

EVALUACION DEL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA TOMOGRAFO DE RMN APLICANDO LA TECNICA DE DIFERENCIAS FINITAS

Aylin Martínez Bermello¹ y William Domínguez Viqueira²

Centro de Biofísica Médica "Patricio Lumumba", Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un modelo matemático que describe la distribución espacial y temporal de la temperatura en el enrollado de un imán resistivo de un tomógrafo de resonancia magnética. El equipo, diseñado y construido en el Centro de Biofísica Médica, en Santiago de Cuba, presta servicios en una instalación hospitalaria cubana. Para esto se utilizó la técnica de diferencias finitas y las expresiones de transferencia de calor y de balance de energía. La validez del modelo se comprobó mediante la comparación de sus resultados con datos experimentales, tomados del equipo para diferentes valores de corriente. Las desviaciones oscilan entre el 2 y el 3.5 % en la estabilización de temperatura, que es cuando se alcanzan los valores más elevados. La cantidad de calor que extraen los refrigerantes constituye como mínimo el 63 % de la energía térmica generada por el enrollado. Los resultados de la aplicación del modelo demuestran su utilidad en la evaluación del sistema de enfriamiento de un imán ya construido, o como punto de partida para el diseño de intercambiadores de calor de imanes resistivos más eficientes para futuros equipos, los cuales lograrán, en consecuencia, mayor calidad de las imágenes clínicas.

ABSTRACT

In this paper a mathematical model for calculation of spatial and temporal temperature distribution in the winding of a resistive magnet of a magnetic resonance imaging (MRI) machine is developed. The equipment, designed and constructed by Centro de Biofísica Médica in Santiago de Cuba, is operating in a Cuban's hospital. The method of finite difference, heat transfer expressions and the Energy Balance Law were used. The effectiveness of the mathematical model was confirmed by comparison of its results with experimental data. The experimental data were measured for different current values in the mentioned magnet. The standard deviations oscillated between 2 and 3.5 % at the moment of stabilization of temperature. The heat transferred is the 63% of total heat generated by the winding. The results of mathematical model shown its efficacy in, the evaluation of the cooling system of a constructed magnet or to design the heat exchangers of futures magnets for MRI machines, whishes will gain more quality in medical images.

INTRODUCCION

Los tomógrafos de resonancia magnética (RM) son equipos médicos de imagenología para el diagnóstico biomédico. La calidad de las imágenes clínicas está definida por la homogeneidad espacial y estabilidad temporal del campo magnético generado por el imán, que puede ser de tipo permanente, superconductor, o resistivo [1].

Los imanes resistivos son generalmente refrigerados por agua [2, 3] para evitar el sobrecalentamiento y garantizar la estabilidad temporal del campo magnético, lo cual es de vital importancia para la calidad de las imágenes. Por ello, los especialistas dedicados al diseño de los sistemas de enfriamiento de imanes resistivos para tomógrafos de RM dedican especial atención a lograr una geometría de los intercambiadores de calor que resulte cada vez más eficiente. Para esto es indispensable conocer la

distribución de temperatura en el enrollado, pero su medición directa resulta problemática. La colocación de sensores puede provocar dificultades que afectarían notablemente la calidad de las imágenes y en caso extremo inutilizarían el imán.

Este trabajo persigue el objetivo de desarrollar la modelación matemática para calcular la distribución espacial y temporal de la temperatura en el interior del enrollado del electroimán del tomógrafo cubano Giroimag03, diseñado y construido por el Centro de Biofísica Médica, e instalado en el Hospital General de Holguín. La determinación de la distribución de temperatura en el enrollado permitirá hacer una valoración del diseño de su sistema de enfriamiento y realizar una evaluación de la calidad en la construcción y montaje de sus elementos. Este análisis posibilitará hacer recomendaciones para perfeccionar del diseño de futuros equipos Giroimag.

Email: ¹aylin@cbm.uo.edu.cu

²wdguezv@infomed.sld.cu

DESARROLLO

Electroimán Giroimag 03. Características constructivas

El imán del tomógrafo Giroimag03 está formado por 2 pares de bobinas conectadas eléctricamente en serie y constituidas por 5 elementos fundamentales: el enrollado, los conductos de 1/2" para el agua de enfriamiento., el rolo, las tapas y la camisa. Estos tres últimos de aluminio y los dos primeros de cobre. El enrollado posee en su interior materiales aislantes eléctricos (Figura 1)

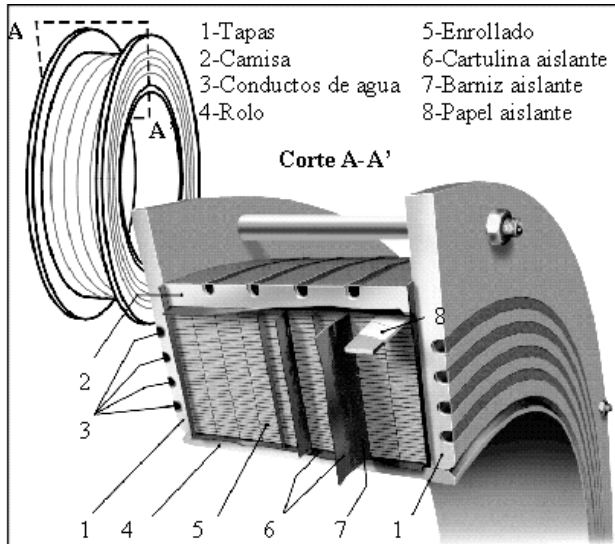


Figura 1. Esquema en corte de una bobina para el imán resistivo del tomógrafo Giroimag03.

Debido a dificultades propias de la tecnología para el proceso de enrollado del imán, entre las espiras quedan diminutas capas de aire que, junto a los aislantes del enrollado, constituyen resistencias al paso del calor desde el enrollado hasta las fuentes frías, apareciendo gradientes de temperatura en el interior de éste.

El calentamiento del enrollado también traerá consigo efectos sobre el voltaje de la fuente de alimentación. La ecuación (1) describe la relación entre la temperatura de un conductor eléctrico y la caída de voltaje en sus extremos, y se basa en las leyes de Ohm y de Pouseville [4]:

$$V = I \cdot R = I \cdot R_0(1 + \alpha(T - T_0)) = V_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (1)$$

Donde V es la caída de voltaje en el conductor; I, la intensidad de la corriente; R, su resistencia eléctrica; R_0 , la resistencia eléctrica a la temperatura de referencia T_0 (20°C); α , el coeficiente de linealidad de la resistencia con la temperatura; T, la temperatura promedio del enrollado y V_0 , el voltaje a la temperatura de referencia.

Para determinar la distribución de temperatura se aplicó la técnica de diferencias finitas, específicamente el método de balance de energía. Se prefirió la forma explícita, debido al desconocimiento de las condiciones del sistema una vez comenzado el proceso de calentamiento.

Desarrollo del método de balance de energía para cada elemento infinitesimal de la bobina. Consideraciones

El proceso transitorio de calentamiento se analiza discretizando el tiempo en pequeños intervalos y considerando la temperatura final de un intervalo como inicial del siguiente [3, 5]. Para determinar la distribución de temperatura se discretizó el enrollado en pequeños elementos de alambre (nodos) cuyas dimensiones coinciden con la sección transversal del conductor (Figura 2).

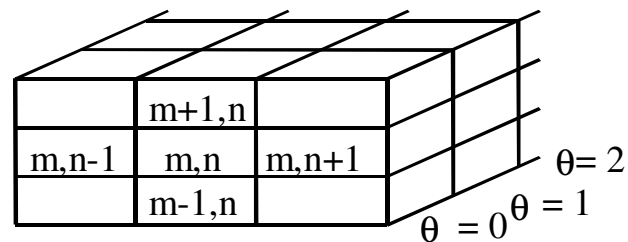


Figura 2. Muestra de la red nodal en el enrollado (n - número de espiras, m - número de vueltas).

La temperatura fue determinada en cada plano teórico en dirección azimutal, cada 10°. Esta selección nodal implica una segmentación consecuente para las tapas, camisa y rolo, pues las longitudes de los tramos de transferencia al agua o al aire no guardan relación con las dimensiones de los nodos. Por ello esas piezas fueron virtualmente fragmentadas de manera conveniente. Las consideraciones fundamentales fueron:

- No se considerarán las dilataciones térmicas de los materiales, ya que a través de los valores de voltaje se conoce que las temperaturas máximas se encuentran por debajo de los 200°C. Esto implicará dilataciones que serán insignificantes respecto al volumen total del enrollado.
- La temperatura del local es constante y homogénea.
- La temperatura de entrada, salida y el flujo de agua coinciden para todos los conductos.
- Los materiales aislantes poseen conductividad térmica no variable con la temperatura.
- Los espesores de barniz y aire son regulares.
- La sección transversal de la bobina es simétrica.
- El calor fluye desde el nodo analizado hacia las fuentes frías.

- La transferencia de calor en dirección azimutal no es significativa.
- En sentido radial, el calor fluye desde el nodo analizado hasta el refrigerante.
- Se asumirán espesores de aire invariables, de magnitud: 0.1 mm entre enrollado y camisa, 0.1 mm entre enrollado y tapa, y 0.15 mm entre espiras.

La aplicación de la Primera Ley de la Termodinámica a un nodo en el momento τ quedará como:

$$\begin{aligned} Q_{\text{gen}(m,n,\theta)}^\tau - Q_{\text{transf}(m,n,\theta)}^\tau &= \Delta U_{(m,n,\theta)}^\tau = \\ &= M_{(m,n,\theta)}^\tau \cdot C_{P(m,n,\theta)}^\tau \cdot \frac{T_{(m,n,\theta)}^{\tau+1} - T_{(m,n,\theta)}^\tau}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2)$$

Donde $\Delta U_{(m,n,\theta)}^\tau$ es la variación de energía interna del nodo (m,n,θ) en el instante τ ; $M_{(m,n,\theta)}^\tau$ su masa, $C_{P(m,n,\theta)}^\tau$ su capacidad calorífica, y $T_{(m,n,\theta)}^{\tau+1}$ la temperatura del nodo pasado un intervalo de tiempo Δt , en cuyo inicio la temperatura del nodo será $T_{(m,n,\theta)}^\tau$; $Q_{\text{gen}(m,n,\theta)}^\tau$ es el calor que genera ese nodo; y $Q_{\text{transf}(m,n,\theta)}^\tau$, el que transfiere. El calor generado estará dado, según la Ley de Joule-Lenz, por la corriente y la resistencia eléctrica del nodo según su temperatura:

$$Q_{\text{gen}(m,n,\theta)}^\tau = I^2 \cdot R_{0(m,n,\theta)}^\tau \left(1 + \alpha \left(T_{(m,n,\theta)}^\tau - T_0 \right) \right) \quad (3)$$

El calor transferido tiene lugar en 4 sentidos: en dirección radial, hacia la camisa y el rolo; en dirección axial, hacia las tapas y las espiras interiores. Estas componentes del calor transferido total serán determinadas mediante la ecuación fundamental de transferencia de calor [6]:

$$Q_{\text{transf}(m,n,\theta)}^\tau = K_{(m,n,\theta)}^\tau \cdot A_{(m,n,\theta)}^\tau \cdot \left(T_{(m,n,\theta)}^\tau - T_{\text{FF}(m,n,\theta)}^\tau \right) \quad (4)$$

Donde la identificación específica de $Q_{\text{trans}(m,n,\theta)}^\tau$, depende del sentido del flujo de calor. K es el coeficiente global de transferencia de calor que depende de la geometría del sistema y de las resistencias térmicas entre la fuente generadora de calor y la fuente fría. A es el área de transferencia de calor; T , la temperatura del nodo y T_{FF} , la de la fuente fría. Esta última temperatura depende de la componente del calor transferido analizada, y de la posición del nodo. Cuando se analiza el calor transferido hacia el rolo, T_{FF} es la temperatura del local. En el flujo de calor hacia la camisa, T_{FF} depende de la ubicación del nodo respecto a los conductos de agua. Para los nodos de posición $n = 2$ y $n = 4$, la transferencia ocurre parcialmente hacia el agua, por convección forzada, y en parte hacia el

aire, por convección libre. En el resto de las espiras la transferencia de calor ocurre sólo con el aire.

El calor transferido hacia las tapas en dirección axial se determinará según la diferencia de temperatura con los nodos adyacentes. Para la espira más cercana a la tapa ($n = 1$), T_{FF} será la temperatura del agua o del aire, según m ; y en el resto, tomará la de la espira adyacente menos alejada de la tapa.

La transferencia de calor en sentido radial es significativamente mayor que en el axial. Por eso algunas espiras interiores poseen temperaturas menores que otras más cercanas, debido a los conductos de agua en las camisas. Debido a ello fue necesario considerar también la transferencia de calor entre espiras hacia el interior del enrollado. En este caso T_{FF} será la temperatura del nodo adyacente más alejado de la tapa. La espira central no transfiere en ese sentido pues el sistema se consideró simétrico. Despejando en la expresión (2) la temperatura en el instante $\tau + 1$:

$$T_{(m,n,\theta)}^{\tau+1} - T_{(m,n,\theta)}^\tau + \frac{Q_{\text{gen}(m,n,\theta)}^\tau - Q_{\text{transf}(m,n,\theta)}^\tau}{M_{(m,n,\theta)}^\tau - C_{P(m,n,\theta)}^\tau} \cdot \Delta t \quad (5)$$

Validación del modelo teórico. Análisis de resultados

Para solucionar el sistema de ecuaciones fue programado un algoritmo usando el software Matlab 5.3 sobre sistema Windows. Los resultados teóricos del modelo fueron comparados con datos experimentales para diferentes valores de corriente: 60, 80, 100 y 125A, que es la corriente nominal. Para cada corrida fueron medidas, a intervalos de 30 min a partir del encendido, las temperaturas en los siguientes sitios: entrada y salida del agua al imán; en 3 puntos del local, en cada camisa, rolo y tapa; y el voltaje de la fuente de corriente, y de cada bobina por separado. El tiempo total de medición para cada corriente es de 10 h.

Todas las temperaturas iniciales en los experimentos fueron de 22 ± 1 °C. Para las mediciones de temperatura se utilizó un termómetro superficial TESTO 920 de ± 0.1 °C de apreciación. El voltaje total fue tomado del panel de control de la fuente, con precisión de ± 0.04 V. Los voltajes de cada bobina individualmente se midieron con un multímetro digital MUL280 con precisión de $\pm 10^{-3}$ V. Los datos experimentales de voltaje fueron utilizados para validar la efectividad del modelo teórico desarrollado a través de una comparación. Los resultados se muestran en la Figura 3.

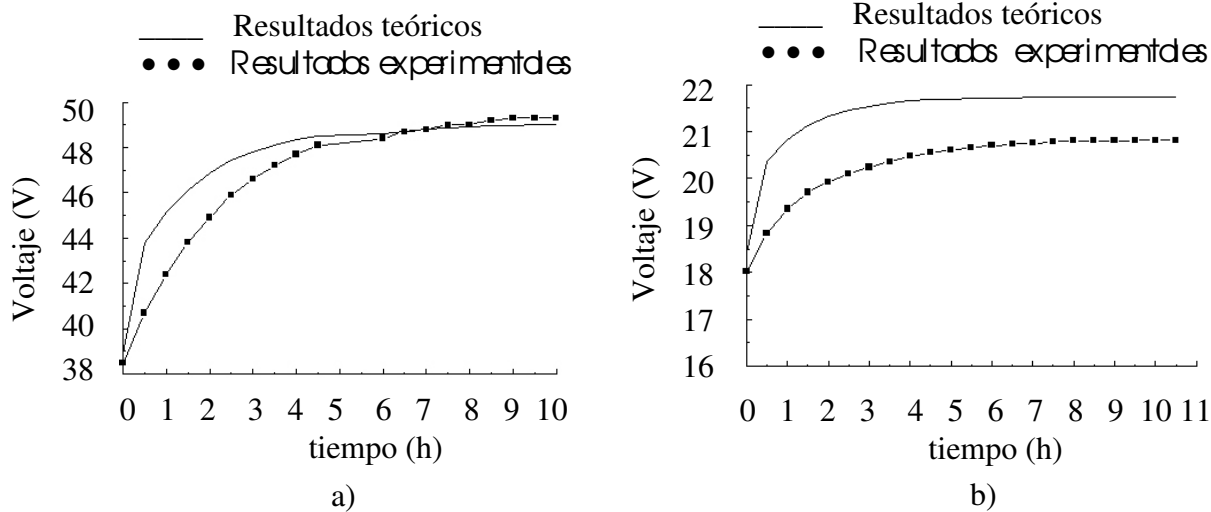


Figura 3. Comparación del comportamiento temporal del voltaje teórico con el experimental a corriente nominal.
a) para una bobina central.
b) para una bobina del extremo.

Los gráficos anteriores evidencian una elevada correspondencia entre los resultados teóricos, obtenidos por el modelo, y los experimentales. Las diferencias en la estabilización son mínimas, especialmente en las bobinas centrales (Figura 3a), a las cuales se les prestó especial atención, pues al tener más alambre, generan mayor cantidad de calor. Las diferencias más significativas se observan en las bobinas de los extremos (Figura 3b), pero esto se explica porque en el modelo se asumieron espesores de aire iguales para ambas bobinas. En el caso de las de los extremos resulta evidente que esos espesores son menores, y que la transferencia de calor es más eficiente. No obstante, las mencionadas diferencias no exceden los límites de 1V. Además, los resultados teóricos se encuentran por encima de los experimentales en ambos casos (Figuras 3a y 3b), lo que indica que el modelo se encuentra sobredimensionado, y que, en todo caso, los regímenes térmicos alcanzados en la práctica, son en realidad menos violentos.

Considerando que los espesores de aire se encuentran en el orden de las décimas de mm puede afirmarse que el proceso de enrollado se realizó de manera eficiente. Esto significa que fueron aplicados al alambre los niveles de tensión adecuados. Puede decirse también que la colocación de los Intercambiadores de calor garantiza un buen contacto con la superficie del enrollado.

Al comparar el calor generado luego de los primeros 30 minutos después del encendido (5862.1 W) con el transferido a los refrigerantes (3695.8 W) se aprecia que el sistema de enfriamiento del imán extrae alrededor del 63 % de la energía térmica generada por el enrollado. Esta "eficiencia" llega a ser del 100 %, cuando se alcanza el equilibrio térmico y permanece constante la temperatura del enrollado. El modelo matemático descrito es útil

entonces cuando se desea determinar si un voltaje de estabilización elevado, causado por una alta temperatura, responde a incorrecciones en el montaje de los Intercambiadores de calor, o a insuficiencia en la capacidad de su sistema de enfriamiento de extraer calor.

Los resultados también demuestran que en este imán la transferencia de calor en sentido radial es mayor y más homogénea que en el axial, al igual que en los transformadores secos [5, 7, 8]. La Figura 3 muestra las temperaturas presuntamente alcanzadas en la estabilización si se tiene en cuenta el flujo de calor en una sola dirección.

La "preferencia" manifiesta del flujo de calor en sentido radial puede ser aprovechada en futuros diseños para aumentar la cantidad de calor transferido, aumentando el número de conductos de agua en esa dirección.

CONCLUSIONES

Basándonos en la buena correspondencia entre los resultados teóricos y los datos experimentales podemos afirmar que el modelo matemático desarrollado es válido para describir el proceso de calentamiento y la distribución espacial y temporal de la temperatura en el interior del imán del tomógrafo Giroimag03. Este equipo posee elevada calidad en cuanto a la compactación de su enrollado y al montaje de los intercambiadores de calor del sistema de enfriamiento, lo que queda demostrado por el espesor de las capas de aire entre el enrollado y los elementos intercambiadores de calor, del orden de las décimas de mm. La configuración de los intercambiadores de calor también resulta eficaz, ya que se evacua como mínimo el 63 % del calor generado por el enrollado evitando su calentamiento excesivo. No obstante, se evidencia

que la transferencia de calor ocurre mayoritariamente en sentido radial, al igual que en las máquinas eléctricas. Esto puede ser aprovechado en próximos diseños para incrementar la cantidad de calor transferido a los refrigerantes aumentando el número de conductos de agua en esa dirección.

También fue demostrado que el modelo matemático desarrollado constituye una herramienta de gran utilidad, bien en la evaluación del sistema de enfriamiento de un imán ya construido, o como punto de partida para el diseño de intercambiadores de calor más eficientes para futuros equipos.

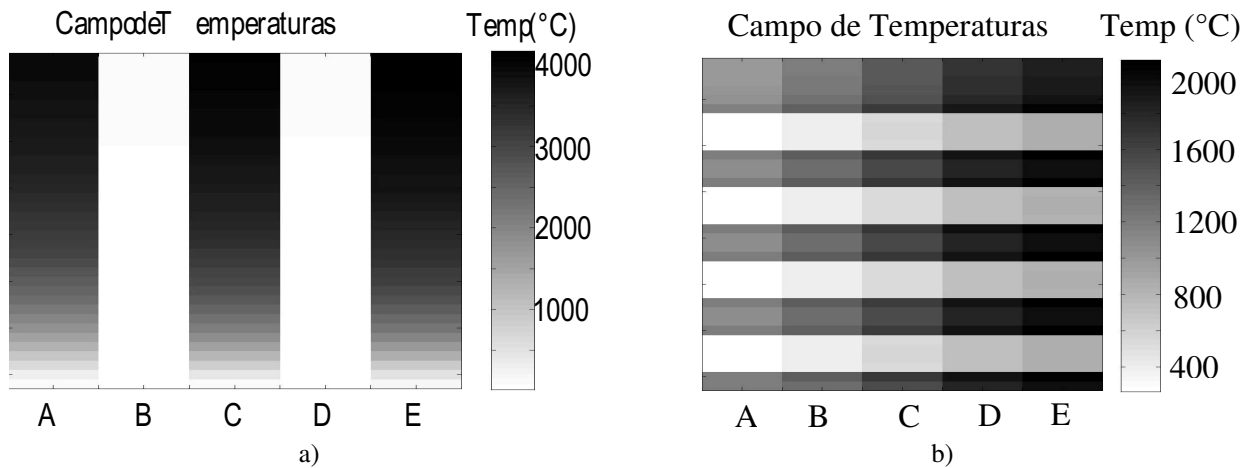


Figura 4. Distribución de la temperatura en una bobina central a corriente nominal, considerando la transferencia de calor

a) sólo hacia la camisa.

b) sólo hacia la tapa

REFERENCIAS

- [1] MONTGOMERY D., BRUCE (1980): **Solenoid Magnet Design: The Magnetic and Mechanical Aspects of Resistive and Superconducting Systems**, A Wiley-Interscience Publication, New York.
- [2] GORDON, E. and R.W.E. TIMMS (1984): "Magnet systems used in Medical NMR", **Computerized Radial**, 8(5), 245-261.
- [3] MINKOWYCZ, W.J. (1988): **Handbook of Numerical Heat Transfer**, A Wiley-Interscience Publication.
- [4] GARRIDO SALMON, CARLOS y AYLIN MARTINEZ BERMELLO (2001): "Modelación del comportamiento temporal de la temperatura y el voltaje en imanes resistivos de equipos de RMI", **Memorias del 2do Congreso Latinoamericano de Ingeniería Biomédica**, Habana.
- [5] KURT C. ROLLE (2000): Heat and mass transfer, University of Wisconsin – Platteville, printed in the United States of America.
- [6] INCROPERA (1985): **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, second edition, New York.
- [7] BOUSBAINE, A. **et al.** (1996): "Novel Approach to the Measurement of Iron and Stray Load Losses in Induction Motors", **IEE Proceedings Electrical Power Applications**, 143(1), 78-86, January.
- [8] XYPTERAS, J **et al.** (1995): "Calculation of the temperature distribution in an asynchronous machine", **European Transactions on Electrical Power Engineering (ETEP)**, 5(3), 181-186, may-june.