

Diseño y construcción de un magnetizador de pulsos

M. Mirabal García^{a,*}, F.J. García González^b, E. Calderón Avalos^c, G.G. López Rocha^a y J.L. Sánchez Llamazares^d

^a Instituto de Física “Dr. Manuel Sandoval Vallarta”, UASLP, Alvaro Obregón 64,
78000 San Luis Potosí, S.L.P., México

^b Universidad Tecnológica de San Luis Potosí,
Apartado Postal 1-16, 78430 San Luis Potosí, S.L.P., México

^c GSS Computación, S.A. de C.V.,
Av. Coral 1202, Col. Valle Dorado 78390 San Luis Potosí, S.L.P., México

^d Laboratorio de Magnetismo, Facultad de Física-IMRE, Universidad de la Habana, Cuba

*e-mail: mirabal@dec1.ifisica.uaslp.mx

Recibido el 12 de enero de 2005; aceptado el 12 de julio de 2005

Se presenta el diseño y construcción de un magnetizador de pulsos que se ha puesto en funcionamiento en el Instituto de Física de la UASLP. El sistema se basa en la descarga de la energía almacenada en un banco de condensadores electrolíticos ($C_{total} = 23.1$ mF; $U = 1/2CV^2 \approx 2300$ J) a través de un solenoide resistivo de cobre, mecánicamente reforzado y de pocas espiras, dentro del cual es posible generar campos pulsados del orden de los 9.0 T. La duración del pulso de corriente (≈ 2.0 ms) permite aproximar la potencia de disipación media, a temperatura ambiente, a su valor mínimo. Se describe el funcionamiento del magnetizador y también el diseño de la bobina de campo; y para observar la forma del pulso, homogeneidad y el valor pico de la intensidad del campo magnético, el sistema está provisto de una bobina de inducción combinada con un integrador electrónico.

Descriptores: Magnetizador de pulsos; bobina de campo; bobina de inducción.

In the present paper we present the design and construction of a pulsed field magnetizer that has been set up at the IF-UASLP. The system is based on the discharge of the energy stored in a capacitor bank ($C_{total} = 23.1$ mF; $U = 1/2CV^2 \approx 2300$ J) into a resistive double-layer copper solenoid supported by reinforcing glass fibers. This magnetizer is capable of generating pulsed magnetic field strengths up to 9.0 T, in a cylindrical volume of 17 mm diameter at the center of the solenoid, with a pulse duration of about 2.0 ms. The principle of operation of the magnetizer as well as the design of the field solenoid are described. A pick-up coil system combined with an electronic integrator is also available in the apparatus to monitor the shape of the field pulse, peak field, and pulse duration.

Keywords: Pulsed field magnetizer; field solenoid; pick-up coil.

PACS: 07.55.Db

1. Introducción

Actualmente la investigación en nuevos materiales magnéticos y las técnicas desarrolladas para generar campos magnéticos intensos en forma pulsada han permitido, por un lado, investigar la naturaleza fundamental de muchas de las propiedades físicas de la materia y, por otro lado, esta investigación y tecnología han tenido gran impacto por todas las aplicaciones posibles en otras áreas de la ciencia y por su utilidad en la industria moderna. Por esta razón el estudio y caracterización de materiales magnéticos es una de las áreas de la ciencia de materiales que mayor atención ha recibido en las últimas décadas.

Los materiales que se han venido utilizando por su importancia comercial y tecnológica en la fabricación de aparatos y dispositivos de uso doméstico, científico o industrial que emplean imanes permanentes (IP), tales como televisores, teléfonos, computadoras, motores de corriente continua, equipos de resonancia magnética nuclear, separadores magnéticos, etc., se pueden clasificar en tres grandes grupos de acuerdo a su composición:

- i). Aleaciones tipo AlNiCo [1];
- ii). Ferritas hexagonales de bario y estroncio ($\text{MeFe}_{12}\text{O}_{19}$; Me = Ba, Sr) [2]; y

- iii). Los compuestos intermetálicos basados en tierras raras del tipo Sm-Co, o del tipo Nd-Fe-B [3,4], cuya característica distintiva es su elevado campo de anisotropía.

Sin embargo cabe destacar que las ferritas y los compuestos intermetálicos constituyen el grueso de la producción mundial, pero para el estudio de estos últimos se requieren campos magnéticos elevados.

En la Tabla I se dan los valores de la intensidad de campo requerido para alcanzar la magnetización de saturación en estos materiales [5]. Aquí es interesante notar que el campo de saturación B_{sat} , para una buena parte de estos materiales, está por encima del campo que se puede generar mediante electroimanes convencionales. Esto ha motivado el desarrollo de técnicas de pulsos en los principales laboratorios del mundo, donde se desarrollan e investigan nuevos materiales magnéticos, para la generación de campos magnéticos de elevada intensidad [6].

Por consiguiente, la posibilidad de generar campos magnéticos intensos en forma pulsada resulta actualmente una herramienta básica para realizar investigación experimental en materiales magnéticos, pues a pesar de existir potentes electroimanes superconductores con los cuales es posible generar campos magnéticos estáticos del orden de los

TABLA I. Valores de campo de saturación, B_{sat} , requerido para magnetizar imanes permanentes que se utilizan comercialmente [5].

Tipo de Material	B_{sat} (T)
Aleaciones Acero - Cobalto	0.12
Aleaciones tipo AlNiCo	0.3 – 0.6
Ferritas Hexagonales	1.0 – 1.2
Imanes a base de Tierras Raras	4.0 – 10.0

20 T, la técnica de campos pulsados, con una duración de unos cuantos milisegundos, resulta económica y confiable para producir intensidades de campo magnético en el intervalo de los 10 T – 50 T; ya que no se requieren sofisticados sistemas de refrigeración basados en helio líquido, como en el caso de los solenoides superconductores para producir campos intensos estáticos; y tampoco se requiere de un gran consumo de energía eléctrica como en el caso de los electroimanes del tipo Weiss o de Bitter [7].

El principio de generación de campos intensos en forma pulsada es muy diferente del utilizado para generar campos débiles. Entendiéndose aquí por débil a las intensidades de campo de hasta 2.5 T, que se pueden generar convencionalmente con el paso de corriente a través de un solenoide con un núcleo basado en una aleación de hierro y cobalto y con un sistema de enfriamiento con agua.

Cabe resaltar que los nuevos materiales magnéticos y las aplicaciones derivadas de la técnica para producir campos pulsados tendrán un alto impacto en el sector industrial, la medicina y la investigación en ciencia de materiales durante los próximos años, ya que su utilidad comprende un extenso número de usos como:

- 1). La obtención de imágenes por resonancia magnética (MRI) en el diagnóstico médico;
- 2). En la ciencia de materiales para el estudio de estructuras y defectos físicos a pequeña escala;
- 3). En la geofísica para el estudio de defectos físicos como fisuras en estructuras de rocas y en la prospección acuífera y petrolera;
- 4). La espectroscopía de alta resolución para el análisis estructural químico y biológico y para la síntesis de nuevos fármacos;
- 5). En la minería para la separación magnética del mineral de hierro; y
- 6). Levitación magnética para sistemas de transporte de alta velocidad, etc.

En el presente trabajo hemos tenido como objetivo desarrollar y construir un magnetizador de pulsos con diseño propio que ofrezca todas las funciones similares a los que se ofertan comercialmente, pero que además incluya otras funciones adicionales tal como la intensidad y caracterización del pulso de campo, que resulta de gran utilidad para su aplicación en la investigación. Esto nos permitirá disponer de una

técnica poderosa para el estudio de la materia en condiciones de campos extremos [8,9].

Se hace énfasis en los aspectos básicos relacionados con el principio de funcionamiento de este magnetizador de pulsos, lo cual normalmente se omite en la literatura específica. En la Sec. 2 se describe la teoría de operación; en la Sec. 3 se detallan las distintas partes que conforman el sistema electrónico; en la Sec. 4 se describe el diseño de la bobina de campo; en la Sec. 5 se describe brevemente el funcionamiento y, por último, en la Sec. 6 se dan las conclusiones de este trabajo.

2. Teoría de operación

Para producir campos magnéticos intensos, bajo el principio de almacenamiento de energía capacitiva, dentro de una bobina de baja inductancia L y con un diseño geométrico especial, el sistema debe poseer las siguientes características: Primero se debe almacenar energía en un banco de condensadores electrolíticos, con capacitancia total C , el cual debe ser cargado a un voltaje V por medio de un circuito rectificador; y segundo, el banco deberá ser descargado a través de la bobina magnetizadora de resistencia R , para generar un pulso de campo magnético de elevada intensidad y de corta duración.

De acuerdo a la Fig. 1, si obviamos el dispositivo de corte **D**, el diagrama corresponde a la configuración de un circuito RLC-serie. Una vez cargado el banco de condensadores, al cerrar el interruptor Th (tiristor), se establece un circuito oscilante; y el campo magnético generado por el inductor L (bobina magnetizadora), es directamente proporcional a la corriente, $I(t)$, en el circuito, la cual satisface la ecuación diferencial,

$$L(d^2I/dt^2) + R(dI/dt) + I/C = 0, \quad (1)$$

donde R es la resistencia de la bobina de campo, L su inductancia y C la capacitancia del banco de condensadores respectivamente.

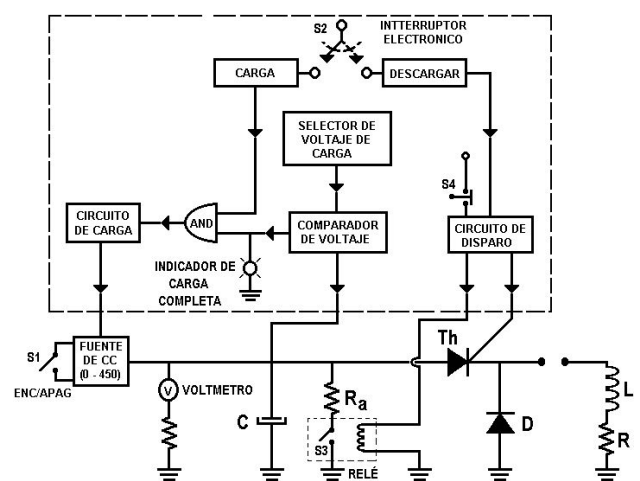


FIGURA 1. Diagrama de bloques del magnetizador de pulsos.

Teniendo en cuenta que $I = 0$ y $V = V_0$, para $t = 0$, tenemos que

$$I(t) = (V_0/L\omega) \exp(-\mu t) \sin \omega t, \quad (2)$$

donde $\mu = R/2L$ y la frecuencia angular

$$\omega = \sqrt{1/LC - R^2/4L^2}.$$

En nuestro circuito R es muy pequeña, i.e., $R^2/4L^2 < 1/LC$; siendo ω real. Por lo tanto la Ec. (2) representa la corriente, $I(t)$, como una función sinusoidal amortiguada en función del tiempo, con un factor de amortiguamiento

$$\gamma = (R/2)\sqrt{C/L} < 1. \quad (3)$$

El valor pico de la corriente I_p , está dado por

$$I_p = \exp[(-RT/4\pi L) \arctan(4\pi L/RT)] \sqrt{2U/L}, \quad (4)$$

o bien,

$$I_p = J\sqrt{2U/L}, \quad (5)$$

donde U es la energía almacenada en C , T es el período de oscilación y J representa las pérdidas en el circuito.

Con el objeto de obtener un pulso de corriente de signo constante y evitar el régimen oscilatorio amortiguado de alta frecuencia, se utiliza el diodo **D** como dispositivo de corte. Dicho diodo entra en funcionamiento cuando la corriente alcanza su valor máximo, poniendo en circuito abierto al banco de condensadores con la bobina de campo. En ese instante se configura un circuito RL , la tensión en los extremos de la bobina es cero y la corriente decaerá exponencialmente de acuerdo con la ecuación

$$I(t) = I_p \exp(-R/L)t. \quad (6)$$

Puesto que la tensión de umbral del diodo **D** es prácticamente nula, éste entrará en conducción cuando la tensión en los bornes del banco sea cero; así toda la energía almacenada en L se disipará en la resistencia R de la bobina.

3. Descripción del sistema

Como se ilustra en la Fig. 1, el magnetizador consta de las siguientes etapas: fuente de carga; banco de condensadores; sistema de descarga; sistema de medición y caracterización del campo magnético; y sistema de protección. Todas ellas gobernadas por el circuito de la tarjeta de control. En esta sección se describe en detalle la función de cada una de ellas; la bobina de campo se describe en la Sec. 4.

3.1. Fuente de carga

Se utiliza un rectificador de media onda alimentado a 220 V C.A. que está conectado al devanado primario de un transformador cuya potencia nominal es de 1200 Watts; el circuito rectificador proporciona una tensión de carga máxima, $V_0^{\text{máx}}$, de 450 V C.C.

3.2. Banco de condensadores

El sistema para almacenar la energía capacitiva está conformado por tres condensadores electrolíticos, de la Compañía Mallory, conectados en paralelo; cada uno con las siguientes características: capacitancia de 7700 μF ; y su tensión nominal máxima de trabajo, $V_0^{\text{máx}}$, es de 450 V en C.C.

3.3. Sistema de descarga

Está constituido por un tiristor, **Th**, y un diodo de alta potencia, **D**, (Fig. 1); el primero funciona como interruptor y permite enviar la energía almacenada en el banco de condensadores a la bobina de campo, mientras que el segundo sirve como dispositivo de corte para producir un pulso de corriente unidireccional. Para este fin se utilizaron el tiristor C701T ($V_{DRM} = 900\text{V}$, $I_{TSM} = 20000\text{A}$, $i^2t = 1.66 \times 10^6\text{A}^2\text{s}$) y el diodo A621T ($V_{RRM} = 900\text{V}$, $I_{FSM} = 25000\text{A}$, $i^2t = 2.5 \times 10^6\text{A}^2\text{s}$) de la compañía National Electronics.

3.4. Bloque de control

En la Fig. 1 aparece el diagrama de bloques del circuito de control, el cual realiza las siguientes funciones:

- a) gobierna la fuente de carga;
- b) sensa el voltaje de carga del banco; y
- c) activa el tiristor de descarga **Th**.

La señal de salida del comparador de voltaje efectúa también las siguientes funciones: a) alimenta al indicador de "Carga Completa" (que se enciende cuando el banco de capacitores queda listo para la descarga); y b) proporciona una señal de entrada a la compuerta "AND". Esta última no enviará señal de salida hacia el circuito de carga a menos que se cumplan las siguientes condiciones:

1. El banco de condensadores ha alcanzado el voltaje de carga, V_0 , preseleccionado por el comparador; y
2. El interruptor S2 "Carga/Descarga", ha sido puesto en la posición "Descarga".

3.5. Sistema de protección

El banco de condensadores cuenta con una resistencia de amortiguamiento, R_a , que permite que la energía almacenada en el banco se disipe a través de ésta en caso necesario, Fig. 1. Esta resistencia está conectada en serie con el interruptor S3, de tal manera que al encender el magnetizador, el relé que gobierna al interruptor es desenergizado, manteniendo así desconectada la resistencia del banco; y al apagarlo, o si se abre el panel posterior, S4, del magnetizador, el relé se activa y conecta la resistencia de amortiguamiento, en serie con el banco, disipando toda la energía que pudiese tener almacenada.

TABLA II. Características de la bobina de campo.

Especificación	
Diámetro interior	17 mm
Diámetro exterior	32 mm
Longitud	82 mm
Sección transversal del alambre	3.5 mm × 4.12 mm
Espesor de la película aislante del alambre	0.12 mm
Número de vueltas	38
Número de capas	2
Homogeneidad a lo largo de 10 mm.	1.0 %
Corriente máxima	≈ 17KA
Campo máximo	9.22 T
Inductancia	6.25 μ H
Resistencia de la bobina de campo	7.0 m Ω

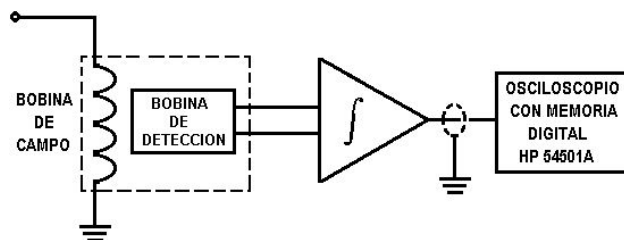


FIGURA 2. Sistema de medición y caracterización del pulso de campo; la fem generada en la bobina de detección es integrada y registrada en un osciloscopio digital.

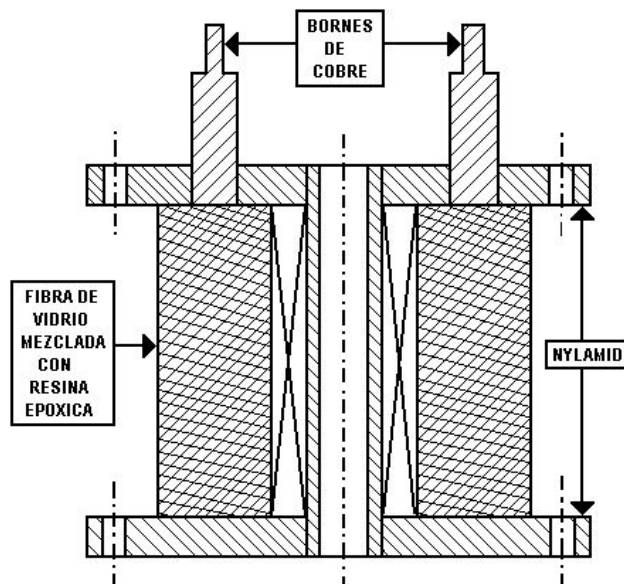


FIGURA 3. Corte longitudinal de la bobina de campo donde se muestran: la geometría del cuerpo, los bornes de cobre y el reforzamiento a base de fibra de vidrio.

3.6. Sistema de medición y caracterización del campo magnético

La parte más sensible en la construcción del magnetizador es el sistema de medición y caracterización del pulso de campo, representado esquemáticamente en la Fig. 2. Para la medición del valor pico del campo se utilizó un gaussmetro marca F. W. Bell, modelo 9903 y una sonda axial Hall cuidadosamente sujeta dentro de un tubo de vidrio y deslizándola a lo largo del eje-z hasta colocarla exactamente en el centro geométrico de la bobina de campo; la precisión en la medición del campo fue del $\pm 3\%$. En la medición de la homogeneidad del campo se utilizó un tubo de vidrio de 1.0 cm de diámetro sobre el cual se construyó una bobina de inducción de 20 vueltas en una sola capa, utilizando alambre barnizado de cobre ($\varnothing = 0.086$ mm). Los extremos del alambre fueron trenzados uniformemente y soldados a un cable coaxial, el cual se conectó a un integrador electrónico. La forma del pulso, su intensidad y duración pueden ser registrados con un osciloscopio digital con memoria; para este fin se utilizó un osciloscopio marca Hewlett Packard de 100 MHz. De esta manera la homogeneidad del campo dentro de la bobina magnetizadora puede verificarse a lo largo del eje-z.

4. Bobina de campo

Para el cálculo óptimo de la bobina magnetizadora se utilizó un programa de cómputo [10]. Los datos iniciales para el cálculo incluyen el diámetro interior deseado, a_1 , y la longitud en la que se desea cierta homogeneidad del campo; típicamente 10 mm. Dado un factor de llenado el valor límite del pico de intensidad del campo, B , en el centro del solenoide, queda completamente determinado por la energía almacenada, U , y las dimensiones de la bobina.

En la Fig. 3 aparece una vista en corte de la estructura de la bobina de campo construida; sus características se dan en la Tabla II.

Para obtener valores del campo muy cercanos al valor límite que se puede generar para un voltaje de carga dado, el factor de amortiguamiento, γ , debe estar comprendido entre los valores 0.05 y 0.07. γ es inversamente proporcional al área de la sección transversal del alambre de cobre, por lo tanto para lograr esta condición es necesario utilizar alambre de gran sección (entre 8-50 mm²).

El diámetro interior del solenoide fue estimado para las dimensiones de las muestras que se desean magnetizar; en nuestro caso como se trata de muestras de laboratorio se escogió $a_1 = 17$ mm.

Una consideración importante en el diseño de la bobina es el siguiente: Puesto que durante la generación del pulso de campo se producen simultáneamente una intensa compresión axial y una intensa expansión radial, derivadas de las fuerzas de Lorentz entre las espiras, cuyo valor se incrementa proporcionalmente con el cuadrado de la intensidad del campo magnético, la bobina fue reforzada mecánicamente con fibra de vidrio impregnada con una resina epóxica. La estructura

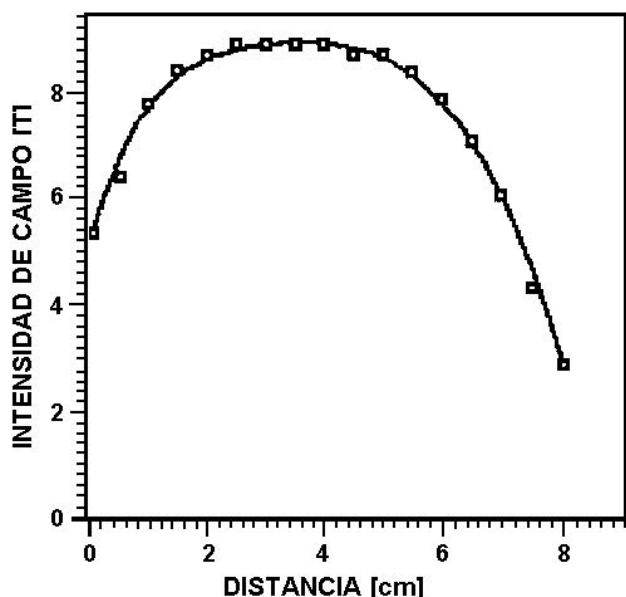


FIGURA 4. Homogeneidad de la bobina de campo; la curva muestra el campo, B , en función de la posición vertical z en el interior de la bobina, para un voltaje de carga $V_0 = 440$ V.

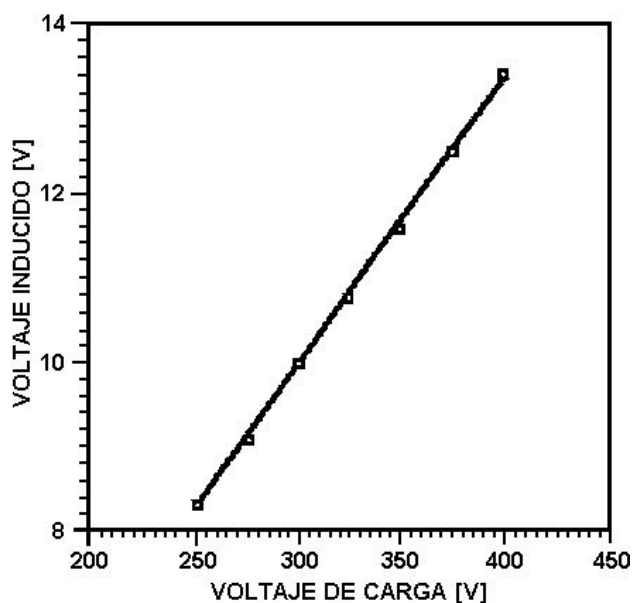


FIGURA 5. Dependencia del voltaje inducido en la bobina de detección, el cual es proporcional a la intensidad de campo, en función del voltaje de carga V_0 .

del cuerpo de la bobina fue diseñada y fabricada a base de *nylamid* para comprimir rígidamente el solenoide y absorber las vibraciones mecánicas que se producen durante la descarga.

5. Funcionamiento del magnetizador

El funcionamiento del magnetizador lo podemos seguir a partir de la misma Fig. 1. Mediante un potenciómetro multivuelta de control de carga se fija el voltaje, V_0 , al cual se desea cargar el banco de condensadores; a la vez, este potencióme-

TABLA III. Características generales del magnetizador de pulsos.

Especificación	
Diámetro interior (bobina de campo)	17 mm
Diámetro exterior (bobina de campo)	32 mm
Longitud (bobina de campo)	82 mm
Sección transversal del alambre	3.5 mm × 4.12 mm
Espesor de la película aislante del alambre	0.12 mm
Número de vueltas (bobina de campo)	38
Número de capas (bobina de campo)	2
Homogeneidad a lo largo de 10 mm.	1.0 %
Corriente máxima	≈ 17 kA
Campo máximo	9.22 T
Inductancia de la bobina de campo	6.25 μH
Resistencia de la bobina de campo	7.0 mΩ
Capacitancia total	23.1 mF
Energía total almacenada	2300 Joules

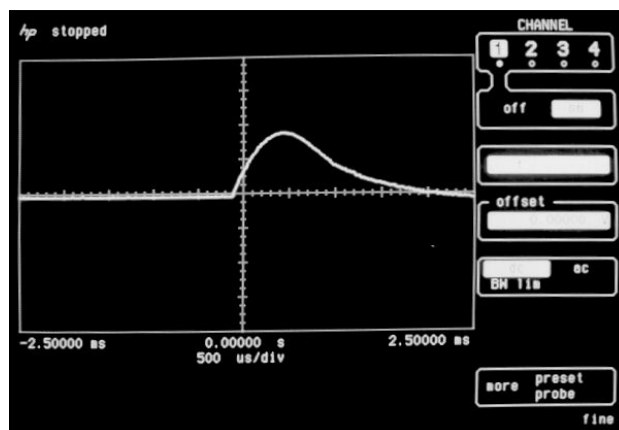


FIGURA 6. Registro del pulso de campo para $V_0^{\max} = 450$ V ($B_{\max} = 9.22$ T). Calibración de los ejes: eje horizontal 0.5 ms/div.; eje vertical 5.0 T/div.

tro proporciona una señal de referencia al comparador de voltaje que constantemente sensa la tensión que alcanza el banco. Cuando se alcanza el valor prefijado (V_0) el circuito de carga queda desconectado. Al accionar el interruptor S2 a la posición “Descarga” se actúa sobre el circuito de disparo, provocando la conducción del tiristor Th , por lo que toda la energía almacenada en el banco se descarga sobre la bobina de campo.

La Fig. 4 muestra la homogeneidad de la bobina de campo en función de la posición z , para el valor del campo, $B \approx 9.0$ T, en el centro; la tensión de carga, V_0 , fue de 440 V C.C. Cabe destacar también que la dependencia del voltaje inducido en la bobina de detección, el cual es proporcional a la intensidad del campo, es lineal con respecto al voltaje de carga del banco de condensadores, Fig. 5.



FIGURA 7. Vista frontal del magnetizador de pulsos.

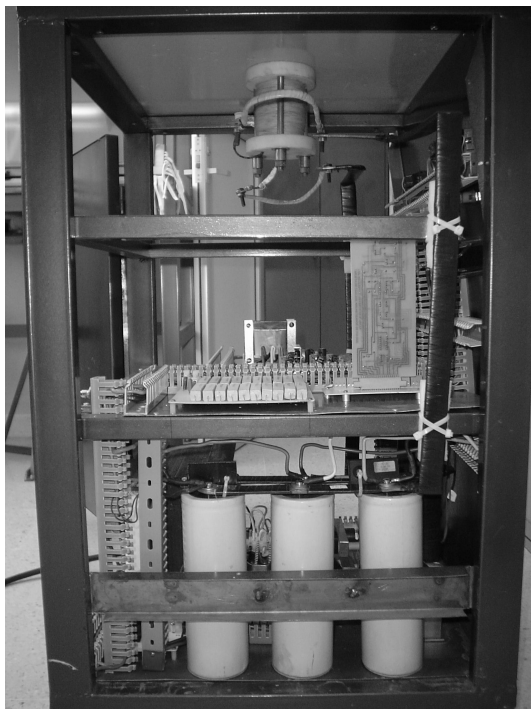


FIGURA 8. Vista lateral del magnetizador de pulsos mostrando la disposición interior de los dispositivos.

En la Fig. 6 se muestra un registro de la forma del pulso de campo generado para $V_0^{\text{máx}}$. De acuerdo a lo discutido en la Sec. 2, el pulso consta de un incremento sinusoidal y un decaimiento exponencial; la duración total de este pulso es de 1.8 ms.

Por último, en la Tabla III se resumen las características generales del magnetizador. En las Figs. 7 y 8 se muestra una vista frontal y lateral respectivamente, pudiéndose apreciar la disposición interior de los dispositivos.

6. Conclusiones

La generación de campos magnéticos pulsados de elevada intensidad mediante el uso de bancos de capacitores resulta altamente eficiente en la transferencia de la energía almacenada, a una carga inductiva. Se llevó a cabo el diseño y construcción de un magnetizador de pulsos, con el cual se pueden generar campos del orden de los 10 T en un volumen útil de 1.0 cm^3 ; y en un intervalo de tiempo menor a los 2.0 ms, lo que permite magnetizar todo tipo de imanes permanentes a escala de laboratorio. Este equipo es fácil de operar, ya que tiene un grado de automatización y dispone de una serie de funciones que lo hacen versátil y confiable. La caracterización del pulso de campo que genera y la homogeneidad de la bobina magnetizadora pueden ser monitoreados a través de una bobina de inducción e integrador electrónico incorporados al sistema. Por otro lado, el equipo fue diseñado para poder incrementar la energía en el banco de condensadores hasta un valor máximo de 3100 J, lo cual puede ser soportado por la bobina de campo; esto nos permitirá generar pulsos de campo superiores a los 10 T.

Finalmente, este magnetizador constituye la base para el desarrollo y construcción de un magnetómetro de pulsos [9], con el que se podrán obtener ciclos de histéresis, campo de anisotropía y la investigación de otras propiedades de materiales magnéticos altamente anisotrópicos; como en el caso de las aleaciones magnéticas intermetálicas base TR-MT-B (TR: tierras raras como el Nd, Pr, Sm, etc., MT: metales de transición como el Fe, Ni, Co, etc.).

Agradecimientos

El presente trabajo se desarrolló en el marco del Convenio de Colaboración Científica entre el Instituto de Física de la UASLP y el Laboratorio de Magnetismo de la Universidad de la Habana, Cuba. Los autores agradecen a José Angel De La Cruz Mendoza y a Enrique Martínez Hernández por su valiosa colaboración durante la construcción del equipo. Este trabajo fue financiado parcialmente por el CONACYT, la SEP y el IF-UASLP.

1. T. Mishima, *Ohm* **19** (1932) 353.
2. J.J. Went, G.W. Rathenau, E.W. Gorter y G.W. von Osterhaut, *Philips Tech. Rev.* **13** (1952) 194.
3. K. Starnat, G. Hoffer, J. Olson, W. Ostertag y J.J. Becker, *J. Appl. Phys.* **38** (1967) 1001.
4. J.J. Croat, J.F. Herbst, R.W. Lee y F.E. Pinkerton, *Appl. Phys. Lett.* **44** (1984) 148.
5. Technical articles and application notes, *LDJ Electronics Inc.* (1990).
6. J.E. Crow, D.M. Parkin y N.S. Sullivan, *MRS Bulletin* (August 1993) p. 17.
7. R.M. Bozorth, *Ferromagnetism* (D. Van Nostrand Company, Inc., Princeton, NJ, USA, 1951).
8. R. Grössinger *et al.*, *IEEE Transactions on Magnetics* **24** (1988) 970.
9. J.L. Sánchez-Llamazares, J.C. Téllez-Blanco y N. Suárez-Almodóvar, "High pulsed magnetic field measurements at the University of La Habana", Proceedings of the II Latin American Workshop on Magnetism, Magnetic Materials and their Applications, Guanajuato, México, August 24–27, 1993. Edited by J.L. Morán López y J. M. Sánchez, *Plenum, Press*, New York, USA (1994).
10. Ferdinand Koskarti, "Numerische Optimierung von Pulsspulen zur Erzeugung hoher Magnetfelder", Diplomarbeit, *Technische Universität Wien* (Austria 1991).