse, C.M., "Electromagnetic Absorption in the Human Head and Neck for Mobile Telephones at 835 and 1900 MHz", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1865-1873, 1996.
- [9] García-Fernández, M. A., Valenzuela-Valdés, J., Martínez-González, A. M., Sánchez-Hernández, D., "Thermoregulatory Response to Electromagnetic Plane-Wave Exposure at 900 MHz", *Proceedings of The European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2006 (ESA SP-626)*. 6-10 November 2006, Nice, France. Editors: H. Lacoste & I. Ouwehand. Published on CDROM., p.657.1, 10/2006.