

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS RADIADOS POR TELÉFONOS CELULARES

Javier Rodríguez¹, Lauriano Portilla², Juan Curi³

Recepcionado: 02 de noviembre de 2012.

Aceptado: 04 de noviembre de 2013.

Resumen

Este trabajo trata sobre la simulación numérica de campos electromagnéticos en medios biológicos. El objetivo principal es modelar y simular la absorción, por parte de la cabeza humana, de las ondas electromagnéticas que emiten los teléfonos celulares. En primer lugar se realiza el modelamiento numérico de una región de interés de la cabeza (discretización del dominio) para lo cual nos ayudamos de imágenes de resonancia magnética obtenidos de la literatura; luego formulamos el modelo matemático de los campos electromagnéticos por medio de las ecuaciones de Maxwell donde se incorporan la propiedad quiral del cerebro y los campos electromagnéticos a baja frecuencia emanados por la batería del celular. El cálculo numérico de los campos electromagnéticos radiados por el celular se realiza por medio de una adaptación del método de Diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD). Finalmente se simuló la Tasa de Absorción Específica (SAR) variando el factor quiral. La simulación fue implementada en Matlab, lo cual mostró la distribución del SAR en vista tridimensional y una vista de perfil que permitió observar los valores máximos del SAR. La conclusión más importante es que considerando el factor quiral del medio biológico, se detectó que existe mayor absorción de la radiación emitida por teléfonos celulares con respecto a resultados de modelos clásicos.

Palabras claves: Campos electromagnéticos, Tasa de Absorción Específica, microondas, modelo matemático, simulación numérica, ecuaciones de Maxwell, quiralidad, Matlab.

Abstract

This work is about the numerical simulation of electromagnetic fields on biological systems. The main goal of this study is modeling and simulation of the electromagnetic absorption in the human head, emanated by the cellular telephones. First we carried out the numerical modeling of a region of interest of the head (discretization of domain) by using scans and images of magnetic resonance obtained of literature. Next we formulated the electromagnetic fields mathematical model deduced with Maxwell's equations considering the brain chiral property and low frequency electromagnetic fields emanated by cellular battery. Then the numerical analysis of the electromagnetic fields radiated by the cellular phone was performed by using the finite-difference time-domain method (FDTD). Finally the Rate of Specific Absorption (SAR) is simulated by changing the factor chiral. The simulation was implemented in Matlab which showed the distribution of the SAR in three-dimensional sight and a side view to observe the maximum values of the SAR. The most important conclusion by considering the chiral factor of the biological media, is that it was detected a major absorption of the radiation emitted by cellular telephones with regard to results of classic models.

Key words: Electromagnetic fields, Rate of Specific Absorption, microwaves, mathematical model, numerical simulation, Maxwell's equations, chirality, Matlab.

¹ M.Sc. Lic. en Matemáticas. Docente de la Facultad de Ingeniería en Informática y Sistemas, Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), Tingo María - Perú. E-mail: javier69rodriguez@hotmail.com

² M.Sc. Lic. en Matemáticas. Docente de la Facultad de Ingeniería en Informática y Sistemas, Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), Tingo María - Perú. E-mail: laurianops@yahoo.es

³ Lic. en Matemáticas. Docente de la Facultad de Ingeniería en Informática y Sistemas, Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), Tingo María - Perú. E-mail: jccg75@hotmail.com

Introducción

El sistema móvil global de comunicaciones (GSM), empleado en telefonía celular, ha sido identificado como una posible fuente dañina para la salud humana. La radiación electromagnética de radiofrecuencia, emitida por las antenas de teléfonos celulares y de estaciones bases, puede penetrar los tejidos orgánicos para luego ser absorbida y convertida en calor, alterando sus funciones como resultado del cambio de temperatura. La proximidad, de una antena de teléfono celular a la cabeza del usuario, lleva a la acumulación de una relativamente alta cantidad de energía de radiofrecuencia en la cabeza, durante un período de tiempo relativamente corto pero de índole repetitiva. La cabeza de los usuarios está sometida a una exposición altamente localizada de RF (1).

La tasa de absorción específica (Specific Absorption Rate, SAR) es una medida de la potencia máxima con que un campo electromagnético de radiofrecuencia es absorbido por el tejido vivo.

Existen algunas investigaciones que presentan simulaciones de la absorción de las ondas electromagnéticas en medios biológicos, particularmente de la cabeza (1, 2, 3, 4, 5), sin embargo los modelos de la estructura de la cabeza son muy simples y no consideran la propiedad quiral del cerebro.

En teoría, cuando un campo electromagnético incide sobre una estructura de una forma arbitraria, las ecuaciones de Maxwell pueden ser utilizadas para conocer el valor exacto de la reflexión en cualquier punto del espacio. Sin embargo, una solución analítica de la distribución del campo está restringida a un cierto número de geometrías; donde es posible realizar los métodos tradicionales de solución de ecuaciones diferenciales. Cuando la geometría se vuelve más complicada, sólo es posible conocer el valor del campo por medio de métodos numéricos. Durante las últimas décadas han sido desarrollados diversos métodos para resolver numéricamente las ecuaciones de Maxwell. Entre estas técnicas se encuentra el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) (6, 7, 8). Actualmente, el método FDTD es ampliamente utilizado para la descripción del campo electromagnético en diversas situaciones físicas, así como también en medios biológicos obteniéndose muy buenos resultados (1, 3, 6, 7).

Aquí usamos el método FDTD modificándolo de tal manera que considere la heterogeneidad y las

propiedades quirales del cerebro con el propósito de obtener una simulación más real del fenómeno descrito.

Materiales y métodos

Modelado de la cabeza humana

De la referencia (3) se tomó un modelo esquemático de la cabeza humana que representa un corte transversal (corte 35) de los 54 cortes tomados de la cabeza en base a imágenes de resonancia magnética (Figura 1).

El motivo por el cual se toma el corte 35, es porque allí se encuentra en mayor proporción el sector cerebro.

Este modelo representa un dominio de celdas cuadradas $\Delta x = \Delta y = 0.5$ cm, la parte que corresponde a la cabeza está contenida en el cuadrado de 40×40 celdas.

Consideraremos que el modelo de la cabeza está contenido en un mallado de 54×54 con el fin de ubicar las condiciones de frontera absorbentes a una distancia apropiada del objeto de interés (la cabeza) y además nos permite ubicar la fuente (celular).

Esta malla es representada en formato de una matriz (Figura 2) guardada en un archivo matlab, tejido, en la cual se distinguen los diferentes tejidos con un número, de la siguiente manera:

Aire	:	0
Piel	:	1
Hueso	:	2
Sangre	:	3
Cerebro	:	4

Los valores de la permitividad relativa (ϵ_r), conductividad eléctrica (σ) y densidad volumétrica de masa (ρ) en cada uno de los tejidos descritos anteriormente se dan en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Valor de los parámetros en cada uno de los medios

Tipo de tejido	medio	900MHz		
		$\epsilon_r (F/m)$	$\sigma (S/m)$	$\rho (g/m^3)$
Aire	0	1	0	1000
Piel	1	23	0,63	1000
Hueso	2	5,4	0,04	1200
Sangre	3	59	1,26	1000
Cerebro	4	51	1,46	1050

Modelado matemático de los campos electromagnéticos radiados por el celular

Considerando una región del espacio que no posee fuentes de corriente eléctrica ni magnética, pero que puede tener materiales que absorben la energía de los campos electromagnéticos (pérdidas), la evaluación de los campos electromagnéticos se realiza por medio de las ecuaciones de Maxwell (6,7) dadas por:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + \sigma E \quad (2)$$

Inserción de la quiralidad

La quiralidad puede modelarse por medio de las ecuaciones de Maxwell agregando a la polarización P un término proporcional a $\nabla \times E$. Las ecuaciones de Born-Fedorov permiten caracterizar el medio quiral por medio de las siguientes ecuaciones constitutivas:

$$D = \varepsilon(E + \beta \cdot \nabla \times E) \quad (3)$$

$$B = \mu(H + \beta \cdot \nabla \times H) \quad (4)$$

Dónde:

- ε : Permitividad
- μ : Permeabilidad
- β : Seudoescalar quiral

Las ecuaciones (3) y (4) son llamadas las ecuaciones constitutivas de Born-Fedorov para la quiralidad en medios lineales isotrópicos y no dispersivos.

Inserción del campo magnético a bajas frecuencias

El campo magnético a bajas frecuencias se incluye por medio de una descomposición del campo B:

$$B = B + B_0 \quad (5)$$

En donde B_0 es la densidad de flujo magnético en baja frecuencia. Reemplazando esta ecuación en (1):

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - B_0 \omega_0 \quad (6)$$

Para la simulación de los campos electromagnéticos vamos a considerar que la estructura a modelar se extiende infinitamente en la dirección-z por lo cual, las derivadas parciales con respecto a "z" son iguales a cero. Esto origina que los resultados se presenten como en

estructura planar (x-y) pero serán válidos hasta una profundidad de $z = 0,5 \text{ cm}$. Es decir la estructura planar será equivalente a una estructura volumétrica de $40 \times 40 \times 1$.

Las ecuaciones (2) y (6) quedan expresadas en sus componentes como:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial y} + \beta \omega k_y H_z - \frac{1}{\mu} B_{0x} \omega_{0x} \quad (7a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x} - \beta \omega k_x H_z - \frac{1}{\mu} B_{0y} \omega_{0y} \quad (7b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} + \beta \omega (k_x H_y - k_y H_x) - \frac{1}{\mu} B_{0z} \omega_{0z} \quad (7c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_z}{\partial y} + \beta \omega k_y E_z - \frac{1}{\varepsilon} \sigma E_x \quad (8a)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \beta \omega k_x E_z - \frac{1}{\varepsilon} \sigma E_y \quad (8b)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} + \beta \omega (k_x E_y - k_y E_x) - \frac{1}{\varepsilon} \sigma E_z \quad (8c)$$

Las ecuaciones (7) y (8) constituyen el modelo matemático para calcular los campos electromagnéticos radiados por el teléfono celular en la cabeza humana, considerando a la cabeza como un dominio heterogéneo con medios 1, 2, 3 y 4 que corresponden a la piel, hueso, sangre y cerebro respectivamente y además considerando la propiedad quiral en el cerebro y la sangre. Dichas ecuaciones se discretizaron para su implementación en Matlab.

Calculo del sar:

Para el cálculo del SAR usamos:

$$SAR_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j} E_{T,i,j}^2}{2\rho(i,j)} \quad (9)$$

Dónde:

- ρ : Densidad volumétrica de masa del tejido correspondiente medida en kg/m^3 .
- σ : Conductividad del tejido correspondiente y

$$E_{T,i,j} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n E_x^m i,j^2 + E_y^m i,j^2 + E_z^m i,j^2 \quad (10)$$

Modelado de fuente de radiación

La fuente de radiación del teléfono celular fue modelada por una antena dipolo equivalente R_s que varía entre 40 y 200 ohms. Como potencia transmitida asumimos los valores máximos permitidos a saber 0.25, 2 y 3.56 W. Como la potencia está dada por $P = V^2/2R_s$, el voltaje a través de la resistencia de antena se determina como una función de R_s (10).

Discusión

Simulación para factor quirral y campo de baja frecuencia nulos

Comenzamos presentando la simulación del SAR considerando una distancia cabeza-celular de 2 cm por ser la más habitual y variando los pasos temporales de 2000 a 4000. Los resultados se pueden resumir en la Cuadro 2. Como vemos el SAR va en aumento conforme avanza el número de pasos temporales iniciándose el SAR máximo en la piel y luego pasa al cerebro. En todos los casos se obtienen valores de SAR que están de acorde con los valores máximos permitidos (0,5-1.6 W/kg) (9), aunque éste aumenta considerablemente con el aumento del número de pasos.

En la Figura 3 podemos observar la distribución del SAR en la cabeza humana y sus vistas en perfil x de las mismas a 3000 pasos temporales.

En la Figura 4 se muestra una comparación de la distribución del SAR para diferentes números de pasos temporales. Aquí se observa que a medida que aumentan los pasos temporales, el SAR se incrementa en toda la amplitud de la cabeza de manera uniforme.

Cuadro 2. SAR Máximo Para factor quirral y campo magnético nulo

Pasos temporales	SAR máximo (SARMAX)	Coordenadas	Tejido
2000	0.2143	(2,20)	Piel
2500	0.2248	(2,20)	Piel
3000	0.2819	(7,19)	Cerebro
3500	0.3693	(7,19)	Cerebro
4000	0.4880	(7,19)	Cerebro

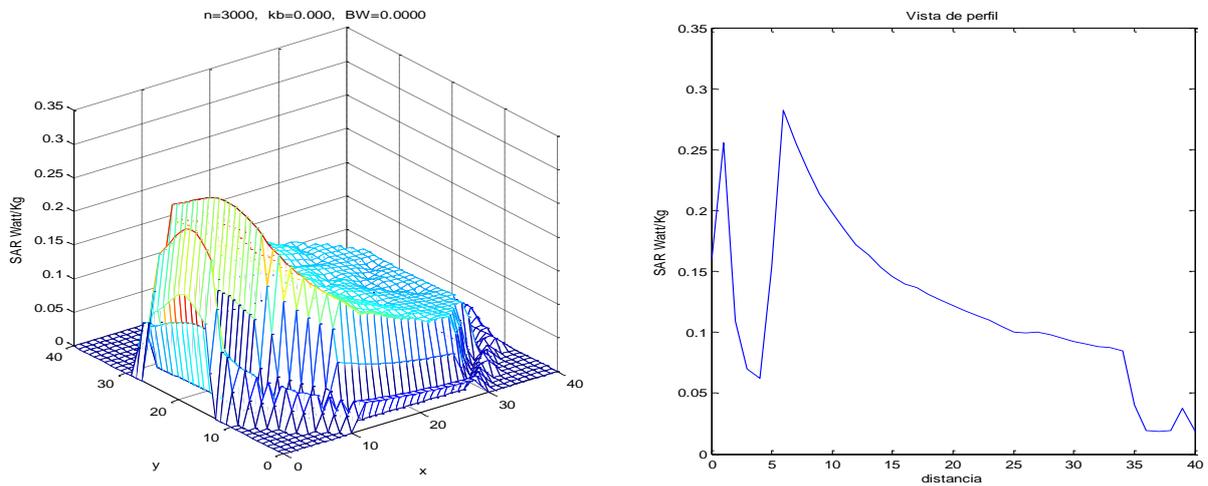


Figura 3. Resultado matriz SAR para un factor quirral nulo y vista perfil x con 3000 pasos

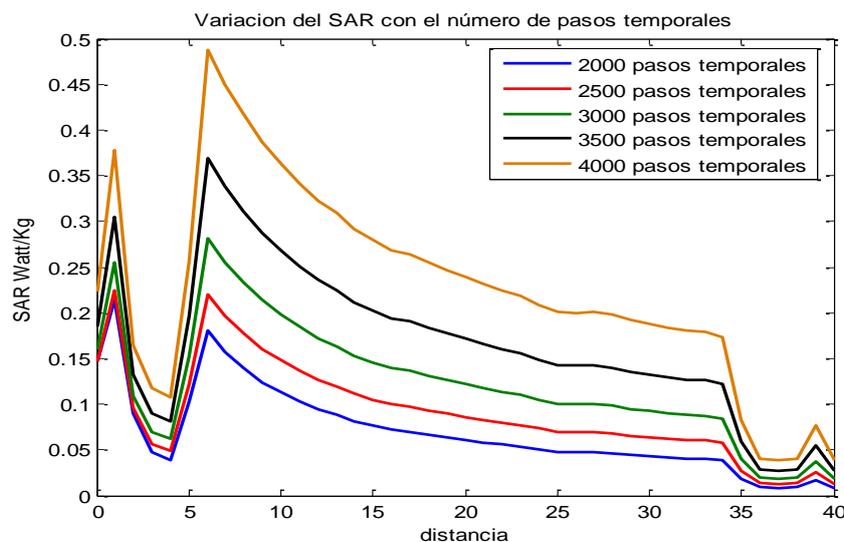


Figura 4. Comparación variación del SAR para diferentes números de pasos temporales

Simulación con factor quiral no nulo

Los resultados para 2000 pasos temporales se resumen en la Cuadro 3. Se puede observar que al tomar el factor quiral, el SAR aumento hasta en un 159% con respecto al caso aquiral.

En la Figura 5 se comparan los perfiles de la distribución del SAR en la cabeza humana para diferentes factores quirales: 0.5, 1, 1.5 y 2, con 2000 pasos temporales, donde se nota que el SAR va en aumento en función del aumento del factor quiral e incluso cambia un poco su distribución.

En la Figura 6 podemos observar que el aumento del SAR es en mayor proporción, pero la distribución en la amplitud de la cabeza ya no es tan uniforme.

Los resultados para 3000 pasos temporales se resumen en la Cuadro 4. Se puede observar que

el SARMAX aumentó hasta en un 182% con respecto al caso aquiral.

En la Figura 7 se comparan los perfiles de la distribución del SAR para este caso. Aquí podemos observar que la distribución del SAR es similar al caso anterior, pero el valor pico del SAR (sarmax) se incrementa en mayor proporción.

Cuadro 3. Variación del SAR Máximo en función del factor quiral a 2000 pasos

Factor quiral	SARMAX	Variación	Aumento del SAR %	Coordenadas	Tejido
0	0.2143			(2,20)	piel
0.5	0.359	0.1447	68%	(7,16)	cerebro
1	0.4596	0.2453	114%	(7,14)	cerebro
1.5	0.5457	0.3314	155%	(7,13)	cerebro
2	0.5548	0.3405	159%	(7,13)	cerebro

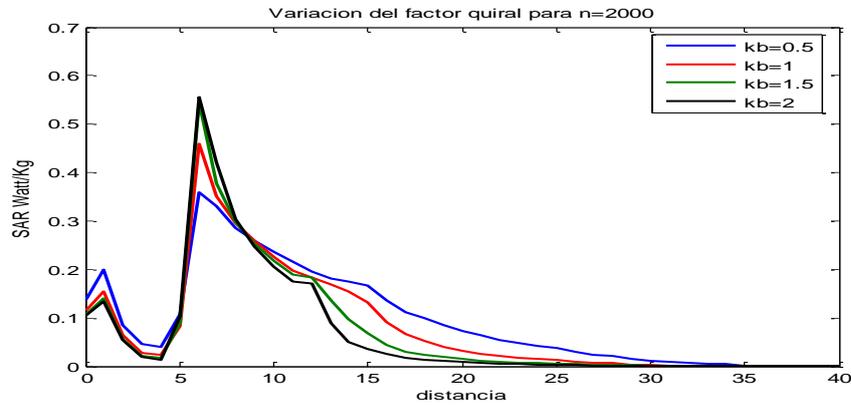


Figura 5. Comparación del SAR para distintos factores quirales

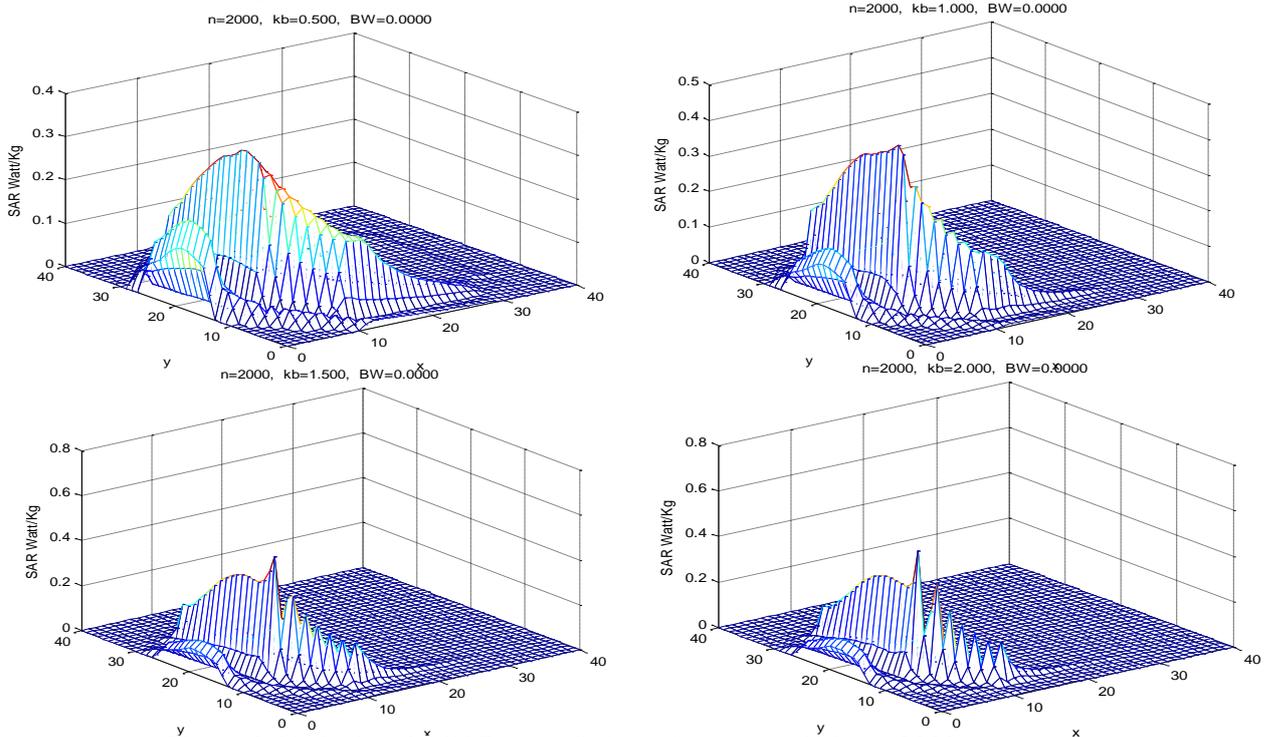


Figura 6. Variación del SAR para distintos factores quirales a 2000 pasos

Cuadro 4. Variación del SAR Máximo en función del factor quirral a 3000 pasos

Factor quirral	SARMAX	Variación	Aumento del SAR %	Coordenadas	Tejido
0	0.2819			(7,19)	cerebro
0.5	0.5346	0.2527	90%	(7,17)	cerebro
1	0.6692	0.3873	137%	(7,14)	cerebro
1.5	0.7869	0.505	179%	(7,13)	cerebro
2	0.7942	0.5123	182%	(7,13)	cerebro

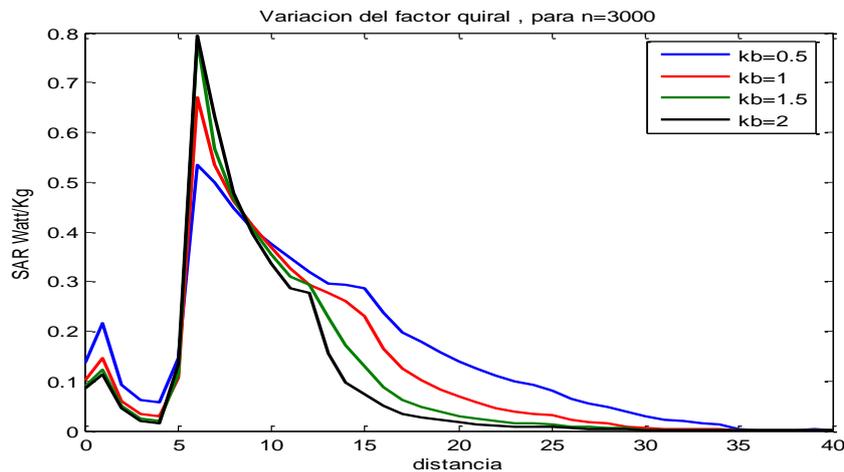


Figura 7. Comparación del SAR para distintos factores quirales a 3000 pasos

Simulación con campo magnético a baja frecuencia

Para simular la variación del SAR para campo magnético a baja frecuencia no nulo, se ha creído conveniente considerar 3000 pasos temporales y un factor de quiralidad de 1. Los resultados para diferentes valores del campo magnético a baja frecuencia se resumen en la Cuadro 5.

En la Figura 8 se compara la distribución del SAR. Aquí se observa que aunque el SARMAX inicialmente disminuye un poco, al aumentar el campo magnético llega a incrementarse, es más el valor del SAR siempre se incrementa en la mayor amplitud de la cabeza.

Cuadro 5. Variación del SAR Máximo con campo magnético a baja frecuencia

Campo magnético	SARMAX	Coordenadas	Tejido
0	0.6692	(14,7)	cerebro
0.01	0.6675	(14,7)	cerebro
0.1	0.6532	(14,7)	cerebro
0.2	0.6388	(14,7)	cerebro
0.3	0.6259	(14,7)	cerebro
0.4	0.6186	(15,7)	cerebro
0.5	0.8444	(35,9)	hueso

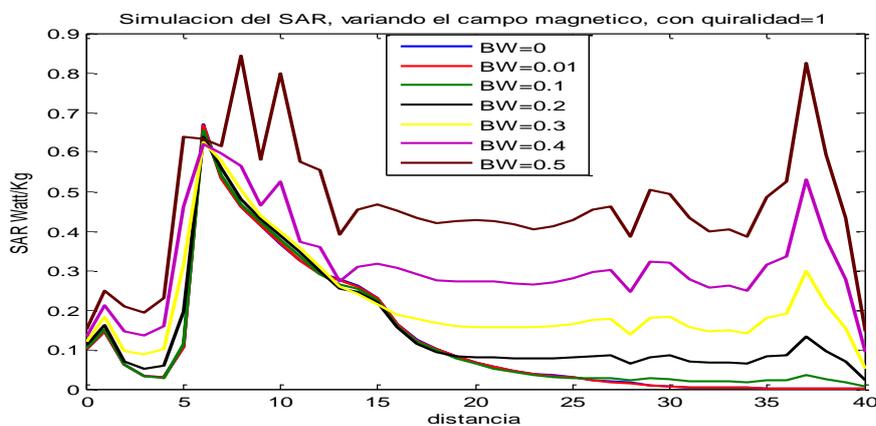


Figura 8. Simulación del SAR para un campo magnético no nulo variable

Variación de la distancia celular-cabeza

Las simulaciones anteriores se hicieron a una distancia de 2 cm que es la más usual sin embargo aquí se observa que pasa si reducimos o ampliamos dicha distancia. Los resultados se resumen en la Cuadro 6.

En la Figura 9 se simula la variación de la distancia cabeza-celular para 3000 pasos temporales con factor quiral 1 y sin considerar el campo magnético a baja frecuencia. Podemos observar que cuando acercamos el celular al oído el SAR aumenta y si lo alejamos, el SAR disminuye.

Cuadro 6. Variación del SAR Máximo en función de la distancia cabeza-celular

Distancia cabeza-celular (cm)	SARMAX	Coordenadas	Tejido
0.5	0.7285	(7,20)	cerebro
1	0.6794	(7,14)	cerebro
1.5	0.6744	(7,14)	cerebro
2	0.6692	(7,14)	cerebro
2.5	0.6641	(7,14)	cerebro
3	0.6596	(7,14)	cerebro

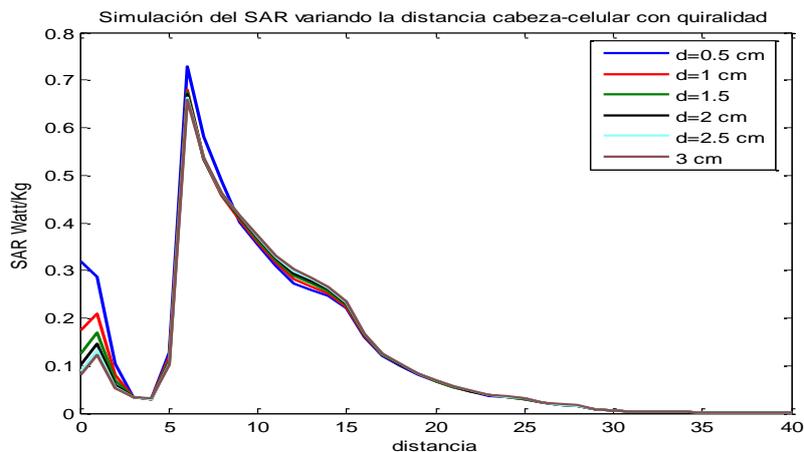


Figura 9. Variación del SAR con respecto a la distancia celular-cabeza, n=3000 y kb= 1

Conclusiones

1. La simulación de los campos electromagnéticos en medios orgánicos como la cabeza del ser humano fue posible mediante el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo y el algoritmo de Yee.
2. Se obtuvo un modelo matemático específico para la simulación de ondas electromagnéticas en la cabeza humana que considera la heterogeneidad del medio y la particularidad de la quiralidad del cerebro humano. El modelo presentado permite determinar y evaluar la absorción inducida por la radiación de teléfonos celulares.
3. El modelo matemático propuesto se puede usar para el cálculo del SAR en cualquier medio orgánico, aquí se hizo para la cabeza humana pero de igual forma se podría simular la radiación electromagnética en algún otro órgano considerando los parámetros específicos en cada caso.
4. El uso de imágenes de resonancia magnética (MRI) en conjunto con el modelo de celdas del método FDTD permitió modelar más eficientemente el dominio de interés necesario para la simulación de la absorción

5. de los campos electromagnéticos radiados por el celular.
5. Se logró implementar un código de computador en el programa MATLAB que resulta muy versátil por sus características gráficas.
6. En todos los resultados obtenidos correspondientes a la simulación del corte transversal de la cabeza, las curvas correspondientes al SAR se atenúan conforme la onda ingresa a la cabeza y el valor del SARMAX está dentro de los límites permitidos.
7. Los valores máximos del SAR, se encuentran en la piel y en el cerebro, incrementándose el valor según aumenta el factor quiral.
8. Cuando se incluye el campo magnético a baja frecuencia junto con la quiralidad se observa aún más el aumento del SAR, por lo que podemos afirmar que el campo magnético a baja frecuencia también influye en la absorción de los campos electromagnéticos.
9. La contribución de este trabajo es, haber implementado computacionalmente a partir de los modelos tradicionales un nuevo modelo que considera la quiralidad del tejido

cerebral y el campo magnético de baja frecuencia generado por la batería del celular.

Referencias bibliográficas

1. Zamorano M, Torres-Silva H, Máximo E. Modelado y simulación del SAR debido a los campos electromagnéticos radiados por teléfonos celulares. *Rev.Univ. de Tarapacá*. 2005; 13 (3).
2. Torres H, Zamorano M. Chiral multiphoton absorption and inverse skin effect in wlan systems, *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá, Arica*. 2005; 13(3).
3. Zamorano M, Torres-Silva. SAR inducido en un modelo bioplasmático quiral por radiación de teléfonos celulares. *Rev. Mex. Fís.*; 2004.
4. Acevedo A. Teoría y simulación de capas de metamateriales en la absorción de radiación de teléfonos celulares. Tesis de pregrado. Arica, Universidad de Tarapacá; 2004.
5. Nonidez L. Métodos de predicción numérica en el dominio del tiempo para dosimetría electromagnética en alta frecuencia en relación al cumplimiento de estándares sobre exposición humana. Tesis doctoral. Madrid, Universidad Politecnica de Madrid; 2001.
6. Taflove A. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Boston, Artech House; 1995.
7. Dennis M. *Electromagnetic simulation using the FDTD method*. NewYork, IEEE Press Series on Microwave technology; 2000.
8. Taflove A, Hagness S. *Computational Eelectrodynamics: The Finite-Difference Time Domain Method*. 2ª ed. Boston, Artech House; 2000.
9. Torres H, Zamorano M. The Journal Mathematics and Computers in Simulation. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*; 2003.
10. Gonzales O. Extensión del método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo para el estudio de estructuras híbridas de microondas incluyendo circuitos concentrados activos y pasivos. Tesis Doctoral. Santander: Universidad de Cantabria; 2008.