

M. A. Escobar y M. P. García

Laboratorio de Mediciones Magnéticas / División de Mediciones Electromagnéticas
Centro Nacional de Metrología (CENAM), Carretera a los Cués, km 4,5
76241 El Marqués, Querétaro. México
Tel. (+ 442) 211 05 44. Fax: (+ 442) 211 05 48. E-mail: mescobar@cenam.mx

Resumen: Se dan a conocer los alcances de medición y los niveles de incertidumbre del patrón nacional de Densidad de Flujo Magnético en corriente continua, desarrollado y establecido recientemente en el Laboratorio de Mediciones Magnéticas de la División de Mediciones Electromagnéticas del CENAM. Se describen los métodos de la bobina de Helmholtz y del teslámetro de Resonancia Magnética Nuclear (RMN), en los cuales se basó el desarrollo de este patrón nacional. El establecimiento de este patrón, permitirá brindar servicios de calibración de instrumentos tales como medidores de densidad de flujo magnético e imanes de referencia, de flujo axial y transversal.

1. INTRODUCCIÓN

La magnitud de densidad de flujo magnético B o campo de inducción magnética, expresa el flujo magnético por unidad de área, que es generado por la corriente eléctrica que circulan a través de circuitos eléctricos o por imanes. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de B es el tesla (T), que corresponde a $Vs/m^2 = Wb/m^2$.

Para la generación de un campo magnético B homogéneo y estable, se emplean sistemas de generación tales como: imanes patrón, solenoides, bobinas de Helmholtz y electroimanes. Estos tres últimos, alimentados preferentemente por fuentes de corriente de alta estabilidad. En el caso de los solenoides y de las bobinas de Helmholtz, es posible determinar el valor del campo inducido,

Abstract: This paper describes the scope of measurement and uncertainty levels of the magnetic flux density national standard in direct current, recently developed and established at CENAM's Laboratorio de Mediciones Magnéticas de la División de Mediciones Electromagnéticas. The Helmholtz coil method and the Nuclear Magnetic Resonance Teslameter (NMR) method were used to base this National Standard on. Setting this standard will allow the Center to offer instrument calibration services for magnetic flux density meters and for reference, axial flow and transversalmagnets.

1. INTRODUCTION

The B magnetic flux density's magnitude or magnetic induction, gives the magnetic flux per unit of area, generated by electric currents traveling through electric circuits or magnets. In the International System of Units, the unit of B is the tesla (T), which is equal to $Vs/m^2 = Wb/m^2$.

Generation systems such as standard magnets, solenoids, Helmholtz coils and electromagnets are used to generate a homogenous and stable B magnetic field. The last three systems are fed by high stability current sources. The value of the induced field can be determined for solenoids and Helmholtz coils if the constant that relates the magnetic field to the intensity of the current that travels through the coils is known.

The method chosen to measure the B field depends on the intensity of the B field to be measured, on the resolution, and on the measurement uncertainty that is needed. To measure the B magnetic field,

conociendo la constante de las bobinas, que relaciona el campo magnético con la intensidad de corriente que circula a través de ellas.

La selección del método empleado para la medición del campo B, depende entre otros factores, del nivel o intensidad del campo B a ser medido, la resolución y la incertidumbre de medición requerida. Para medir el campo magnético B son empleados magnetómetros basados en sensores que detectan tensiones inducidas, como por ejemplo: bobinas de detección (search coil), sensores de efecto Hall y sensores con núcleo ferromagnético (fluxgate), así como magnetómetros basados en sensores de efecto cuántico, tales como: teslámetros de resonancia magnética nuclear (RMN) y de resonancia de espín del electrón (REE) [1].

El patrón nacional de densidad de flujo magnético B, en corriente continua, establecido en el CENAM, se basa en dos métodos de medición:

(1) El método de la bobina de Helmholtz, el cual es empleado para generar y determinar el campo magnético B en el intervalo de 10 μ T a 50 mT. En este método, el valor del campo magnético B es una función de la intensidad de corriente I que circula a través de la bobina, de la constante K de la bobina y de la constante magnética μ_0 , y se determina a partir de la relación: $B = \mu_0 KI$.

(2) El método del teslámetro de Resonancia Magnética Nuclear (RMN). Este método es utilizado para medir de manera directa el campo magnético B, generado por un electroimán, en el intervalo de 100 mT a 300 mT. En este método, la frecuencia de resonancia f_0 de los protones de hidrógeno, de una muestra de agua, es función del campo magnético B aplicado y de la razón giromagnética del protón γ_p , que es una constante física fundamental. El valor de B se determina a partir de la medición de f_0 y del valor de γ_p y está dado por la relación: $B = f_0 / (\gamma_p / 2\pi)$.

Con el establecimiento de este patrón se calibrarán magnetómetros de efecto Hall, imanes de referencia, bobinas de Helmholtz y solenoides patrón. Estos servicios tienen aplicación en la

sensor-based magnetometers, such as search coils, Hall effect sensors and fluxgate, that detect induced voltages are used, as well as quantum effect sensor based magnetometers, such as: nuclear magnetic resonance (NMR) and electron spin resonance (ESR) teslameters [1].

The B magnetic flux density National standard in direct current, established at the CENAM is based on two methods of measurement:

(1) The Helmholtz coil method. This method is used to generate and to determine the B magnetic field in the 10 μ T to 50 mT range. The value of the B magnetic field in this method is a function of the intensity of current I that circulates through the coil, of the coil's constant K, and of the magnetic constant μ_0 . This value is determined by the ratio: $B = \mu_0 KI$.

(2) Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Teslameter method. This method is used to measure directly the B magnetic field that an electromagnet generates in the 100 mT to 300 mT range. The frequency of resonance f_0 of the hydrogen protons from a sample of water is a function of the applied B magnetic field and of the giromagnetic ratio γ_p of the proton, which is a fundamental physical constant. The B value is determined from the f_0 measurement and from the γ_p value, and is provided by the ratio: $B = f_0 / (\gamma_p / 2\pi)$.

By establishing this standard, the Hall effect magnetometers will be calibrated as well as reference magnets, Helmholtz coils and standard solenoids. Industries that employ these services are the electric industry, the metalmechanic industry, the automobile industry, photocopying equipment manufactures, and home appliances. Other areas of application include the health sector and research and technological development laboratories where measuring of the magnetic flux density is fundamental.

The following sections will describe the principles and methods of the measurements used to develop the B magnetic flux density's National standard. The Standard's scopes and

industria eléctrica, la metal-mecánica, automotriz, en la de enseres domésticos, empresas fabricantes de equipo de fotocopiado, entre otras, así como en el sector salud y en laboratorios de investigación y desarrollo tecnológico donde la medición de la densidad de flujomagnético es fundamental.

En las secciones siguientes se describen los principios y los métodos de medición en los cuales se basó el desarrollo del patrón nacional de densidad de flujo magnético B, y se dan a conocer los alcances de medición y los niveles de incertidumbre de este patrón.

2. DESCRIPCIÓN DEL PATRÓN

2.1 Método de la bobina de Helmholtz.

2.1.1 Descripción y principio de operación:

Para la generación y determinación del campo B en el intervalo de $10 \mu\text{T}$ a 50mT , se empleó una bobina de Helmholtz, como la mostrada en la figura 1, cuyas especificaciones se encuentran descritas en la tabla 1.

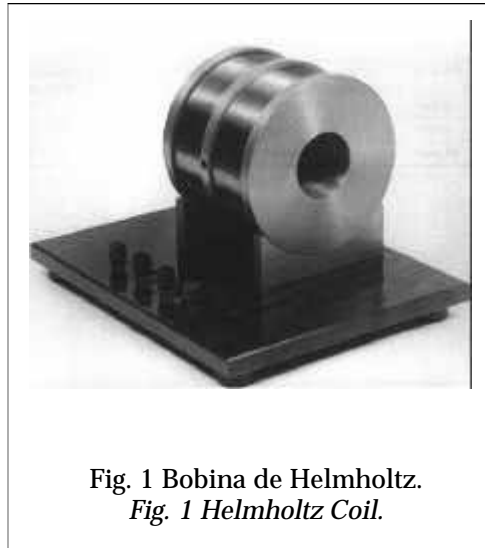
uncertainty levels are provided.

2. STANDARD DESCRIPTION

2.1 The Helmholtz Coil Method.

2.1.1 Description and principle of operation

In order to generate and to determine the B field in the $10 \mu\text{T}$ to 50mT range, a Helmholtz coil was used (Figure 1); its specifications are described in Table 1.



Un acceso axial paralelo al eje de la bobina y otro acceso radial, perpendicular al eje de la bobina, permite la calibración de sensores tipo Hall, de flujo axial y transversal.

An axial access parallel to the axis of the coil, and a radial access, perpendicular to the axis of the coil, lets the calibration of axial and transversal flow Hall sensors.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de la bobina de Helmholtz.
Table 1. Technical Specifications of the Helmholtz Coil

Corriente de alimentación máxima: <i>Maximum Feed Current:</i>	3 A (conexión en serie) <i>(series connection)</i> 4 A (conexión en paralelo) <i>(parallel connection)</i>
Tensión de alimentación máxima: <i>Maximum Feed Voltage:</i>	60 Vcc
Resistencia eléctrica: <i>Electric Resistance:</i>	18,4 Ω
Temperatura de operación máxima: <i>Maximum Temperature of Operation</i>	40 $^{\circ}\text{C}$
Diámetro de acceso axial: <i>Axial Access Diameter:</i>	50 mm
Diámetro de acceso radial: <i>Radial Access Diameter:</i>	8 mm
Longitud de la cavidad cilíndrica: <i>Length of the Cylinder Cavity:</i>	111 mm
Constante de la bobina, <i>K</i> <i>Coil Constant, K</i>	19 760 \pm 60 [(A/m)/A]

El método de la bobina de Helmholtz, consiste en alimentar esta bobina con una fuente de corriente continua estable. La intensidad de corriente eléctrica I que circula a través de la bobina, produce un campo magnético homogéneo en el centro de ésta, cuya densidad de flujo magnético B (T) se determina a partir de la relación (1).

The Helmholtz coil method entails feeding the coil with a stable direct current source. The electric current strength I that circulates through the coil produces a homogeneous magnetic field in its center, whose B (T) magnetic flux density is determined by the ratio (1):

$$B = \mu_0 H = \mu_0 (K I) \quad (1)$$

donde:

B = densidad de flujo magnético, en tesla (T),
 H = intensidad de campo magnético, en (A/m),
 μ_0 = constante de campo magnético = $4\pi \times 10^{-7}$ (Vs/Am),
 K = constante de la bobina y es igual a: $K = 19760 \pm 60$ ((A/m)/A),
 I = intensidad de corriente que circula a través de la bobina, en (A).

A partir de la ecuación (1) se puede calcular el valor de la corriente I que debe circular a través de la bobina de Helmholtz, para generar en su interior un campo B deseado:

Where:

B = the magnetic flux density in tesla (T),
 H = the magnetic field strength in (A/m),
 μ_0 = the magnetic field constant = $4\pi \times 10^{-7}$ (Vs/Am),
 K = the constant of the coil and is equal to: $K = 19760 \pm 60$ ((A/m)/A),
 I = electric current strength that circulates through the coil, in (A).

The value of current I that has to circulate through the Helmholtz coil to generate a desired B field inside, can be calculated from equation (1) as:

$$I = B / (\mu_0 K) \quad (2)$$

La generación de un campomagnético B estable y las propias restricciones eléctricas impuestas por los circuitos de alimentación y el sistema de generación mismo, implicaron el uso de diferentes circuitos de alimentación, los cuales dieron como resultado el establecimiento de tres subintervalos para la generación y determinación de B: $10\mu T$ a 2 mT, 2 mT a 10 mT y 10mTa50meeting

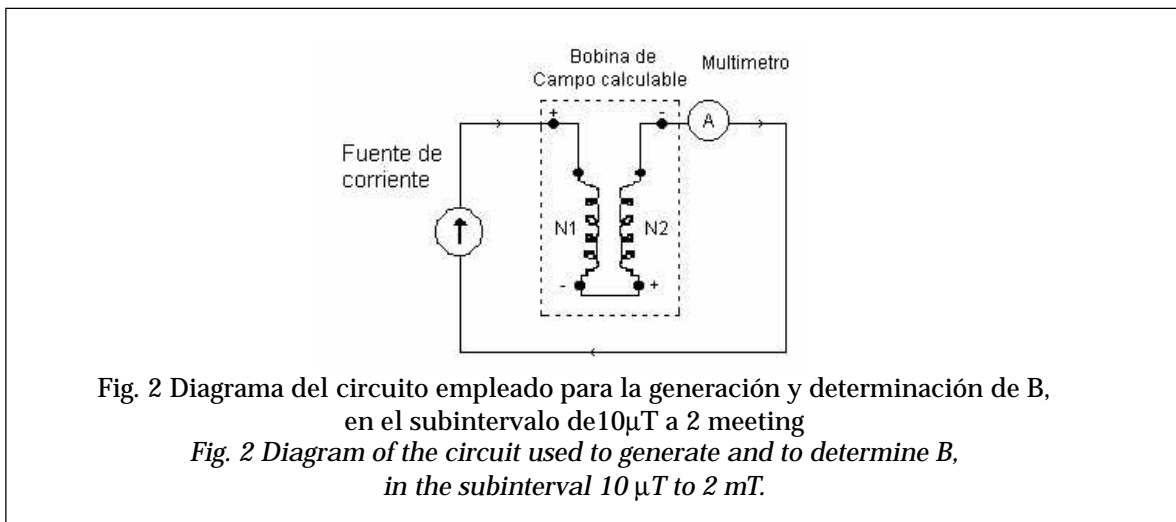
2.1.2 Subintervalo de $10\mu T$ (100 mG) a 2 mT (20 G):

La Fig. 2 esquematiza el circuito empleado para la generación y la determinación de B.

Different feed circuits had to be used to generate a stable B magnetic field, because of the electric restrictions imposed by the feed circuits and the generation system itself. Therefore, three subintervals were established to generate and to determine B: $10\mu T$ to 2 mT, 2 mT to 10 mT, and 10 mT to 50meeting

2.1.2 Subinterval $10\mu T$ (100mG)to2mT(20G):

Fig. 2 provides the schematics of the circuit used to generate and to determine B.



La intensidad de corriente eléctrica I que circula a través de la bobina, fue provista por una fuente de corriente continua y fue medida de manera directa utilizando un ampermetro, con trazabilidad al patrón nacional de resistencia eléctrica y al patrón nacional de tensión en corriente continua.

El valor de la densidad de flujo magnético B generado por la bobina, se determinó a partir de la ecuación (1), $B = \mu_0 KI$, donde el valor de la constante de la bobina, es igual a: 19760 ± 60 (A/m)/A.

La tabla 2 muestra los valores de la homogeneidad del campo B, que fueron determinados a partir del perfil del campo B(x) en la región central de la bobina de Helmholtz.

A direct current source supplied the strength of the electric current I that circulates through the coil, and was measured directly using an ammeter of high accuracy, with traceability to the National Standard of Electric Resistance and to the National Standard of Voltage in Direct Current.

The value of the B magnetic flux density generated by the coil, was determined from equation (1), $B = \mu_0 KI$, where the value of the coil constant, $K = 19760 \pm 60$ (A/m)/A.

Table 2 shows the values of B field homogeneity determined from field profile B(x) in the center region of the Helmholtz coil.

Tabla 2 Homogeneidad del campo B.
Table 2. Homogeneity of B field.

B	Homogeneidad de B <i>Homogeneity of B</i>	
	en/ in 5 mm	en/in 10 mm
10 μT	\leq	$\leq 0,4 \%$
μ T	0,06 %	\leq
100 μ	$\leq 0,03 \%$	0,03 %
200 T	\leq	$\leq 0,03 \%$
μ T	0,02 %	0,03 %
1 mT	0,02 %	\leq
1,5 mT	\leq	$\leq 0,03 \%$
	$\leq 0,02 \%$	0,03 %

En la tabla 3 se muestran algunos resultados de la caracterización de la intensidad de corriente continua, obtenidos para cada valor nominal de B (ver ec. 1).

Table 3 shows the results of characterizing the direct current's strength, obtained for each B nominal value (see Eq. 1).

Tabla 3. Valores de corriente y de campo B obtenidos en el subintervalo de 10 μ T a 2mT.
Table 3. Values of current and of B field obtained in the subinterval 10 μ T to 2mT.

B	I (mA)		B (mT) (estimada) (Estimated)
	Promedio <i>Average</i>	Desviación estándar <i>Standard Deviation</i>	
10 μT	0,402788	1,0E-06	0,010002
50 μT	2,01334	3,0E-05	0,049994
100 μT	4,02775	3,4E-05	0,100014
200 μT	8,05428	5,9E-05	0,199997
500 μT	20,1352	1,6E-04	0,499981
1 mT	40,2736	3,1E-04	1,00004
1,5 mT	60,4043	5,9E-04	1,49991
2 mT	80,5438	4,4E-04	2,00000

2.1.3 Subintervalo de 2 mT (20 G) a 10 mT (100 G):

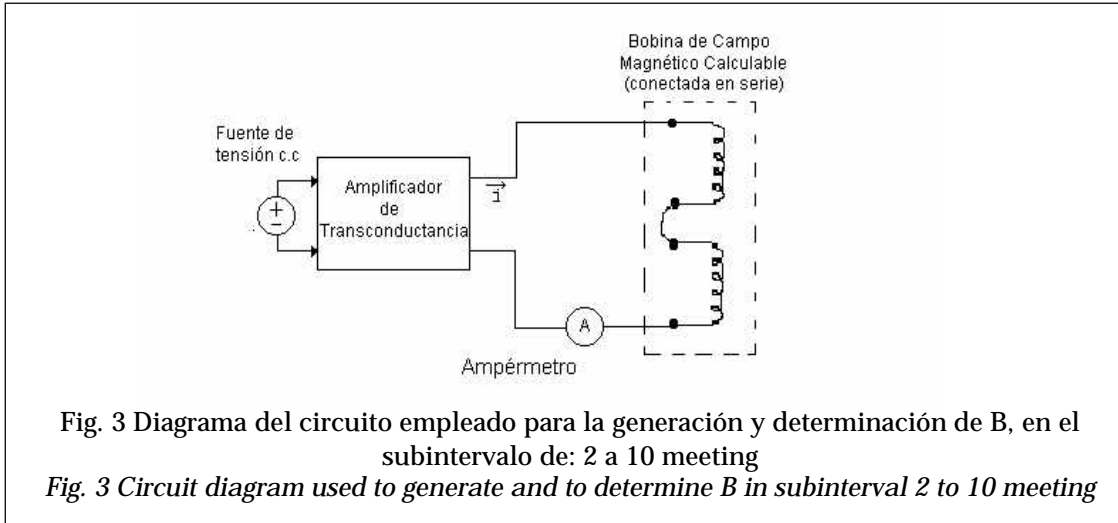
La Fig. 3 esquematiza el circuito que fue empleado para la generación y la determinación de B, en este intervalo.

2.1.3 Subinterval of 2 mT (20 G) to 10mT(100G):

Fig. 3 provides the diagram of the circuit used to generate and to determine B in this range.

Para alimentar la bobina de Helmholtz se utilizó una fuente de tensión continua y un amplificador de transconductancia, con una tensión de complianza máxima de 10 V. El diagrama de la Fig. 3 muestra el circuito empleado.

To feed the Helmholtz coil, a direct voltage source and transconductance amplifier were used with a maximum compliance voltage 10 V. Fig. 3 shows the circuit used.



La homogeneidad del campo B, a lo largo del diámetro central de la cavidad cilíndrica de la bobina es $\leq 0,03 \%$, en 10 mm, para todo el intervalo de 2 mT a 10 meeting

The homogeneity of field B in the central diameter of the coil's cylindrical cavity is $\leq 0,03 \%$, in 10 mm, for all range of 2 mT to 10 meeting

En la tabla 4 se muestran algunos resultados de la caracterización de la intensidad de corriente continua, para cada valor nominal de B (ver ecuación 1).

Table 4 shows the strength's characterization results of the direct current for each B nominal value (see Eq. 1).

Tabla 4. Valores de corriente I y de campo B obtenidos en el subintervalo de 2 mT a 10 meeting
 Table 4. Values of the I current and of the B field obtained in the 2 mT to 10 mT subinterval.

B (Nominal)	I (A)		B (mT)
	Promedio Average	Desviación estándar Standard Deviation	(estimada) (estimated)
2 mT	0,080554	7,0E-06	2,00024
3 mT	0,120809	8,2E-06	2,9998
4 mT	0,161087	9,1E-06	4,0000
5 mT	0,201142	1,2E-05	4,9946
10 mT	0,402337	1,6E-04	9,9905

2.1.4 Subintervalo de 10mT(100G) a 50mT(500G):

Para la generación del campo B en este subintervalo, se utilizó una fuente de corriente continua y una fuente de tensión continua, como control para la fuente de corriente que alimenta a la bobina de Helmholtz, cuyas bobinas que la constituyen fueron conectadas en paralelo. El diagrama de la Fig. 4 muestra el circuito que fue empleado.

2.1.4 Subinterval of 10mT(100G) to 50mT(500G):

To generate Field B in this subinterval, a direct current source controlled by a direct voltage source was used to feed the Helmholtz coil, whose coils were connected in parallel. Diagram Fig. 4 shows the circuit that was used.

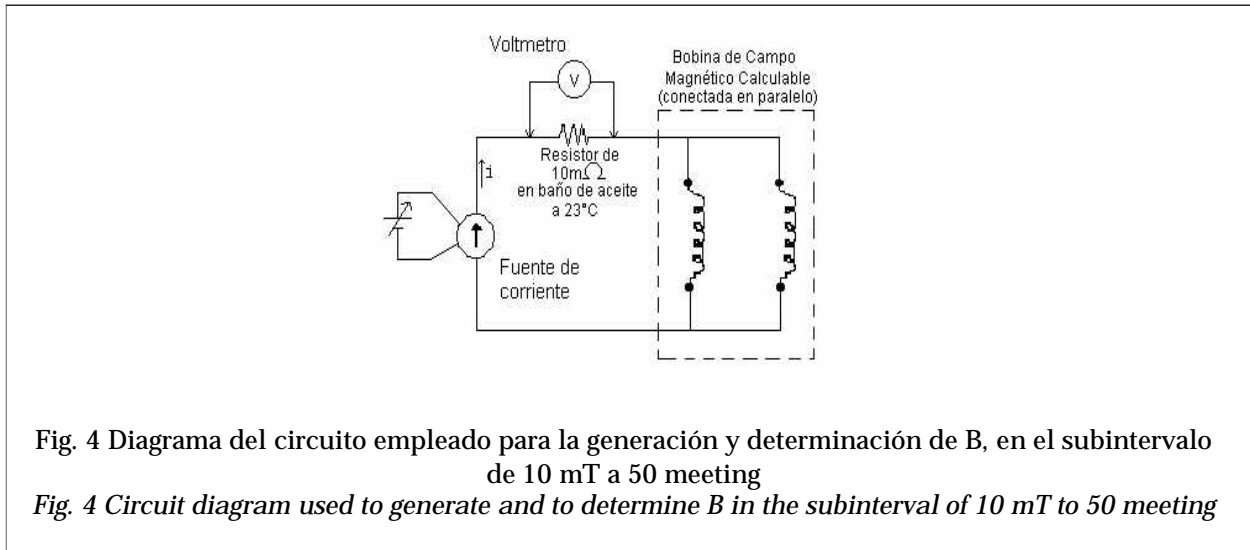


Fig. 4 Diagrama del circuito empleado para la generación y determinación de B, en el subintervalo de 10 mT a 50 meeting

Fig. 4 Circuit diagram used to generate and to determine B in the subinterval of 10 mT to 50 meeting

La intensidad de corriente eléctrica I que circula a través de la bobina, se determinó por la ley de Ohm. Se midió la caída de tensión V_R en un resistor, con valor nominal $R = 0,01 \Omega$ en baño de aceite a temperatura controlada (23 °C), utilizando un voltmetro y un resistor patrón de alta exactitud.

La homogeneidad del campo B, a lo largo del diámetro central de la cavidad cilíndrica de la bobina es $\leq 0,03 \%$, en 10 mm, para todo el intervalo. En la tabla 5 se muestran algunos resultados de la caracterización de la intensidad de corriente continua y los valores del campo B que fueron determinados a partir de estas corrientes.

The strength of the electric current I that circulated through the coil was determined by the Ohm law. The voltage drop V_R was measured in a resistor of nominal value $R = 0,01\Omega$, in an oil bath at a controlled temperature of (23 °C), using a voltmeter and a high accuracy standard resistor.

The homogeneity of Field B in the central diameter of the coil's central cavity is $\leq 0,03 \%$, in 10 mm, for the entire range. Table 5 shows the results of the characterization of the continuous current's strength, and the values of Field B that were determined as of these currents.

Tabla 5. Valores de corriente I y de campo B obtenidos en el subintervalo de 10 mT a 50 mT
 Table 5. Values of current I and of Field B obtained in the 10 mT to 50 mT subinterval.

B	V _R (mV)	I (A)		B (mT)
(Nominal)	Promedio Average	Promedio Average	Desviación estándar Standard Deviation	(estimada) (estimated)
10 mT	8,1096	0,40548	8,5E-06	10,0685
20 mT	16,2195	0,81098	2,1E-05	20,1375
30 mT	24,3293	1,21646	2,0E-05	30,206
40 mT	32,4389	1,62195	3,1E-05	40,275
50 mT	40,5484	2,02742	4,1E-05	50,343

2.1.5 Fuentes y evaluación de incertidumbre

Incertidumbre para los subintervalos de 10 μ T a 2 mT y de 2 mT a 10 mT

De acuerdo con la ecuación (1), $B = \mu_0 KI$, la expresión para la evaluación de la incertidumbre estándar combinada, $U_c(B)$, del campo B generado, es:

$$U_c(B) = [((\partial B/\partial \mu_0)U(\mu_0))^2 + ((\partial B/\partial K)U(K))^2 + ((\partial B/\partial I)U(I))^2]^{1/2} \quad (3)$$

Donde las derivadas parciales describen la sensibilidad del campo B, respecto de las principales magnitudes de influencia, y $U(\mu_0)$, $U(K)$ y $U(I)$ representan las respectivas componentes de incertidumbre estándar.

La expresión anterior puede expresarse en términos de valores relativos, de las componentes de incertidumbre, como:

$$U_{c\text{ rel}}^2(B) = U_{\text{rel}}^2(\mu_0) + U_{\text{rel}}^2(K) + U_{\text{rel}}^2(I) \quad (4)$$

Para $U_{\text{rel}}(\mu_0)$ se tiene que, en virtud de que μ_0 es una constante física fundamental de valor exacto (CODATA 1998 [2]), entonces $U_{\text{rel}}(\mu_0) = 0$.

La tabla 6 muestra las componentes de incertidumbre que fueron evaluadas y los valores relativos de estas componentes. La incertidumbre expandida U_e reportada en esta tabla, corresponden a un factor de cobertura $K = 2$ para un nivel de confianza del 95 %

2.1.5 Sources and uncertainty evaluation

Uncertainty for the 10 μ T to 2 mT, and 2 mT to 10 mT subintervals.

As per the Equation (1), $B = \mu_0 KI$, the expression to evaluate the combined standard uncertainty, $U_c(B)$, of the generated field B is:

Partial derivatives describe the sensitivity of Field B in regard to the key magnitudes of influence, and $U(\mu_0)$, $U(K)$ and $U(I)$ represent the respective components of standard uncertainty.

The above Equation can be expressed in terms of the uncertainty components' relative values, such as:

For $U_{\text{rel}}(\mu_0)$, it is understood that since μ_0 is a fundamental exact value physical constant (CODATA 1998 [2]), then $U_{\text{rel}}(\mu_0) = 0$.

Table 6 shows the uncertainty components that were evaluated and their relative values. The expanded uncertainty U_e reported in this Table, correspond to a coverage factor $k = 2$ for an approximately level of confidence of 95 %. Uncertainty was calculated as per the 1993

aproximadamente. La incertidumbre fue calculada de acuerdo a la Guía BIPM/ISO de 1993 [3].

BIPM/ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [3].

Tabla 6. Incertidumbre relativa estimada del patrón nacional de densidad de flujo magnético, en el subintervalo de 10 μT a 10 mT .
 Table 6. Relative uncertainty estimated from the Magnetic flux Density National Standard in the subinterval of 10 μT to 10 mT .

B	U _{rel} (I)		U _{rel} (K)	U incertidumbre combinada relativa <i>relative combined uncertainty</i>	U incertidumbre expandida relativa <i>relative expanded uncertainty</i>	
	U _A	U _B				U _B
(nominal)		U _{estabilidad} <i>stability</i>	U _{resolución} <i>resolution</i>			
	($\mu\text{A/A}$)	($\mu\text{A/A}$)	($\mu\text{A/A}$)	[(A/m)/A] / [(A/m)/A]	U _c	U _e (k = 2)
				($\times 10^{-3}$)	(mT/T)	(mT/T)
10 μT	1,342	18,48	0,07	1,5	1,5	3
50 μT	7,468	25,98	0,14	1,5	1,5	3
100 μT	4,278	18,48	0,07	1,5	1,5	3
200 μT	3,635	15,01	0,04	1,5	1,5	3
500 μT	3,886	34,64	0,14	1,5	1,5	3
1 mT	3,883	27,14	0,07	1,5	1,5	3
1,5 mT	4,919	24,83	0,05	1,5	1,5	3
2 mT	2,710	23,67	0,04	1,5	1,5	3
2 mT	23,21	23,67	0,36	1,5	1,5	3
3 mT	18,11	111,4	0,24	1,5	1,5	3
4 mT	15,15	99,30	0,18	1,5	1,5	3
5 mT	15,44	92,38	0,14	1,5	1,5	3
10 mT	103,8	77,94	0,07	1,5	1,5	3

- Incertidumbre para el subintervalo de 10 mT a 50 mT

Para evaluar la incertidumbre estándar combinada de B, U_c(B), expresamos la ec. (3) en términos de valores relativos, de las componentes de incertidumbre obtenidas por una evaluación de incertidumbre tipo "A" o tipo "B", teniendo en cuenta que el valor de la intensidad de corriente suministrada por la fuente a la bobina, se determinó por la ley de Ohm, midiendo la caída de tensión V en un resistor patrón.

- *Uncertainty for the 10 mT to 50 mT subinterval.*

To evaluate the combined uncertainty standard of B, U_c (B), we express Eq. (3) in terms of relative values, from the uncertainty components obtained by an evaluation of uncertainty type "A" or type "B", understanding that the Ohm law determined the value of strength of the current supplied by the coil's source, measuring the drop in voltage V in a standard resistor.

$$U_{c \text{ rel}}(B) = [U_{\text{rel}}^2(\mu_0) + U_{\text{rel}}^2(K) + U_{\text{rel}}^2(V) + U_{\text{rel}}^2(K)]^{1/2} \quad (5)$$

Como ya se mencionó anteriormente, la incertidumbre $U_{rel}(\mu_0) = 0$, y la incertidumbre relativa de la constante K de la bobina es: $U_{rel}(K) = 1,5 \times 10^{-3} [(A/m)/A] / [(A/m)/A]$.

La tabla 7 muestra las componentes de incertidumbre que fueron evaluadas y los valores relativos de estas componentes. La incertidumbre expandida U_e reportada en esta tabla, corresponden a un factor de cobertura $k=2$ para un nivel de confianza del 95 % aproximadamente. La incertidumbre fue calculada de acuerdo a la Guía BIPM/ISO de 1993 [3].

As previously stated, uncertainty $U_{rel}(\mu_0) = 0$, and the relative uncertainty of the constant K of the coil is: $U_{rel}(K) = 1,5 \times 10^{-3} [(A/m)/A] / [(A/m)/A]$.

Table 7 shows the uncertainty components that were evaluated as well as their relative values. The U_e relative expanded uncertainty reported in this Table belong to a coverage factor $k = 2$ for an approximate level of confidence of 95 %. Uncertainty was calculated as per the 1993 BIPM/ISO Guide [3].

Tabla 7. Incertidumbre relativa estimada del patrón nacional de densidad de flujo magnético, en el subintervalo de 10 mT a 50 mT .

Table 7. Relative uncertainty estimated from the National Standard of Magnetic Flux Density in the 10 mT to 50 mT subinterval.

B (nominal)	$U_{rel}(V)$		$U_{rel}(R)$		$U_{rel}(K)$	U incertidumbre combinada relativa relative combined uncertainty	U incertidumbre expandida relativa relative expanded uncertainty	
	U_A	U_B		U_B		U_B		
		$U_{estabilidad}$ stability	$U_{resolución}$ resolution	$U_{estabilidad}$ stability	U_{cal}			
	($\mu V/V$)	($\mu V/V$)	($\mu V/V$)	($\mu \Omega/\Omega$)	($\mu \Omega/\Omega$)	$[(A/m)/A] / [(A/m)/A]$	U_c	$U_e (k = 2)$
						($\times 10^{-3}$)	(mT/T)	(mT/T)
10 mT	5,39	26,56	0,36	10	1	1,5	1,5	3
20 mT	6,77	16,17	0,18	10	1	1,5	1,5	3
30 mT	4,24	12,12	0,12	10	1	1,5	1,5	3
40 mT	4,90	10,39	0,09	10	1	1,5	1,5	3
50 mT	5,22	9,24	0,07	10	1	1,5	1,5	3

2.2 Método del teslámetro de resonancia magnética nuclear (RMN).

2.2.1 Descripción y principio de operación.

Un sistema de generación de campos magnéticos, formado por una fuente de corriente de alta estabilidad y por un electroimán, genera entre los polos de este último una intensidad de campo magnético H (A/m), dada por la relación siguiente:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 \quad (6)$$

2.2 Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Teslameter Method

2.2.1 Description and principle of operation

A magnetic field generation system formed by a high stability current source and by an electromagnet, generates an H (A/m) magnetic field strength between the two poles of the electromagnet, expressed in the following Equation:

La medición del campo \mathbf{B} , por medio del método de resonancia magnética nuclear [1, 4, 5, 6, 7], se basa en la dependencia lineal de la frecuencia de precesión de los momentos magnéticos de los protones, de elementos como el hidrógeno, con el campomagnético \mathbf{B} , con el cual interaccionan.

En presencia de un campo magnético \mathbf{B} externo, los protones con momento magnético $m \neq 0$, adquieren una energía $E = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} = -mB \cos \theta$, donde θ es el ángulo formado entre la dirección del momento dipolar magnético y la dirección del campo aplicado. El momento magnético de los protones es sujeto además a un par o momento de rotación τ , dada por $\tau = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$, el cual, produce un movimiento de precesión de los momentos magnéticos entorno al campo \mathbf{B} , como se muestra en la figura 5, con una frecuencia característica f_0 llamada frecuencia de Larmor o frecuencia angular de resonancia, dada por:

$$f_0 = B(\gamma_p/2\pi) \quad (7)$$

donde: $\gamma_p = 4\pi m / h = 2,675\,222\,12(11) \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ (CODATA1998, [2]), es la razón giromagnética del protón, con h la constante de Planck. De la ec. (7) se observa que la frecuencia de precesión es proporcional al campomagnético B .

Measuring field \mathbf{B} with the nuclear magnetic resonance method [1, 4, 5, 6, 7], is based on the lineal dependency of the precision frequency of the magnetic moments of the protons in elements such as hydrogen, with the magnetic field B with which they interacted.

When in the presence of an external magnetic field \mathbf{B} , protons with a magnetic moment of $m \neq 0$, acquire an energy $E = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} = -mB \cos \theta$, where θ is the angle between the direction of the magnetic dipole moment and direction of the applied field. The magnetic moment of the protons is also subjected to a rotation pair or momentum τ , supplied by $\tau = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$, which produces the movement of precision of the magnetic moments around field \mathbf{B} , as seen in Figure 5, with a characteristic frequency f_0 known as the Larmor frequency, or angular resonance frequency, supplied by:

Where:
 $\gamma_p = 4\pi m / h = 2,675\,222\,12(11) \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ (CODATA1998, [2]), is the protons' giromagnetic ratio with h the Planck's constant. Eq. (7) shows us that the precision frequency is proportional to themagnetic field B .

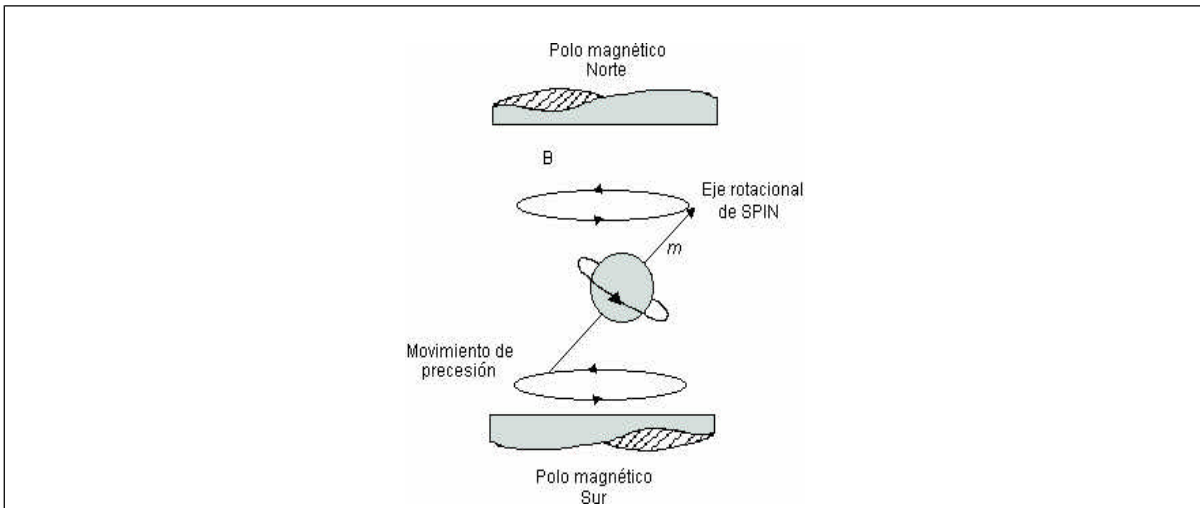
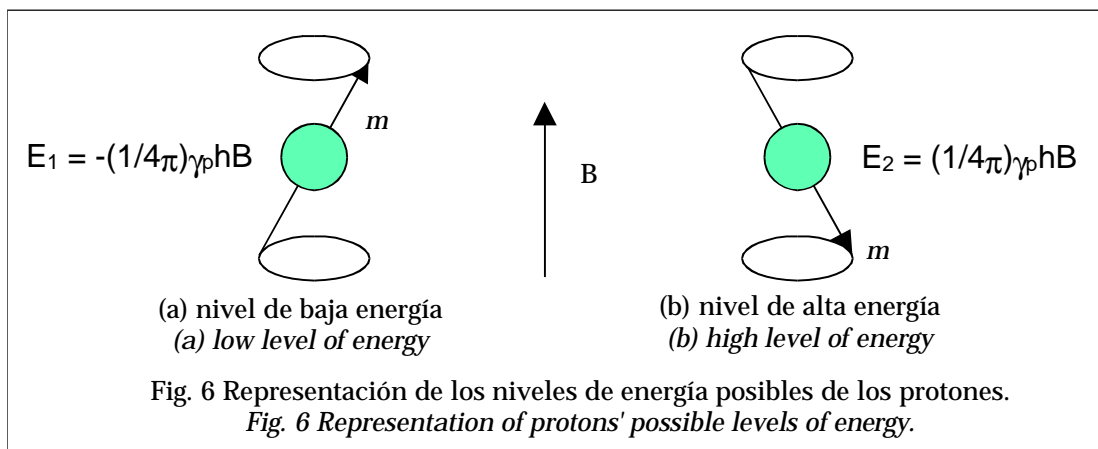


Fig. 5 Representación del movimiento de precesión del momento magnético del protón, causado por un campo magnético \mathbf{B} externo, orientado en la dirección z .
 Fig. 5 Representation of the precision movement of the proton's magnetic moment, caused by an external magnetic field B , oriented in the z direction

Desde el punto de vista de la mecánica cuántica los protones, sujetos a la acción de un campo magnético B externo, pueden estar en dos estados o niveles de energía: (a) un estado paralelo (estado spin “hacia arriba”) donde los protones, cuya proyección de su momento magnético es paralela a B, tienen un nivel de baja energía $E_1 = -(1/4\pi)\gamma_p hB$, y (b) un estado antiparalelo (estado spin “hacia abajo”) donde los protones, cuya proyección de su momento magnético es antiparalela a B, tienen un nivel de alta energía $E_2 = (1/4\pi)\gamma_p hB$. La figura 6 representa estos dos niveles de energía cuantizados.

From the point of view of quantum mechanics, protons subject to the action of an external magnetic field B can be in two states or levels of energy: (a) a parallel state (upward spin) where the protons, whose projection of their magnetic moment is parallel to B, have a low level of energy $E_1 = -(1/4\pi)\gamma_p hB$, and (b) an antiparallel state (downward spin) where the protons, whose projection of their magnetic moment is antiparallel to B, have a high level of energy $E_2 = (1/4\pi)\gamma_p hB$. Figure 6 represents these two levels of quantized energy.



Considerando que el estado energético de los protones de hidrógeno de una muestra de agua, bajo la acción de un campo B, esté en su nivel de baja energía, entonces la energía necesaria para cambiar de un nivel de baja energía a un nivel de alta energía está dada por la diferencia de energías entre estos dos niveles:

Considering that the energy state of the hydrogen protons in a sample of water, under the action of a B field is at its low energy level, the energy needed to change from a low level of energy to a high level of energy is supplied by the difference of energies of these two levels:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (\gamma_p / 2\pi) hB \quad (8)$$

donde: $(\gamma_p / 2\pi) = 42,577\,482\,5 \text{ MHz T}^{-1}$,
 $h = 6,626\,068\,76 \times 10^{-34} \text{ Js}$, y
 B = campo aplicado, en T.

*where: $(\gamma_p / 2\pi) = 42,577\,482\,5 \text{ MHz T}^{-1}$,
 $h = 6,626\,068\,76 \times 10^{-34} \text{ Js}$, y
 B = applied field, in T.*

Este cambio de energía puede expresarse en términos de la frecuencia de Larmor a través de la constante de Planck, por medio de la ecuación siguiente:

This change in energy can be stated in terms of the Larmor frequency through the Planck constant, as seen here:

$$\Delta E = hf_0 \quad (9)$$

De donde:

Where:

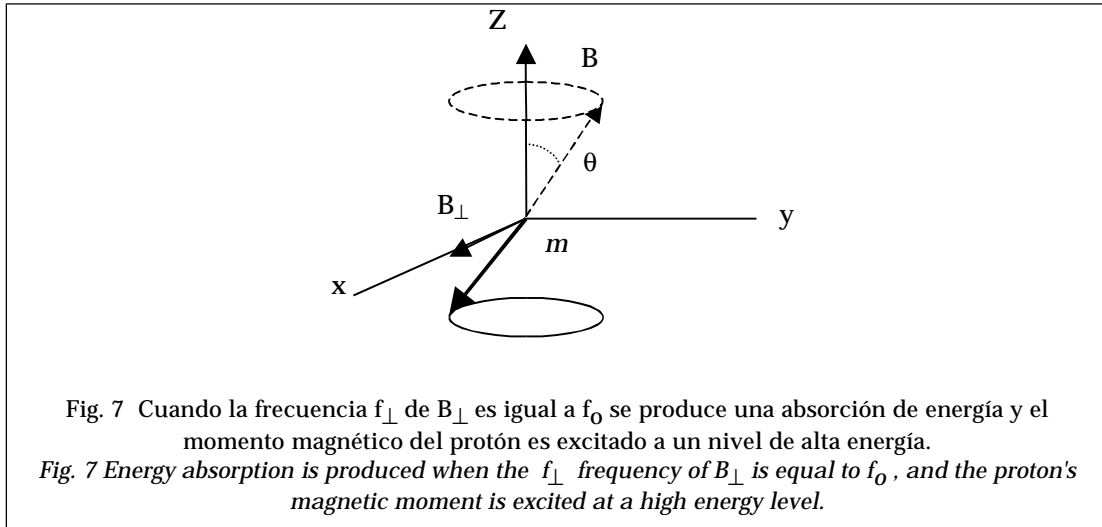
$$f_0 = \Delta E/h \quad (10)$$

Esta expresión, que es igual a la ec. (7), permite relacionar a la frecuencia de resonancia, f_0 , con un cambio de energía del sistema ΔE . De acuerdo con la ec. (7), la medición del campo magnético B por el método de RMN, se basa en la dependencia lineal de la frecuencia de precesión de los protones, con el campo magnético aplicado B , y dado que γ_p es una constante física fundamental, la única variable a ser medida es la frecuencia de resonancia. La ec. (10) provee de manera natural un medio para poder medir la frecuencia f_0 , y por consiguiente determinar el valor de B . Este medio consiste en inducir un cambio de energía en el sistema y detectarlo para poder medir f_0 . El teslámetro de RMN empleado en el establecimiento del patrón nacional de B , trabaja bajo este principio, conocido como absorción de energía.

El teslámetro de RMN patrón, utiliza los protones de hidrógeno de una muestra de agua para la medición de f_0 . A fin de inducir un cambio en el estado energético de los momentos magnéticos de los protones, que permita medir f_0 , se aplica al sensor un segundo campo B_{\perp} perpendicular a B . El campo B_{\perp} , generado por un oscilador de radio frecuencia (RF), oscila a una frecuencia f_{\perp} entre las direcciones x positiva y negativa, como se describe en la Fig. 7, produciendo un momento de rotación suplementario sobre el protón. El momento τ_{\perp} resultante tiende a crecer el ángulo θ entre la dirección del momento magnético y la dirección del campo aplicado B . Cuando $f_{\perp} = f_0$, se provee la energía necesaria para permitir la transición de los protones de baja energía E_1 hacia el nivel de alta energía E_2 . La energía ΔE es entonces absorbida por los momentos magnéticos de los protones y esta absorción es detectada por el sensor del teslámetro de RMN para determinar el valor de f_0 , utilizando una bobina y un sistema de detección de alta sensibilidad y bajo ruido, similares a las de un receptor de radiofrecuencia.

This Equation, equal to Eq. (7), lets us relate the f_0 resonance frequency to a change in energy of the ΔE system. According to Equation (7), measuring the magnetic field B with the NMR method is based on the lineal dependency of the protons' precision frequency with the applied magnetic field B , and since γ_p is a fundamental physical constant, the only variable to be measured is the resonance frequency. Equation (10) naturally provides a means to measure the frequency f_0 ; thereby determining the B value. This mean calls for inducing a change of energy in the system and detecting it to measure f_0 . The NMR teslameter used to establish the National Standard of B , works under this principle, known as energy absorption.

The standard NMR teslameter uses the hydrogen protons from a sample of water to measure f_0 . In order to induce a change in the energy state of the protons magnetic moments to measure f_0 , a second field B_{\perp} is applied perpendicularly to the B sensor. Field B_{\perp} , generated by a radio frequency oscillator, oscillates at a frequency f_{\perp} between the positive and negative x direction, as Fig. 7 describes, producing a supplementary rotation momentum over the proton. The resulting τ_{\perp} momentum tends to increase the θ angle between the direction of the magnetic moment and the direction of the B applied field. When $f_{\perp} = f_0$, then the energy needed to allow for the low energy protons E_1 to make a transition to a high level of energy E_2 is provided. Then, the protons magnetic moment absorbs the ΔE energy. The NMR teslameter's sensor detects this absorption and determines the value of f_0 , using a coil and a high sensitivity low noise detection system, similar to a radio-frequency receiver.



El principio de medición de f_0 es el siguiente [8]: se utiliza un oscilador de RF controlado por tensión, con capacidad para generar frecuencias en el intervalo de 1.7 MHz a 78 MHz y cuya señal de control es una onda triangular que permite realizar un control lineal de frecuencia en función del tiempo siguiendo la ecuación siguiente:

$$f(t) = f_i \pm a t \quad (11)$$

donde: f_i es un valor de frecuencia inicial, a es la rapidez de barrido y t es una variable temporal.

Para encontrar el valor de la frecuencia de resonancia, la frecuencia del oscilador se hace variar siguiendo la función descrita en la ec. (11); cuando la frecuencia del oscilador alcanza el valor de f_0 , se produce una absorción de energía la cual es detectada por un circuito que activa una compuerta de control del contador de frecuencia ajustada a un intervalo de tiempo

$$t = \frac{\tau_0}{2}, \text{ donde } \tau_0 = \left(\frac{\gamma_p}{2\pi} \right)^{-1}$$

Esto produce un corrimiento entre el valor de frecuencia de resonancia y el valor de frecuencia registrado, $f_1 = f_0 + \Delta f$. En un principio, se realiza el barrido de frecuencia del oscilador de la ecuación (11) con pendiente

The f_0 measurement principle is as follows: [8]: a voltage controlled RF oscillator with the capacity to generate frequencies in the 1.7 Mhz a 78 MHz range is used. Its control signal is a triangle wave that allows the frequency to be controlled linearly, as a function of time, using the following Equation:

Where: f_i is the initial frequency value, a is the sweep velocity and t is a temporary variable.

To find the resonance frequency's value, the oscillator's frequency is modified by using the function described in Eq. (11); when the oscillator frequency reaches the f_0 value, energy absorption is produced and is detected by the circuit that activates the adjusted frequency counter control gate to a time range of

$$t = \frac{\tau_0}{2}, \text{ where } \tau_0 = \left(\frac{\gamma_p}{2\pi} \right)^{-1}.$$

This produces a shift between the resonance frequency value and the registered frequency value, $f_1 = f_0 + \Delta f$. At the onset, a sweep of the oscillator's frequency is carried out with positive slope (Eq. 11), thereby increasing the frequency values; this makes the registered frequency appear as having a value higher than the one it really has.

positiva, esto es, incrementando los valores de frecuencia; esto provoca que la frecuencia registrada aparezca con un valor mayor al que realmente tiene. Cuando la frecuencia del oscilador es igual a f_1 , la frecuencia del oscilador es barrida en el sentido opuesto, ahora decreciendo los valores de frecuencia, con una pendiente negativa en la ecuación (11). De esta manera, al alcanzar el valor de resonancia, y activarse la compuerta del contador de frecuencia, la frecuencia de resonancia se registra también ahora con un corrimiento, $f_2 = f_0 - \Delta f$. Después de un ciclo completo, se tiene que los corrimientos de frecuencia están colocados simétricamente alrededor de la frecuencia de resonancia. Gracias a esta técnica utilizada, el valor de f_0 se obtiene fácilmente por medio de la relación siguiente:

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{f_0 + \Delta f + f_0 - \Delta f}{2} \quad (12)$$

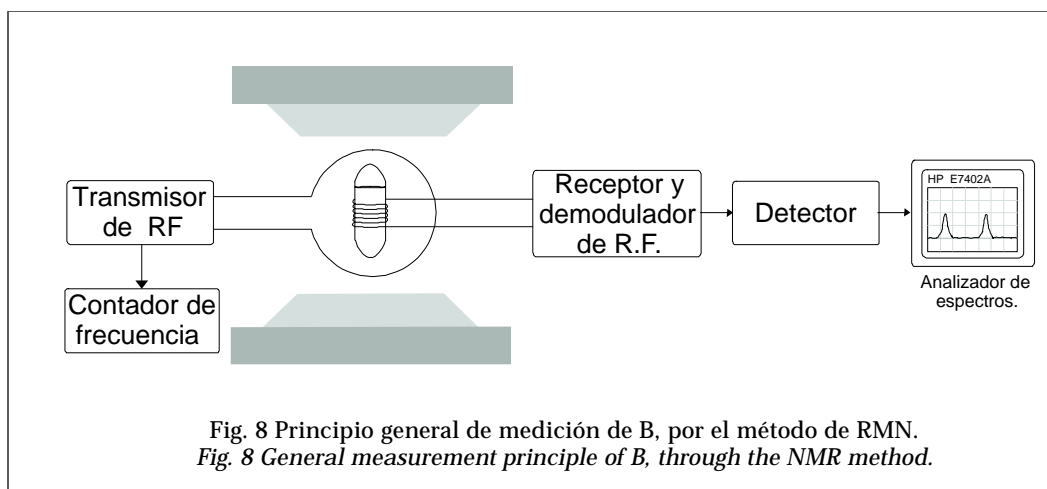
En la ecuación (12) puede verse que después de dos excursiones del oscilador hacia arriba y hacia abajo, el valor promedio de los valores registrados por el contador de frecuencia es igual al valor de la frecuencia de resonancia. El error reportado por el fabricante del teslámetro de RMN en la determinación del campo B, empleando esta técnica, es del orden de $10 \mu T$.

La Fig. 8 esquematiza el principio general de medición de f_0 , y por consiguiente la determinación de B, por el método de RMN.

When the oscillator's frequency is equal to f_1 , the oscillator's frequency is swept in the opposite direction, thereby decreasing the frequency values with a negative slope (Eq. 11). By doing this, when the resonance value is reached and when the frequency counter gate is activated, then the resonance frequency will be recorded with a shift, $f_2 = f_0 - \Delta f$. After a complete cycle, the frequency shifts are placed symmetrically around the resonance frequency. Thanks to this technique, now the value of f_0 can be easily obtained through the following ratio:

Through Equation (12), one can easily see how after two oscillator excursions, upwards and the downwards, the average value of the values recorded by the frequency counter is equal to the resonance frequency value. The error reported by the NMR teslameter manufacturer in determining the B field, using this technique, is in the order of $10 \mu T$.

Fig. 8 schematizes the general measurement principle of f_0 . Consequently, B is determined via the NMR method.



2.2.2 Intervalo de 100 mT (1000 G) a 300 mT (3000 G).

Para la generación del campo B, se utilizó un electroimán con polos de 152,4 mm (6") de diámetro, y una separación entre éstos de 12,7 mm (0,5"). La alimentación del electroimán, indicado en la figura 8 y 9, se efectuó a través de una fuente bipolar de corriente continua, cuya capacidad de generación es de ± 20 A. El control de ésta se realizó por medio de un circuito desarrollado en el laboratorio.

La intensidad de corriente eléctrica que circula a través de las bobinas del electroimán se determinó por la ley de Ohm. Se midió la caída de tensión en un derivador de corriente, utilizando un multímetro digital. La medición del campo B, se efectuó por medio de un teslámetro de RMN, de tipo comercial, cuya base de tiempo fue calibrada contra el patrón nacional de frecuencia, establecido en el CENAM. En la tabla 8 se muestran algunas de las características principales de este instrumento. El teslámetro de RMN proporciona de manera directa el valor de f_0 ó de B.

La Fig. 9 muestra el diagrama del sistema utilizado para la generación del campo B, en el intervalo de 100mT a 300mT

2.2.2 100mT(1000G)to300mT(3000G)Range.

To generate the B field, we used an electromagnet with 152,4 mm (6") diameter poles separated 12,7 mm (0,5"). A bipolar power supply provides the direct current to the electromagnet showed in Figures 8 and 9. Its generation capacity is ± 20 A. A circuit developed in the laboratory let us to control this supply.

The electric current strength that circulates through the electromagnet's coils was determined by the Ohm's law. The voltage drop in a current shunt was measured using a digital multimeter.

The B field was measured using a commercial NMR teslameter. Its time base had been calibrated against the national frequency standard established at CENAM. Table 8 shows this instrument's key characteristics. The NMR teslameter directly provides the f_0 value or B value.

Fig. 9 shows the diagram of the system used to generate the B field in the 100mT to 300mT range.

Tabla 8. Características del teslámetro de RMN utilizado.
Table 8. Characteristics of the NMR teslameter.

Estabilidad de la base de tiempo: <i>Stability of the time base:</i>	$\leq 1,58 \times 10^{-08}$, en 600 s.
Intervalo de frecuencia de barrido: <i>Interval frequency sweep:</i>	1,7 MHz a 78 MHz.
Rapidez de rastreo: <i>Tracking speed:</i>	90 mT/s, máximo
Intervalo de medición del campo <i>Field measurement range:</i>	79 mT a 1,83 T.
Dimensiones de la muestra de H ₂ O <i>Dimensions of the H₂O sample :</i>	6,5 mm (largo) x 5 mm (diámetro)

Debido a que la principal componente de incertidumbre en la medición del campo B, por el método de RMN, es la incertidumbre asociada a la medición de la frecuencia de

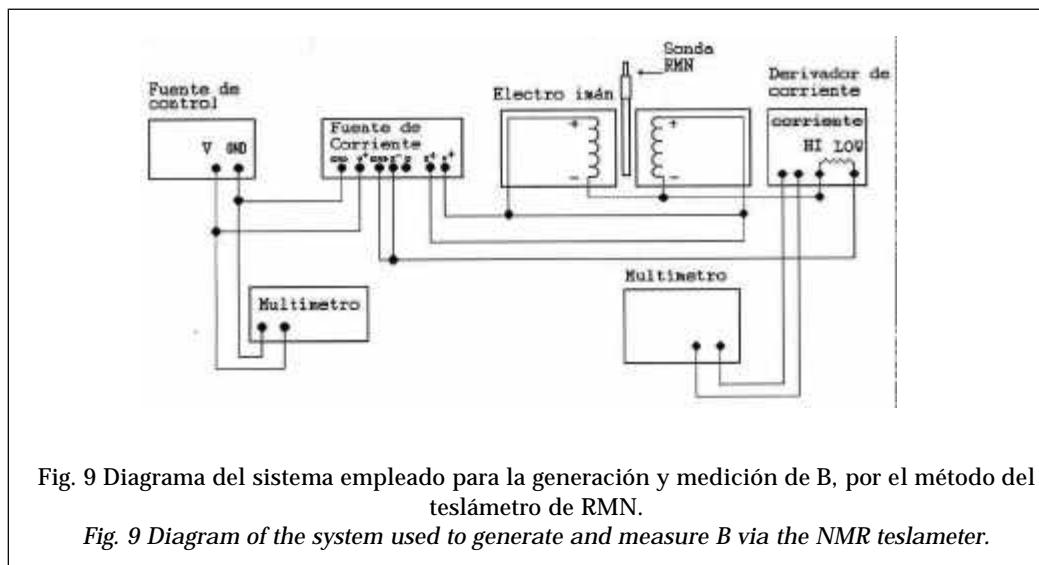
Because the main component of uncertainty in measuring the B field via the NMR method is the uncertainty associated to the f_0 resonance frequency measurement, the NMR teslameter was

resonancia f_0 , se llevó a cabo la calibración del teslámetro de RMN en su conjunto, empleando para ello un Analizador de Espectros, al cual se conectó la salida del detector del teslámetro de RMN. Con este método, las frecuencias f_1 y f_2 fueron medidas y el valor de f_0 fue determinado aplicando la ec. (12).

El analizador empleado, cuya base de tiempo también fue calibrada contra el patrón nacional de frecuencia, tiene la capacidad de observar las señales en un intervalo amplio de frecuencias, de 9 kHz a 3 GHz, y de medir el espectro de valores de amplitud contra valores de frecuencia. Este analizador permitió observar, en tiempo real, las señales de RMN en el dominio de la frecuencia, que fueron generadas por el campo B a 100 mT, 200 mT y 300 mT, así como también permitió determinar el valor de la frecuencia de resonancia f_0 asociada a estos valores de densidad de flujo magnético.

calibrated as an ensemble using a Spectrum Analyzer. The NMR teslameter detector outlet was connected to the Spectrum Analyzer. Using this method, f_1 and f_2 frequencies were measured and f_0 was determined from Eq. (12).

The analyzer used, whose time base was also calibrated against the national frequency standard, has the capacity to observe the signals in a wide range of frequencies, 9 kHz to 3 GHz, and to measure the amplitude value spectrum against the frequency values. This analyzer allowed us to see, in real time, the NMR signals in the frequency domain that the B field generated at 100 mT, 200 mT and 300 mT. It also allowed us to determine the value of the f_0 resonance frequency associated to these magnetic flux density values.

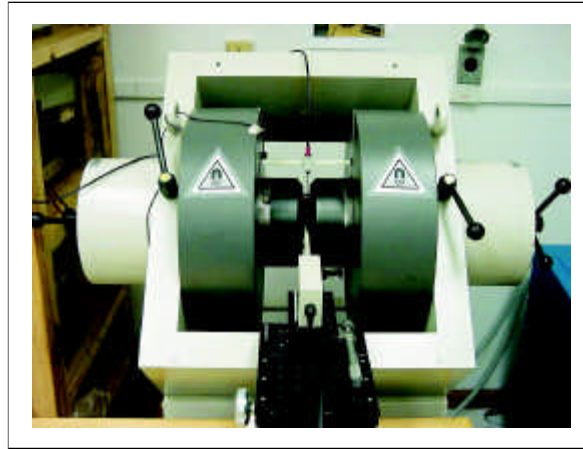


El sensor de RMN se colocó entre los polos de un electroimán, como semuestra en la Fig. 10, en una zona de alta homogeneidad del campo B, teniéndose variaciones de $B \leq 0,03 \%$, en 10 mm, para todos los valores de B que fueron medidos.

The NMR sensor was placed between the electromagnet poles, as seen in Fig. 10, in a high homogeneity area of the B field, with variations of $B \leq 0,03 \%$, in 10 mm, for all the values of B that were measured.

Fig. 10 Posicionamiento del sensor de RMN entre los polos del electroimán, para la medición de la frecuencia de resonancia, en el intervalo de 100 mT a 300 mT.

Fig. 10 NMR sensor placement between the electromagnetic poles to measure the resonance frequency in the 100 mT to 300 mT range.



De acuerdo con la técnica empleada por el teslámetro de RMN para la medición de la frecuencia de resonancia f_0 , mencionada anteriormente [8], se observaron en el analizador dos picos en la proximidad de f_0 , con valores de frecuencia f_1 y f_2 respectivamente, con $f_2 > f_1$, cuyo valor promedio corresponde al valor esperado de la frecuencia de resonancia f_0 , para un campo B dado.

La tabla 9 muestra algunos de los resultados de la caracterización del sensor del teslámetro de RMN, y los valores de la frecuencia de resonancia f_0 que fueron determinados para cada valor nominal de B.

According to the technique used by the NMR teslameter to measure the f_0 resonance frequency mentioned in [8], two peaks were seen in the analyzer close to f_0 , with frequency values of f_1 and f_2 respectively, where $f_2 > f_1$. Its average value corresponds to the value expected from the f_0 resonance frequency for a given B field.

Table 9 shows some of the results of the NMR teslameter sensor characterization and the values of the f_0 resonance frequency determined for each B nominal value.

Tabla 9. Resultados obtenidos en el intervalo de 100 a 300 mT
Table 9. Results obtained in the 100 to 300 mT range

B (nominal)	I (A) (promedio) (average)	f_1 (MHz) (promedio) (average)	f_2 (MHz) (promedio) (average)	$f_0 = (f_1+f_2)/2$ (MHz)	$B = f_0/(\gamma_p/2\pi)$ (estimado) (estimated) (mT)	B (mT) (lectura del teslámetro) (Teslameter reading)
100 mT	1,887 786	4,234 832	4,281 134	4,257 983	100,006	100,008
200 mT	3,621 580	8,481 451	8,550 147	8,515 799	200,007	200,006
300 mT	5,234 635	12,722 223	12,759 141	12,740 682	299,235	299,236

2.2.3 Fuentes y evaluación de incertidumbre.

De acuerdo con el análisis anterior y con el modelo dado por la ec. (12) para f_0 , la expresión para la evaluación de la incertidumbre estándar combinada, $U_c(f_0)$, es:

$$U_c(f_0) = \sqrt{(f_0/f_1)^2 U(f_1)^2 + (f_0/f_2)^2 U(f_2)^2} \quad (14)$$

Donde las derivadas parciales describen la sensibilidad del campo B, respecto de las principales magnitudes de influencia. $U(f_1)$ y $U(f_2)$ representan las respectivas componentes de incertidumbre estándar.

La tabla 10 muestra las componentes de incertidumbre asociadas a la medición de f_1 y f_2 que fueron evaluadas y los valores relativos de estas componentes. La incertidumbre expandida relativa U_e reportada en esta tabla, corresponde a un factor de cobertura $k = 2,18$ para una B nominal de 100 mT, y $k = 2$ para una B nominal de 200 mT y 300 mT, para un nivel de confianza del 95 % aproximadamente. La incertidumbre fue calculada de acuerdo a la Guía BIPM/ISO de 1993 [3].

2.2.3 Sources and uncertainty evaluation.

According to this analysis and using the model that Eq. (12) supplies for f_0 , the equation that we will use to evaluate the combined standard uncertainty will be, $U_c(f_0)$:

Partial derivatives describe the sensitivity that Filed B has in regards to the key magnitudes of influence. $U(f_1)$ and $U(f_2)$ represent the respective components of standard uncertainty.

Table 10 shows the uncertainty components associated to the measurements of f_1 and f_2 that were evaluated and their relative values. The relative expanded uncertainty U_e reported in this Table belong to a coverage factor $k = 2,18$ for a B nominal value of 100 mT, and $k = 2$ for a B nominal value of 200 mT and 300 mT, for an approximate level of confidence of 95 %. Uncertainty was calculated as per the 1993 BIPM/ISO Guide [3].

Tabla 10. Incertidumbre estimada para f_0 .
Table 10. Estimated uncertainty for f_0 .

B (nominal)	U (f_1)		U (f_2)		U _c (f_0)	U _e (f_0)
	U _A	U _B	U _A	U _B		
	(μ Hz/Hz)	(μ Hz/Hz)	(μ Hz/Hz)	(μ Hz/Hz)		
100 mT	7,6	10,3	4,4	10,2	8,5	18 (k = 2,18)
200 mT	3,9	13,3	4,5	13,2	9,8	20 (k = 2)
300 mT	1,5	5,6	2,4	5,6	4,2	8 (k = 2)

De acuerdo con la ec. (7), la densidad de flujo magnético esta dada por:

$$B = f_0 / (\gamma_p / 2\pi) \quad (15)$$

Donde: $\gamma_p / 2\pi = 42,577\ 482\ 5\ \text{MHz T}^{-1}$, es una constante con una incertidumbre relativa de $4,1 \times 10^{-8}$ (CODATA, 1998). Esta componente de incertidumbre no contribuye significativamente al cálculo de la incertidumbre de B, por lo que, la única componente de incertidumbre a considerar, es la incertidumbre asociada a la

According to Eq. (7), magnetic flux density is supplied by:

Where: $\gamma_p / 2\pi = 42,577\ 482\ 5\ \text{MHz T}^{-1}$, is a constant with a relative uncertainty of $4,1 \times 10^{-8}$ (CODATA, 1998). This uncertainty component does not contribute significantly to the calculation of B's uncertainty, therefore, the only uncertainty component that has to be considered is the one associated to the

determinación de la frecuencia de resonancia f_0 . La tabla 11 muestra la incertidumbre que fue estimada para la densidad de flujomagnético B.

determination of the f_0 resonance frequency. Table 11 shows the uncertainty that was estimated for the B magnetic flux density.

Tabla 11. Incertidumbre estimada para B.
Table 11. Uncertainty estimated for B.

B (nominal)	Ue (B) (μ T/T)
100 mT	18 (k = 2, 18)
200 mT	20 (k = 2)
300 mT	8 (k = 2)

El patrón nacional de densidad de flujo magnético, B (T), establecido en el CENAM, permitirá atender algunas de las necesidades de calibración detectadas en diversos sectores industriales de nuestro país, brindando a los usuarios de esta magnitud, mediciones magnéticas confiables con trazabilidad a patrones nacionales.

The National Standard of Magnetic Flux Density, B (T), established at CENAM, will allow us to cover some of the calibration needs detected in different industries in our country. Thus, we will be able to provide the users of this magnitude with reliable magnetic measurements traceable to the National Standards.

REFERENCIAS

- [1] Numerical data and functional relationships in science and technology. Units and fundamental constants in physics and chemistry. J. Bortfeldt and B. Kramer. Landolt-Börnstein, Springer-Verlag, 1991.
- [2] The fundamental physical constants. P. J. Mohr and B. N. Taylor. Physics Today. August, 2000.
- [3] Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones. Reporte técnico: CNM-MED-PT-0002, 1994.
- [4] Praktische Physik, Band 2. F. Kohlrausch. B. G. Teubner, Stuttgart, 1996.
- [5] Are your magnetic measurements really traceable?. An introduction to NPL's capabilities. L. Henderson, M. Hall, J. Bartholomew, T. Drake and S. Harmon. Cal Lab, March-April, 1999.
- [6] Physique. J. Kane et M. Sternheim. Inter Editions, Paris, 1995.
- [7] Système de création de champ magnétique homogène à aimants ferrites pour l'imagérie RMN. V. Nguyen. Thèse INPG-LEG. Septembre 1996.
- [8] A new field-tracking NMR magnetometer system. J. Kubiak, M. Ostafin and G. Kienitz. J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 12, 1979.

REFERENCES

- [1] Numerical data and functional relationships in science and technology. Units and fundamental constants in physics and chemistry. J. Bortfeldt and B. Kramer. Landolt-Börnstein, Springer-Verlag, 1991.
- [2] The fundamental physical constants. P. J. Mohr and B. N. Taylor. Physics Today. August, 2000.
- [3] Guía BIPM/ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones. Reporte técnico: CNM-MED-PT-0002, 1994.
- [4] Praktische Physik, Band 2. F. Kohlrausch. B. G. Teubner, Stuttgart, 1996.
- [5] Are your magnetic measurements really traceable?. An introduction to NPL's capabilities. L. Henderson, M. Hall, J. Bartholomew, T. Drake and S. Harmon. Cal Lab, March-April, 1999.
- [6] Physique. J. Kane et M. Sternheim. Inter Editions, Paris, 1995.
- [7] Système de création de champ magnétique homogène à aimants ferrites pour l'imagérie RMN. V. Nguyen. Thèse INPG-LEG. Septembre 1996.
- [8] A new field-tracking NMR magnetometer system. J. Kubiak, M. Ostafin and G. Kienitz. J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 12, 1979.