

Diseño y construcción de un sistema de campo magnético estático para experimentos de RMN mediante arreglo Halbach de imanes permanentes.

H. Dorantes¹, F. Vazquez², F. Moumtadi¹, S. E. Solis-Najera²

¹Departamento de Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Mx., 04519, México.

²Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Mx., 04519, México.

Resumen— Los escáneres convencionales de resonancia magnética son voluminosos, pesados y costosos, esto limita su implementación y aplicaciones en zonas alejadas de ciudades. Recientemente se ha despertado el interés en el desarrollo de sistemas de resonancia magnética portátil, uno de los retos principales es construir un imán estático homogéneo cuyos costos de mantenimiento sean mínimos. En este artículo presentamos el diseño y desarrollo de una matriz de imanes permanentes modificada para un escáner portátil de RM.

Palabras clave— Arreglo Halbach, Portátil, Resonancia Magnética.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas de Imagen por Resonancia Magnética (IRM) y los de Espectroscopia por Resonancia Magnética (ERM) se utilizan en diversos campos de conocimiento, desde el área industrial, médica, alimentaria, etc. Esto se debe a que es un sistema no invasivo, por lo tanto no compromete la integridad de la muestra.

Hoy en día la gran mayoría de los sistemas de Resonancia Magnética generan el campo magnético estático mediante el uso de imanes superconductores, esto debido a que pueden obtenerse altas intensidades de campo (típicamente mayores a 1 Tesla) con una aceptable homogeneidad de campo. Sin embargo, las grandes dimensiones y el alto costo de mantenimiento restringen su uso en los sectores educativo, diagnóstico médico temprano y análisis químico.

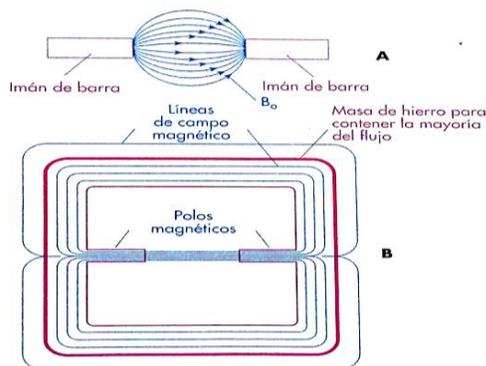


Fig. 1.- Sistema de campo magnético estático de imán permanente. A) Divergencia de las líneas de campo magnético a través del aire, B) sistema de campo magnético estático con un entrehierro para mejorar las propiedades del campo generado

Los sistemas de campo magnético estático que utilizan imanes de hierro son una alternativa económica; sin embargo, debido a la divergencia de las líneas de campo en el aire, es necesario el uso de un sistema de entrehierro (núcleo) con la finalidad de mejorar la homogeneidad del campo magnético (Fig. 1). Esta solución a pesar de ser relativamente económica presenta un inconveniente con respecto al peso del sistema, por ejemplo un sistema de IRM con una intensidad de campo de 0.2 T y una dimensión de entrehierro necesaria para que quepa un torso promedio (aproximadamente 50 cm), tendría un peso estimado de 23 toneladas [1,2].

El desarrollo de nuevos materiales usados en la fabricación de imanes permanentes, representa una alternativa prometedora para la generación de los sistemas de campo magnético estático.

Una alternativa al uso del sistema entrehierro, es la configuración de imanes individuales en un arreglo denominado Halbach (Fig.2), en el cual se genera la interferencia constructiva y destructiva de las líneas de campo entre los imanes adyacentes, esto con la finalidad de favorecer las líneas de campo sobre una o varias direcciones específicas [3].

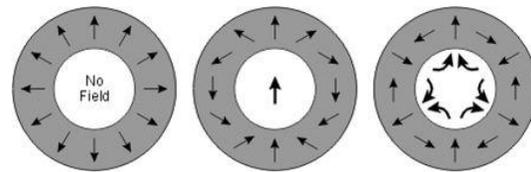


Figura 2.- Representación de tres configuraciones diferentes de momentos magnéticos en un arreglo Halbach.

II. METODOLOGÍA

En los sistemas de resonancia magnética, el elemento más importante es el subsistema de campo magnético estático, debido a que la intensidad del campo magnético define la frecuencia a la cual los protones realizan la precesión, siguiendo la relación de Larmor descrita en (1), mientras que la homogeneidad del campo en un volumen delimita la región de trabajo útil.

$$f_p = \frac{\gamma_p}{2\pi} * B_0 \quad (1)$$

donde f_p [Hz] representa la frecuencia de precesión de una especie nuclear; γ_p [Hz/T] la constante giro-magnética de dicha especie nuclear; B_0 indica la intensidad de campo magnético estático al cual se somete la muestra. En la Tabla I se muestran los valores de γ_p para los núcleos más abundantes.

TABLA I.

Constantes Giromagnéticas	
Núcleo	Relación giromagnética (MHz/T)
¹ H	2.6752x10 ⁸
¹³ C	6.7283x10 ⁷
¹⁹ F	2.5181x10 ⁸
³¹ P	1.0841x10 ⁸

Los sistemas de alta intensidad de campo tienen dos ventajas principalmente: incremento de la relación señal/ruido y disminución en los tiempos necesarios para realizar el experimento [1]. Sin embargo, considerando que la frecuencia de precesión para el núcleo de hidrogeno en un campo con una intensidad de 1 Tesla es de 42.5 MHz aproximadamente, el diseño electrónico del sistema tiende a complicarse y requerir de componentes de alta frecuencia (por ejemplo transistores con frecuencia de transición del orden de GHz).

Como se mencionó anteriormente, la homogeneidad de campo sobre un determinado volumen restringe la sección de trabajo "útil". Esto implica que los núcleos de la muestra contenidos dentro de ese volumen experimentan una misma intensidad de campo magnético, de modo que los núcleos de una misma especie presentan la misma frecuencia de precesión. En tanto que los núcleos que se encuentran fuera experimentan una frecuencia de precesión distinta. Esto genera una problemática debido a que puede existir la superposición de las frecuencias de precesión de diferentes especies nucleares propiciando errores en la detección.

Para diseñar del sistema de campo magnético estático mediante un arreglo Halbach de imanes permanente, partimos de las ecuaciones descritas por Klaus Halbach a modo de poder determinar los parámetros del arreglo [4].

La intensidad de campo magnético en el interior de un arreglo cilíndrico está determinada por:

$$B_o = B_r * C_N * \ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right) \quad (2)$$

donde R_{ext} y R_{int} representan el radio exterior e interior del arreglo cilindro conformado por los imanes, respectivamente; B_r representa la remanencia del imán, es decir la densidad de flujo magnético que permanece en él después de magnetizar el material; la constante de proporcionalidad C_N se define como:

$$C_N = \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{M}\right)}{\frac{2\pi}{M}} \quad (3)$$

M define el número de imanes del cual se compone el arreglo [4].

Los sistemas de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) requieren una intensidad de campo magnético de entre 0.2 T a 4 T [1]. En el presente trabajo se plantea el diseño de un imán para utilización con pequeñas especies, por lo que se requiere un área circular de trabajo de al menos 5 cm, este diámetro permite también realizar experimentos de espectroscopia a muestras en tubos de ensayo.

III. RESULTADOS

En (2), tomando un B_r constante y un R_{int} de 5 cm, se determinó el comportamiento de la intensidad de campo del arreglo en función del radio externo y el número de imanes para su construcción. En la Fig. 3 se puede observar que la intensidad de campo magnético tiene una variación mínima a partir de 8 imanes.

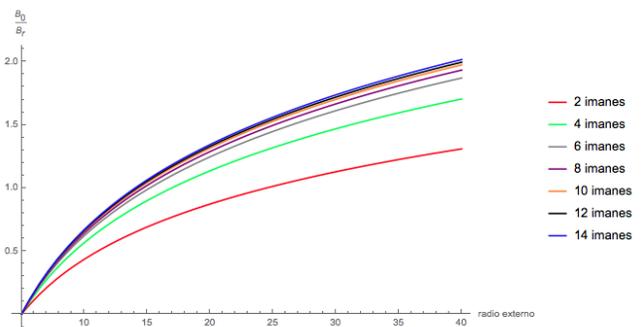


Fig. 3.- Grafica de la ecuación 2 en función del radio externo radio exterior.

Para incrementar el área efectiva del arreglo y obtener la máxima intensidad de campo se requiere encontrar la posición óptima (orientación de polos) de cada imán dentro de la matriz.

En la Fig. 4 se muestra el arreglo de imanes utilizado en el presente diseño, consta de 8 imanes de neodimio (NdFeb) de 2 cm x 2 cm, colocados a manera de un octaedro.

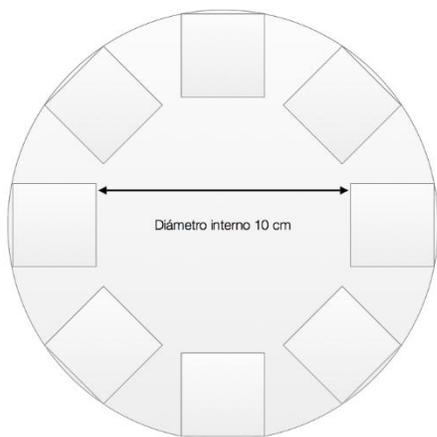


Fig. 4.- Configuración propuesta para el arreglo Halbach.

Si bien las ecuaciones de Klaus Halbach permiten estimar la intensidad del campo magnético conforme a los parámetros geométricos del arreglo, éstas no proporcionan información sobre el área de trabajo efectiva del sistema, por lo que se procedió a realizar un mapeo físico del campo.

Conforme a este mapeo se podrá determinar también el ancho de banda requerido para el sistema de transmisión/recepción de RF de acuerdo a (1), considerando la intensidad mínima y máxima del campo magnético estático.

Una vez determinadas las posiciones óptimas de los imanes en el arreglo, se procedió a construir el arreglo Halbach, y a realizar la caracterización del mismo (determinación de las regiones de homogeneidad).

Se trabajó con una metodología que permitiera visualizar las líneas de campo magnético en el arreglo fabricado; esto con la finalidad de que al momento de realizar el montaje experimental del sistema se coloquen los imanes en las polaridades correctas. En la Fig. 5-a se muestra el sistema implementado con 8 imanes en este caso se aprecia como el polvo de hierro se concentra en su mayoría en el centro de la estructura. En las Fig. 5-b se muestra el resultado de la colocación de los primeros dos imanes en el arreglo, en este caso la limadura se concentra propiamente en los imanes y nada en el centro de la estructura de modo que esto nos indica que las polaridades de los imanes debe ser invertida (solo uno de los imanes) Fig. 5-c, posteriormente se agregan otro par de imanes, resultando una distribución de las líneas de campo como se muestra en la Fig. 5-d, en este caso de manera similar a la Fig. 5-b indica que los nuevos imanes agregados están en la orientación incorrecta, al hacer la corrección de estos se

obtiene el resultado de la Fig. 5-e en las cual se aprecia una distribución más homogénea del campo dentro del arreglo, por último se muestra la distribución de las líneas de campo con un arreglo de 6 imanes Fig. 5-f.

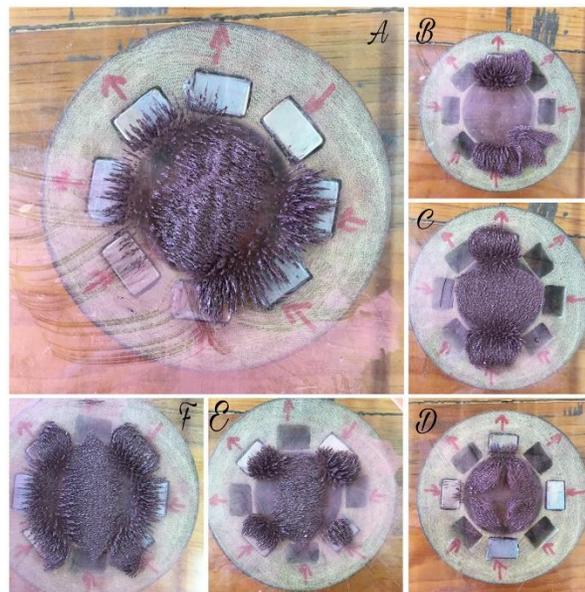


Fig. 5.- representación de las líneas de campo para diferentes configuraciones de imán permanente en la estructura fabricada. A) 8 imanes arreglo halbach, B) 2 imanes polos iguales confrontados, C) 2 imanes polos diferentes confrontados, D) 4 imanes polos iguales confrontados, E) 4 imanes polos diferentes confrontados, F) 6 imanes polos diferentes confrontados.

IV. CONCLUSIONES

Se demostró que un arreglo con 8 imanes cúbicos permanentes de neodimio en un arreglo circular con diámetro de 5cm presenta características deseables para ser implementado en experimentos de RMN, dada la región homogénea del campo magnético que abarca casi en su totalidad la región transversal del diseño presentado. De acuerdo al comportamiento descrito en la Fig. 3, considerando la remanencia magnética más baja reportada para el neodimio (1T), el arreglo propuesto tendría una intensidad de campo cercana a los 2T, que lo hace óptimo para prácticamente todas las aplicaciones de la IRM.

RECONOCIMIENTOS

Trabajo realizado con el apoyo del Programa UNAM-DGAPA-PAPIME PE104117.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Stark, D.D. y Bradley, W.G. “*Resonancia Magnética*”. 1 Vols. 3a. Edición. Madrid: Harcourt Brace de España Sa.(pp. 37- 167), 2000.
- [2] Enderle, J.D. y Bronzino, J.D. “*Introduction to biomedical engineering*”. 3a. Edición. Amsterdam: Elsevier/Academic Press. (pp. 1174-1214), 2011.
- [3] Doğan, N., Topkaya, R., Subaşı, H., Yerli, Y. y Rameev, B. (2009) «Development of Halbach magnet for portable NMR device», *Journal of Physics: Conference Series*, 153, p. 012047. doi: 10.1088/1742-6596/153/1/012047.
- [4] Klaus Halbach; “*Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material*”, *Nuclear Instruments and Methods*, 169, pp. 110, 1980.