



CIENCIAS TÉCNICAS

Artículo Original de Investigación

Diseño de bobinas de excitación-recepción para la detección de señales de RMN ^{19}F proveniente del compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno

José Luis García Bello ¹ <https://orcid.org/0000-0002-8238-8402>
Alejandro Bordelois Cayamo ² <https://orcid.org/0000-0001-5053-4885>
José León Montoya ³ <https://orcid.org/0000-0001-5508-0501>
Manuel Arsenio Lores Guevara ² <https://orcid.org/0000-0003-1949-180X>
Juan Carlos García Naranjo ^{2*} <https://orcid.org/0000-0003-1649-3383>
Luis Enrique Bergues Cabrales ^{4*} <https://orcid.org/0000-0001-8094-392X>

¹ Universidad Autónoma de Santo Domingo. Santo Domingo, República Dominicana

² Centro de Biofísica Médica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

³ Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

⁴ Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

*Autores para la correspondencia: jcgwaranjo@uo.edu.cu, lbergues@uo.edu.cu, berguesc@yahoo.com

RESUMEN

Introducción. La excitación de cualquier muestra con un campo de radiofrecuencia y la recepción de la señal proveniente de esta son de vital importancia para su caracterización cuando se usan las diferentes técnicas de resonancia magnética nuclear (relajación, imágenes y espectroscopia). El objetivo de este estudio es diseñar una bobina de excitación-recepción para la detección de señales de resonancia magnética nuclear de flúor-19 proveniente del compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno cuando se usa la relajación magnética nuclear. **Métodos.** La inducción magnética se calcula en el interior de cada bobina. Las simulaciones de sus respectivos mapas de campos magnéticos axiales y radiales se muestran. Además, se calculan la resistencia eléctrica, la inductancia magnética, la sensibilidad y el factor de calidad para cada bobina. **Resultados.** Los resultados muestran que la primera variante de bobina induce la mayor homogeneidad del campo magnético de radiofrecuencia en el volumen de trabajo, los menores valores de la inductancia magnética, la resistencia eléctrica y la inducción magnética de la bobina y los valores más adecuados del factor de calidad y la sensibilidad. Se concluye que la primera variante de bobina excitación-recepción es la más adecuada para el estudio del compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno caracterizado por relajación magnética de flúor-19.

Palabras clave: Relajación de resonancia magnética nuclear de flúor-19; bobina de excitación-recepción; compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno.

Revisores ^a

Dr. C. Karel Valdiviés Cruz
Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad de la Habana.
La Habana, Cuba

Editora

M. Sc. Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Dr. C. Yoan Karell Acosta González
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

^a N. del E: En este apartado figuran los nombres de los árbitros que accedieron a revelar su identidad, como expresión de apertura progresiva del proceso de revisión por pares. No aparecen aquellos que optaron por el anonimato.



Design of excitation-reception coils for the detection of ^{19}F NMR signals from the polytetrafluoroethylene/graphene oxide composite

ABSTRACT

Introduction. The excitation of any sample with a radiofrequency field and the reception of the signal coming from it are of vital importance for its characterization when different techniques of Nuclear Magnetic Resonance (Relaxation, Images and Spectroscopy) are used. The aim of this study is to design an excitation-reception coil for the detection of fluorine-19 Nuclear Magnetic Resonance signals from the polytetrafluoroethylene/graphene oxide composite when nuclear magnetic relaxation is used. **Methods.** The magnetic induction is calculated inside each coil. Simulations of their respective maps of axial and radial magnetic fields are shown. In addition, the electrical resistance, the magnetic inductance, the sensitivity and the quality factor for each coil are calculated. **Results and Discussion.** The results show that the first variant of coil induces the greater homogeneity of the radiofrequency magnetic field in the work volume, the lowest values of the magnetic inductance, electrical resistance and magnetic induction of the coil, and the most adequate values of the quality factor and sensitivity. It is concluded that the first variant of excitation-reception coil is the most suitable for the study of the polytetrafluoroethylene/graphene oxide composite characterized by fluorine-19 magnetic relaxation.

Keywords: fluorine-19 nuclear magnetic resonance relaxation; excitation-reception coil; polytetrafluoroethylene/graphene oxide composite

INTRODUCCIÓN

La resonancia magnética nuclear (RMN) permite conocer los tiempos de relajación spin-spin (T_2) y spin-retículo (T_1) en dependencia del núcleo que está bajo estudio.⁽¹⁾ Para esto, la alta homogeneidad del campo magnético principal (Δc_{mp}) y el correcto diseño de la bobina de radiofrecuencia (rf) tienen que ser garantizados para lograr una alta relación señal/ruido y una alta sensibilidad de la bobina (S_b). El campo magnético principal es generado por el sistema magnético principal, el cual puede ser un imán permanente o electroimán. El parámetro Δc_{mp} se calcula por medio de la expresión $\Delta c_{mp} = (B_{oi} - B_o)/B_o$, donde B_o es la inducción magnética en el centro magnético del sistema magnético principal y B_{oi} ($i = 1, \dots, M_1$) es la inducción magnética en el i -ésimo punto interior al volumen de trabajo (coincide con el tamaño de la muestra bajo estudio). M_1 es el número total de puntos en este volumen de trabajo. Es importante señalar que el origen de las coordenadas se ubica en el centro magnético que a su vez coincide con el centro mecánico del sistema magnético principal, aspectos que se garantizan en la simulación y en el experimento.

La muestra se excita con un campo magnético generado por la bobina de rf. La homogeneidad del campo magnético de rf (Δr_f) se calcula mediante $\Delta r_f = (B_{1k} - B_{1o})/B_{1o}$, donde

B_{1o} es la inducción magnética de rf en el centro magnético de la bobina de rf y B_{1k} ($k = 1, \dots, M_2$) es la inducción magnética de rf en el k -ésimo punto interior al volumen de trabajo (coincide con el tamaño de la muestra bajo estudio). M_2 es el número total de puntos en este volumen de trabajo.

La señal proveniente de la muestra se detecta por la bobina de recepción. Cuando las bobinas de excitación y de recepción se construyen por separado, Δr_f y el factor de calidad de la bobina de rf (Q_b) son sus requisitos fundamentales, respectivamente. Sin embargo, un compromiso entre Δr_f y Q_b se debe tener en cuenta cuando se usa la misma bobina para la excitación-recepción de la señal proveniente de la muestra.⁽²⁾

De las configuraciones de bobinas de rf, el solenoide es el de mayor sensibilidad en RMN, si $H_b = D_b$, donde H_b es la longitud de la bobina y D_b su diámetro, como demuestran Hoult y Lauterbur.⁽²⁾ Sin embargo, un criterio práctico que limita el uso del solenoide es el ajuste de su reactancia inductiva, X_L ($X_L = 2\pi f_o L_b$) a un valor de 100 Ohm a 150 Ohm (Ω).⁽³⁾ La variable L_b es la inductancia magnética de la bobina y f_o la frecuencia cíclica ($f_o = \gamma B_o$), donde γ es la razón giromagnética del núcleo bajo estudio. La constante γ es una propiedad de cada núcleo atómico. En RMN, f_o es la frecuencia de resonancia o frecuencia de Larmor.⁽²⁾

De los núcleos empleados en RMN, el más abundante en la naturaleza es el protón o hidrógeno ^1H ($\gamma = 42,577 \text{ MHz/T}$), lo que ha permitido caracterizar materiales/sustancias en las que prevalecen la concentración de ^1H , como en los sistemas biológicos. En estos sistemas y otros se han estudiado otros tipos de núcleos, como el carbono-13 (^{13}C , $\gamma = 10,708 \text{ MHz/T}$), fósforo-31 (^{31}P , $\gamma = 17,235 \text{ MHz/T}$), entre otros. ⁽⁴⁾ Sin embargo, existen otros que por su importancia y abundancia son de interés para la relajación de RMN (rRMN) como el fluor-19 (^{19}F , $\gamma = 40,052 \text{ MHz/T}$), el cual es abundante en muchos compuestos y su razón giromagnética es aproximadamente 94 % la del protón. ⁽⁵⁾ Dentro del campo de los materiales del futuro, las propiedades del grafeno, politetrafluoroetileno y compuesto politetrafluoroetileno/óxido de grafeno destacan sobre el resto y los sitúan en la avanzada tecnológica de la industria de los materiales.

El grafeno es un material compuesto por el 100 de carbono, conductividad eléctrica ($0,96 \times 10^8 \text{ S/m}$) mayor a la del cobre ($0,60 \times 10^8 \text{ S/m}$), conductividad térmica ($\sim 5000 \text{ W/mK}$ a temperatura ambiente), densidad ($0,77 \text{ mg/m}^2$), gran área superficial específica ($2600 \text{ m}^2/\text{g}$), resistencia a la tracción (130 GPa), módulo de Young ($1,0 \text{ TPa}$), entre otras propiedades y características físico-químicas. Esto hace que este material sea ligero, el más resistente conocido, elástico (grandes elongaciones bajo altas tensiones mecánicas sin sufrir ruptura), mejor conductor eléctrico y térmico que el cobre, lo que ha permitido que el grafeno se convierta en un candidato ideal para la fabricación de disipadores térmicos y de materiales compuestos de gran conductividad térmica (por ejemplo, células solares orgánicas, supercondensadores, ánodos en baterías de litio, sensores, transistores, pantallas táctiles y de cristal líquido, entre otras aplicaciones). ⁽⁶⁾

El politetrafluoroetileno es un material similar al polietileno, excepto que los átomos de hidrógeno están completamente reemplazados por los de fluor. El politetrafluoroetileno está compuesto por el 67 % de fluor y 33 % de carbono (estructura química $[\text{CF}_2-\text{CF}_2]_n$), alto peso molecular, alta densidad específica ($2,7 \text{ g/cm}^3$), de 90 % a 95 % de cristalinidad, gran estabilidad química y térmica, no conductor eléctrico de alta permitividad eléctrica, baja conductividad térmica ($\sim 0,3 \text{ W/mK}$), elevado punto de fusión de $320 \text{ }^\circ\text{C}$ a $342 \text{ }^\circ\text{C}$, insoluble en los disolventes orgánicos como hidrocarburos clorados, o éster y fenol a temperaturas mayores que la de transición ($327 \text{ }^\circ\text{C}$), entre otras propiedades y características físico-químicas. Esto hace que este material sea muy inerte (alta estabilidad frente a la acción de solventes, ácidos, bases, agentes oxidantes y radiación ultravioleta), posea la mayor resistencia química de todos los polímeros conocidos (energía de los enlaces del carbono-fluor $\sim 460 \text{ kJ/mol}$, lo que hace

que estos enlaces sean más fuertes y estables, y por ende muy difíciles de romper), sea impenetrable para la mayoría de las sustancias, tenga el coeficiente de fricción más bajo de todos los materiales sólidos (de 0,05 a 0,09) y una tensión superficial muy baja para adherirse con otros materiales ($2 \times 10^{-2} \text{ N/m}$), lo que ha permitido que el politetrafluoroetileno tenga diferentes aplicaciones industriales, tales como en: instalaciones eléctricas, equipos electrónicos, componentes eléctricos, tintas, válvulas de bomba, tuberías, revestimientos, automotriz, biomédica, nuclear y aeroespacial, entre otras aplicaciones. ^(7,8)

La baja conductibilidad térmica del politetrafluoroetileno limita su aplicación en la ingeniería. ⁽⁹⁾ Las propiedades y características tribológicas, mecánicas, biomédicas, térmicas y eléctricas de este fluoropolímero pueden ser mejoradas si a su matriz polimérica se le adiciona nanopartículas de grafeno, formando el compuesto politetrafluoroetileno/óxido de grafeno. ^(10,11) Respecto al politetrafluoroetileno puro, este polímero nanocompuesto (del inglés, polymer-nanocomposites) incrementa el módulo de elasticidad (en un 10 %) y la resistencia a la tracción (en más del 40 %); mejora la conductividad térmica en aproximadamente un 29 %; 84 %; 157 % para las concentraciones de 4 %; 8 %; 16 % en peso, respectivamente; su densidad es igual (para las concentraciones de 0,25 % a 1 % en peso) y disminuye ($2,14 \text{ g/cm}^3$; $2,07 \text{ g/cm}^3$; $1,95 \text{ g/cm}^3$ para las concentraciones de 4 %; 8 %; 16 % en peso, respectivamente); posee un punto de fusión 8 veces mayor ($332,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Los valores del módulo de almacenamiento del compuesto politetrafluoroetileno/óxido son 2412; 1297 y 381 para $-50 \text{ }^\circ\text{C}$; $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y $150 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente; sin embargo, los valores de este módulo para el politetrafluoroetileno puro son 1102; 545 y 170 para estas respectivas temperaturas. Además, este polímero nanocompuesto tiene alta energía superficial; resistencia inherente a la oxidación, particularmente para aplicaciones de temperatura elevada; excelentes propiedades autolubricantes y fisicoquímicas (por ejemplo, baja permeabilidad, baja viscosidad de fusión, ductilidad, resistencia al calor). Estas propiedades físico-químicas del compuesto politetrafluoroetileno/óxido de grafeno han atraído el interés de la comunidad científica debido a que sus propiedades son únicas y su potencialidad para aplicaciones en la biotecnología, la biomedicina, la bioingeniería, el diagnóstico y terapia de enfermedades, entre otras. Entre estas aplicaciones se pueden mencionar la mejora del coeficiente de fricción e índice de desgaste (3 veces mayor para la concentración de grafeno óptima de 0,5 % del peso de las nanopartículas de grafeno), por lo que reduce el desgaste en engranajes, cojinetes, rodamientos, bombas de vacío, prótesis e implantes para las articulaciones humanas de cadera-rodilla; la adhesión a sustratos en dependencia

de la aplicación (hasta 3 veces); mejora de recubrimiento de superficies con pinturas y barnices; incrementa la protección anti-relámpago de los aviones, torres de telecomunicaciones y paletas de turbinas eólicas. Además, este polímero nanocompuesto permite la separación de combustibles contaminantes del agua y el tratamiento de aguas residuales, entre otras aplicaciones. ⁽¹²⁻¹⁵⁾

Aunque en la República de Cuba no se conocen reportes científicos ni aplicaciones de los 3 compuestos arriba mencionados, en particular el compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno; hasta donde se ha revisado, este polímero nanocompuesto se puede enmarcar en la línea de la ciencia de nuevos materiales y aplicarse en diferentes sectores socioeconómicos, tales como: la biomedicina (específicamente en la rehabilitación, biomecánica, prótesis de rodilla y cadera), las telecomunicaciones, la electrónica, la ingeniería química y el medioambiente (tratamiento de residuales, combustibles), recubrimiento de superficies, entre otras posibles aplicaciones.

Una de las sugerencias en la literatura es el estudio de los procesos de relajación, polimerización y difusión que acontecen en el compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno, ^(10,15) que no han sido estudiados por rRMN. Proponemos que pueden ser estudiados en el Centro de Biofísica Médica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba, por la experticia de sus investigadores y las metodologías que ellos han implementado para la caracterización por rRMN de muestras no biológicas y biológicas (por ejemplo, la anemia falciforme por rRMN). ⁽¹⁶⁾

Como el compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno tiene alta concentración de ¹⁹F, su caracterización por rRMN tiene que ser a la frecuencia de este núcleo. Por tanto, las bobinas de excitación y recepción por separado, o la bobina de excitación-recepción tienen que ser sintonizadas a la frecuencia del ¹⁹F. Como este material es un sólido, ambos tipos de bobinas acopladas al circuito RLC (resistivo, inductivo y capacitivo) tienen que satisfacer que sus tiempos muertos sean cortos después de concluido el pulso de excitación. Esto permite obtener la información contenida en la parte inicial de la señal de inducción libre y estudiar sustancias con cortos tiempos de relajación (como los sólidos), entre otras ventajas. ⁽¹⁷⁾ En sólidos, los tiempos muertos cortos se explican por la rápida velocidad de relajación (depende inversamente con la sexta potencia de la distancia (muy corta) entre los núcleos/momentos magnéticos) en ellos. Por tanto, la relación señal/ruido (S/R) es baja, lo que trae consigo que el número de acumulaciones y la duración del experimento incrementen.

López Ríos ⁽¹⁷⁾ reporta tiempos muertos $\leq 5 \mu\text{s}$ (μs significa microsegundos) cuando se usan circuitos independi-

entes para la excitación y recepción, un conmutador activo de alta velocidad, una resistencia amortiguadora y un preamplificador de bajo niveles de ruido. Las bobinas de excitación y recepción por separado permiten optimizar los canales de excitación y recepción por separados. Bajo factor de calidad, mayor ancho de banda y alta homogeneidad del campo de radiofrecuencia son las exigencias para el diseño de las bobinas de excitación. Sin embargo, alto factor de calidad, baja homogeneidad del campo de radiofrecuencia, bajo ruido, entre otros aspectos son los requerimientos para el diseño de las bobinas de recepción.

López Ríos ⁽¹⁷⁾ expone 3 razones que dificultan la obtención de tiempos muertos cortos cuando se utilizan las bobinas de excitación y recepción por separado, tales como: a) el acoplamiento magnético entre los 2 tipos de bobinas (la señal emitida por una bobina será captada por la otra); b) las señales transitorias no deseadas que provienen de la muestra y de la aplicación del pulso de radiofrecuencia se transmiten al canal de recepción junto con la señal útil deseada; c) la primera etapa del proceso de amplificación se puede saturar después de los pulsos de radiofrecuencia y transitorios, los que impiden la captación de la señal de inducción libre durante un tiempo, siendo marcado para sistemas que generan inducciones magnéticas bajas.

Las 3 razones mencionadas en el párrafo anterior más la baja profundidad de penetración de la radiofrecuencia en la muestra (inversamente proporcional al diámetro de la bobina), la alta razón señal-ruido obtenida con bobinas largas, y el tamaño de la muestra igual a 1 cm^3 pueden justificar el por qué la bobina de excitación-recepción puede ser sugerida para caracterizar el compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno, por rRMN, sin precedente en la literatura. Este último tipo de bobina tiene la ventaja que en la misma se excita la muestra y recibe la señal proveniente de ella, lo que hace menos complejo el diseño y construcción de la bobina excitación-recepción y de su electrónica asociada.

Por eso, el objetivo de este estudio es diseñar una bobina de rf que se use para la excitación-recepción que permita la detección de la señal de ¹⁹F proveniente del compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno cuando se usa la rRMN.

MÉTODOS

Variantes de bobina excitación-recepción

Las dimensiones Hb, Db y el paso entre 2 espiras consecutivas (h) del solenoide que se propone como bobina de rf para la excitación-recepción del compuesto politetrafluoretileno/óxido de grafeno se muestran esquemáticamente en la figura 1. Son usadas 3 variantes de bobinas y denominadas

bobina-1, bobina-2 y bobina-3 (tabla 1). En esta tabla se especifican los valores de h, del número de vueltas (N) y diámetro de cada espira (d) para las 3 variantes de bobinas. El número de capas es 1; $d = 2r$, donde r es el radio de la espira de material de cobre. Es importante señalar que a pesar de N ser entero, el lugar decimal de N (tabla 1) significa que se agrega media espira para que los terminales salgan en la misma dirección perpendicular a la bobina, lo que facilita la conexión al circuito de sintonía y acoplamiento.

Cálculo de B_{10}

Hoult y Richards ⁽¹⁸⁾ reportan una expresión aproximada para B_{10} (en T) en el centro del solenoide, dada por

$$B_{10} \approx \frac{NI\mu_0}{2[(H_b/2)^2 + (D_b/2)^2]^{3/2}}, \quad [1]$$

donde I es la intensidad de la corriente eléctrica (en A) que circula por la bobina y μ_0 la permeabilidad magnética del vacío. N, H_b y D_b se definen arriba.

La ecuación [1] es válida para $f \leq 10$ MHz pero no permite el cálculo de B_{1k} en otros puntos interiores al solenoide. Para esto, la ecuación de Biot-Savart se implementa numéricamente para calcular el valor de B_{1k} en el punto k -ésimo interior al solenoide, denominado B_{1k} ($B_{1k} = \sqrt{B_{1zk}^2 + B_{1rk}^2}$, $k = 1, \dots, M_2$),

donde B_{1zk} y B_{1rk} son las componentes de B_{1k} en el punto (r, z) , en coordenadas cilíndricas, y M_2 se define arriba. Una vez conocido los valores de B_{10} y B_{1k} ($k = 1, \dots, M_2$) se calcula Δ_{rf} por la expresión expuesta en la sección Introducción de este manuscrito.

Además de B_{10} y Δ_{rf} , otros parámetros se tienen en cuenta para la selección adecuada de la bobina excitación-recepción de rf, como la resistencia eléctrica (R_{b-rf}), L_b , S_b y Q_b .

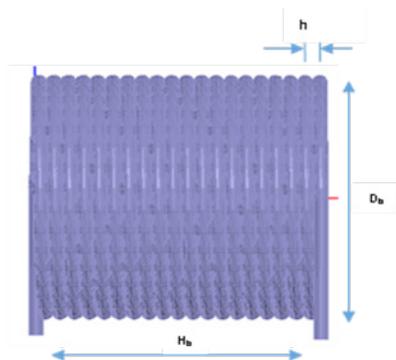


Fig. 1. Representación esquemática de la bobina de rf (solenoides) para la excitación-recepción. Las simbologías H_b y D_b representan la longitud y diámetro del solenoide, mientras h el paso entre 2 espiras.

Cálculo de la inductancia de la bobina

Para el cálculo de L_b (en μH) para un solenoide de núcleo de aire, en términos de H_b , D_b y N, se usa la siguiente expresión aproximada ⁽¹⁹⁾De acuerdo al criterio establecido por Volgov VA.,⁽²⁰⁾ los valores de $L_b \leq 3 \mu H$ se seleccionan para $f_0 \leq 4$ MHz.

$$L_b = \frac{D_b^2 N^2}{45 D_b + 100 H_b}. \quad [2]$$

Cálculo de la resistencia eléctrica de la bobina

El valor de R_{b-rf} (en Ω) se calcula por medio de una metodología ingenieril que hace uso de las ecuaciones reportadas por Volgov VA.,⁽²⁰⁾ dadas por

$$R_{b-rf} \approx r_0 [F(z) + \left(\frac{d_{sa} k N}{2 D_b}\right) G(z)], \quad [3]$$

$$r_0 = \frac{7 D_b N}{d_{sa}^2} 10^{-6} \quad [4]$$

Donde r_0 es la resistencia eléctrica de la bobina (en Ω) a la corriente directa, d_{sa} es el diámetro del conductor sin aislamiento (en cm); D_b es el diámetro de la bobina (en cm); k es un coeficiente que estima la influencia de D_b y H_b sobre el efecto de proximidad y su valor es 5 para las 3 variantes de bobinas. Los coeficientes $F(z)$ y $G(z)$ cuantifican los efectos superficial y de proximidad, respectivamente. Los mismos se expresan por medio de las funciones de Bessel y sus valores para el conductor de cobre aparecen tabulados por Volgov VA.⁽²⁰⁾ El argumento z de $F(z)$ y $G(z)$ viene dado por la expresión ($z = 0,106 d_{sa} \sqrt{f_0}$), donde f_0 se expresa en Hz. Los

valores de r_0 , $F(z)$, $G(z)$, d_{sa} y z se reportan en la tabla 2. ⁽²⁰⁾

Tabla 1. Parámetros geométricos de cada variante de bobina

Variantes de bobinas	N	d (mm)	h (mm)
Bobina-1	16,5	0,625	2r
Bobina-2	25,5	0,260	3r
Bobina-3	20,5	0,500	2r

N (número de vueltas), d (diámetro de la espira) y h (paso entre dos espiras consecutivas).

Tabla 2. Valores de los parámetros en la ecuación [3]

Parámetros	Bobina-1	Bobina-2	Bobina-3
r_0 (Ω)	0,0296	0,2640	0,0574
F(z)	4,8560	2,2540	4,1510
G(z)	2,1710	0,8609	1,8180
d_{sa} (cm)	0,0625	0,0260	0,0500
z	13,2500	5,5120	10,6000

r_0 (resistencia eléctrica de la bobina a la corriente directa, en Ω); F(z) (coeficiente que cuantifica el efecto superficial); G(z) (coeficiente que cuantifica el efecto de proximidad); d_{sa} (diámetro del conductor sin aislamiento, en cm); y z (argumento de F(z) y G(z)).⁽²⁰⁾

Cálculo de la sensibilidad de la bobina

Una vez obtenido el valor de B_{10} y el valor de R_{b-rf} , S_b se calcula por la fórmula reportada en Mispelter J *et al.*,⁽³⁾ dada por

$$S_b = \frac{B_{10}}{I \sqrt{R_{b-rf}}} \cdot \quad [5]$$

Cálculo del factor de calidad de la bobina

El parámetro Q_b se calcula por medio de la expresión

$$Q_b = \frac{2\pi f_0 L_b}{R_{b-rf}} \cdot \quad [6]$$

Simulaciones

Para los cálculos de los parámetros de la bobina y del campo magnético de rf generado por esta, se usan los valores de los parámetros que se reportan en las tablas 1 y 2; $I = 1$ A, $B_0 = 0,094845$ T; $\gamma = 40,05$ MHz/T (para el ^{19}F); $f_0 = 3,79854$ MHz; $\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6}$ Tm/A; y $\rho = 1,69 \times 10^{-8}$ Ωm (ρ , resistividad eléctrica del cobre). Además, se considera $H_b = D_b = 1$ cm porque el volumen de la muestra es 1 cm^3 .

Para los cálculos y simulaciones se siguió la siguiente metodología. Primero, se calcula en el siguiente orden L_b , r_0 , R_{b-rf} y Q_b . Segundo, se resuelve numéricamente, por el método de los elementos finitos, la ecuación de Biot-Savart para computar B_{1k} ($k = 1, \dots, M2$) en cualquier punto (r, z) interior al solenoide. Tercero, el valor de B_{10} obtenido con la ecuación de Biot-Savart se compara con el calculado con la ecuación [1]. Cuarto, se calcula S_b . Quinto, se calculan los valores de B_{10} y Δ_{rf} . Además, se muestran los mapas espaciales del campo magnético de radiofrecuencia en el eje z y los planos XY, XZ y YZ, a partir de los valores de B_{1k} ($k = 1, \dots, M2$) generados por cada una de las 3 variantes de bobina de rf. Sexto, se muestran los gráficos de la magnitud de la señal contra la frecuencia y de la impedancia de entrada contra la frecuencia.

Para las simulaciones numéricas, por el método de los elementos finitos, se escoge un cubo, cuyo mallado contiene 392 272 tetraedros hexagonales y el número total de elementos es 87 801. El número de tetraedros para simular la bobina es 485 525. Se usa el método de refinamiento hasta que la diferencia respecto al valor anterior sea menor que 1 %.

Las ecuaciones [1] y [8] y la solución numérica de la ecuación de Biot-Savart se implementan en el programa profesional Matlab, versión R2011a. Los cálculos se realizan en una computadora personal Intel Pentium 4, con un procesador dual-core de CPU 2,16 GHz y 4 GB de RAM. La duración del cálculo es de 18 h aproximadamente.

RESULTADOS

El mapa espacial del campo magnético de rf generado por la Bobina-1 no es homogéneo ni simétrico (figura 2). El mismo se muestra a lo largo del eje de simetría z (figura 2A) y en los planos XY (figura 2b), XZ (figura 2C) y YZ (figura 2D). Estos hallazgos se hacen notables para las bobina-2 y bobina-3 (resultados no mostrados).

Para cada variante de bobina, el valor máximo de la inducción magnética de rf se alcanza en su centro (tabla 3). Para la bobina-1, el valor de B_{10} que se muestra en esta tabla difiere del calculado numéricamente (0,78 mT), siendo esta diferencia de 0,69 mT. Esta variante bobina induce el valor de $B_{10} = 0,80$ mT en todos los puntos de una región esférica de 1,8 mm de diámetro. Por tanto, $\Delta_{rf} 0,0256$ (2,56 %) en esta región. Para las otras 2 variantes de bobinas, Δ_{rf} es mayor al 10,0 % en dicho volumen. Además, en la tabla 3 se muestran los valores de L_b , R_{b-rf} , S_b y Q_b de las bobina-1, bobina-2 y bobina-3. El valor de Q_b se calcula para $f_0 = 3,79854$ MHz. Esta tabla revela que la bobina-1 tiene los menores valores de L_b , R_{b-rf} , B_{10} y S_b y los mayores valores de Q_b .

Después de seleccionada la variante de bobina (bobina-1) y sus parámetros, se procede a la sintonía y acople de la misma, cuyo circuito básico se muestra en la figura 3. Este esquema presenta ventajas en cuanto a la sintonía ya que el rotor está conectado a tierra.⁽³⁾ De esta manera, las corrientes parásitas se eliminan a través del operador durante el proceso de sintonía. Además, la inclusión del capacitor $C_{balance}$ mantiene prácticamente iguales las tensiones en los extremos de la bobina, lo que hace este circuito inmune a las señales en modo común (se sugiere al lector ver los detalles en las páginas 108 a 118 de la referencia Mispelter J *et al.* ⁽³⁾). El segmento de línea de cuarto de onda junto a los diodos cruzados protege al preamplificador durante la excitación de la muestra. El segmento de línea se escoge para $f_0 = 3,79854$ MHz. Los valores de los componentes se calculan según las fórmulas descritas

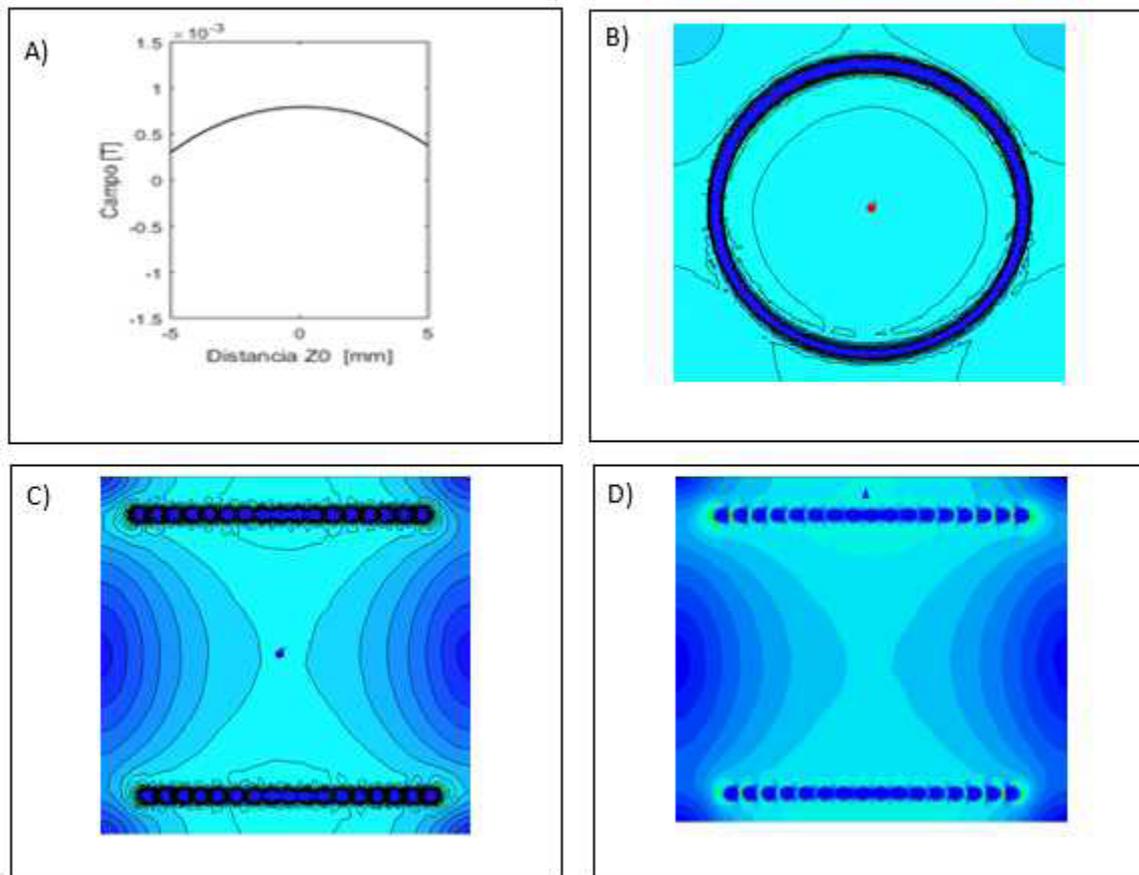


Fig. 2. Mapas espaciales del campo magnético de radiofrecuencia en el eje z (zo) y los planos XY (B), XZ (C) y YZ (D) generados por la Bobina-1.

en Mispelter J *et al.* ⁽³⁾ (se sugiere al lector ver los detalles en las páginas 154 a 156).

Las capacidades de acoplamiento (180 pF), de sintonía (1 516 pF) y de balance (1 696 pF) se calculan por las fórmulas descritas en Mispelter J *et al.*, ⁽³⁾ a partir de los valores de L_b y R_{b-rf} de la bobina-1 (tabla 3). Los capacitores seleccionados (tipo TM120, Voltronics, USA). Los capacitores de cerámica (ATC, USA) se usan para completar las altas capacidades de sintonía y balance. Todos estos dispositivos cumplen con las exigencias para sus utilidades en RMN

debido a la alta estabilidad, alto voltaje y propiedades no magnéticas. En la figura 3, C_0 es el capacitor de presintonía y su valor de capacidad se escoge entre 2 y 16 pF.

El comportamiento de la amplitud de la señal contra la frecuencia (o la respuesta en frecuencia del circuito de acoplamiento en impedancia y sintonía) se presenta en la figura 4. La respuesta en amplitud (en decibelios, dB) permite la lectura del ancho de banda del circuito a la altura de los 3 dB, a partir del pico central. Esta figura revela que la señal alcanza su valor máximo a la frecuencia de trabajo

Tabla 3. Valores de los parámetros de cada variante de bobina

Variantes	R_{b-rf} (mΩ)	B_{10} (mT)	S_b ($\mu T/A\Omega^{1/2}$)	Q_b	L_b (μH)
Bobina-1	570	1,47	1917	81	1,826
Bobina-2	1220	2,27	2102	92	4,471
Bobina-3	924	1,82	1859	77	2,830

$L_b, R_{b-rf}, B_{10}, S_b, Q_b$ son la inductancia magnética, la resistencia eléctrica a la frecuencia $f_0 = 3,79854$ MHz, el campo magnético de radiofrecuencia en el origen, la sensibilidad, el factor de calidad de la bobina de rf, respectivamente.

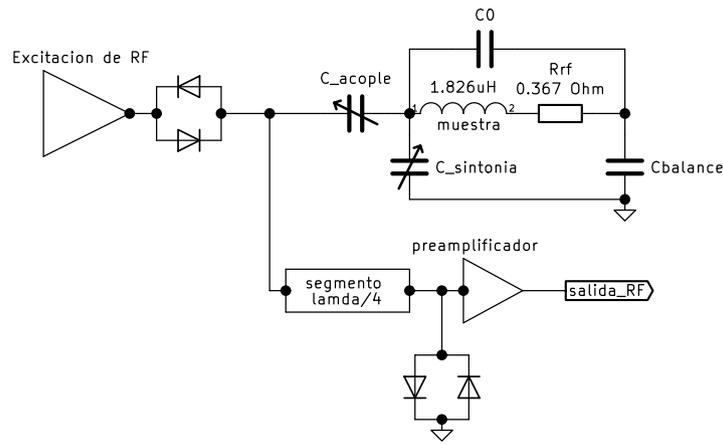


Fig. 3. Esquema básico de conexión de la bobina para la excitación-recepción de la señal de RMN proveniente del compuesto Politetrafluoetileno/óxido de grafeno a 3,79854 MHz.

(3,79854 MHz) con un ancho de banda del circuito resonante (95 kHz) acoplado a la línea de transmisión. Esta dependencia se puede verificar con un analizador de redes Agilent N9912A (Agilent, USA) en el modo S11. Para esto, se hace la lectura en el punto de conexión adecuado donde la impedancia eléctrica debe ser 50Ω . Este punto es el extremo de C_{acople} que se conecta al segmento de línea cuarto de onda. Un mayor detalle del circuito de sintonía y acople aparece en Mispelter J. *et al.* ⁽³⁾

La respuesta en impedancia eléctrica del circuito (figura 3) se muestra en la figura 5. El capacitor C_{acople} se usa para el ajuste de la impedancia eléctrica, cuyo valor es 50Ω a la frecuencia de resonancia. Para estos fines, se utiliza el

analizador de redes Agilent N9912A en el modo de Carta de Smith. La gráfica que muestra la dependencia de la magnitud del voltaje en el pin 1 de la inductancia con respecto a la frecuencia se denomina respuesta amplitud frecuencia del circuito resonante, el cual está formado por la inductancia de $1,826 \mu\text{H}$ en serie con la resistencia a la radiofrecuencia de la propia bobina en paralelo con el capacitor de presintonía C_o .

El filtro resonante que se utiliza frecuentemente a la entrada de todo sistema de radio recepción se representa esquemáticamente en la figura 6. Este filtro comúnmente se denomina circuito tanque o trampa de ondas. Este circuito tanque se acopla en serie con la primera etapa de amplificación con impedancia de entrada $R = R_{ab}$ (generalmente 50Ω)

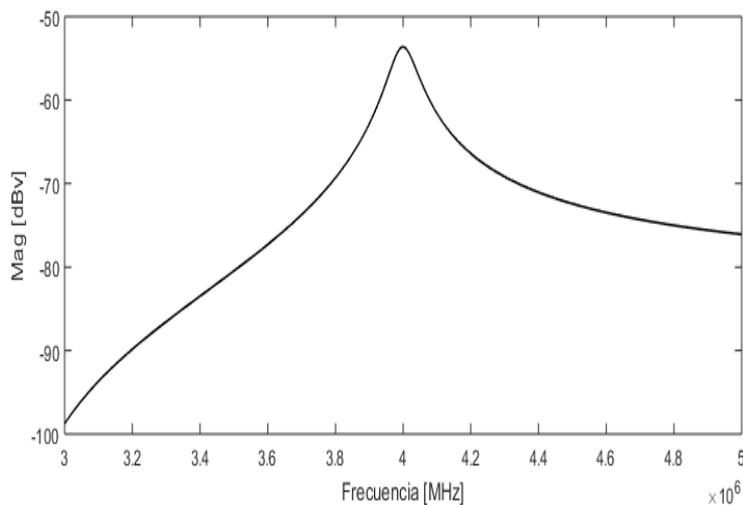


Fig. 4. Magnitud de la señal (dB) en el pin 1 de la bobina contra la frecuencia. Pin 1 se muestra en la figura 3.

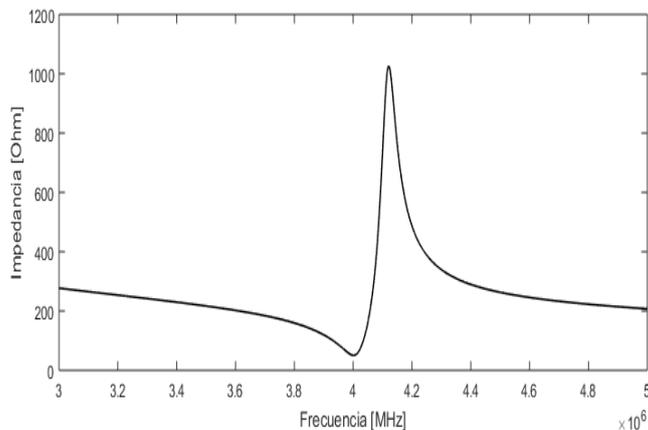


Fig. 5. Impedancia de entrada del circuito resonante en el punto de unión entre el segmento de línea y el capacitor de acople.

que a la vez hace las veces de carga del circuito tanque. Por eso, a R_{ab} se le denomina también resistencia de carga.

En los receptores destinados al registro de señal de RMN (espectroscopia, imágenes o relajación magnética) se utiliza un circuito similar al que se muestra en la figura 6, salvo que la inductancia ($L = 1,826 \mu\text{H}$) es la propia bobina receptora con reactancia jX_L (la muestra bajo estudio se encuentra dentro de esta bobina) y la resistencia eléctrica $R_L = 0,382 \Omega$ debida al tipo de conductor que se usa en su elaboración y a los efectos superficiales y de proximidad. Además, la reactancia capacitiva variable se utiliza para sintonizar el circuito resonante a la frecuencia deseada ($f_0 = 3,79854 \text{ MHz}$ muy próxima a la frecuencia de trabajo).

A diferencia de los sistemas de recepción, este circuito de antena se utiliza en RMN para la excitación de los protones de

hidrógeno de la muestra bajo estudio (contenida en su interior). Es decir, una vez que se excita la muestra con alta energía de rf, los voltajes que se utilizan están en el orden de las decenas de voltios. En un segundo momento, este propio tanque se utiliza en forma de receptor para el registro de la débil señal de RMN (en el orden de los milivoltios).

Se determina la corriente en la resistencia de carga R_{ab} para la determinación de los parámetros del preamplificador y del transmisor de rf. Para ello, se utiliza el teorema de Thevenin y resulta el esquema eléctrico equivalente (cuadro izquierdo de la figura 7). Se asume que la tensión en el circuito tanque alcanza el valor $E = 10 \text{ V}$ durante la excitación. El voltaje de Thevenin (V_{th}) se obtiene si se deja en circuito abierto los extremos a-b, a los cuales se conecta la carga. En este caso, $V_{th} = E = 10 \text{ V}$ pues no hay circulación de corriente por el circuito. Se conecta en corto circuito los bornes 1-2 de la fuente de tensión del circuito para la determinación de la impedancia de Thevenin (Z_{th}), la cual es la que existe entre los puntos a-b, es decir, $Z_{ab} = Z_{th}$ (cuadro derecho de la figura 7). El valor de Z_{th} se determina por la fórmula para ramas en paralelo, dada por ($Z_{th} = (R_L + jX_L)(-jX_C)/(R_L + jX_L - jX_C)$), donde j representa la unidad imaginaria del número complejo Z_{th} . En este caso, $f = 3,79854 \text{ MHz}$, $R_L = 0,382 \Omega$, $L = 1,826 \mu\text{H}$. La condición de resonancia se obtiene cuando $X_C = X_L$, a partir de la cual se calcula el valor de Z_{th} ($Z_{th} = (4,972 \times 10^3 - j43,581) \Omega$) y su módulo ($|Z_{th}| = 4,9722 \times 10^3 \Omega$).

Conocidos V_{th} y R_{th} se puede calcular la corriente por la resistencia de carga ($R_{carga} = R_{ab}$), denominada I_{carga} . Para esto, se implementa el circuito eléctrico que se muestra en la figura 8 a partir de la expresión $I_{carga} = V_{th}/(R_{carga} + Z_{th})$

y si se supone que $R_{carga} = 50 \Omega$ y $V_{th} = 10 \text{ V}$, $I_{carga} = (1,991 \times 10^{-3} + j1,728 \times 10^{-5}) \text{ A}$.

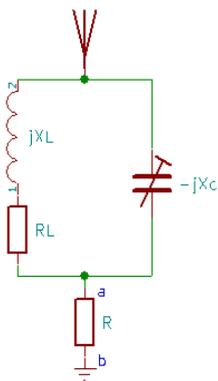


Fig. 6. Representación esquemática del filtro resonante.

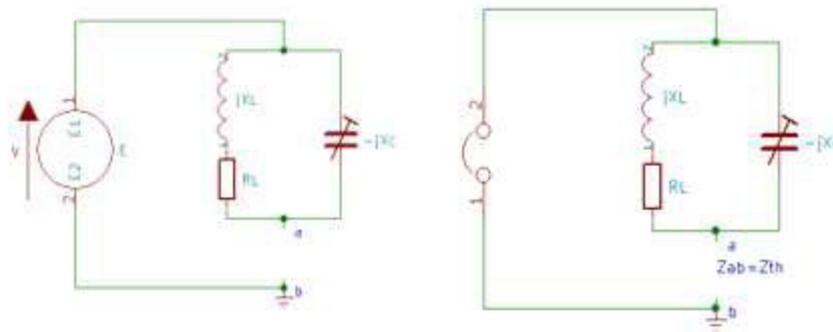


Fig. 7. Esquema eléctrico equivalente del circuito representado en la figura 6 que resulta de la aplicación del teorema de Thevenin (cuadro de la izquierda). Esquema eléctrico equivalente del circuito para el cálculo de la impedancia de Thevenin, Z_{th} (cuadro de la derecha).

El valor de I_{carga} se puede verificar también si se usa el teorema de Norton. Para esto, se usa el circuito eléctrico equivalente que se muestra en la figura 9 y se usan los valores de $V_{th} = 10 \text{ V}$ y $f = f_0 = 3,79854 \text{ MHz}$. En el teorema de Norton se usa la admitancia eléctrica (Y_n) en vez de la impedancia eléctrica. El valor de Y_n se calcula por $Y_n = 1/Z_{th}$ y su valor es $(2,011 \times 10^{-4} + j1,762 \times 10^{-6}) \Omega^{-1}$. La corriente eléctrica que circula por Y_n , denominada I_n , se calcula por la siguiente expresión $I_n = V_{th} Y_n$ y su valor es $(2,01 \times 10^{-3} - j1,763 \times 10^{-5}) \text{ A}$. La admitancia de la carga (Y_R) se puede computar por la expresión $Y_R = 1/R_{carga}$ y su valor es $0,02 \Omega^{-1}$. Por tanto, la intensidad de la corriente eléctrica que circula por Y_R , denominada I_{YR} , se puede determinar por medio de $I_{YR} = [Y_R / (Y_n + Y_R)] I_n$ y su valor es $I_{YR} = (1,991 \times 10^{-3} + j1,75 \times 10^{-5}) \text{ A}$.

Aunque las simulaciones no fueron mostradas, el tiempo muerto obtenido fue de $31 \mu\text{s}$ para los parámetros de la bobina de excitación-recepción, los del circuito resonante (o circuito tanque) y el circuito eléctrico propuesto por López-Ríos⁽¹⁷⁾ pero modificado a este tipo de bobina, el cual no se muestra porque este estudio se focaliza esencialmente a esta bobina con su circuito resonante acoplado, denominado cabezal de RMN.

DISCUSIÓN

La asimetría del campo magnético de B_1 generado por las bobina-1, bobina-2 y bobina-3 se explica porque en las simulaciones los centros mecánico y magnético del solenoide no coinciden. La marcada no homogeneidad del campo magnético de rf se explica por la presencia de armónicos zonales (a lo largo del eje z) y radiales (en los planos perpendiculares al eje z) de órdenes pares, como los de segundo, cuarto y sexto orden, con predominio de los de segundo orden, acorde al mapa espacial que se muestra en la figura 2. Este resultado está acorde a la teoría publicada por Cabrales LEB *et al.*⁽²¹⁾ El

armónico de segundo orden axial tiene la forma $a_2 z^2$ mientras los radiales, en cartesianas, pueden ser X^2 , Y^2 , XY , XZ , YZ , $(X^2 - Y^2)$, $(X^2 - Z^2)$ y $(Y^2 - Z^2)$. Los armónicos XY , XZ y YZ son mutuamente ortogonales. Lo mismo ocurre para los armónicos $(X^2 - Y^2)$, $(X^2 - Z^2)$ y $(Y^2 - Z^2)$. Lo último explica por qué los mapas espaciales radiales (planos XY , XZ y YZ) son similares.

A pesar que la bobina-2 tiene los mayores valores de S_b y Q_b , la misma no se selecciona como bobina de excitación-recepción por la marcada no homogeneidad del mapa de campo magnético de rf y el hecho que $L_b > 4,00 \mu\text{H}$. Cuando $L_b > 4,00 \mu\text{H}$, las pérdidas dieléctricas se hacen notables, lo que trae consigo el corrimiento de f_0 al acoplarse capacitivamente con cualquier medio circundante (por ejemplo, el operario), como se reporta en Mispelter J *et al.*⁽³⁾ Este es el por qué el valor de L_b debe ser el menor posible para minimizar los voltajes y campos eléctricos asociados, por lo que se reducen las pérdidas dieléctricas.

De las bobina-1 y bobina-3, la bobina-1 se selecciona para el diseño de la bobina excitación-recepción porque induce el mayor valor de Δ_{rf} en su interior, tiene los menores valores de L_b , R_{b-rf} y B_{1o} y los valores de Q_b y S_b están en el rango permisible para el diseño de una bobina de rf. Este es el motivo por el cual en este trabajo se presentan solamente los mapas espaciales axiales y radiales para la Bobina-1. Además, en la selección de esta variante de bobina se tiene en cuenta que un incremento de N trae consigo un aumento de B_{1o} (manteniendo I constante) y por tanto de S_b . Sin embargo, este incremento de N conlleva a un aumento de la R_{b-rf} . Como resultado, el ruido asociado incrementa proporcionalmente a R_{b-rf} .

Las simulaciones mostradas en este estudio son válidas para bobinas con núcleo de aire. Sin embargo, cuando en las mismas se considera la muestra, el campo eléctrico que atraviesa la muestra induce un aumento de las pérdidas en esta, lo que trae consigo un aumento de R_{b-rf} . Como un resultado, la

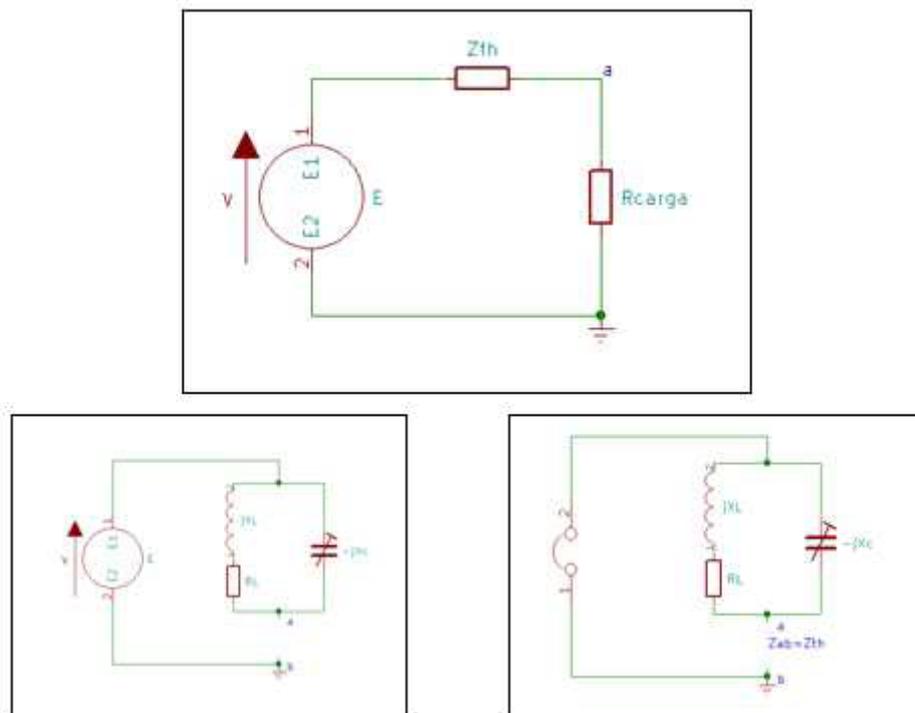


Fig. 8. Esquema del circuito eléctrico para el cálculo de la corriente eléctrica que circula por la resistencia eléctrica de carga ($R_{carga}=R_{ab}$).

Q_b y S_b disminuyen. Por eso, en la expresión para el cálculo de R_{b-rr} se debería tener en cuenta las resistencias eléctricas asociadas a la bobina, las pérdidas dieléctricas (se sugiere al lector ver la ecuación [12] en página 428)⁽²⁾ e inductivas (se sugiere al lector ver la ecuación [17] en página 430)⁽²⁾. Además, las propiedades magnéticas y la conductividad eléctrica del grafeno hay que tenerlas en consideración porque pueden introducirse pérdidas eléctricas no deseadas y por ende afectar a Q_b y S_b . A pesar de este comentario, dichos parámetros no afectan la selección de la bobina-1 para la excitación-recepción de la muestra de estudio.

El tiempo muerto de 31 μs , que se obtiene a partir de las simulaciones realizadas en este estudio, es válido para los valores de los parámetros de la bobina excitación-recepción (bobina-1), del circuito resonante asociado a esta, y el tipo de circuito eléctrico que se acopla a este cabezal de RMN (no mostrado). La concepción habitual para el diseño y cálculo de los parámetros de la bobina excitación-recepción es computar estos como si las bobinas estuviesen por separado (excitación y recepción por canales independientes) y luego se busca un compromiso entre ellos.^(2,3,18) Sin embargo, este procedimiento no significa necesariamente que los valores de estos parámetros sean óptimos, como en este estudio. Esto trae consigo mayor exigencia a los componentes electrónicos (en cuanto al valor, calidad, precisión, entre otros), *hardware*

y *software* no optimizados, aspectos que conllevan a que se incremente el costo del equipo.

Rigurosamente hablando, la optimización de los parámetros de la bobina excitación-recepción constituye un reto científico-técnico para los investigadores ya que esta bobina tiene que satisfacer simultáneamente las exigencias que se les imponen a las bobinas de excitación y recepción cuando se diseñan por separado. Aunque no es objetivo de este estudio, la realización de este proceso de optimización es factible. Para esto, se resuelve un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas (Δ_{rr} , Q_b y el ruido); en principio, puede ser las mismas que se reportan cuando se usan las bobinas de excitación y recepción por separado.^(2,18) Lo novedoso consiste en acoplarle a este sistema de ecuaciones otra ecuación de ligadura que empalme a Δ_{rr} , Q_b y el ruido porque es la misma bobina. Esto se hace de manera tal que Δ_{rr} y Q_b sean máximos y el ruido mínimo. Este problema de optimización será objeto de otro estudio, en el cual se mostrarán los resultados analíticos y numéricos, así como la comparación entre ellos, sin precedente en la literatura.

Los parámetros óptimos de la bobina excitación-recepción trae consigo que el mapa espacial de Δ_{rr} , y los valores de B_{10} , Q_b , R_{b-rr} , L_b , S_b y del circuito resonante son diferentes a los mostrados en este estudio para las bobina-1, bobina-2 y bobina-3, como es de esperar. En este caso, resultará una con-

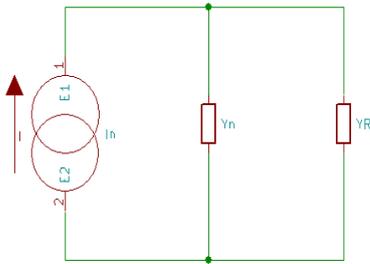


Fig. 9. Esquema del circuito eléctrico para el cálculo de la corriente eléctrica que circula por la admitancia eléctrica Y_R , por medio del teorema de Norton.

figuración bobina y diferentes a estas 3. Una vez optimizado el cabezal de RMN (bobina excitación-recepción más circuito resonante optimizados), se pueden desarrollar un *hardware* electrónico especializado para la caracterización sólidos por RMN que garantice tiempos muertos próximos a los 6 μ s, como se reporta en la literatura. ^(10,17,22,23)

La construcción y validación experimental del cabezal de RMN, optimizado o no, es factible por las siguientes razones: a) la experticia de los investigadores del Centro de Biofísica Médica, Universidad de Oriente, en esta área del conocimiento; b) la existencia del imán permanente ($B_0 = 0,095$ T) en esta institución; c) la disponibilidad de circuitos eléctricos que permiten obtener tiempos muertos ≤ 5 μ s; ⁽¹⁷⁾ d) en el departamento de Mecánica de la Universidad de Oriente están los 3 tipos de materiales (grafeno, Politetrafluoetileno puro, micropartículas del Politetrafluoetileno, y el compuesto Politetrafluoetileno/óxido de grafeno).

Durante el proceso de corrección de este trabajo, en el Centro de Biofísica Médica se realizan las simulaciones preliminares del estudio de López-Ríos. ⁽¹⁷⁾ Las mismas permiten obtener tiempos muertos de 3,4 μ s cuando se usan por separado las bobinas de excitación (bobina con forma de montura de caballo) y recepción (con los mismos parámetros de la bobina-1). Estas simulaciones recientes y la de este estudio no se comparan con las de otros estudios similares porque no existen reportes científicos, hasta donde se ha revisado, de la caracterización de Politetrafluoetileno/óxido de grafeno por rRMN a la frecuencia de resonancia del ^{19}F .

Conclusiones

La bobina-1 es la más adecuada para la excitación-recepción de la señal proveniente del compuesto Politetrafluoetileno/óxido de grafeno porque induce la mayor homogeneidad del campo magnético de radiofrecuencia en el volumen de es-

tudio, los menores valores de la inductancia magnética, la resistencia eléctrica y la inducción magnética de radiofrecuencia de la bobina y los mayores valores del factor de calidad, la sensibilidad y la capacidad eléctrica de esta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Solomentsev G, Diehl C, Akke M. Conformational entropy of fk506 binding to ftkbp12 determined by nuclear magnetic resonance relaxation and molecular dynamics simulations. *Biochemistry*, 2018;57(9):1451-61. <https://doi.org/10.1021/acs.biochem.7b01256>
- Hoult DI, Lauterbur PC. The sensitivity of the zeugmatographic experiment involving human samples. *Journal of Magnetic Resonance*, 1979;34(2):425-33. [https://doi.org/10.1016/0022-2364\(79\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0022-2364(79)90019-2)
- Mispelter J, Lupu M, Briguet A. NMR Probeheads for biophysical and biomedical experiments. Theoretical principles and Practical Guidelines. Imperial College Press, England (2006).
- Demetriou E, Kujawa A, Golay X. Pulse sequences for measuring exchange rates between proton species: From unlocalised NMR spectroscopy to chemical exchange saturation transfer imaging. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 2020;120:25-71. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2020.06.001>
- Staal X, Koshkina O, Srinivas M. In vivo 19-fluorine magnetic resonance imaging. In *Fluorine in Life Science: Pharmaceuticals, Medicinal Diagnostics, and Agrochemicals*, Academic Press, USA. 2019:397-424p.
- Ren S, Rong P, Yu Q. Preparations, properties and applications of graphene in functional devices: A concise review. *Ceramics International*, 2018;44(11):11940-55. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.089>
- Dhanumalayan E and Joshi GM. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)-a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2018;1(2):247-68. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>
- Puts GJ, Crouse P, Ameduri BM. Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer. *Chemical Reviews*, 2019;119(3):1763-805. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00458>
- Wang Y, Xu Y, Dong S, Wang P, Chen W, Lu Z, *et al.* Ultrasonic activation of inert poly (tetrafluoroethylene) enables piezocatalytic generation of reactive oxygen species. *Nature Communications*, 2021;12(1):1-8. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23921-3>
- Nemati N, Emamy M, Yau S, Kim JK, Kim DE. High temperature friction and wear properties of graphene oxide/polytetrafluoroethylene composite coatings deposited on stainless steel. *RSC Advances*, 2016;6(7):5977-87. <https://doi.org/10.1039/C5RA23509J>
- Masood MT, Papadopoulou EL, Heredia-Guerrero JA, Bayer IS, Athanassiou A, Ceseracciu L. Graphene and polytetrafluoroethylene synergistically improve the tribological properties and adhesion of nylon 66 coatings. *Carbon*, 2017;123:26-33. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.07.026>
- Óth LF, De Baets P, Szabényi G. Thermal, viscoelastic, mechanical and wear behaviour of nanoparticle filled polytetrafluoroethylene: A comparison. *Polymers*, 2020;12(9):1940. <https://doi.org/10.3390/polym12091940>

13. Aturaliya R, Wang D, Xu Y, Lin YJ, Li Q, Turng LS. Expanded polytetrafluoroethylene/graphite composites for easy water/oil separation. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2020;12:38241-8. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c11583>
14. Sushmita K, Menon AV, Sharma S, Abhyankar AC, Madras G, Bose S. Mechanistic insight into the nature of dopants in graphene derivatives influencing electromagnetic interference shielding properties in hybrid polymer nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019;123:2579-90. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b10999>
15. Shareena TPD, McShan D, Dasmahapatra A, Tchounwou PB. A review on graphene-based nanomaterials in biomedical applications and risks in environment and health. *Nano-micro letters*, 2018;10(3):53. <https://doi.org/10.1007/s40820-018-0206-4>
16. Lores Guevara MA, Naranjo JCG, Mirabal CAC. MR Relaxation studies of hemoglobin aggregation process in sickle cell disease: application for diagnostics and therapeutics. *Applied Magnetic Resonance*, 2019;50(4):541-51. <https://doi.org/10.1007/s00723-018-1104-0>
17. López-Rios N. Sonda con bajo tiempo muerto para relaxometría por resonancia magnética nuclear. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 2014;XV(1):83-91. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)30008-1](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)30008-1)
18. Hoult DI, Richards RE. The signal-to-noise of the Nuclear Magnetic Resonant experiment. *Journal Magnetic Resonance*, 1976;24(1):71-85. [https://doi.org/10.1016/0022-2364\(76\)90233-X](https://doi.org/10.1016/0022-2364(76)90233-X)
19. Straw RD. *The ARRL Handbook For Radio Amateurs*. Volume 6. American Radio Relay League (ARRL), Newington, USA (1999).
20. Volgov VA. *Detali y uzli radioelectronnoi apparaturi*. Editorial Energía, Moscú, pp. 230-5 (1977).
21. Cabrales LEB, Marcos FR. Cálculo y análisis de bobinas correctoras del campo magnético para equipos de RMNI con núcleo de aire: II - Bobinas circulares. *Revista Cubana de Física*, 1992;12(3):235-43. Disponible en: <http://www.revistacubanade-fisica.org/RCFextradata/OldFiles/1992/Vol.%2012,%20No.%203/12003235.pdf>
22. Sullivan NS, Deschamps P, Neel P, Vaissiere JM. Efficient fast-recovery scheme for NMR pulse spectrometers. *Revue de Physique Appliquée*, 1983;18(4):253-61. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01983001804025300>
23. Walder BJ and Alam TM. Quantification of uncoupled spin domains in spin-abundant disordered solids. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020;21(11):3938. <https://doi.org/10.3390/ijms21113938>

Recibido: 05/01/2022
Aprobado: 05/04/2022

Agradecimientos

Los autores agradecen los inestimables comentarios de los 2 revisores anónimos y de la Editora Ejecutiva Dr. C. Diana Elena Prieto Acosta que mejoraron sustancialmente este manuscrito. El autor José Luis García Bello agradece al Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología y la Universidad Autónoma de Santo Domingo, ambos de República Dominicana.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: José Luis García Bello, Alejandro Bordelois Cayamo, Manuel Arsenio Lores Guevara, Juan Carlos García Naranjo, Luis Enrique Bergues Cabrales

Curación de datos: José Luis García Bello, Alejandro Bordelois Cayamo, Juan Carlos García Naranjo, Luis Enrique Bergues Cabrales
Análisis formal: José Luis García Bello, Alejandro Bordelois Cayamo, José León Montoya, Manuel Arsenio Lores Guevara, Juan Carlos García Naranjo, Luis Enrique Bergues Cabrales

Investigación: José Luis García Bello, Alejandro Bordelois Cayamo, José León Montoya, Manuel Arsenio Lores Guevara, Juan Carlos García Naranjo, Luis Enrique Bergues Cabrales

Metodología: José Luis García Bello, Alejandro Bordelois Cayamo, Juan Carlos García Naranjo, Luis Enrique Bergues Cabrales

Administración del proyecto: Manuel Arsenio Lores Guevara, Juan Carlos García Naranjo

Software: Alejandro Bordelois Cayamo, José León Montoya, Luis Enrique Bergues Cabrales

Supervisión: Juan Carlos García Naranjo

Validación: Luis Enrique Bergues Cabrales

Visualización: José Luis García Bello, Alejandro Bordelois Cayamo, José León Montoya, Manuel Arsenio Lores Guevara, Juan Carlos García Naranjo, Luis Enrique Bergues Cabrales

Redacción-borrador original: José Luis García Bello, Alejandro Bordelois Cayamo, Manuel Arsenio Lores Guevara, Juan Carlos García Naranjo, Luis Enrique Bergues Cabrales

Redacción-revisión y edición: José Luis García Bello, Alejandro Bordelois Cayamo, José León Montoya, Manuel Arsenio Lores Guevara, Juan Carlos García Naranjo, Luis Enrique Bergues Cabrales

Financiación

No hay fuentes de financiamiento nacional e internacional que declarar.

Cómo citar este artículo

García Bello JL, Bordelois Cayamo A, León Montoya J, Lores Guevara MA, *et al.* Diseño de bobinas de excitación-recepción para la detección de señales de RMN 19F proveniente del compuesto politetrafluoroetileno/óxido de grafeno. *An Acad Cienc Cuba [internet]* 2022 [citado en día, mes y año];12(3):e1189. Disponible en: <http://www.revistacuba.cu/index.php/revacc/article/view/1189>

