

Diseño y simulación computacional del prototipo de un espectrómetro RMN de campo bajo a base de arreglo Halbach de imanes permanentes de diseño modular para uso en el Instituto Tecnológico de Costa Rica

Design and Computational Simulation of a Modular Low-Field NMR Spectrometer Prototype Based on a Halbach Array of Permanent Magnets for Use at the Costa Rica Institute of Technology

Felipe Montero-Castillo¹, Joshuan Omier-Fernández²,
Jafet Ortiz-Valverde³, Isaac F. Céspedes-Camacho⁴

Fecha de recepción: 17 de febrero, 2026

Fecha de aprobación: 15 de mayo, 2026

Montero-Castillo, F; Omier-Fernández, J; Ortiz-Valverde, J; Céspedes-Camacho, I.F. Diseño y simulación computacional del prototipo de un espectrómetro RMN de campo bajo a base de arreglo Halbach de imanes permanentes de diseño modular para uso en el Instituto Tecnológico de Costa Rica . *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 4. Octubre-Diciembre, 2026. Pág. 102-122.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i4.8480>



- 1 Estudiante de Ingeniería Física en el Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 felipemonterocastillo@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0000-3191-572X>
- 2 Estudiante de Ingeniería Física en el Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 germaynejoshuan789@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0008-9251-7790>
- 3 Estudiante de Ingeniería Física en el Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 jafetortizvalverde@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-7416-3406>
- 4 Profesor de la Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 icespedes@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1514-1343>

Palabras clave

Resonancia magnética nuclear; espectroscopía; arreglo de Halbach; instrumentación científica.

Resumen

El presente estudio aborda el diseño y simulación del prototipo de un espectrómetro de Resonancia Magnética Nuclear de campo bajo, basado en un arreglo Halbach modular de imanes permanentes, con el objeto de diseñar un equipo de bajo costo y alta homogeneidad de campo para uso docente e investigativo en el Tecnológico de Costa Rica. En la fase inicial, se evaluaron seis configuraciones geométrico-magnéticas mediante simulaciones estacionarias en COMSOL Multiphysics, variando el número de anillos y tipos de imán de materiales N52 y N55, con un porcentaje de inhomogeneidad de campo de 1,14%. El diseño de seis anillos con imanes N55 logró un campo central de 0,305 T, se opta por utilizar este arreglo de imanes. El espectrómetro se moduló incorporando una sonda RLC en serie con las siguientes propiedades: 1 μH , 8,16 Ω , 150,15 pF, así como con un preamplificador SR560 y un amplificador RF BT00250-AlphaA. La simulación de excitación del pulso de 90° y la generación de señales FID permitieron validar un pico de pulso de 59 μT y una amplitud en el FID experimental de 30 000 a.u. El análisis espectral reveló claramente el doblete característico del sistema XA_1 centrado en la frecuencia de Larmor de 12,986 MHz, confirmando la resolución espectral prevista. La congruencia entre los resultados teóricos y experimentales demuestra la robustez del diseño y su idoneidad para aplicaciones de RMN de campo bajo, ofreciendo una plataforma fiable y económica para futuros estudios y enseñanza.

Keywords

Magnetic resonance; spectroscopy; Halbach array; scientific instrumentation.

Abstract

This study addresses the design and simulation of a low-field Nuclear Magnetic Resonance spectrometer prototype based on a modular Halbach array of permanent magnets. The objective was to develop a low-cost system with high magnetic-field homogeneity for teaching and research purposes at the Costa Rica Institute of Technology. In the initial phase, six geometric-magnetic configurations were evaluated through stationary simulations in COMSOL Multiphysics, varying the number of rings and magnet grades (N52 and N55), achieving a field inhomogeneity of 1,14%. The configuration consisting of six N55 magnet rings produced a central field of 0,305 T, this is the array used. The spectrometer was modeled by incorporating a series RLC probe with the following properties: 1 μH , 8,16 Ω , and 150,15 pF, as well as an SR560 preamplifier and a BT00250-AlphaA RF amplifier. The simulation of the 90° excitation pulse and the generation of free induction decay (FID) signals validated a pulse peak of 59 μT and an experimental FID amplitude of 30,000 a.u. Spectral analysis clearly revealed the characteristic doublet of the XA_1 spin system centered at the Larmor frequency of 12,986 MHz, confirming the expected spectral resolution. The strong agreement between theoretical and experimental results demonstrates the robustness of the design and its suitability for low-field NMR applications, providing a reliable and cost-effective platform for future research and teaching activities.

Introducción

La espectroscopía por Resonancia Magnética Nuclear (RMN) es una técnica altamente utilizada por las ciencias químicas. Esta permite analizar una sustancia sin destruirla o modificar químicamente su entorno, haciendo uso de una propiedad intrínseca de la materia llamada espín. Esta característica dota a la técnica de gran viabilidad para el estudio de componentes y ambientes químicos variados [1].

Con más de setenta años en su haber [1], la investigación enfocada en la misma ha permitido el desarrollo tecnologías de gran importancia para el mundo actual. Entre sus usos, se encuentra el análisis de polímeros [2], estudio de combustibles fósiles y aditivos [3], detección de impurezas [4], monitoreo del traslado de fluidos multifase [5] e incluso observación y caracterización de reacciones químicas [6].

Uno de los principales elementos de un espectroscopio por RMN es el imán, fuente del campo magnético externo que da origen a la precesión de los espines. Existen varios arreglos que varían la intensidad del campo magnético con el fin de realizar análisis más amplios [7][8]; debido a que la resolución del dispositivo depende de la intensidad del campo generado. Algunos sistemas emplean electroimanes, los cuales suelen presentar costos elevados y requieren mecanismos de refrigeración continua para evitar el sobrecalentamiento y mantener la estabilidad del campo magnético. La implementación de estos sistemas de refrigeración representa una de las principales dificultades técnicas, no obstante, los electroimanes pueden generar campos magnéticos de mayor intensidad y con un control más preciso, lo que favorece la obtención de resultados de mayor calidad [9],[10],[11]. Por otro lado, existen arreglos que utilizan imanes permanentes, los cuales pueden ser manufacturados a partir de materiales con distintas capacidades de magnetización [12]. El arreglo que corresponde a este artículo entra en la categoría de imanes permanentes.

Los estudios y aplicaciones en RMN varían dependiendo de la magnitud del campo magnético aplicado. En la actualidad pueden definirse claramente dos grandes regímenes: campo alto y campo bajo, no obstante, en los últimos años el campo ultra bajo y campo cero han alcanzado cierta popularidad [13][14]. Los dispositivos de campo alto se consideran como tal cuando superan valores de campo magnético de 1,5 T [15], con los cuales se pueden observar núcleos como hidrógeno, carbono, flúor y fósforo. Campos magnéticos más altos se pueden considerar de tipo ultra alto e incrementan el rango de núcleos a estudiar [16].

En este artículo se hace especial énfasis en la RMN de campo bajo. Aunque este término suele referirse a campos magnéticos inferiores a 1 T [17], para efectos de esta investigación se considerarán campos comprendidos entre 0,1 T y 1 T. Los equipos de RMN de campo bajo presentan diversas ventajas, entre ellas la versatilidad de diseño, ya que pueden ser compactos e incluso portátiles [18],[19]. Asimismo, permiten el uso de imanes permanentes, lo que reduce significativamente su costo al eliminar la necesidad de materiales superconductores y complejos sistemas de enfriamiento. Además, la homogeneidad del campo magnético, entendida como el grado de uniformidad espacial del campo dentro del volumen de interés, resulta más sencilla de alcanzar y mantener que en equipos de mayor campo, gracias a la implementación de diferentes configuraciones de arreglos de imanes.

Un arreglo que se considera eficaz, y es de los principales elementos de este artículo, es el arreglo de Halbach [20]. Dicho arreglo consiste en una configuración de imanes permanentes individuales orientados de forma que el campo magnético se maximiza en el centro y se minimiza en el exterior. Esta configuración mantiene el campo magnético estable en el centro, detalle de gran importancia para la correcta lectura de señales RMN.

En el contexto del estudio de los bloques del Halbach un factor de suma importancia es la homogeneidad del campo, ya que esta influye en el desplazamiento químico observado en los espectros finales. La correcta caracterización del campo magnético experimental propuesta, resulta vital para el diseño geométrico de los imanes y es necesaria para definir los posibles experimentos a realizar [20],[21].

Costa Rica cuenta, a la fecha, con tres equipos de RMN: dos equipos de campo alto, uno de 400 MHz en la Escuela de Química de la Universidad de Costa Rica y uno de 600 MHz en el Centro de Investigación en Productos Naturales (CIPRONA) de la misma universidad [22], así como un único equipo de campo bajo de 60 MHz en La Escuela de Química del Tecnológico de Costa Rica [23]. Todos ellos fabricados en el extranjero. Estos equipos se utilizan principalmente para la elucidación y caracterización estructural de moléculas orgánicas simples y complejas, así como de herramienta docente en cursos de Química Orgánica y Física. Es importante mencionar que, a lo largo de los últimos 50 años, en Costa Rica se han adquirido varios dispositivos de RMN tanto de campo bajo como de campo alto [7], lo que demuestra la importancia y necesidad de la técnica para la investigación, el desarrollo y la innovación del país.

A pesar de lo anterior, la investigación enfocada al desarrollo local de equipos de RMN de campo bajo es prácticamente inexistente. Gracias a la implementación de cursos especializados en RMN dentro de las universidades públicas nacionales, se ha logrado que estudiantes de carreras como Ingeniería Física conozcan fundamentos teóricos para el desarrollo de nuevos equipos de RMN en el país. El objetivo del presente artículo es proponer el diseño y simulación del prototipo de un equipo de RMN de bajo costo en el régimen de campo bajo, basado en un arreglo de Halbach modular de imanes permanentes para su uso en la investigación y la docencia dentro del Tecnológico de Costa Rica.

Materiales y métodos

El proceso metodológico se dividió en dos grandes fases: i. diseño, simulación y caracterización del sistema magnético y ii. modelado del comportamiento del sistema de detección y adquisición de señal.

En la primera etapa, se definió la geometría del sistema de imanes con base en un arreglo tipo Halbach. Para esto se propusieron tres diseños modulares del arreglo Halbach, posteriormente se profundizará en ellos. Para cada diseño, se consideraron dos tipos de imanes permanentes de neodimio-hierro-boro: N52 y N55 (*vide infra*), dando un total de seis configuraciones geométrico-magnéticas a evaluar. Cada configuración fue simulada utilizando el software COMSOL Multiphysics (versión 6.2), mediante un estudio estacionario de campos magnéticos. Las simulaciones permitieron determinar la magnitud y distribución espacial del campo magnético generado por cada diseño. Así mismo, se pudo verificar su homogeneidad dentro del volumen de interés de 1 mm^3 , correspondiente a la región donde, teóricamente, se ubicaría la muestra durante la medición mediante la sonda de RMN [20],[21].

De manera paralela, se realizó la cotización de los materiales necesarios para cada configuración, considerando tanto el tipo como la cantidad y dimensiones de los imanes requeridos. A partir de esta información, se construyó una relación campo magnético/costo para cada diseño, permitiendo seleccionar la opción más eficiente en términos de desempeño técnico y viabilidad económica.

Una vez elegido el diseño óptimo del arreglo magnético, tomando en cuenta la homogeneidad y la intensidad de campo en teslas, se procedió al modelado del sistema de detección y adquisición de señal. Esta segunda fase se realizó en el entorno MATLAB Simulink (versión

R2024b), donde se construyó un modelo funcional del espectrómetro de RMN. También se simularon los resultados del espectro tomando en cuenta las variaciones del campo magnético para ver su efecto en el desplazamiento químico.

El sistema simulado incluye una sonda, la cual es representada como un circuito RLC serie, con parámetros de inductancia de 1 mH, resistencia de 8,16 Ω y capacitancia de 150,15 pF, sintonizado a la frecuencia de Larmor calculada para el sistema acoplado tipo XA_1 . En este sistema, X representa un núcleo de carbono-13 y A un protón acoplado a este. Además, se integraron al modelo componentes electrónicos externos: un preamplificador de radiofrecuencia modelo BT00250-AlphaA RF y un amplificador de señal modelo SR560.

El espectro de respuesta se obtuvo a partir de la simulación de la excitación por un pulso de 90 grados y la posterior adquisición de la señal de inducción libre (FID, por sus siglas en inglés). Se generó tanto una señal teórica ideal como una versión experimental sintética, agregando funciones de ruido basado en la homogeneidad del campo al modelo para simular condiciones reales de adquisición. Finalmente, las señales obtenidas fueron transformadas al dominio de la frecuencia mediante una Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) para su análisis espectral (ahorra costo computacional frente a la transformada convencional).

Arreglo de Halbach

El Arreglo de Halbach, también conocido como Matriz de Halbach, es un arreglo de imanes permanentes capaces de potenciar el campo magnético en una dirección y, al mismo tiempo, eliminar la interferencia del campo en dirección opuesta. Existen diferentes configuraciones dependiendo el tipo de uso, con una gran variabilidad de geometrías en las tres dimensiones [23]. Sin embargo, para el caso bajo estudio, es de interés la configuración cilíndrica por su fácil manufactura y diseño modular, además de que la máxima eficiencia se alcanza cuando la razón entre el radio interno r_i y el radio externo r_o , es $r_i/r_o \cong 0,451$ [21]. El esquema se presenta en la Figura 1.

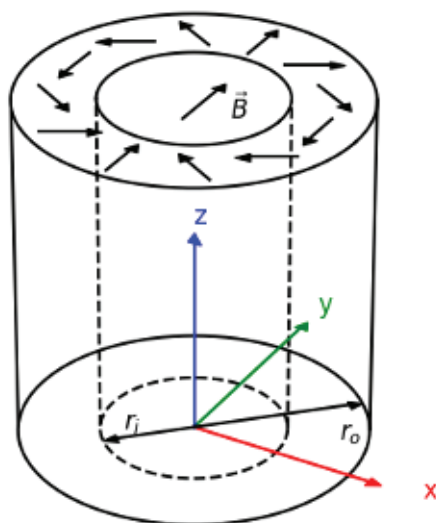


Figura 1. Arreglo de Halbach teórico, en configuración cilíndrica, vista isométrica y dirección del campo magnético generado en cada anillo, basado en [21].

Una de las aplicaciones potenciales del arreglo de Halbach cilíndrico es su uso en sistemas de RMN, gracias a su capacidad para generar campos magnéticos intensos y homogéneos en una dirección específica. Para facilitar su construcción y reducir los costos, se han propuesto

diseños modulares que emplean imanes permanentes de forma cúbica dispuestos de manera que simulan el efecto de un anillo Halbach continuo [24]. Esta aproximación permite segmentar el diseño en módulos ensamblables que replican la distribución ideal del campo, manteniendo una buena homogeneidad sin requerir componentes curvos o manufactura especializada. El diseño modular propuesto se muestra en la Figura 2.

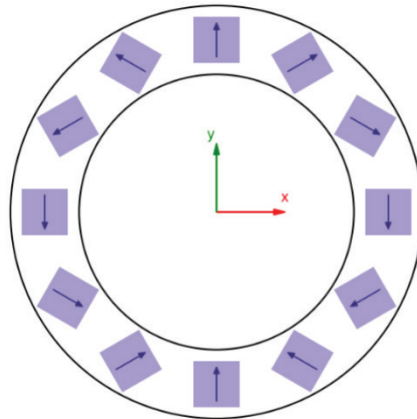


Figura 2. Sección transversal del arreglo cilíndrico de Halbach, en vista superior, con 16 imanes y su respectiva dirección del campo magnético. Adaptado de [25].

A pesar de la formación de campos magnéticos en magnitudes del orden de los militeslas, las aplicaciones de la RMN de campo bajo se han impulsado en los últimos años por la facilidad de manufactura y bajo costo [17],[18],[19],[20]. Se han logrado generar señales de RMN en dispositivos de características similares [18]. No obstante, es resaltable que para obtener mejores resultados es recomendable un proceso de prepolarización o hiperpolarización.

Simulación de imanes

Se realizó una validación numérica del campo magnético generado por un arreglo de Halbach compuesto por imanes permanentes. El objetivo fue analizar tanto la magnitud como la dirección del campo en una configuración representativa del sistema experimental. Para ello, se simuló la distribución espacial de la intensidad del campo magnético, expresada en mT, en distintos puntos dentro y alrededor del arreglo.

En cuanto a la estructura individual de cada anillo, se diseñó una disposición específica de imanes orientados estratégicamente para garantizar el comportamiento característico de un arreglo de Halbach. En cada anillo se colocaron 16 imanes permanentes de forma prismática, con caras cuadradas de 50 mm de lado, dispuestos según el patrón de orientación mostrado en la Figura 2. El diseño geométrico adoptado incluye un radio interno de $r_i = 140$ mm y un radio externo de $r_o = 190$ mm, lo que da como resultado una razón $r_i/r_o = 0,7368$. Aunque este valor no corresponde con el óptimo teórico para la máxima intensidad de campo magnético, se eligió ya que representa la mejor solución considerando las restricciones físicas del sistema, tales como el tamaño de los imanes y el espacio disponible para su disposición.

A partir de esta configuración base, se realizó una exploración paramétrica variando tanto el número total de anillos N , como la altura h de los imanes, con el propósito de optimizar la intensidad y homogeneidad del campo magnético generado en el volumen de interés. Esta configuración se observa en la Figura 3.

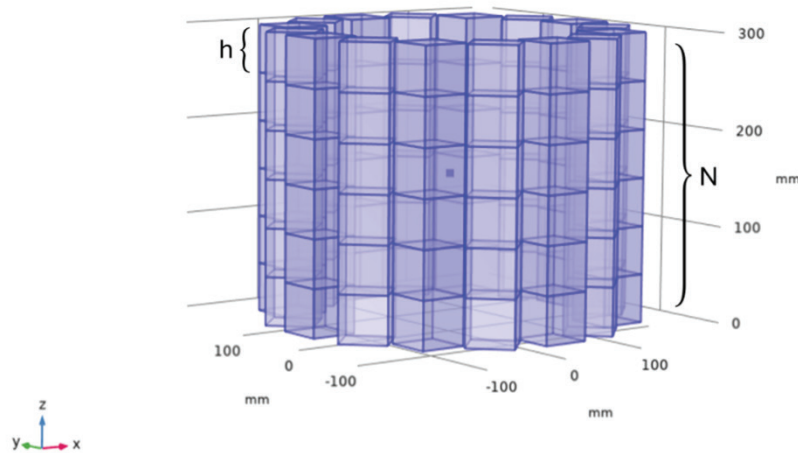


Figura 3. Diseño de anillos de imanes en arreglo de Halbach, en vista frontal con dimensiones aplicadas y punto P de mayor magnitud del campo magnético.

Para la simulación del arreglo de Halbach, se plantearon tres diseños distintos, los cuales se diferenciaron por la cantidad de anillos utilizados y la altura de los imanes que los conforman. La elección de estas configuraciones responde a criterios de simplicidad constructiva, ya que los imanes requeridos son de geometría simple y fácil manufactura. Las configuraciones consideradas fueron: (1) un único anillo conformado por imanes de 200 mm de altura; (2) un conjunto de dos anillos, cada uno con imanes de 150 mm de altura; y (3) un conjunto de seis anillos, compuestos por imanes cúbicos de 50 mm de altura.

Para cada una de las configuraciones, la evaluación de la magnitud del campo magnético se llevó a cabo en el punto central P del eje axial del conjunto, es decir, en el plano ubicado a una altura H , definida como:

$$H = \frac{N \cdot h}{2} \quad (1)$$

El punto P se encuentra en $r = 0$ mm, es decir, en el centro del arreglo en coordenadas cilíndricas. La elección de este punto de medición se fundamenta en que, desde el punto de vista teórico [24], allí se espera la mayor intensidad de campo magnético y es donde se ubicará la muestra a medir.

Para la evaluación de la inhomogeneidad I del campo magnético, se consideró una esfera teórica de 1 mm de radio centrada en P . Dentro de esta esfera, la intensidad del campo magnético se midió en siete posiciones: una en el centro y seis adicionales ubicadas a una distancia de 1 mm desde el centro a lo largo de los ejes cartesianos. Las variaciones registradas fueron analizadas mediante la ecuación (2) en donde $B_{\max}$ y $B_{\min}$ corresponden al campo magnético máximo y mínimo respectivamente, mientras que $\bar{B}$ al campo magnético promedio entre los 7 puntos [7].

$$I = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{\bar{B}} \quad (2)$$

Lo que resultó en un valor de inhomogeneidad del 1,14%.

Adicionalmente, cada una de las configuraciones mencionadas fue evaluada utilizando dos tipos distintos de imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB): los grados N52 y N55. Estos materiales se diferencian principalmente por su densidad de flujo magnético nominal: 1,45 T para el N52 y 1,49 T para el N55, según especificaciones técnicas del fabricante [26], [27]. Esta comparación permite analizar no solo el comportamiento geométrico del arreglo, sino también el impacto del tipo de material sobre la intensidad del campo resultante, lo cual es fundamental para determinar la configuración óptima en términos de eficiencia y costo.

Resultados de la simulación de imanes

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones vectoriales del campo magnético para cada una de las configuraciones geométricas y tipos de imán se presentan en las Figuras 4, 5 y 6. En estas figuras se muestra tanto la magnitud del campo magnético, representada por la escala de colores como su dirección, indicada por flechas que muestran el sentido del vector campo magnético en cada punto.

El color amarillo en el centro del arreglo corresponde a las zonas donde el campo magnético es más intenso, cercano a los valores máximos simulados en cada configuración (entre 0,259 T y 0,306 T). A medida que se aleja del centro, los colores cambian gradualmente hacia el verde, azul claro y azul oscuro, indicando una disminución progresiva de la intensidad del campo. Este gradiente de colores permite visualizar claramente cómo el campo se concentra en la región central del arreglo de imanes.

En cuanto a la dirección del campo, las flechas muestran un patrón simétrico que apunta hacia la dirección y positiva en el dispositivo, típico de un arreglo tipo Halbach. Este patrón evidencia cómo la configuración geométrica canaliza el flujo magnético hacia una sola dirección en el interior de los anillos, creando una zona central con alta uniformidad. Fuera del volumen definido por los anillos, se observa una disminución abrupta de la intensidad con colores azules, lo que confirma que el campo está confinado y que las fugas al exterior son mínimas, eliminando la necesidad de blindaje magnético adicional.

Respecto a la magnitud, los diseños correspondientes a dos y seis anillos (Figuras 5 y 6) construidos con imanes de grado N55, presentaron los valores máximos del campo, con 0,306 T y 0,305 T, respectivamente. Las versiones equivalentes con imanes N52 mostraron valores inferiores, lo cual concuerda con la mayor densidad de energía magnética asociada a los imanes N55.

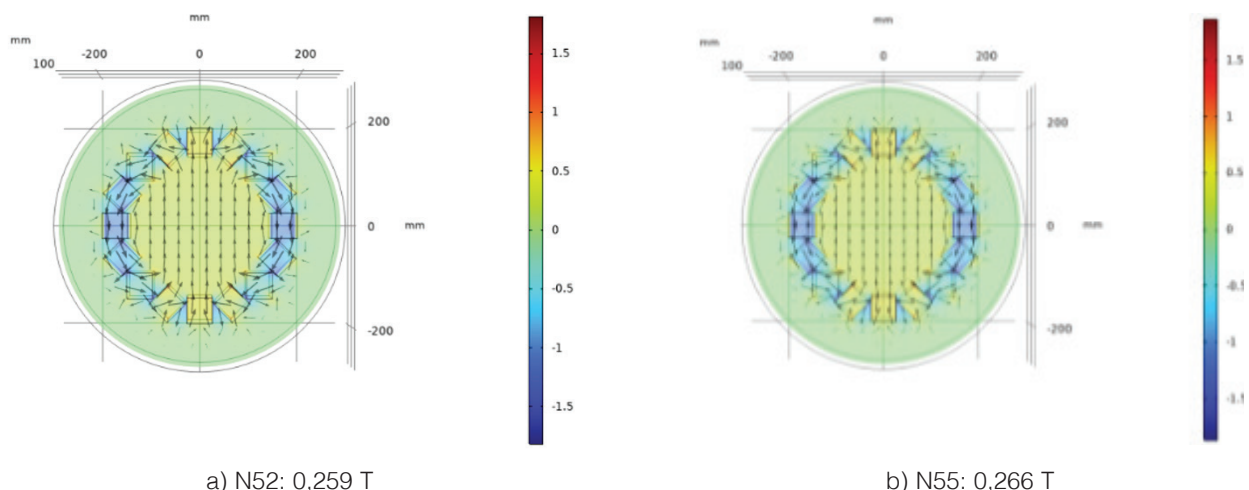


Figura 4. Distribución del campo magnético simulada para un anillo compuesto por 16 imanes permanentes, utilizando el material especificado en cada caso.

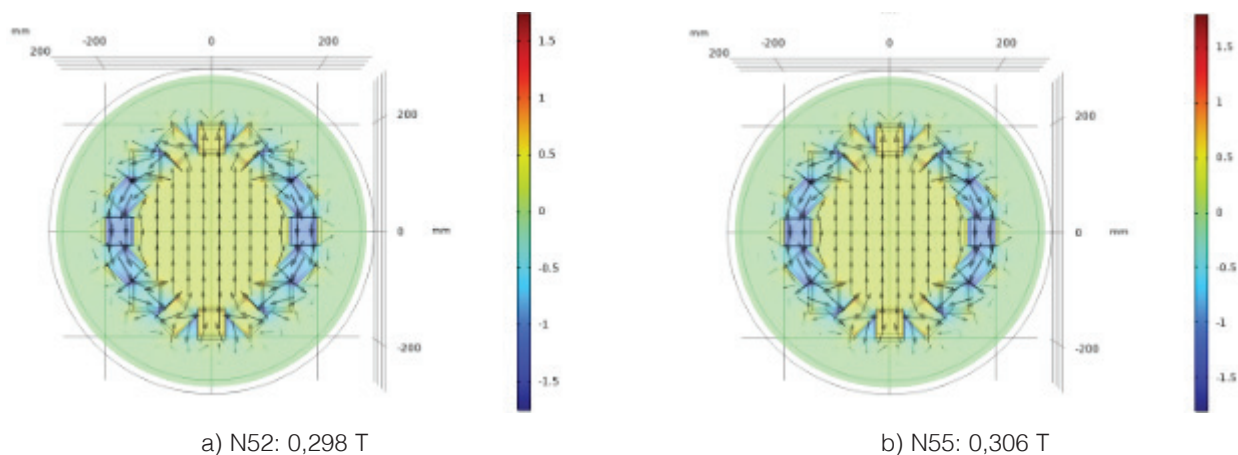


Figura 5. Distribución del campo magnético simulada para dos anillos compuesto por 16 imanes permanentes, utilizando el material especificado en cada caso.

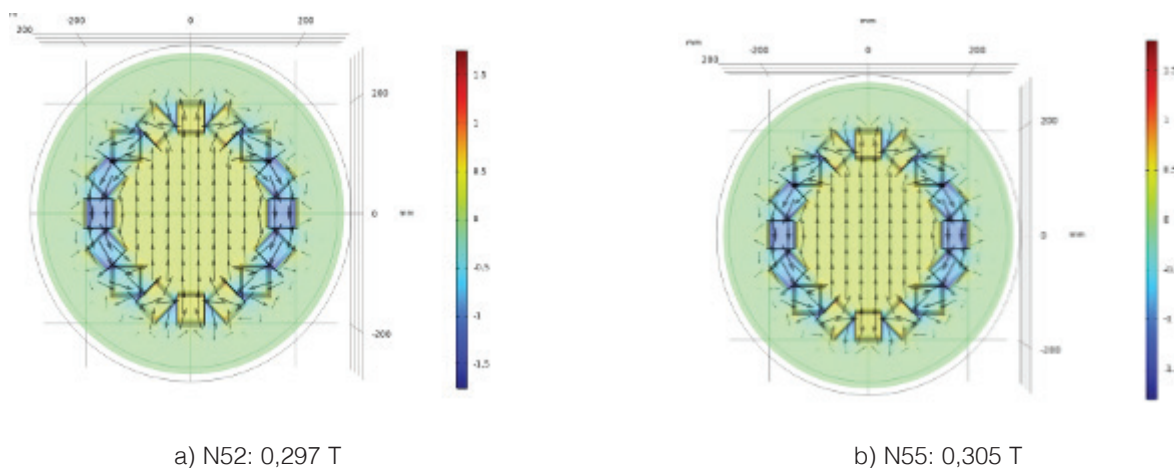


Figura 6. Distribución del campo magnético simulada para seis anillos compuesto por 16 imanes permanentes, utilizando el material especificado en cada caso.

Comparación teórica de los resultados obtenidos mediante la simulación

Con el fin de evaluar la viabilidad teórica de los diseños propuestos, se realiza una comparación entre la magnitud del campo magnético obtenida mediante la simulación del arreglo de Halbach compuesto por seis anillos de 16 imanes cada uno, utilizando ambos materiales (N52 y N55), y los valores reportados en la literatura para configuraciones de características similares [20],[25]. Esta comparación permite contextualizar el desempeño del sistema diseñado en relación con otros enfoques previamente estudiados. Los resultados correspondientes se resumen en la Tabla 1, donde se presenta tanto la intensidad del campo magnético (redondeado a tres cifras significativas), como las condiciones geométricas y los materiales.

Tabla 1. Comparación de los valores de intensidad del campo magnético obtenidos para el diseño simulado de seis anillos con 16 imanes permanentes por anillo y con materiales N52 y N55, en relación con los valores reportados en estudios previos con configuraciones análogas.

Magnitud del campo magnético obtenido por la simulación de arreglo Halbach de 6 anillos de 16 imanes		Magnitud del campo magnético obtenido por L. Yang [25]	Magnitud del campo magnético obtenido por Y. Peng [20]
N52	0,297 T	0,169 T	0,533 T
N55	0,305 T		

Estos resultados sugieren que, al menos desde una perspectiva teórica, el diseño propuesto tiene la capacidad de generar un campo magnético con una intensidad suficiente para realizar experimentos de RMN de campo bajo, con una buena sensibilidad y en concordancia con lo reportado en la literatura [20] y [25].

Análisis comparativo de desempeño magnético

En la Tabla 2 se resume la magnitud del campo magnético obtenido en función de cada diseño y material. Si bien el diseño de dos anillos genera un campo magnético ligeramente superior, su eficiencia económica es significativamente menor en comparación. La configuración individual de cada anillo puede ajustarse más fácilmente, lo cual habilita la posibilidad de realizar shimming (i.e. optimizar la homogeneidad del campo magnético) [25],[28].

Tabla 2. Comparación de materiales, intensidad de campo magnético simulada y costo estimado para cada uno de los diseños propuestos del arreglo Halbach.

Arreglo Halbach	Material	Campo Magnético [T]	Precio aproximado ¹
Diseño: 1 anillo de 16 imanes de 50 mm x 50 mm x 200 mm	N52	0,259	\$ 3 648
	N55	0,266	\$ 3 840
Diseño: 2 anillos de 16 imanes de 50 mm x 50 mm x 150 mm	N52	0,298	\$ 5 344
	N55	0,306	\$ 5 632
Diseño: 6 anillos de 16 imanes de 50 mm x 50 mm x 50 mm	N52	0,297	\$ 4 940
	N55	0,305	\$ 5 200

¹ Cotización realizada en *MagnetPeak Solutions LLC*, año 2024.

Con el objetivo de evaluar la homogeneidad del campo magnético a lo largo del eje longitudinal, la Figura 7 presenta la distribución de la magnitud del campo magnético en función de la coordenada longitudinal normalizada z según la Figura 3), donde $z = 0$ corresponde al centro del arreglo de imanes, $z = 1$ a la parte superior y $z = -1$ a la parte inferior.

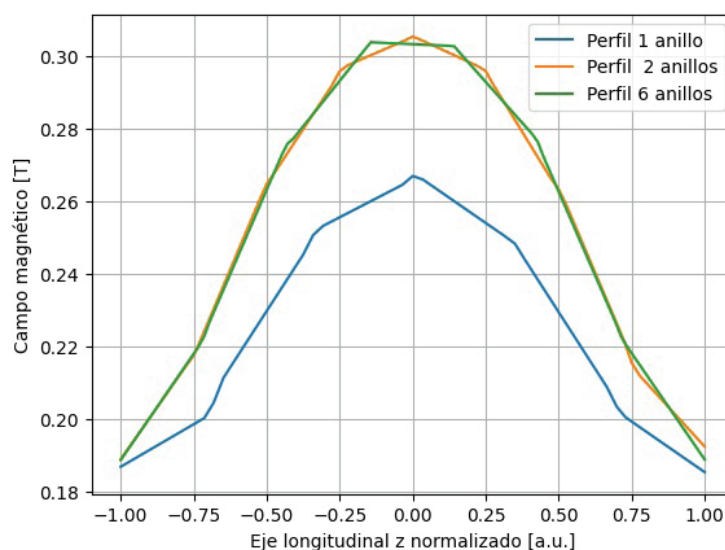


Figura 7. Comparación de la distribución longitudinal del campo magnético para los tres diseños de arreglo Halbach utilizando imanes N55.

Como se observa en la figura, en los tres diseños el máximo campo magnético se localiza en el centro del arreglo. El diseño de un solo anillo presenta el menor valor máximo de campo, mientras que el arreglo de dos anillos alcanza el mayor, seguido muy de cerca por el diseño de seis anillos, en concordancia con los resultados mostrados en la Tabla 2. No obstante, el perfil correspondiente al diseño de seis anillos exhibe un pico considerablemente más ancho, indicando que la disminución del campo magnético a lo largo del eje longitudinal ocurre de manera más gradual que en el diseño de dos anillos. En consecuencia, el arreglo de seis anillos presenta una mayor homogeneidad espacial del campo magnético, característica especialmente deseable para aplicaciones de resonancia magnética nuclear, donde la uniformidad del campo es un parámetro crítico.

Simulación del espectrómetro

La simulación del espectrómetro se diseñó con base en la arquitectura presentada en la Figura 8, la cual representa el flujo de señales y componentes principales necesarios para el funcionamiento de un sistema de espectroscopía RMN.

El sistema comienza con una fuente de poder que alimenta la unidad de procesamiento computacional, la cual se encarga de generar las señales necesarias para activar el dispositivo de control principal. El dispositivo de control regula el envío del pulso de radiofrecuencia hacia un amplificador, que aumenta la potencia de la señal antes de ser transmitida a la sonda Tx/Rx (transmisión/recepción). Esta sonda se encuentra ubicada dentro del campo magnético generado por el conjunto de imanes dispuestos en la configuración Halbach, lo que garantiza un campo homogéneo en la región de medición.

La señal de retorno inducida por los núcleos en resonancia es captada nuevamente por la misma sonda y dirigida hacia un filtro de ajuste de señal, encargado de separar las frecuencias de interés. Posteriormente, la señal es enviada a un preamplificador, que mejora su relación señal/ruido, y luego a un mezclador de señales, que la combina con una frecuencia de referencia para su posterior análisis. Finalmente, la señal procesada regresa a la unidad de procesamiento, donde se adquiere, se transforma al dominio de la frecuencia y se analiza el espectro.

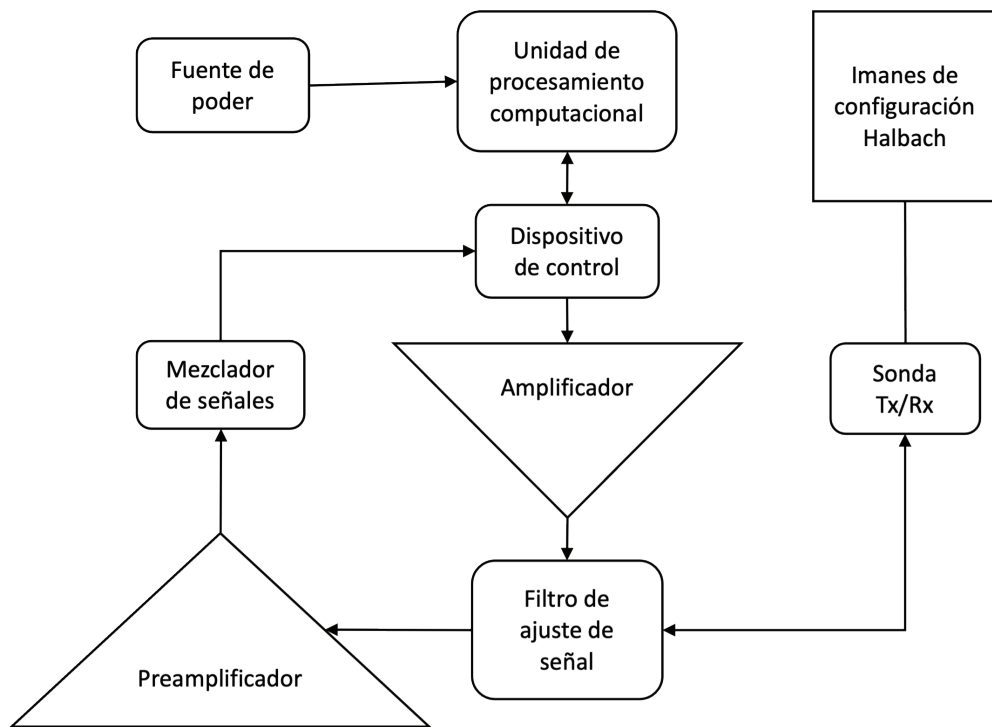


Figura 8. Diseño de arquitectura de componentes electrónicos e imanes en arreglo Halbach para el espectrómetro RMN de campo bajo.

Este modelo simulado permitió evaluar la respuesta del sistema completo ante distintas configuraciones de campo magnético y condiciones experimentales. Asimismo, hizo posible generar señales teóricas y experimentales que incluyen ruido, producto de la inhomogeneidad del campo.

El esquema del espectrómetro basado en la arquitectura de la Figura 8, se presenta en forma de diagrama de bloques en la Figura 9.

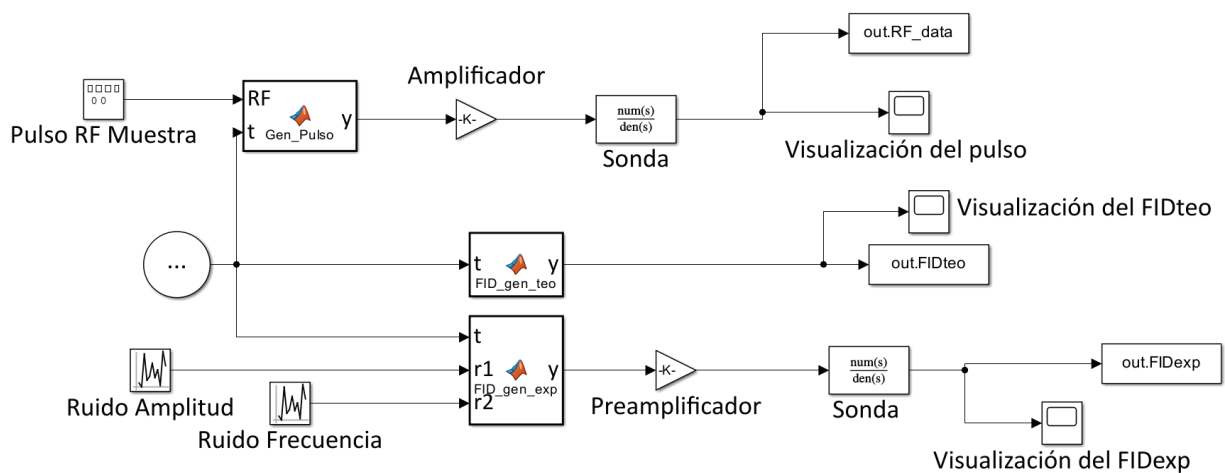


Figura 9. Esquema computacional del sistema propuesto para el espectrómetro RMN, para un pulso RF de 12,986 MHz que simula un sistema de protones del tipo XA_1 .

El esquema diseñado para este experimento tiene como objetivo generar y detectar un pulso de radiofrecuencia en muestras líquidas que contienen protones del tipo X_{A_1} , operando a una frecuencia de Larmor teórica de 12,986 MHz, lo cual lo hace adecuado para pruebas exploratorias simples, e.g. pulsos de 90° en átomos de ^1H o ^{19}F . Los principales resultados esperados son: (1) la caracterización temporal de la señal de pulso de radiofrecuencia (RF) emitido, en términos de su amplitud y frecuencia, y (2) la detección de la señal de FID teórica y experimental.

El sistema, presente en la figura 9, se compone de 3 bloques funcionales. En el primero, la unidad de procesamiento genera el pulso de RF, el cual se modula con una función sinusoidal para modelar su comportamiento temporal. Dicho pulso se transmite a un amplificador y, posteriormente, a través de la sonda, hasta la muestra. Respecto al segundo bloque, se utiliza una función sinusoidal de amplitud unitaria con una envolvente exponencial para generar un FID teórico, que sea característico del sistema utilizado, este valor se utiliza para la validación de los resultados. La frecuencia de f del pulso de RF se determina aplicando la ecuación:

$$f_{Larmor} = \gamma \cdot B_0 \quad (3)$$

donde $\gamma = \gamma_H = 42,577 \text{ MHz/T}$ es la constante giromagnética propia del sistema X_{A_1} (equivalente a la del protón) y B_0 es el campo magnético externo aplicado a la sustancia. El modelo se puso a prueba aplicando la magnitud de campo magnético obtenida de 0,305 T, para el diseño de seis anillos de 16 imanes permanentes de N55 (figura 6).

En la segunda y tercera sección del esquema se agrupan los componentes relacionados con la detección de la señal producida por la relajación de los espines nucleares. Un pulso de radiofrecuencia (RF) senoidal, de amplitud unitaria y frecuencia $12,986 \pm 0,048 \text{ MHz}$, se aplica a un bloque encargado de modular su decaimiento temporal y transformarlo en una señal de libre inducción (FID). Esta señal se ve afectada por el ruido asociado a la inhomogeneidad del campo magnético, el cual se incorpora para representar condiciones experimentales reales. En el caso del pulso teórico, el bloque genera directamente la FID simulada del sistema, mientras que para el pulso experimental la respuesta proviene de la señal medida en el montaje físico.

El pulso experimental se modeló para reproducir el comportamiento característico de una señal FID. Con este propósito, se consideraron siete puntos (*vide supra*), cada uno sometido a una ligera variación en el campo magnético local debida a la inhomogeneidad del arreglo, con el fin de analizar su efecto sobre el ensanchamiento de banda observado en el espectro obtenido. Para aproximar las condiciones de una medición real, el modelo incorpora perturbaciones aleatorias tanto en la amplitud como en la frecuencia de la señal. La amplitud se definió con un valor nominal de 1 a.u., al que se añadió una perturbación aleatoria equivalente al 1 % de dicho valor, obtenida mediante una variable con distribución uniforme en el intervalo $[-1,1]$. De forma similar, la frecuencia de Larmor se calculó a partir del campo magnético central obtenido en la Figura 6.b, al cual se adicionó una perturbación correspondiente al producto entre la desviación estándar del campo magnético $\sigma_B = 0,00122 \text{ T}$ y una nueva variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo $[-1,1]$. En consecuencia, la frecuencia de Larmor empleada en el modelo experimental se expresa como:

$$f_{Larmor_{Exp}} = \gamma \cdot (B_0 + \sigma_B \cdot rand(-1,1)) \quad (4)$$

donde $rand(-1,1)$ representa una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo $[-1,1]$. Se emplearon semillas fijas e independientes para las variables aleatorias de amplitud y frecuencia, con el fin de garantizar la reproducibilidad de las simulaciones y evitar correlaciones artificiales entre ambas perturbaciones.

Estas perturbaciones permiten simular las fluctuaciones e inhomogeneidades presentes en un entorno experimental, tanto por ruido como por variaciones espaciales del campo magnético, obteniendo así una señal FID más representativa de las condiciones reales de operación.

Modelado de los componentes

La sonda seleccionada para la simulación es una sonda multinuclear con las siguientes especificaciones: una inductancia de 1 μH , una resistencia de 8,16 Ω y una capacitancia de 150,15 pF. Además, se trabaja a una frecuencia teórica de 12,986 MHz, la cual corresponde a la frecuencia de Larmor del hidrógeno calculada para un campo magnético bajo, de una magnitud de 0,305 T.

Para caracterizar el comportamiento de la sonda, se modeló su respuesta mediante una función de transferencia $H(s)$. Esta función se obtuvo a partir del análisis matemático de un circuito RLC en serie, que representa el equivalente eléctrico de la sonda. La expresión resultante describe la relación entre la señal de entrada y la respuesta en frecuencia del sistema, según la siguiente ecuación:

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 \cdot s + \omega_0^2} \quad (5)$$

En este contexto, se calculó el coeficiente de amortiguamiento ζ , el cual indica el grado de disipación de energía en el sistema oscilatorio. Un valor de $\zeta = 0,05$ sugiere un sistema débilmente amortiguado, lo cual es deseable en aplicaciones de RMN, ya que permite una respuesta oscilatoria suficientemente prolongada para captar el FID. Además, s corresponde a la frecuencia de salida del sistema, ω_0 es la velocidad angular la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$f_{Larmor} = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (6)$$

Sabiendo que la frecuencia de Larmor definida para este experimento fue de 12,986 MHz, se llega a un valor de ω_0 de $8,159 \times 10^7 \text{ rad/s}$.

Por lo tanto, se tiene la siguiente función de transferencia:

$$H(s) = \frac{6,657 \times 10^{15} \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{s^2 + s \cdot 8,159 \times 10^6 \frac{\text{rad}}{\text{s}} + 6,657 \times 10^{15} \frac{\text{rad}}{\text{s}}} \quad (7)$$

Estos valores se aplicaron en el software dentro de los bloques correspondientes a la sonda, que experimentalmente se consideran idénticos.

Respecto al amplificador, se modeló tomando como referencia el equipo BT00250-AlphaA RF Amplifier de la marca Tomco Technologies. Este componente presenta una ganancia aproximada de 54 dB, lo cual es suficiente para amplificar el pulso y lograr una ganancia en amplitud de aproximadamente 501 veces la señal de entrada.

Para la caracterización del preamplificador se tomó como referencia el esquema SR560 Preamplifier de la marca Stanford Research Systems. Este equipo posee una ganancia plana ajustable desde 1 hasta 50000 veces, lo que equivale a una ganancia de máxima de 94 dB.

Este preamplificador es uno de los más potentes y precisos del mercado, lo que permite una recepción de pulsos altamente precisa, especialmente cuando se trabaja en el régimen de campo magnético ultra bajo.

Resultados de las simulaciones

De acuerdo con las ecuaciones de Bloch y la teoría de la excitación por radiofrecuencia descrita por Levitt [7], para la aplicación de un campo de radiofrecuencia B_1 perpendicular al campo estático B_0 , se produce la precesión de la magnetización alrededor del campo RF con una frecuencia angular de nutación $\omega_1 = \gamma B_1$. En consecuencia, el ángulo de rotación de la magnetización durante un pulso de duración t_p está dado por:

$$\theta = \gamma B_1 t_p \quad (8)$$

Para un pulso de excitación de 90° , el campo requerido se obtiene de:

$$B_1 = \frac{\pi}{2\gamma t_p} \quad (9)$$

Considerando un tiempo de pulso de $100 \mu\text{s}$, se obtiene un campo de radiofrecuencia aproximado de $59 \mu\text{T}$, valor consistente con los campos de excitación empleados en espectrómetros de RMN de campo bajo.

En la Figura 10 se presenta la respuesta temporal del pulso de radiofrecuencia simulado, obtenido a partir de una señal senoidal de entrada con amplitud unitaria (1 a.u.), después de su amplificación y propagación a través del modelo equivalente de la sonda RLC. Debido a que el modelo representa únicamente la respuesta dinámica del circuito y no calcula el campo magnético generado por la bobina, la amplitud de la señal se expresa en unidades arbitrarias. La figura muestra únicamente una décima parte de la duración total del pulso.

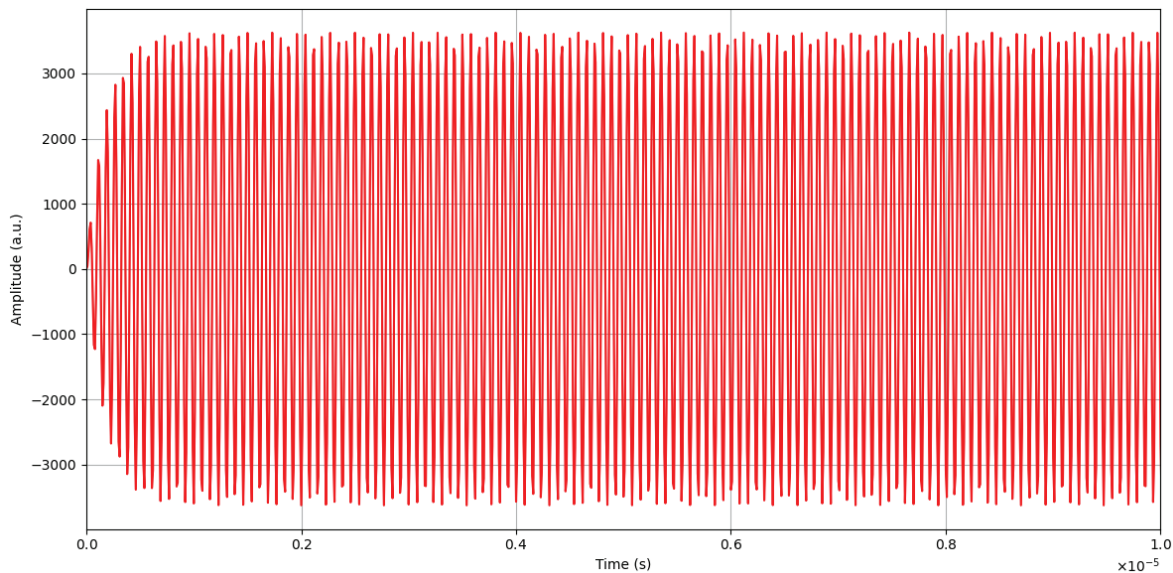


Figura 10. Simulación del pulso de emisión de RF de 12,986 MHz en escala de amplitud y tiempo.

El pulso de emisión de RF presenta una amplitud pico aproximada de 3000 a.u., correspondiente a la respuesta del circuito resonante ante la excitación aplicada. Esta respuesta evidencia una ganancia aproximada de 3×10^3 respecto a la señal de entrada normalizada, indicando que el circuito proporciona una amplificación significativa de la señal de excitación. En conjunto con el tiempo de pulso de $100 \mu\text{s}$, el campo de radiofrecuencia requerido para producir una rotación de 90° , estimado mediante la ecuación (8) en aproximadamente $59 \mu\text{T}$, resulta consistente con los valores de excitación empleados en espectrómetros de RMN de campo bajo [29], [30]. Lo anterior indica que el campo de excitación requerido puede obtenerse a partir de una señal de entrada de baja amplitud mediante una etapa de amplificación RF y una sonda resonante adecuadamente sintonizada. Asimismo, se aprecia una ligera variabilidad en la amplitud del pulso. Estas desviaciones, que aparecen en intervalos aproximadamente regulares, podrían deberse a interferencias generadas por la sonda.

En la Figura 11 se presenta la comparación entre el pulso correspondiente al FID teórico y experimental obtenido de la simulación del sistema anteriormente planteado.

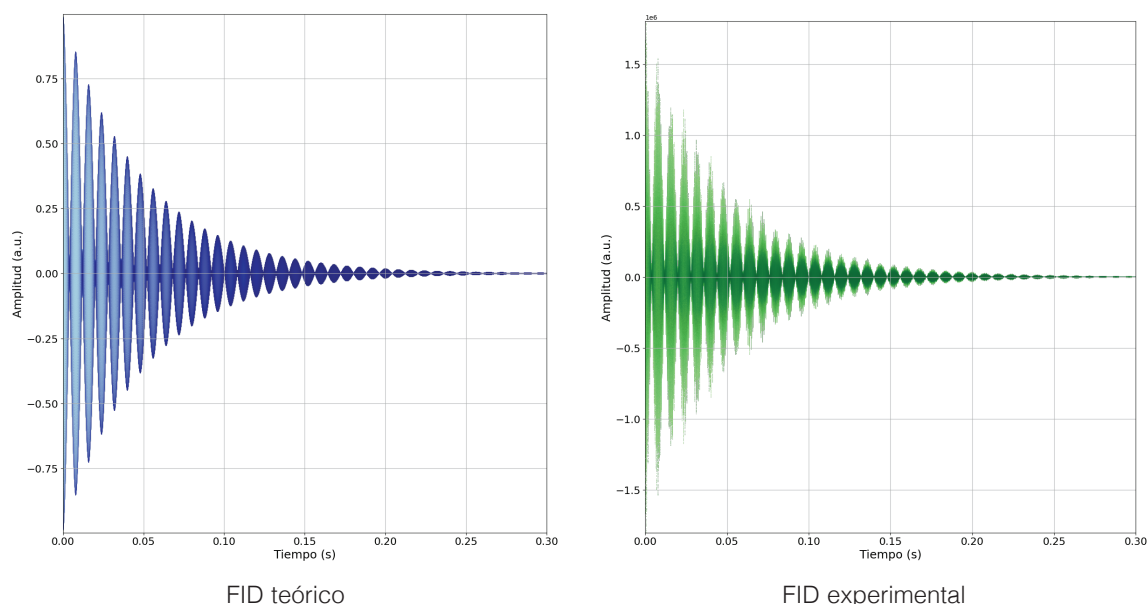


Figura 11. Señal correspondiente al FID teórico (a) y experimental (b) de la sustancia XA_1 con acoplamiento J.

La Figura 11a muestra el decaimiento temporal de la señal teórica generada por el sistema. Dicha señal se modeló mediante una función envolvente normalizada de magnitud unitaria, lo que facilita la visualización de la atenuación de su amplitud a lo largo del tiempo. Este modelo proporciona un punto de comparación con los resultados experimentales y permite evaluar el desempeño de los componentes simulados.

En la figura 11b se puede observar el decaimiento experimental del pulso de relajación del sistema. Se observa que la amplitud del pulso es de alrededor de $1,5 \times 10^6$ a.u. al inicio del tiempo de simulación. Esto se debe a que, en el contexto del RMN de campo bajo, es necesario garantizar que existe una amplitud de señal lo suficientemente grande para la correcta adquisición de los datos. Por la manera en que se simularon los componentes, es posible ajustar la ganancia de la señal si se necesitara más o menos precisión.

Además, se observa que la señal del FID experimental revela la existencia de ruido respecto a los resultados teóricos, una característica esperable debido a las particularidades del modelo planteado, el comportamiento de ambas graficas es bastante similar. A continuación, se obtuvieron las transformadas de Fourier de las señales teórica y experimental, con el fin de analizar su espectro de frecuencia. Esto se presenta en las figuras 12 y 13.

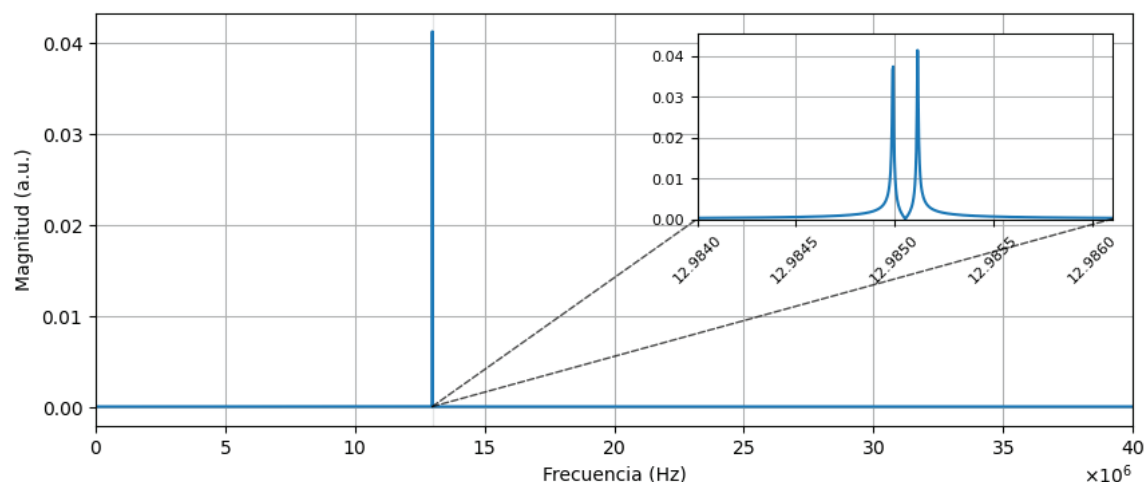


Figura 12. Espectro de frecuencia para el FID teórico, con ampliificación en la escala de 12,9840 MHz y 12,9860 MHz.

Este espectro corresponde a un FID de una sustancia que posee la existencia de un protón acoplado. Cuando se escala el eje de la frecuencia de la gráfica, es posible observar la presencia de 2 picos muy cercanos a 13 MHz, esto es esperable ya que cerca de ese punto se encuentra la frecuencia de Larmor del sistema [30]. En el espectro resultante se observa la presencia de dos picos con una separación de aproximadamente 125 Hz. En la simulación se utilizó un valor de J , correspondiente al acoplamiento espín-espín típico entre un protón y un carbono-13 enlazados en un enlace σ de tipo sp^3 . Este valor, fundamentado en el mecanismo de contacto de Fermi, representa una magnitud apropiada para este tipo de sistemas. Por tanto, se tiene una estructura doble claramente definida. Esta característica es coherente con el comportamiento espectral de los sistemas acoplados del tipo XA_1 [30].

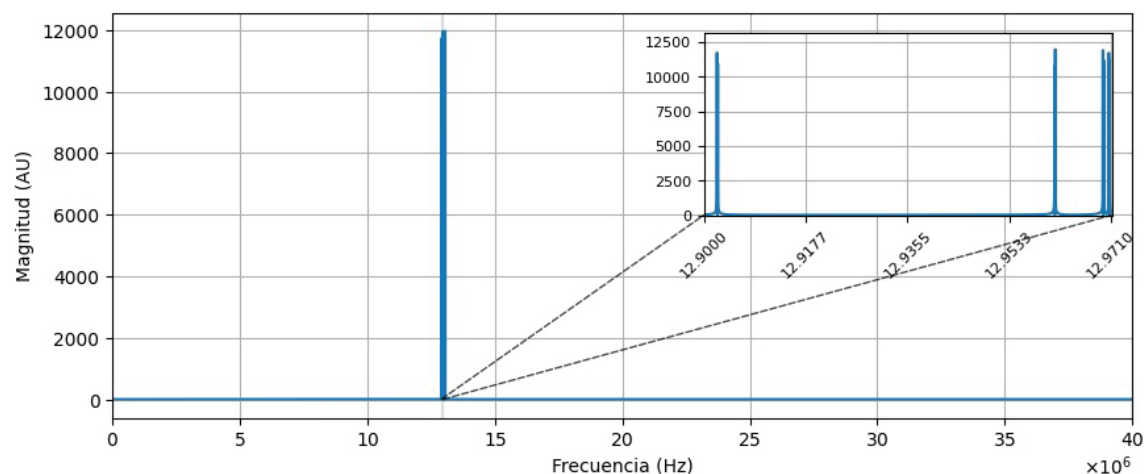


Figura 13. Espectro de frecuencia de FID teórico con perspectiva de los picos de señal y ampliificación entre 12,9840 MHz y 12,9860 MHz.

En la Figura 13 se presenta una perspectiva ampliada que permite apreciar con mayor claridad el ensanchamiento de banda y el desplazamiento químico originados por la inhomogeneidad del campo en el espectro final; ya que este es la superposición de los 7 puntos simulados. En esta representación se distinguen todos los picos dobles generados, así como un ligero ensanchamiento cercano a la frecuencia de Larmor esperada.

Según la regla del acoplamiento espín-espín, un núcleo de tipo X acoplado a n núcleos equivalentes de tipo A genera un patrón de $n + 1$ señales en el espectro, centradas alrededor de la frecuencia de Larmor. Para el caso en estudio $n = 1$, lo que genera una doble señal (un doblete), tal como se observa en la simulación.

La separación entre los dos picos corresponde a la constante de acoplamiento J , que representa la interacción entre los espines de los núcleos involucrados [30], [31]. La aparición clara de esta estructura confirma el correcto funcionamiento del sistema simulado y valida la calidad del diseño en términos de resolución espectral. Además, este resultado evidencia la capacidad del espectrómetro propuesto para captar señales características de sistemas reales, lo que respalda su uso como herramienta didáctica funcional y precisa.

Limitaciones del estudio

Los resultados obtenidos mediante COMSOL Multiphysics representan una aproximación idealizada del comportamiento del arreglo Halbach, construida a partir de la geometría seleccionada para las propiedades magnéticas nominales de los imanes y las condiciones de frontera establecidas. Por lo tanto, la intensidad de campo central máxima de 0,305 T y la inhomogeneidad calculada de 1,14 % podrían diferir de los valores obtenidos al construir y caracterizar experimentalmente el sistema, cuyo efecto real se desconoce.

La simulación supone que los imanes de grado N55 presentan propiedades magnéticas uniformes y equivalentes a los valores nominales proporcionados por el fabricante. Sin embargo, los imanes reales pueden presentar variaciones en la magnetización de cada una de las piezas planteadas. Asimismo, las tolerancias dimensionales, los pequeños errores angulares, las separaciones entre los imanes y las imprecisiones durante el ensamblaje de los seis anillos pueden alterar tanto la magnitud como la distribución espacial del campo. Debido a que la homogeneidad requerida en RMN es especialmente sensible a estas desviaciones, errores relativamente pequeños de fabricación o alineación podrían producir gradientes de campo mayores que los estimados mediante la simulación.

Los resultados presentados en el estudio también dependen de las simplificaciones numéricas utilizadas, i.e. la discretización de la geometría, la densidad de la malla, el tamaño del dominio de aire y las condiciones de frontera.

Por otra parte, el estudio estacionario no incorpora algunos fenómenos presentes durante la operación real del equipo, como las variaciones de temperatura, la desmagnetización parcial de los imanes producto del desgaste y las vibraciones mecánicas.

En cuanto a las simulaciones realizadas en MATLAB Simulink, una de las principales limitaciones corresponde a la simplificación de los componentes electrónicos del espectrómetro. La sonda se representó mediante un circuito RLC serie con parámetros constantes, mientras que el preamplificador, el amplificador de radiofrecuencia y las demás etapas de adquisición se modelaron a partir de comportamientos idealizados. En un sistema real estos componentes pueden presentar pérdidas, impedancias parásitas, variaciones de ganancia, desfases, saturación, distorsión y respuestas dependientes de la frecuencia. Por esta razón, la amplitud y la forma del pulso de 90°, de la señal FID y del espectro resultante podrían diferir de las obtenidas experimentalmente.

Asimismo, las señales analizadas fueron generadas mediante modelos teóricos y la incorporación de ruido sintético con una distribución rectangular basada en la inhomogeneidad calculada del campo magnético. Esta aproximación permite estudiar de forma preliminar la respuesta del sistema, pero no representa toda la complejidad del ruido experimental, que puede incluir ruido térmico, electrónico, ambiental y fluctuaciones del campo. El modelo también supone valores conocidos para los tiempos de relajación, la frecuencia de Larmor y el acoplamiento del sistema XA_1 , sin considerar las variaciones asociadas con la composición, concentración, temperatura y geometría de una muestra real.

Conclusiones y recomendaciones

Luego de las simulaciones y estudios presentados, se considera que el diseño conformado por seis anillos con 16 imanes permanentes de grado N55, representa una alternativa con alta eficiencia relativa en términos de campo magnético por unidad de costo. Este arreglo permite alcanzar un campo magnético de 0,305 T, siendo este un valor adecuado para la operación de sistemas de RMN en condiciones de bajo campo. La configuración modular propuesta no solo facilita las labores de mantenimiento y adaptación a requerimientos específicos, sino que también contribuye a una distribución más homogénea del campo a lo largo del eje longitudinal.

Se calculó la inhomogeneidad del campo magnético para el modelo de 16 imanes permanentes, y mediante un análisis matemático se encontró un valor de 1,14%. Este resultado representa un indicador positivo para los experimentos de C-13 y F-19, lo cual se ve reforzado por las simulaciones espectrales realizadas.

Se demostró una amplitud pico de 59 μ T en la sonda Tx/Rx, valor que se encuentra en concordancia con las predicciones teóricas. Esta correspondencia valida el planteamiento del esquema de modelado y confirma la fidelidad del sistema, lo que refuerza la adecuada caracterización de la sonda diseñada para su aplicación en experimentos de RMN de campo bajo.

En el estudio del FID, los componentes seleccionados para el preamplificador mostraron un desempeño importante al incrementar la señal procedente de los espines del sistema XA_1 de carbono e hidrógeno, alcanzando una amplitud de $1,5 \times 10^6$ a.u. Este nivel de ganancia resultó esencial para optimizar la relación señal-ruido y garantizar la integridad de la señal recuperada. El ruido introducido producto de las inhomogeneidades, no comprometió la detección de la forma de pulso esperada, pues los resultados obtenidos mediante las simulaciones de los modelos teórico y experimental mostraron tendencias similares.

Los análisis espectrales revelaron los dobletes característicos asociados al acoplamiento en el sistema XA_1 , centrado en una frecuencia de Larmor de 12,986 MHz y en concordancia al campo magnético externo de $0,305 \pm 0,282$ T. A pesar de la presencia del ensanchamiento de banda, tanto los espectros teóricos como los experimentales se ajustaron satisfactoriamente a las predicciones de la bibliografía consultada, evidenciando la capacidad del conjunto de componentes propuestos para reproducir con fidelidad las características espectrales fundamentales requeridas en la implementación práctica del espectrómetro RMN de campo bajo.

Todas las características operativas señaladas previamente y sustentadas en el modelado computacional, consolidan a la propuesta de equipo RMN de campo bajo como una solución técnicamente robusta y funcionalmente idónea para aplicaciones académicas, ofreciendo una plataforma fiable para futuros desarrollos y análisis espectrales de alta precisión. Estos

resultados abren un campo de posibilidades en el desarrollo de la RMN tanto en el país como en la región, lo que permitirá no sólo un aumento en los niveles de I+D+i sino una democratización de la técnica en el sector académico y productivo del país.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Michael Montero Sánchez por su valiosa colaboración en la redacción inicial de este documento y por haber contribuido con ideas fundamentales que sirvieron como base para el desarrollo de esta investigación. Aunque por motivos personales tuvo que retirarse del proyecto, lo reconocemos como el quinto autor por su aporte significativo en las etapas iniciales del trabajo.

Referencias

- [1] M. H. Levitt, *Spin Dynamics: Basics of Nuclear Magnetic Resonance*. Chichester, U.K.: Wiley, 2001.
- [2] J. U. Izunobi and C. L. Higginbotham, "Polymer molecular weight analysis by ^1H NMR spectroscopy," *Journal of Chemical Education*, vol. 88, no. 8, pp. 1098–1104, 2011, doi: [10.1021/ed100461v](https://doi.org/10.1021/ed100461v).
- [3] D. G. Lonnon and J. M. Hook, "O quantitative nuclear magnetic resonance spectroscopy of gasoline and oxygenated additives," *Analytical Chemistry*, vol. 75, no. 17, pp. 4659–4666, 2003, doi: [10.1021/ac034339q](https://doi.org/10.1021/ac034339q).
- [4] N. R. Babij et al., "NMR chemical shifts of trace impurities: Industrially preferred solvents used in process and green chemistry," *Organic Process Research & Development*, vol. 20, no. 3, pp. 661–667, 2016, doi: [10.1021/acs.oprd.5b00417](https://doi.org/10.1021/acs.oprd.5b00417).
- [5] M. Meribout and S. Sonowan, "Optimal Halbach magnet array design for portable NMR targeting multiphase flow metering applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 1, pp. 1–7, Jan. 2019, Art. no. 4001207, doi: [10.1109/TMAG.2018.2877603](https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2877603).
- [6] E. Danieli et al., "On-line monitoring of chemical reactions by using bench-top nuclear magnetic resonance spectroscopy," *ChemPhysChem*, vol. 15, no. 14, pp. 3060–3066, 2014, doi: [10.1002/cphc.201402049](https://doi.org/10.1002/cphc.201402049).
- [7] J. A. Borloz-Chinchilla and I. F. Céspedes-Camacho, "Resonancia Magnética Nuclear en Costa Rica: una perspectiva histórica," *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 37, no. 3, 2024, doi: [10.18845/tm.v37i3.6870](https://doi.org/10.18845/tm.v37i3.6870).
- [8] R. Battesti et al., "High magnetic fields for fundamental physics," *Physics Reports*, vols. 765–766, pp. 1–39, 2018, doi: [10.1016/j.physrep.2018.07.005](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.07.005).
- [9] Y. Iwasa et al., "Solid-cryogen cooling technique for superconducting magnets of NMR and MRI," *Physics Procedia*, vol. 36, pp. 1348–1353, 2012, doi: [10.1016/j.phpro.2012.06.303](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.303).
- [10] S. In, Y.-J. Hong, H.-K. Yeom, J. Ko, H. Kim, and S.-J. Park, "Thermal and structural analysis of a cryogenic conduction cooling system for a HTS NMR magnet," *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, vol. 18, no. 1, pp. 59–63, 2016, doi: [10.9714/psac.2016.18.1.059](https://doi.org/10.9714/psac.2016.18.1.059).
- [11] S. Ito et al., "Long term operation of superfluid-cooled cryostat for 920 MHz NMR spectrometer," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 14, no. 2, pp. 1715–1718, Jun. 2004, doi: [10.1109/TASC.2004.831051](https://doi.org/10.1109/TASC.2004.831051).
- [12] R. de Oliveira-Silva et al., "A benchtop single-sided magnet with NMR well-logging tool specifications: Examples of application," *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 322, Art. no. 106871, 2021, doi: [10.1016/j.jmr.2020.106871](https://doi.org/10.1016/j.jmr.2020.106871).
- [13] T. Karasawa et al., "Homogeneous B_0 coil design method for open-access ultra-low field magnetic resonance imaging: A simulation study," *Magnetic Resonance Imaging*, vol. 112, pp. 128–135, 2024, doi: [10.1016/j.mri.2024.07.006](https://doi.org/10.1016/j.mri.2024.07.006).
- [14] K. K. G. Kurian, P. K. Madhu, and G. Rajalakshmi, "Solid-state NMR signals at zero-to-ultra-low field," *Journal of Magnetic Resonance Open*, vols. 10–11, Art. no. 100049, 2022, doi: [10.1016/j.jmro.2022.100049](https://doi.org/10.1016/j.jmro.2022.100049).
- [15] A. B. García García, "Aplicación de técnicas de resonancia magnética nuclear al estudio de miosistemas," Ph.D. dissertation, Facultad de Veterinaria, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2018. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/17022>. [Accessed: Jul. 26, 2026].
- [16] W. Wei et al., "Construction and testing of a high-homogeneity 55 T pulsed magnet for high-field nuclear magnetic resonance measurements," *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 374, Art. no. 107862, 2025, doi: [10.1016/j.jmr.2025.107862](https://doi.org/10.1016/j.jmr.2025.107862).

- [17] J. Mitchell et al., "Low-field permanent magnets for industrial process and quality control," *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, vol. 76, pp. 1–60, 2014, doi: [10.1016/j.pnmrs.2013.09.001](https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2013.09.001).
- [18] N. Bryden et al., "An open-source, low-cost NMR spectrometer operating in the mT field regime," *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 332, Art. no. 107076, 2021, doi: [10.1016/j.jmr.2021.107076](https://doi.org/10.1016/j.jmr.2021.107076).
- [19] G. Moresi and R. Magin, "Miniature permanent magnet for table-top NMR," *Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering*, vol. 19B, no. 1, pp. 35–43, 2003, doi: [10.1002/cmr.b.10082](https://doi.org/10.1002/cmr.b.10082).
- [20] P. Yu et al., "A low-cost home-built NMR using Halbach magnet," *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 294, pp. 162–168, 2018, doi: [10.1016/j.jmr.2018.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jmr.2018.07.014).
- [21] P. Blümner and H. Soltner, "Practical concepts for design, construction and application of Halbach magnets in magnetic resonance," *Applied Magnetic Resonance*, vol. 54, pp. 1701–1739, 2023, doi: [10.1007/s00723-023-01602-2](https://doi.org/10.1007/s00723-023-01602-2).
- [22] Centro de Investigación en Productos Naturales, "Unidad de Resonancia Magnética Nuclear," Universidad de Costa Rica. [Online]. Available: <https://ciprona.ucr.ac.cr/unidad-de-resonancia-magnetica-nuclear>. [Accessed: Mar. 10, 2025].
- [23] K. Mora-Pérez, "TEC impulsa investigación y conocimiento de la Resonancia Magnética Nuclear," *Hoy en el TEC*, Jan. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2023/01/19/tec-impulsa-investigacion-conocimiento-resonancia-magnetica-nuclear>. [Accessed: Jul. 26, 2026].
- [24] K. Nishimura, "The strongest array beyond Halbach array," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 580, Art. no. 170933, 2023, doi: [10.1016/j.jmmm.2023.170933](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170933).
- [25] L. Yang et al., "An easy-built Halbach magnet for LF-NMR with high homogeneity using optimized target-field passive shimming method," *Journal of Magnetic Resonance*, vol. 357, Art. no. 107582, 2023, doi: [10.1016/j.jmr.2023.107582](https://doi.org/10.1016/j.jmr.2023.107582).
- [26] Arnold Magnetic Technologies, "Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets: N52," datasheet. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N52-151021.pdf>. [Accessed: Jul. 26, 2026].
- [27] Arnold Magnetic Technologies, "Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets: N55," datasheet, rev. 210802. [Online]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N55-151021.pdf>. [Accessed: Jul. 26, 2026].
- [28] J. Wang, W. Mao, M. Qiu, M. B. Smith, and R. T. Constable, "Factors influencing flip angle mapping in MRI: RF pulse shape, slice-select gradients, off-resonance excitation, and B0 inhomogeneities," *Magnetic Resonance in Medicine*, vol. 56, no. 2, pp. 463–468, 2006, doi: [10.1002/mrm.20947](https://doi.org/10.1002/mrm.20947).
- [29] D. Holmes, "NMR basic concepts handout," Michigan State University, East Lansing, MI, USA, Feb. 2004.
- [30] Q. Stern and K. Sheberstov, "Simulation of NMR spectra at zero and ultralow fields from A to Z—A tribute to Prof. Konstantin L'vovich Ivanov," *Magnetic Resonance*, vol. 4, pp. 87–109, 2023, doi: [10.5194/mr-4-87-2023](https://doi.org/10.5194/mr-4-87-2023).
- [31] S. Alcicek, P. Put, D. Barskiy, V. Kontul, and S. Pustelny, "Zero-field NMR of urea: Spin-topology engineering by chemical exchange," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 12, no. 43, pp. 10671–10676, 2021, doi: [10.1021/acs.jpcllett.1c02768](https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.1c02768).

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos haber utilizado *ChatGPT-4o* para múltiples tareas: la revisión gramatical y de estilo y el apoyo en la estructura y redacción. Todos los resultados e información asistidos por IA fueron revisados, verificados y validados minuciosamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la precisión, coherencia e integridad del contenido publicado.