

Modelo matemático de las quemaduras inducidas en toma de imágenes por Resonancia Magnética Nuclear.

Luis Manuel Chávez Antonio¹, Silvia Hidalgo Tóbon^{1,2}

¹Departamento de Física, UAM-Iztapalapa, México CDMX.

²Departamento de Imagenología, Hospital infantil de México, Federico Gómez, México CDMX.

E-mail:¹ luis.chavez.060894@gmail.com, ² shid@xanum.uam.mx

Resumen — El estudio de las quemaduras inducidas en un estudio de resonancia magnética, aunque poco común, ha tomado gran relevancia debido a que es un problema de seguridad. La mayoría de estas lesiones térmicas se producen cuando el paciente está en contacto con algún tipo de dispositivo de monitorización fisiológica, o por lo general se produce donde la piel está en contacto con la antena de RF o forma un bucle con partes de su cuerpo. Las quemaduras producidas por resonancia magnética se rigen por las interacciones por los pulsos de radiofrecuencia (RF) de las secuencias que generan las bobinas y la absorción de esta onda electromagnética en los tejidos. Este estudio tuvo como objetivo obtener una expresión matemática de la corriente y potencia inducida en el bucle de tejido (circuito) formado, donde ocurrirá la quemadura. Se utilizó la teoría de circuitos eléctricos para obtener una ecuación que describe el comportamiento de la carga en el bucle, y el formalismo de las series de Fourier para expresar el potencial generado por las secuencias. Al resolver la ecuación diferencial de segundo orden se obtuvieron expresiones para la corriente y potencia disipada en el circuito y el potencial generado. Estas expresiones se graficaron en Matlab. El modelo matemático propuesto describe el fenómeno de las quemaduras, dando así la corriente y potencia disipada en el bucle de tejido en términos de las secuencias y propiedades eléctricas de la piel.

Palabras Clave – bucle de tejido, pulsos de RF, secuencias

Abstract — The study of induced burns in a magnetic resonance study, although uncommon, has taken on great relevance because it is a safety issue. Most of these thermal injuries occur when the patient is in contact with some type of physiological monitoring device, or typically occur where the skin is in contact with the RF antenna or loops with parts of their body. The burns produced by magnetic resonance are governed by the interactions by the radiofrequency (RF) pulses of the sequences generated by the coils and the absorption of this electromagnetic wave in the tissues. This study aimed to obtain a mathematical expression of the current and power induced in the tissue loop (circuit) formed, where the burn will occur. The theory of electrical circuits was used to obtain an equation that describes the behavior of the charge in the loop, and the formalism of the Fourier series for the potential generated by the sequences. Solving the second order differential formula gives expressions for the current and power dissipated in the circuit and the potential generated. These expressions were plotted in Matlab. Conclusions: the proposed mathematical model describes the phenomenon of burns, thus giving the current and power dissipated in the tissue loop in terms of the sequences and electrical properties of the skin.

Keywords — tissue loop, RF pulses, sequences

I. INTRODUCCIÓN

La resonancia magnética nuclear se ha convertido en un procedimiento de diagnóstico estándar en la medicina clínica, los escáneres de resonancia magnética modernos, utiliza un campo magnético estático muy fuerte, campos magnéticos de gradiente adicionales y ondas cortas de alta frecuencia de campos de radiofrecuencia (RF) para excitar protones [1]. La obtención de imágenes de los seres humanos reside en la capacidad de manipular, con una combinación de campos magnéticos, y luego detectar, la precesión masiva de los espines de hidrógeno en el agua, la grasa y otras moléculas orgánicas [2].

Una de las razones del entusiasmo por la resonancia magnética es su seguridad, donde la naturaleza no invasiva de los campos magnéticos empleados hace posible diagnosticar afecciones en personas de casi cualquier edad. Se utiliza para detectar enfermedades, lesiones y una variedad de problemas, con más de 60 millones de estudios de resonancia magnética al año. Sin embargo, debido a su fiabilidad en sus resultados para los estudios clínicos, hay un porcentaje muy bajo en el que se producen accidentes deliberados, cómo hacer movimientos inapropiados en el resonador y producir una quemadura, etc.

El estudio de las quemaduras producidas por resonancia magnética, aunque poco común, ha tomado gran relevancia debido a que es un problema de seguridad [3]. Las quemaduras se producen por las interacciones de los pulsos de radiofrecuencia (RF) de las bobinas y la absorción de esta onda electromagnética en los tejidos.

Durante un procedimiento de RM, las ondas de RF son transmitidas por la bobina que induce corriente de alta frecuencia en los tejidos [4]. La mayor parte de la potencia de RF transmitida se transforma en calor dentro del tejido del paciente como resultado de las pérdidas resistivas.

La mayoría de estas lesiones térmicas se producen cuando el paciente está conectado a algún tipo de dispositivo de monitorización fisiológica, o por lo general se produce donde la piel está en contacto con la antena de RF o forma un bucle con parte de su cuerpo, Fig. 1, es decir, forma un circuito, y en consecuencia se presenta quemaduras de piel con piel [5], en

el que se ha observado quemaduras de tercer grado durante un examen simple de imágenes por resonancia magnética.



Fig. 1. Muestra un bucle de tejido conductor, formado por parte del cuerpo y una antena de RF

El calentamiento electromagnético por inducción de los cables de monitoreo a menudo se ha considerado la causa principal de lesiones térmicas sufridas durante la resonancia magnética [6]. La formación de un bucle en el cable del monitor aumentaría la inductancia del circuito y, por lo tanto, se induce corrientes más grandes con un mayor calentamiento del cable [7].

En la literatura se reporta un caso inusual en un paciente [8], durante la resonancia magnética, se creó un bucle conductor en el cuerpo del paciente [9] que se presenta esquemáticamente en la Fig. 2. El paciente forma un circuito con sus piernas cuando ambas pantorrillas se tocan entre sí, como resultado de la inducción magnética en el cuerpo se tiene como consecuencia una corriente en el bucle que depende de la resistencia del tejido, lo que significó un aumento de la temperatura en las zonas fronterizas y causó una quemadura.

Para un bucle de tejido se propone que la piel se comporta como un circuito RLC. La inductancia (L_{bucle}) y la resistencia (R_{bucle}) del bucle, representan la trayectoria de la corriente a través de las dos piernas y el tronco [10]. La piel con sus capas en donde se tiene contacto es modelado con una resistencia (R_{piel}) y un capacitor (C) como se muestra en la Fig.2

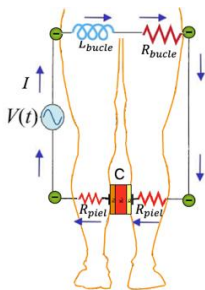


Fig. 2. Bucle de tejido modelado como circuito RLC.

Del esquema anterior, tenemos que las resistencias están conectados en un arreglo en serie, la resistencia equivalente, R_{equi} , para estos resistores es igual a la suma de sus resistencias individuales (1)

$$R = R_{equi} = R_{bucle} + 2 R_{piel} \tag{1}$$

El capacitor equivalente, C_{equi} , es una conexión en serie, dado que el espacio entre las placas paralelas está ocupado por tres bloques de dieléctrico, que representan las capas de la piel, cada uno con una constante dieléctrica k . La capacitancia es [11]

$$C_{equi} = C = \frac{3\epsilon_0 A}{d} \frac{K_1 K_2 K_3}{K_1 K_2 + K_2 K_3 + K_1 K_3} \tag{2}$$

Donde R_i son las resistencias, C es la capacitancia, ϵ_0 es la permitividad del vacío y k_i es la constante del dieléctrico. El circuito mostrado en la Fig. 2, se simplifica como se muestra en la Fig. 3

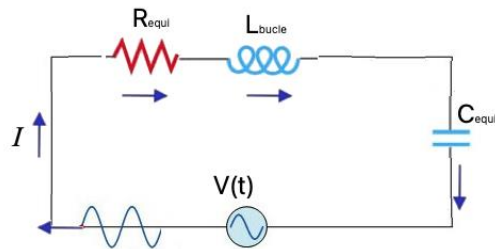


Fig. 3. Circuito RLC, con resistencia y capacitor equivalente.

Sí, hay ruptura de dieléctrico, el dieléctrico se quema y se convierte en un conductor [12]. Cuando sucede dicho fenómeno lo vamos a asociar con el momento en que se forma la quemadura o edema.

Al suponer que la corriente I viaja sobre el cuerpo humano debido a los iones que se encuentran en el fluido corporal, donde a nivel celular se forman los llamados canales iónicos en el cual pasan iones como calcio, sodio, potasio, etc., y genera una corriente que viaja por los axones de las neuronas hasta el cerebro [13].

Se sabe que las quemaduras por resonancia, las que son reportadas, son más comunes para secuencias como la turbo espín eco [14], esta secuencia consiste en mandar pulsos de RF de 90° y posteriormente mandar pulsos de 180° para refasar el vector de magnetización transversal y así obtener ecos (señal) con un solo pulso de 90° , estas secuencias son más rápidas que el espín eco (SE) [15], sin embargo, el calentamiento por inducción electromagnética ocurrirá

cuando un circuito esté en una condición resonante. Para conocer esta frecuencia resonante, ocuparemos la ley de Kirchhoff para los voltajes (3) [16]

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dQ}{dt} + \omega^2 Q = \frac{V(t)}{L} \quad (3)$$

Donde $\omega^2 = 1/LC$, es la frecuencia de resonancia del circuito, R es la resistencia equivalente del circuito, L la inductancia, Q es la carga del circuito.

El voltaje inducido en la piel, está relacionado con el tipo de secuencia que se le realice al paciente. Ahora se considera una secuencia turbo espín eco Fig. 4, el potencial inducido estará relacionado con los pulsos de 90° que son rectangulares y que se repiten en un tiempo conocido como tiempo de repetición, el cual cuantifica cada cuanto se manda el siguiente pulso de 90° .

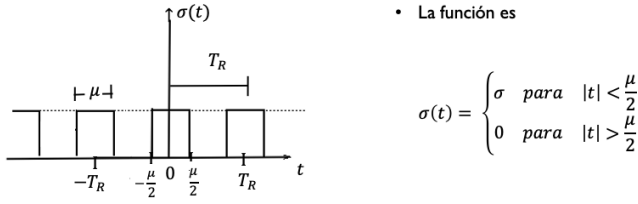


Fig. 4. Voltaje inducido por pulsos de RF. Dónde T_R es el tiempo de repetición y μ es el tiempo de duración del pulso de RF de 90° .

Por tanto, el potencial se propone de acuerdo con la secuencia anterior como $V = \sigma(t)$. Dónde $\sigma(t)$ tiene la siguiente forma (4)

$$\sigma(t) = \frac{\sigma}{2T_R} \mu + \frac{2\sigma}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi\mu}{2T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} \quad (4)$$

La ecuación (4) es la serie de Fourier [17] para el voltaje $\sigma(t)$.

II. METODOLOGÍA

La piel se modela como un circuito RLC cuando se forma un bucle con partes del cuerpo o está en contacto con una antena de RF, y por ley de inducción de Faraday se induce una fem, cuando se somete a las secuencias. Se utilizó el formalismo de la teoría de los circuitos eléctricos, se muestra en (3), para encontrar la carga Q en el circuito y el análisis de las formas de onda por el método de Fourier para el voltaje inducido.

III. RESULTADOS

Al resolver la ecuación (3), se obtiene la carga (5) que hay en el bucle de tejido

$$Q(t) = C_1 e^{m_1 t} + C_2 e^{m_2 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \sin \frac{n\pi t}{T_R} + B_n \cos \frac{n\pi t}{T_R} \right) + D \quad (5)$$

Donde C_1 y C_2 son constantes, $m_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{(R/2L)^2 + \omega^2}$, $m_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{(R/2L)^2 + \omega^2}$, $D = \sigma/\pi L \omega^2$ y

$$A_n = \frac{\omega^2 - \left(\frac{2n\pi}{T_R}\right)^2}{\left(\omega^2 - \left(\frac{2n\pi}{T_R}\right)^2\right)^2 + \frac{R^2}{L^2} \left(\frac{2n\pi}{T_R}\right)^2} \frac{2\sigma}{\pi n L} \sin\left(\frac{2n\pi\mu}{T_R}\right) \quad \text{y} \quad B_n = \frac{\left(\frac{2n\pi}{T_R}\right)}{\left(\omega^2 - \left(\frac{2n\pi}{T_R}\right)^2\right)^2 + \frac{R^2}{L^2} \left(\frac{2n\pi}{T_R}\right)^2} \frac{2\sigma R}{\pi n L^2} \sin\left(\frac{2n\pi\mu}{T_R}\right).$$

Al derivar con respecto del tiempo tenemos la corriente inducida (6)

$$I(t) = C_1 m_1 e^{m_1 t} + C_2 m_2 e^{m_2 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \frac{n\pi}{T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} - B_n \frac{n\pi}{T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} \right) \quad (6)$$

La potencia disipada en la resistencia (7)

$$P(t) = R \left(C_1 m_1 e^{m_1 t} + C_2 m_2 e^{m_2 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \frac{n\pi}{T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} - B_n \frac{n\pi}{T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} \right) \right)^2 \quad (7)$$

Ahora tenemos las gráficas del voltaje, corriente y potencia inducida, realizadas en Matlab Fig. 5

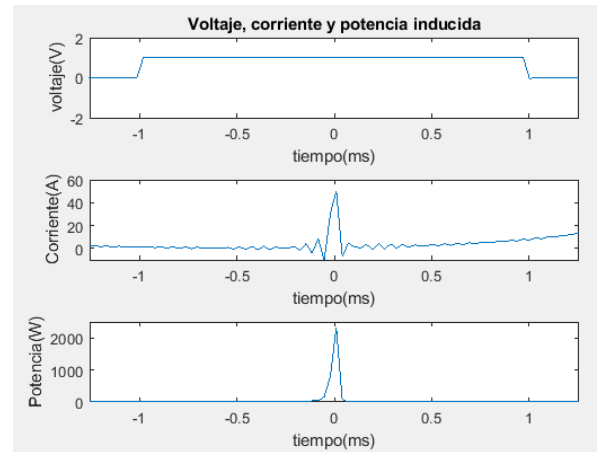


Fig. 5. Se muestra el voltaje, corriente y potencia inducida.

IV. DISCUSIÓN

Los pulsos de RF inducen un voltaje y comienza a fluir corriente en el circuito, la corriente inducida tiene una duración corta teniendo su máximo cuando se manda el pulso y decae como una función sinc, cabe mencionar que la potencia disipada solo existe cuando hay corriente en el bucle, esta transferencia de energía es del mismo orden de duración en tiempo que la corriente, esta rapidez con la que la potencia se disipa en el tejido es lo que conduciría a la quemadura en la piel.

V. CONCLUSIONES

El modelo matemático propuesto describe el fenómeno de las quemaduras cuando se introduce a un paciente en un escáner de resonancia magnética, el modelo proporciona la corriente y la potencia disipada, la cual tiene dependencia de las características eléctricas de la piel y los parámetros de las secuencias de pulsos de radiofrecuencias.

REFERENCIAS

- [1] Haacke, E., Brown, R., Thompson, M., Venkatesan, R. (1999). *"Magnetic resonance imaging: Physical principles and sequence design"*. New York: Wiley-Liss.
- [2] Charles P. Slichter (1963). *"Principles of Magnetic Resonance"*. New York, Evanston y London.
- [3] Leo L, Tsai., Aaron, K., Koenraad, J., Justin, W., Martin, P. (2015). *"A practical Guide to MR Imaging Safety: What Radiologists Need to know"*.
- [4] Frank, Shellock., Karacozoff, M. *"Reference manual for magnetic resonance safety, implants and devices"* Los Angeles: Biomedical research publishing group, pp. 2–23, 2017.
- [5] S. Keevil, "SAFETY IN MAGNETIC RESONANCE IMAGING", *MEDICAL PHYSICS INTERNATIONAL. Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 26–34, 2016.
- [6] F.G. Shellock. "Radiofrequency energy-induced heating during MR procedures: a review." *J Magn Reson Imaging*, 12 (2000), pp. 30–36.
- [7] Dempsey, Mary F., Barrie Condon, and Donald M. Hadley. "Investigation of the factors responsible for burns during MRI." *Journal of Magnetic Resonance Imaging: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine* 13.4 (2001), pp. 627–631.
- [8] Friedstat JS., Moore ME., Goverman J., Fagan SP. "An unusual burn during routine magnetic resonance imaging." *J Burn Care Res*. 2013.
- [9] Gasper Podobnik. "TWO CASES OF MRI-INDUCED SKIN BURN", *Medical Imaging and Radiotherapy Journal*, vol. 37, no. 1, pp. 11–14, 2020.
- [10] Knopp MV., Essig M., Debus J., Zabel HJ., van Kaick G. "Unusual burns of the lower extremities caused by a closed conducting loop in a patient at MR imaging". *Radiology*. vol. 200, no.2, pp. 572–575, 1996.
- [11] Joseph a. Edminister. (2003). *"Theory and Problems of Electric Circuits"*. (1era, ed.) McGraw Hill.
- [12] F.W Sears., M.W. Zemansky., H.D. Young., R.A. Freedmann. (2009). *"Física Universitaria"*, vol. 2, Pearson.
- [13] Constanzo L. *"Fisiología."* Ed. Elsevier, España 2014.
- [14] Nettelblad, H., K. A. Thuomas, and F. Sjober. 1996. "Magnetic resonance imaging: a new diagnostic aid in the care of high-voltage electrical burns. *Burns*, vol. 22, pp. 117-119, 1996.
- [15] Hahn, E.L (1950). "Spin echoes". *Physical Review*, vol. 80, no. 4, pp. 580–594.
- [16] Paul, Lorrain., Dale R, Corson. *"Electromagnetic Fields and Waves"*, W.H Freeman and Company: New York., (1988).
- [17] Georgi P. Tolstov., *"Fourier Series"*, Dover Publications, INC. NEW YORK (1962).