

MODELO MATEMÁTICO DE LAS QUEMADURAS INDUCIDAS EN TOMA DE IMÁGENES POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Luis Manuel Chávez Antonio^a, Silvia Sandra Hidalgo Tobón^{a,b}

^aUniversidad Autónoma Metropolitana, Departamento de física, San Rafael Atlixco, Iztapalapa, CDMX, México, luis.chavez.060894@gmail.com, shid@xanum.uam.mx

^bHospital Infantil de México, Federico Gómez, CDMX, México

RESUMEN

En este trabajo se describe, el modelo matemático, utilizado para el estudio de quemaduras producidas por resonancia magnética (MRI). El estudio de las quemaduras producidas por MRI, está gobernada por interacciones de los pulsos de radiofrecuencia (RF) de las bobinas y la absorción de esta onda electromagnética en los tejidos en los que se cierra el bucle; la piel se modela como un circuito conductor, y por inducción de Faraday circula corriente inducida en dicho bucle al someterse a las secuencias, siendo más predominante en donde se tenga mayor resistencia.

Palabras Claves: Quemaduras por MRI, Bucle de Tejido, Pulsos de RF.P

ABSTRAC

In this work, the mathematical model used for the study of burns produced by magnetic resonance imaging (MRI) is described. The study of burns produced by MRI is governed by the interactions of the radiofrequency (RF) pulses of the coils and the absorption of this electromagnetic wave in the tissues in which the loop is closed; the skin is modeled as a conductive circuit, and by Faraday induction induced current circulates in said loop when subjected to the sequences, being more predominant where there is greater resistance.

Key Words: MRI burns, Tissue loop, Rf pulses

1. INTRODUCCIÓN

La resonancia magnética nuclear se ha convertido en un procedimiento de diagnóstico estándar en la medicina clínica, los escáneres de resonancia magnética modernos, utilizan 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 resonancia magnética se basa en la interacción de espín nuclear con un campo magnético externo B_0 . El núcleo dominante en la resonancia magnética es el protón en el hidrógeno y su interacción con el campo externo da como resultado la precesión del espín del protón alrededor de la dirección del campo.

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 giros de hidrógeno en el agua, la grasa y otras moléculas orgánicas.

Una de las razones del entusiasmo por la resonancia magnética fue y continúa siendo, 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. 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 de interés.

Durante un procedimiento de RM, las ondas de RF son transmitidas por la bobina que induce corriente de alta frecuencia en los tejidos [2]. 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, es decir, forma un circuito, y en consecuencia se presenta quemaduras de piel con piel [3], en el que se ha observado quemaduras de tercer grado durante un examen simple de imágenes por resonancia magnética.

En la literatura se reporta un caso inusual en un paciente [4], durante la resonancia magnética, se creó un bucle conductor cerrado a través del torso y las pierna [5] que se presenta esquemáticamente en la Fig. 1. 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 significo un aumento de la temperatura en las zonas fronterizas y causo una quemadura.



Figura 1. Quemadura en las pantorrillas producidas por resonancia magnética

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. La formación de un bucle en el cable del monitor aumentaría la inductancia del circuito y, por lo tanto, se inducirían corrientes más grandes con un mayor calentamiento del cable.

El peor caso de calentamiento por inducción electromagnética (es decir, inducción de corriente máxima) ocurrirá cuando un circuito esté en ciertas condiciones, una es la condición resonante que se logra cuando la frecuencia de los pulsos de RF es igual a la frecuencia de Larmor [6], otras son, la manipulación del ángulo de magnetización a través de la potencia y duración adecuadas de las ondas de RF.

2. TEORÍA

De la literatura anterior se propone que la piel se comporta como un circuito RLC, y que sus propiedades eléctricas que pertenecen a este bucle de tejido, estarán asociadas a una resistencia, un inductor y un capacitor para el bucle de tejido, como se muestra a continuación

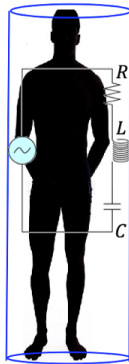


Figura 2. Se muestra un bucle de tejido conductor, formado por parte del cuerpo y se modela como un circuito conductor

Este circuito RLC, el capacitor contiene un dieléctrico que, si en cierto momento hay ruptura de dieléctrico, el dieléctrico se quema y se convierte en un conductor. Cuando sucede dicho fenómeno lo vamos a asociar en el momento en el que se forma la quemadura o edema.

Al suponer que la corriente I que viaja sobre el cuerpo humano debido a los iones que se encuentran en el fluido corporal, donde a nivel celular lo que se forman son los llamados canales iónicos en el cual estos dejan pasar iones como calcio, sodio, potasio, etc., el cual genera una corriente que viaja por los axones de las neuronas hasta el cerebro [7].

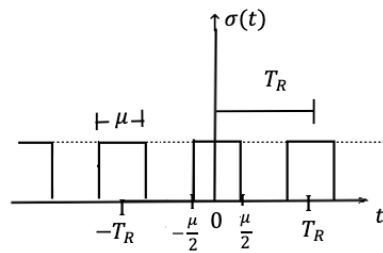
Se sabe que las quemaduras por resonancia, las que son reportadas, son más comunes para secuencias como la turbo espín eco [8], esta secuencia consiste en mandar pulsos de RF de 90° y posteriormente mandar pulsos de 180° para refasar el vector de magnetización transversal y así obtener ecos (señal) con un solo pulso de 90° , estas secuencias son más rápidas que la espín eco (SE), 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 Kirchoff para los voltajes [9]

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dQ}{dt} + \omega^2 Q = \frac{V}{L} \quad (1)$$

Donde $\omega^2 = 1/LC$, es la frecuencia de resonancia del circuito.

Para encontrar la solución se necesita conocer la forma del potencial, vamos a considerar una secuencia turbo espín eco (ver fig.3), este potencial inducido estará relacionado con los pulsos de 90° que son rectangulares y que se repiten en un tiempo que se llama tiempo de repetición, el cual cuantifica cada cuanto se manda el siguiente pulso de 90° .



• La función es

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma & \text{para } |t| < \frac{\mu}{2} \\ 0 & \text{para } |t| > \frac{\mu}{2} \end{cases}$$

Figura 3. Voltaje inducido por pulsos de RF. Donde 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 $V = \sigma(t)$. Donde $\sigma(t)$ tiene la siguiente forma

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

La ecuación (2) es la serie de Fourier [10] para el voltaje $\sigma(t)$ que se muestra en la figura 3.

3. RESULTADOS

Tras encontrar la expresión para el voltaje inducido, al resolver la ecuación (1), se obtiene

$$Q(t) = C_1 e^{m_1 t} + C_2 e^{m_2 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \sin \frac{n\pi t}{T_R} + B_n \cos \frac{n\pi t}{T_R} \right) + D \quad (3)$$

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 $A_n = \frac{\omega^2 - \left(\frac{2n\pi}{T_R}\right)^2}{2\beta \left(\frac{2n\pi}{T_R}\right)} B_n$.

Al derivar con respecto del tiempo tenemos la corriente inducida

$$I(t) = C_1 m_1 e^{m_1 t} + C_2 m_2 e^{m_2 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \frac{n\pi}{T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} - B_n \frac{n\pi}{T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} \right) \quad (4)$$

La potencia disipada en la resistencia:

$$P(t) = R \left(C_1 m_1 e^{m_1 t} + C_2 m_2 e^{m_2 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \frac{n\pi}{T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} - B_n \frac{n\pi}{T_R} \cos \frac{n\pi t}{T_R} \right) \right)^2 \quad (5)$$

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

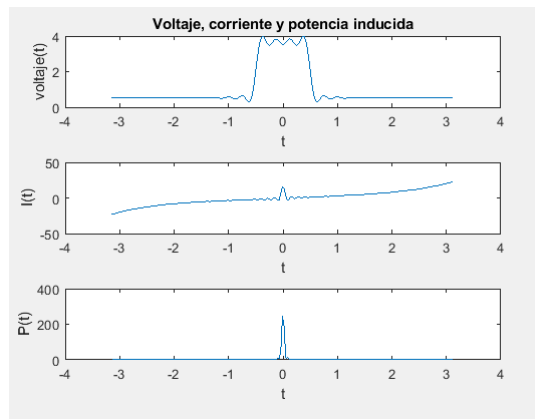


Figura 4. Se muestra el voltaje, corriente y potencia inducida a partir de las ecuaciones (2), (4) y (5)

4. CONCLUSIÓN

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.

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.

5. REFERENCIAS

- [1] E. Mark Haacke, Robert W. Brown., "Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design," Canada: Wiley-Liss

- [2] Shellock GF, Karacozoff A M., "Reference manual for magnetic resonance safety, implants and divices," Los Angeles: Biomedical research publishing group, 2-23 (2017).
- [3] Nicole S. Mendel., "Two Cases of MRI-Induced skin burns," 348-349 (2017).
- [4] Friedstat JS., Moore ME., Goverman J., Fagan SP. "An unusual burn during routine magnetic resonance imaging." J Burn Care Res. 2013
- [5] Gasper Podobnik., "Two cases of MRI-Induced skin burns.," 11-14 (2019).
- [6] Shellock GF., "Radiofrequency energy-induced heating during MR procedurs: a review.," Journal of Magnetic Resonance Imaging, 30-36 (2000).
- [7] Constanzo L. "Fisiología.," Ed. Elsevier, España 2014.
- [8] 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.
- [9] Paul Lorrain., "Electromagnetic Fields and Waves," W.H Freeman and Company: New York., (1988).
- [10] Georgi P. Tolstov., "Fourier Series.," Dover Publications, INC. NEW YORK (1962).