

CARACTERIZACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN ELECTROIMÁN SEGÚN
WEISS PARA LA MEDIDA DE LA MAGNETORRESISTENCIA EN MANGANITAS
LSMO

GERMAN DARIO OBANDO BRAVO
LUIS CARLOS TORRES NUPAN

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PASTO
2008

CARACTERIZACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN ELECTROIMÁN SEGÚN
WEISS PARA LA MEDIDA DE LA MAGNETORRESISTENCIA EN MANGANITAS
LSMO

GERMAN DARIO OBANDO BRAVO
LUIS CARLOS TORRES NUPAN

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero Electrónico

Director
M. Sc. Omar Paredes Chamorro

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PASTO
2008

RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el proyecto de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”.

Artículo Primero del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, 24 de Abril de 2008

El primer autor:

“Dedicado a mi madre, por su inmenso amor y su apoyo incondicional”

El segundo autor:

“Dedicado a mis padres Martha y Leonardo por su amor, apoyo y comprensión a lo largo de mi vida”

AGRADECIMIENTOS

A Dios por hacer que todo esto sea posible.

A la Universidad de Nariño por brindarnos las herramientas suficientes para llevar este proyecto a feliz termino.

Sinceros agradecimientos al profesor Omar Paredes por el apoyo, la infinita motivación y los conocimientos brindados durante el planteamiento y desarrollo del trabajo.

Agradecemos especialmente al profesor Carlos Córdoba y a Jenny Mera, por toda su ayuda durante la experimentación en el laboratorio y por estar siempre pendientes de nuestra investigación.

Finalmente a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. GENERALIDADES DEL SISTEMA	25
2. SUBSISTEMA DE GENERACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO	28
2.1 ELECTROIMAN SEGÚN WEISS	28
2.1.1 Características físicas	29
2.1.2 Condiciones en el límite entre dos materiales magnéticos	29
2.1.3 Calculo teórico del campo generado por el electroimán según Weiss en el entrehierro	33
2.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	34
2.2.1 Efecto Joule	34
2.2.2 Configuración del sistema de refrigeración	35
2.3 FUENTE DE PODER HEWLETT PACKARD 6675A	36
2.3.1 Características de la fuente de voltaje	36
2.4 DISPOSITIVO CONMUTADOR DE VOLTAJE	37
2.4.1 Circuito lógico de control	38
2.4.2 Circuito de conmutación de potencia	39
2.5 CONTROLADOR DEL SUBSISTEMA DE GENERACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO	39
2.5.1 Características del ordenador	39
2.5.2 LabVIEW	40
2.5.3 Especificaciones del controlador	42

2.6 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN CON EL CONTROLADOR	45
2.6.1 Estructura del bus GPIB	46
2.6.2 Control de comunicación a través del puerto GPIB	47
3. MAGNETORRESISTENCIA	48
3.1 MAGNETORRESISTENCIA COLOSAL	51
3.2 MANGANITAS LSMO	53
3.3 APLICACIONES DE LA MAGNETORRESISTENCIA EN NUEVAS TECNOLOGÍAS	54
4. SUBSISTEMA DE MEDICIÓN DE LA MAGNETORRESISTENCIA	58
4.1 TÉCNICA DE LAS CUATRO PUNTAS	58
4.2 SONDA DE RESISTIVIDAD	62
4.3 FUENTE DE PODER TEKTRONIX PS2520G	63
4.4 MULTÍMETRO FLUKE 45	64
4.5 CONTROLADOR DEL SUBSISTEMA DE MEDICIÓN DE LA MAGNETORRESISTENCIA	64
4.5.1 Especificaciones del controlador	65
5. DETALLES EXPERIMENTALES	68
5.1 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL ELECTROIMÁN SEGÚN WEISS	68
5.1.1 Sensor A1302	68
5.1.2 Sensor UGN3503UA	68
5.2 APLICACIÓN DEL SISTEMA EN LA MEDIDA DE LA MAGNETORRESISTENCIA EN MANGANITAS LSMO	69
5.2.1 Preparación de las muestras de manganita LSMO	69
5.2.2 Medición de la resistividad eléctrica mediante el método de las cuatro puntas	72

5.2.3 Medición de la magnetorresistencia	77
6. RESULTADOS OBTENIDOS	78
6.1 MEDICIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE APLICADA EN EL ELECTROIMÁN	78
6.1.1 Medición con el sensor A1302	78
6.1.2 Medición con el sensor UGN3503UA	81
6.1.3 Correlación de los resultados obtenidos con la caracterización teórica del electroimán de Weiss	82
6.2 SOFTWARE DE CONTROL DEL SISTEMA DESARROLLADO	89
6.2.1 Interfaz de usuario del controlador para el subsistema de generación de campo magnético	89
6.2.2 Protocolo para el manejo del programa de control del electroimán según Weiss	92 95
6.2.3 Interfaz de usuario del controlador para el subsistema de medición de la magnetorresistencia	
6.2.4 Protocolo para el manejo del programa de medida de la magnetorresistencia	98
6.3 DEMAGNETIZACIÓN DEL ELECTROIMÁN	100
6.3.1 Imanación del núcleo	100
6.3.2 Proceso de demagnetización	101
6.3.3 Implementación del software de demagnetización	102
6.3.4 Validación experimental del algoritmo de demagnetización	103
6.4 MAGNETORRESISTENCIA	106
6.4.1 Resistividad eléctrica de las manganitas LSMO	106
6.4.2 Magnetorresistencia de las manganitas LSMO	107
7. CONCLUSIONES	110
8. RECOMENDACIONES	112

BIBLIOGRAFIA

113

ANEXOS

116

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Valor numérico y simbólico de cada valor de bit en status	47
Cuadro 2. Comparación entre la electrónica convencional y la magnetoelectrónica	55
Cuadro 3. Resultados y errores	88
Cuadro 4. Direcciones del bus GPIB asignadas a cada dispositivo del sistema.	93
Cuadro 5. Medidas de verificación del algoritmo de demagnetización usando el sensor A1302	105

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Elementos que conforman el sistema general	26
Figura 2. Diagrama de bloques del sistema completo	27
Figura 3. Superficie cilíndrica imaginaria entre 2 materiales magnéticos	30
Figura 4. Contorno rectangular imaginario entre 2 materiales magnéticos	31
Figura 5. Comportamiento de las líneas B al cruzar el límite de separación entre dos materiales magnéticos	32
Figura 6. Condensación de las líneas de inducción magnética en un material de mayor permitividad	32
Figura 7. Esquema del electroimán según Weiss	33
Figura 8. Fuente de poder Hewlett Packard 6675A	36
Figura 9. Diagrama de bloques del dispositivo conmutador de voltaje	38
Figura 10. Diagrama del circuito lógico de control	39
Figura 11. Circuito de conmutación de potencia	39
Figura 12. Diagrama de bloques del controlador del subsistema de generación de campo magnético	44
Figura 13. Interconexión de Equipos mediante el bus GPIB	46
Figura 14. Fenómeno de GMR. (a) Estructura multicapa sometida a un campo magnético externo y (b) sin aplicarle campo magnético.	50
Figura 15. Magnetorresistencia colosal	51
Figura 16. Estructura molecular de una manganita LSMO	53
Figura 17. Principio de operación de una cabeza lectora magnetorresistiva	55

Figura 18. Configuración geométrica para la implementación de la técnica de las cuatro puntas	59
Figura 19. Una muestra de un plano semi-infinito con cuatro contactos a lo largo de su frontera	60
Figura 20. Esquema de la sonda de resistividad	62
Figura 21. Fuente Tektronix PS2520G	63
Figura 22. Multímetro FLUKE 45	64
Figura 23. Diagrama de bloques del controlador del subsistema de medición de la magnetorresistencia	67
Figura 24. Difractograma de rayos X para la manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$	69
Figura 25. Diagrama de fases para el compuesto $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$	70
Figura 26. Fotografía de una muestra de manganita LSMO.	71
Figura 27. Mufla Lindberg/Blue M utilizada en el proceso de sinterización de las muestras	71
Figura 28. Muestra de manganita ubicada en la sonda de resistividad	72
Figura 29. Mecanismo diseñado para aplicar el método de presión	73
Figura 30. Curva V-I para la manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ obtenida con el método de pintura de plata	74
Figura 31. Curva resistencia-tiempo para una muestra de pintura de plata de referencia <i>electronic conductive tinture super star</i> y una corriente de 150 mA	75
Figura 32. Esquema del sistema de medición de la magnetorresistencia	77
Figura 33. Respuesta en voltaje del sensor A1302 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss	78
Figura 34. Respuesta en voltaje del sensor A1301 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss, con una longitud del entrehierro igual a 0.053m	79
Figura 35. Respuesta en voltaje del sensor A1301 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss, con una longitud del entrehierro igual a 0.043m	79

Figura 36. Respuesta en voltaje del sensor A1301 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss, con una longitud del entrehierro igual a 0.033m	80
Figura 37. Respuesta en voltaje del sensor A1301 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss, con una longitud del entrehierro igual a 0.023m	80
Figura 38. Respuesta en voltaje del sensor A1301 Vs. Longitud del entrehierro, con una corriente aplicada al electroimán de 0.9962A	81
Figura 39. Respuesta en voltaje del sensor UGN3503UA Vs. Corriente aplicada al electroimán según Weiss, con un entrehierro de longitud igual a 0.093m	82
Figura 40. Respuesta en voltaje del sensor UGN3503UA Vs. Corriente aplicada al electroimán según Weiss, con un entrehierro de longitud igual a 0.093m	82
Figura 41. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.093m	83
Figura 42. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.08m	84
Figura 43. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.07m	84
Figura 44. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.06m	85
Figura 45. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.05m	85
Figura 46. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.04m	86
Figura 47. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.03m	86
Figura 48. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.02m	87
Figura 49. Campo magnético teórico y medido Vs. Distancia entre los polos, con una corriente aplicada al electroimán de 1A	88
Figura 50. Campo magnético teórico y medido Vs. Distancia entre los polos, con una corriente aplicada al electroimán de 1A	89

Figura 51. Pantalla del controlador para el subsistema de generación de campo magnético	90
Figura 52. Conexiones del panel frontal del dispositivo conmutador de voltaje	92
Figura 53. Ventana de diálogo correspondiente a un error en la fuente HP6675A	93
Figura 54. Ventanas de diálogo correspondientes a un error en (a) el multímetro FLUKE 45 o (b) la fuente Tektronix PS2520G	94
Figura 55. Ventana de diálogo para especificar la distancia entre los polos del electroimán según Weiss	94
Figura 56. Panel de control programa de medición de la magnetorresistencia	96
Figura 57. Cuadro de dialogo para el almacenamiento de datos obtenidos en la medición de la magnetorresistencia	98
Figura 58. Montaje de la sonda de resistividad	99
Figura 59. Panel de conexiones para la medida de la magnetorresistencia	99
Figura 60. Curva de histéresis para un material ferromagnético	101
Figura 61. Curva representativa del algoritmo de demagnetización	102
Figura 62. Interfaz para el software de demagnetización	103
Figura 63. Curva Campo magnético Vs Corriente aplicada al electroimán al realizar un barrido ascendente – descendente	104
Figura 64. Curva Campo magnético Vs Corriente aplicada al electroimán antes y después de aplicar el proceso de demagnetización	105
Figura 65. Gráfica V-I para la muestra de manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ a temperatura ambiente	106
Figura 66. Curvas Resistencia-Campo Magnético para diferentes corrientes suministradas a la muestra de $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ a temperatura ambiente	107
Figura 67. Curva Resistencia-Campo Magnético del $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ para una corriente suministrada a la muestra de 150 mA a temperatura ambiente	108
Figura 68. Curva magnetorresistiva para el compuesto $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ a temperatura ambiente	109

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. SubVI “GPIB Error Report.vi”. (a) Interfaz de usuario, (b) diagrama de bloques y (c) Cuadro de errores GPIB que el programa puede detectar con su descripción	117
Anexo B. Interfaz de usuario para el software de medición de la resistencia eléctrica	120
Anexo C. Modificación de la función de calibración para el electroimán según Weiss	121
Anexo D. Configuración de las direcciones GPIB para los dispositivos que intervienen en el sistema	123
Anexo E. SubVI para el almacenamiento de datos en un archivo plano. (a) Diagrama de bloques de inicialización de escritura del archivo y (b) diagrama de bloques de escritura en un archivo de texto	124
Anexo F. Subrutina de envío de datos a la fuente Tektronix PS2520G “GPIBTEK.vi”. Diagrama de bloques	125
Anexo G. Subrutina de envío de datos a la fuente HP 6675A “GPIB.vi”. Diagrama de bloques	126
Anexo H. Hoja de características del sensor UGN3503UA de Allegro Microsystems	127
Anexo I. Hoja de características del sensor A1302 de Allegro Microsystems	129
Anexo J. Lista de códigos SCPI utilizados para controlar la fuente HP 6675A, la fuente Tektronix PS2520G y el multímetro FLUKE 45	136

GLOSARIO

ANTIFERROMAGNETISMO: es el ordenamiento de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección pero en sentido inverso (por pares, por ejemplo, o una subred frente a otra). La interacción antiferromagnética es la interacción magnética que hace que los momentos magnéticos tiendan a disponerse en la misma dirección y en sentido inverso, cancelándose si tienen el mismo valor absoluto, o reduciéndolos si son distintos.

BOBINAS DE HELMHOLTZ: arreglo coaxial o paralelo de bobinas con igual número de espiras cuya separación es equivalente a su radio, este arreglo tiene la propiedad de generar un campo magnético casi completamente uniforme en medio de dichas bobinas.

CAMPO MAGNÉTICO: región del espacio donde se ponen de manifiesto los fenómenos magnéticos. Se representa por el vector B , inducción magnética.

CIRCUITO ELÉCTRICO: interconexión de elementos eléctricos unidos entre sí en una trayectoria cerrada de forma que pueda fluir continuamente una corriente eléctrica.

COERCITIVIDAD: la coercitividad H_c define la intensidad del campo magnético que es necesaria para volver a demagnetizar completamente un imán.

DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X: registro gráfico obtenido a partir del método de difracción de rayos X. Esta técnica se utiliza para obtener información cuantitativa de las propiedades de los materiales tales como la estructura cristalina, fases existentes, posiciones atómicas, entre otras.

DIPOLO MAGNÉTICO: es una aproximación que se hace al campo generado por un circuito circular de corriente eléctrica cuando la distancia al circuito es mucho mayor a las dimensiones del mismo.

EFECTO JAHN-TELLER: el teorema de Jahn-Teller establece que si un ion magnético está en un punto de un cristal de alta simetría de tal forma que su estado fundamental es degenerado, entonces será energéticamente más favorable para el cristal distorsionarse (la posición de equilibrio del ion se desplaza) disminuyendo la simetría de tal manera que se levanta la degeneración.

ELECTROIMÁN: es un tipo de imán en el que el campo magnético se produce mediante el flujo de una corriente eléctrica, desapareciendo en cuanto cesa dicha corriente.

ERROR RELATIVO: es el cociente entre el error absoluto y el valor de la medida; es un número adimensional y se suele expresar en tanto por ciento. Una medida es tanto más precisa cuanto menor sea su error relativo.

FERROMAGNETISMO: propiedad de algunos materiales que hace que resulten intensamente imantados cuando se sitúan en un campo magnético, y conserven parte de su imantación cuando desaparece dicho campo.

GPIB: la norma estándar ANSI/IEEE 488 también conocida como General Purpose Interface Bus (Bus de Interfaz de Propósito General), describe una interface para comunicaciones entre instrumentos y controladores de varios fabricantes. Contiene información sobre las especificaciones eléctricas, mecánicas y funcionales.

LINEALIDAD: cercanía de la curva de respuesta típica de un instrumento o dispositivo a una línea recta.

MAGNETOELECTRÓNICA: también conocida como espintrónica. Es una tecnología emergente que explota tanto la carga del electrón como su espín. Actualmente su principal aplicación es el almacenamiento de información de alta densidad.

MAGNETORRESISTENCIA: hace referencia a la propiedad de ciertos materiales de variar su resistencia eléctrica al ser sometidos a un campo magnético externo.

MANGANITA: se denomina manganita a la familia de perovskitas que contienen manganeso como su principal componente.

MÉTODO DE SOL-GEL: proceso químico utilizado para la sintetización de materiales.

NANOTECNOLOGÍA: campo de las ciencias aplicadas dedicado al control y manipulación de la materia a escalas no mayores a 100 nanómetros (10^{-9} m); es decir, a un nivel prácticamente molecular o atómico (10^{-10} m).

OERSTED: unidad de medida de intensidad de campo magnético que no pertenece al sistema internacional *SI*. De símbolo *Oe*. $1 \text{ Oe} = 10^3 \text{ A.m}^{-1}$.

PERMITIVIDAD (μ): capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través suyo los campos magnéticos; está dada por la relación entre la densidad de flujo magnético (*B*) y la intensidad de campo magnético existente (*H*).

PEROVSKITAS: denominación que se le da a un grupo de cristales cuya estructura atómica es ortorrómbica. Su fórmula química básica sigue el patrón ABO_3 , donde A y B son cationes de tamaños diferentes.

PROTOCOLO DE MANEJO: plan escrito y detallado de un experimento científico.

RESISTENCIA ELÉCTRICA: se denomina resistencia eléctrica de una sustancia a la oposición que encuentra la corriente eléctrica durante su recorrido a través de ésta.

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA: magnitud característica que mide la capacidad de un material para oponerse al flujo de una corriente eléctrica. También recibe el nombre de resistencia específica. Es la inversa de la conductividad eléctrica, σ . La resistividad se representa por ρ y se mide en ohmio·metro.

SENSOR: dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal.

ESPÍN: momento angular intrínseco de las partículas subatómicas. El espín es una propiedad fundamental de todas las partículas elementales, de la misma forma como lo son su masa o su carga. El momento magnético de espín tiene un origen cuántico y no existe una interpretación clásica, sin embargo suele asociarse con el giro de las partículas sobre su propio eje.

TEMPERATURA DE CURIE: temperatura por encima de la cual un cuerpo ferromagnético pierde su magnetismo, comportándose como un material puramente paramagnético.

RESUMEN

En este proyecto se implementó un sistema de generación de campo magnético utilizando un electroimán según Weiss, cuyo campo magnético está relacionado con la corriente con la cual se alimenta y la longitud del entrehierro entre sus polos. Una fuente de corriente Hewlett Packard de la serie 6675A se encarga de suministrar la energía para el funcionamiento del electroimán. Para el manejo del sistema se implementó un programa desarrollado en LabVIEW 6.1 encargado de controlar la corriente suministrada al electroimán por la fuente de poder. Este programa cuenta además con unas rutinas de manejo que automatizan el proceso de generación de campo, y que se pueden ajustar fácilmente de acuerdo a la necesidad del usuario.

Para comprobar la funcionalidad del sistema implementado se realizó un modelo teórico del comportamiento del campo magnético generado por el electroimán, para su posterior análisis experimental a través de medidas utilizando sensores de efecto Hall.

El sistema de generación de campo magnético se aplicó a la medida de la magnetorresistencia en manganitas LSMO. Para medir la magnetorresistencia se implementó un montaje basado en la técnica de las cuatro puntas, suministrando un valor de corriente constante al material a través de una fuente auxiliar, y midiendo el voltaje generado por la muestra utilizando un multímetro. Mediante un programa de control se almacenó los datos de voltaje, corriente y campo magnético generado, procesándose posteriormente, permitiendo una visualización de los mismos al usuario.

Palabras clave: campo magnético, electroimán, magnetorresistencia, manganitas LSMO

ABSTRACT

A system of generation of magnetic field was implemented in this project using an electromagnet according to Weiss. Theoretical calculation to know the field that generate the instrument and its properties was realized. Hewlett Packard source of the series 6675A is charge of giving the energy for the operation of the electromagnet. A device switch charge of changing the polarity of the voltage given by the source was also implemented, for the control of the current source and the device switch was elaborate a program charge of routines of handling of the instruments according to the necessities requested by the user, automating the process of generating a field magnetic uniform of variable magnitude until the value of a Tesla, also the program realize a change in two ways.

The system of generation of magnetic field was applied to the magnetoresistance measure in manganites LSMO. To measure magnetoresistance was implemented an assembly based on the technique of the four points, giving a value of constant current using an auxiliary source, and measuring the voltage generated by the sample, by means of a control program stores the voltage, current and generated magnetic field data, were stored, being processed later, allowing a visualization from the same ones to the user.

INTRODUCCIÓN

En 1959 el físico norteamericano Richard Feynman con su conferencia titulada “There is a plenty of room at the bottom” (“hay mucho espacio en el fondo”) marcó el antecedente clave para el desarrollo de lo que posteriormente se conocería como nanotecnología. Feynman planteó su convencimiento de que era técnicamente factible y útil fabricar dispositivos a escala molecular, lanzando así un desafío tecnológico para concretar su pensamiento en la práctica.

En menos de 50 años el diseño y fabricación de estructuras nanométricas se ha extendido a multitud de objetos y la electrónica ha jugado un papel fundamental para posibilitar la ejecución de dichos avances, no solo a nivel de fabricación de los nuevos nano-dispositivos sino también facilitando la construcción de equipos necesarios en la investigación de los elementos que se van a utilizar como materia prima.

Actualmente uno de los ejes principales dentro de la nanotecnología es la llamada electrónica del espín o espintrónica. Contrariamente a la electrónica clásica, donde solo la carga de los portadores es aprovechada, en la espintrónica dos componentes, carga y espín de portadores estrechamente relacionados entre sí, son utilizados simultáneamente para obtener dispositivos con nuevas funcionalidades. El fenómeno de la magnetorresistencia es un ejemplo exitoso dentro de esta temática: apenas diez años separan el descubrimiento del fenómeno de su aplicación generalizada en los cabezales de lectura de los discos magnéticos ampliamente comercializados en la actualidad. Tal ha sido el auge de los componentes magnetorresistivos que en 2007, los pioneros en su investigación Albert Fert y Peter Grünberg recibieron el premio Nobel de Física.

Es así como hoy en día muchas de las investigaciones realizadas a nivel mundial están enfocadas a la obtención de nuevos y mejores materiales magnetorresistivos, para esto es indispensable contar con equipos que permitan llevar a cabo una caracterización eléctrica y magnética eficiente de dichos materiales.

En el presente trabajo de investigación se expone el diseño, desarrollo e implementación de un sistema que permite la generación de campos magnéticos controlados a partir de la automatización de un electroimán según Weiss. Además se lleva a cabo una aplicación del sistema obtenido en la medición de la magnetorresistencia en manganitas LSMO fabricadas por el Grupo de Investigación en Materiales Cerámicos de la Universidad de Nariño.

El documento inicia con una breve descripción del sistema general (capítulo 1), posteriormente se explican detalladamente tanto el sistema de generación de campo magnético (capítulo 2) como la aplicación de éste en la automatización de la medida de la magnetorresistencia (capítulos 3 y 4), así mismo se describe el proceso experimental que se llevó a cabo y los resultados obtenidos, incluyendo la implementación del controlador a través de software desarrollado bajo la plataforma labVIEW 6.1. Finalmente se presentan

las correspondientes conclusiones y recomendaciones que surgen durante la ejecución y culminación del proyecto.

Es importante resaltar la importancia del sistema descrito en el presente trabajo, pues se constituye en un precedente que permite dar inicio al desarrollo de la investigación experimental en el campo de las propiedades magnéticas de los materiales, dentro de la Universidad de Nariño y más específicamente en el Centro de Investigación en Materiales CIMA de ésta institución.

1. GENERALIDADES DEL SISTEMA

El propósito del sistema desarrollado es facilitar la investigación de fenómenos que involucren la presencia de campos magnéticos de magnitud considerable, a través de la práctica experimental. Es decir, el sistema será utilizado para evaluar el comportamiento de materiales determinados ante la presencia de un campo magnético externo.

Para esto, es necesario diseñar y construir un sistema capaz de generar un campo magnético controlado, dicho campo debe cumplir las siguientes características:

- Que varíe en un amplio rango de valores
- Que sea constante y uniforme; esto es, que conserve su magnitud y dirección no solo en un punto sino en un espacio determinado (espacio de experimentación o trabajo).
- Que pueda alcanzar una intensidad considerable (de alrededor de un Tesla).

Por las características que se impusieron anteriormente al campo magnético generado se utilizará una configuración conocida como electroimán según Weiss para originarlo, éste es un dispositivo capaz de producir un campo magnético uniforme cuya intensidad es proporcional a la magnitud de la corriente con la cual se esté alimentando.

Por lo tanto, el control del campo generado se hará mediante la corriente suministrada al electroimán, ésta corriente será entregada por una fuente de poder Hewlett Packard 6675A, la cual presenta una interfaz de comunicación GPIB para su manejo mediante ordenador.

Establecido ya un control de campo magnético se procede a implementar un subsistema para la medición de magnetorresistencia en muestras de materiales sintetizados en el Centro de Investigación en Materiales de la Universidad de Nariño (CIMA), en el caso particular al que se refiere este documento dichas muestras serán específicamente perovskitas del tipo LSMO.

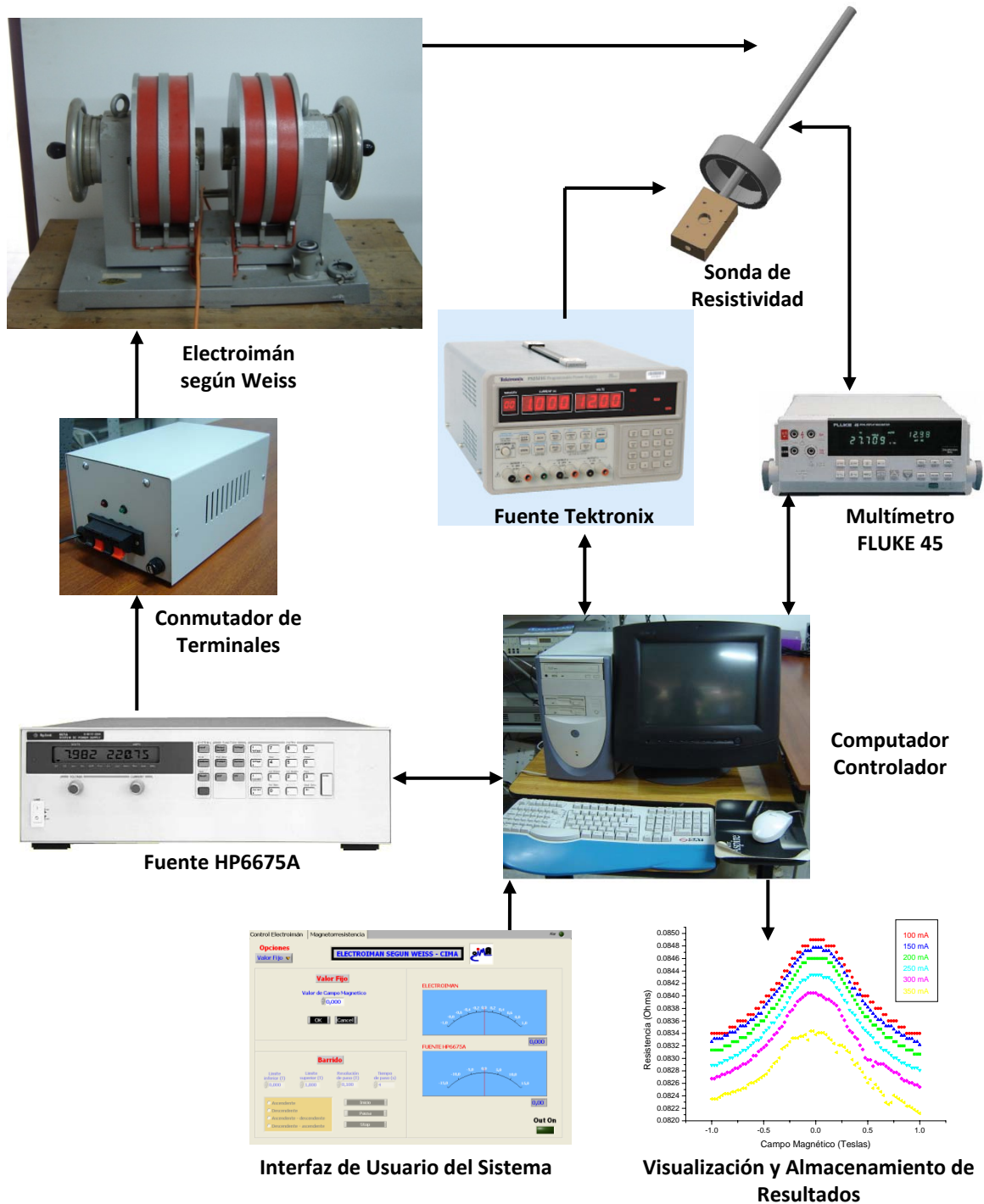
Para garantizar la efectividad y eficacia del subsistema de medida de magnetorresistencia, se requiere la automatización del método de las cuatro puntas mientras la muestra estudiada se encuentra inmersa en una sonda específicamente diseñada para tal fin, la cual se somete al campo magnético controlado.

Finalmente se implementa un programa de control que se encargará de gobernar tanto el subsistema de generación de campo como el subsistema de medición de la magnetorresistencia, además éste programa será provisto con una interfaz de usuario que a parte de ser amigable, deberá ajustarse a los requerimientos que involucra la labor investigativa.

El sistema completo será por tanto capaz de generar resultados experimentales que muestren el comportamiento magnetorresistivo de distintas muestras de materiales al ser sometidas a un campo magnético variable y controlado por el usuario.

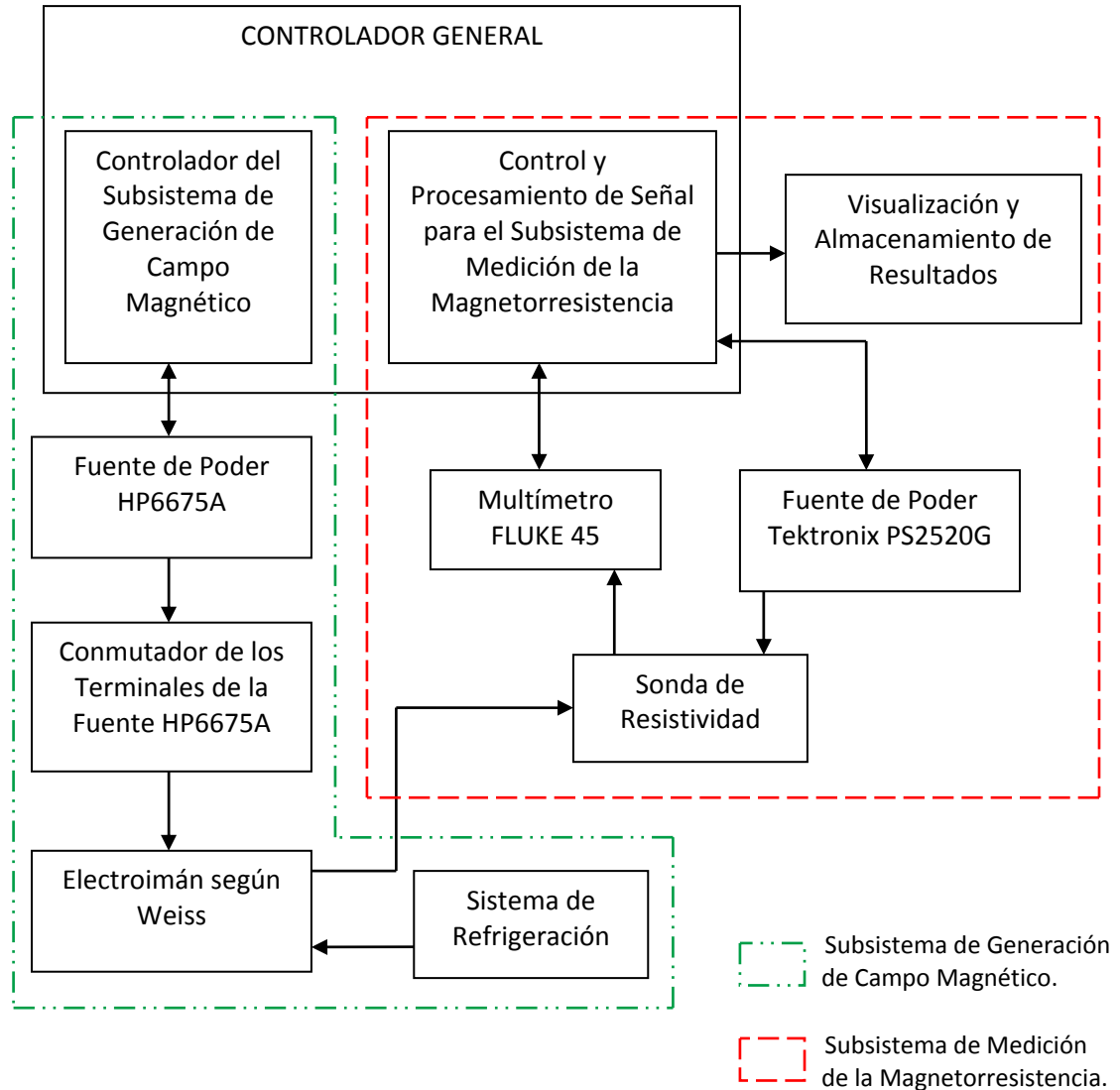
Los elementos que involucra el sistema se muestran en la siguiente figura.

Figura 1. Elementos que conforman el sistema general



El diagrama de bloques del sistema descrito es el siguiente.

Figura 2. Diagrama de bloques del sistema completo



En el diagrama de bloques se puede observar claramente la presencia de dos subsistemas principales que son: el de generación de campo magnético y el de medición de magnetorresistencia, dichos subsistemas se tratarán a continuación.

2. SUBSISTEMA DE GENERACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO

Su función es producir y controlar el campo magnético requerido por el usuario, consta de las siguientes partes:

Electroimán según Weiss: es el dispositivo encargado de generar el campo magnético requerido que se controla mediante la corriente con la cual se esté alimentando. Necesita un sistema de refrigeración constante puesto que cuando está trabajando a su máxima capacidad puede genera gran cantidad de calor.

Sistema de refrigeración: el sistema de refrigeración provee al electroimán de Weiss un flujo constante de agua a una tasa preestablecida recomendada por el fabricante.

Fuente de poder Hewlett Packard 6675A: la fuente de poder de referencia HP 6675A de Agilent Technologies es la que suministra al electroimán según Weiss la corriente necesaria para su funcionamiento. Esta fuente puede controlarse mediante computador puesto que posee una tarjeta hardware de conexión al bus GPIB. Además es capaz de manejar potencias de hasta 2 KW, necesarias debido a los requerimientos del equipo al cual provee la alimentación.

Dispositivo conmutador de voltaje: este mecanismo es capaz de invertir la polaridad de los terminales de alimentación que van desde la fuente de poder hacia el electroimán. Se hizo necesaria su implementación para aumentar el rango de posibles valores de campo magnético generado puesto que la fuente Hewlett Packard 6675A solo puede suministrar corriente en una dirección (corriente en sentido positivo). Al conmutar los terminales y por tanto invertir su polaridad, es posible duplicar la cantidad de valores de campo magnético debido a que la dirección de la corriente determina también la dirección del campo. De ésta forma se tiene no solo un control de magnitud de campo magnético sino también un control de dirección del mismo.

Controlador del subsistema de generación de campo magnético: el control se realiza mediante un programa desarrollado sobre la plataforma LabVIEW 6.1, el cual se encuentra implementado en un computador de escritorio que soporta el estándar de comunicación IEEE 488 para el flujo de datos desde y hacia la fuente de poder Hewlett Packard 6675A. Cuenta con la interfaz final de usuario.

2.1 ELECTROIMAN SEGÚN WEISS

El electroimán según Weiss es un dispositivo diseñado para generar campos magnéticos de magnitud uniforme en un área determinada y de alto valor. En este proyecto el electroimán se encarga de generar el campo magnético de acuerdo a los requerimientos solicitados en el programa de control. Es necesario tener en cuenta algunos aspectos de este dispositivo.

2.1.1 Características físicas.

- El electroimán según Weiss esta constituido por dos bobinas emplazas en núcleos polares cilíndricos horizontales, las cuales se cierran sobre un núcleo de hierro en “U” formando un circuito magnético.
- El entrehierro de los núcleos polares tiene un valor de 93mm, y se puede variar por medio de dos ruedas accionadas a mano, una rotación equivale a un avance horizontal de 5mm, la precisión del equipo es de 0.05mm.
- Requiere un suministro de caudal de $0.5\text{m}^3/\text{hr}$ de agua para su refrigeración esto con el fin de lograr un funcionamiento permanente del equipo.
- Tensión máxima de funcionamiento 120VDC.
- Máxima corriente de absorción 18A.
- Numero total de espiras 2582.
- Resistencia de las bobinas 7Ω .
- Diámetro del núcleo polar 100mm.
- Dimensiones 695mm*410mm*500mm.
- Peso 250Kg.

2.1.2 Condiciones en el límite entre dos materiales magnéticos¹. El campo generado por el electroimán según Weiss realiza un recorrido constituido en su mayor parte por un material de alta permitividad, el espacio sobrante lo hace a través del aire que tiene una permitividad mucho menor, es necesario entonces realizar una descripción breve acerca de las condiciones del límite entre dos materiales y como influye en el campo magnético generado por las bobinas del electroimán.

En las proximidades de la superficie de separación de dos materiales magnéticos, los vectores \mathbf{B} y \mathbf{H} deben satisfacer determinadas condiciones de frontera que se infieren de las relaciones

$$\nabla B = 0 \quad \nabla \times H = j \quad (1)$$

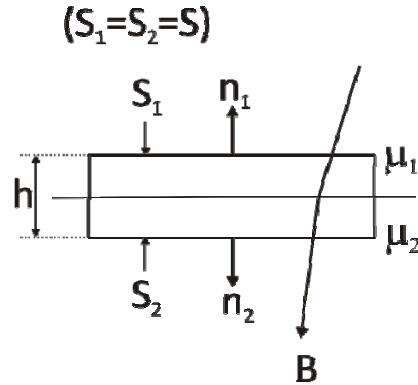
Se considera campos estacionarios, o sea, campos que no varían con el tiempo.

Tomando en el límite entre dos materiales magnéticos, de permeabilidades μ_1 y μ_2 , una superficie cilíndrica imaginaria de altura h y bases S_1 y S_2 situadas por ambos lados de la superficie de separación (figura 3) El flujo del vector \mathbf{B} a través de esta superficie es

$$\Phi_B = B_{1n}S + B_{2n}S + \langle B_n \rangle S_{lat} \quad (2)$$

¹ SAVELIEV, I. V. Curso de Física General. 3 ed. U.R.S.S.: MIR, 1982.

Figura 3. Superficie cilíndrica imaginaria entre 2 materiales magnéticos



Fuente: SAVELIEV, I. V. Curso de Física General. 3 ed. U.R.S.S.: MIR, 1982.

De acuerdo con $\nabla B = 0$, el flujo del vector \mathbf{B} a través de cualquier superficie cerrada es nulo. Igualando a cero la expresión 2 y haciendo $h \rightarrow 0$, llegamos a la relación

$$B_{1n} = -B_{2n} \quad (3)$$

Si \mathbf{B}_1 y \mathbf{B}_2 se proyectan sobre una misma normal, se obtiene la condición

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (4)$$

De acuerdo con la relación.

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu} \quad (5)$$

Sustituyendo los componentes de \mathbf{B} por los respectivos componentes del vector \mathbf{H} multiplicados por $\mu_0 \mu$, se obtiene.

$$\mu_0 \mu_1 H_{1n} = \mu_0 \mu_2 H_{2n} \quad (6)$$

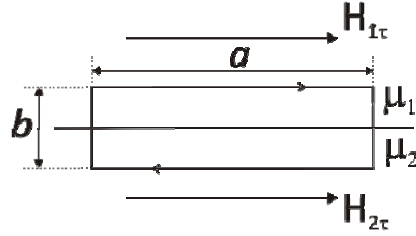
De la que sigue que

$$\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (7)$$

Ahora se toma en el límite entre los materiales magnéticos un contorno rectangular (figura 4) y se calcula para él la circulación \mathbf{H} . Si las dimensiones del contorno son pequeñas, la circulación se puede representar en la forma.

$$\oint H_l dl = H_{1r} a - H_{2r} a + \langle H_l \rangle 2b \quad (8)$$

Figura 4. Contorno rectangular imaginario entre 2 materiales magnéticos



Fuente: SAVELIEV, I. V. Curso de Física General. 3 ed. U.R.S.S.: MIR, 1982.

Donde $\langle H_l \rangle$ es el valor medio de H_l en los trozos de contorno perpendiculares al límite. Si por la superficie de separación no fluyen corrientes, $\nabla \times H$ será nulo dentro de los límites del contorno. Por eso la circulación también será nula. Suponiendo la expresión 8 igual a cero y considerando el paso al límite $b \rightarrow 0$ se llega a la relación.

$$H_{1\tau} = H_{2\tau} \quad (9)$$

Sustituyendo los componentes de H por los respectivos componentes del vector B divididos por $\mu_0\mu$, se obtiene la relación.

$$\frac{B_{1\tau}}{\mu_0\mu_1} = \frac{B_{2\tau}}{\mu_0\mu_2} \quad (10)$$

De lo cual se deduce que:

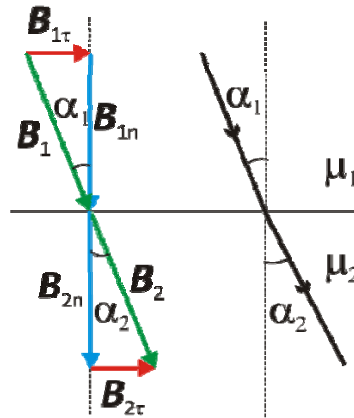
$$\frac{B_{1\tau}}{B_{2\tau}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (11)$$

Resumiendo, se puede decir que al pasar a través del límite de separación de dos medios magnéticos, el componente normal del vector B y el componente tangencial del vector H varían de un modo continuo. En cambio, el componente tangencial del vector B y el componente normal del vector H , al pasar a través del límite de separación sufren una discontinuidad.

En la figura 5, se muestra el comportamiento de las líneas B al cruzar el límite de separación entre dos materiales magnéticos. Se designa los ángulos entre las líneas B y la normal a la superficie de separación respectivamente por α_1 y α_2 . La relación entre las tangentes de estos ángulos es

$$\frac{\text{tg}\alpha_1}{\text{tg}\alpha_2} = \frac{B_{1\tau}B_{1n}}{B_{2\tau}B_{2n}} \quad (12)$$

Figura 5. Comportamiento de las líneas B al cruzar el límite de separación entre dos materiales magnéticos



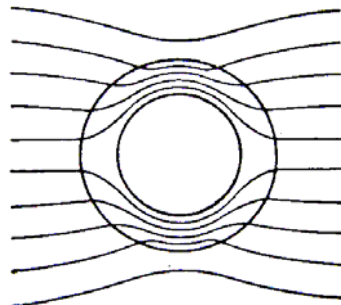
Fuente: SÁVELIEV, I. V. Curso de Física General. 3 ed. U.R.S.S.: MIR, 1982.

De aquí, teniendo en cuenta las expresiones 4 y 11, se obtiene una ley de refracción de las líneas de inducción magnética:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (13)$$

Al pasar al material magnético de mayor μ , las líneas de inducción magnética se desvían de la normal hacia la superficie. Esto hace que dichas líneas se condensen, la condensación de las líneas B en la substancia de mayor permeabilidad magnética da la posibilidad de formar haces magnéticos, es decir, de darles la forma y dirección necesarias. En particular, para efectuar la protección magnética de un volumen determinado, se rodea este con una pantalla de hierro.

Figura 6. Condensación de las líneas de inducción magnética en un material de mayor permitividad

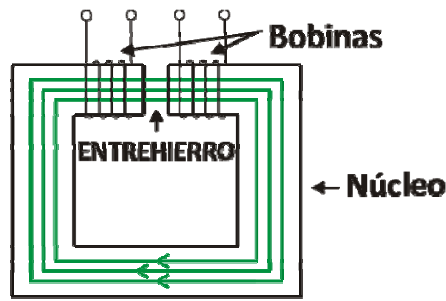


Fuente: SERWAY, Raymond A. Física Mc Graw Hill. 1992 México

En la figura 6, se observa que la condensación de las líneas de inducción magnética en el espesor de la pantalla hace que el campo se debilite dentro.

2.1.3 Cálculo teórico del campo generado por el electroimán según Weiss en el entrehierro². Preliminarmente se realizó un cálculo teórico del campo que genera el electroimán para obtener una perspectiva de su comportamiento físico durante su funcionamiento, esto se logró basándose en la teoría de condiciones en el límite entre dos materiales magnéticos vista en el numeral 2.1.2.

Figura 7. Esquema del electroimán según Weiss



Fuente: FRISH, Serguéi y TIMOREVA, Alexandra. Curso de Física General Tomo II. Editorial Mir. 1977 Moscú

En la figura 7, se presenta un esquema del circuito magnético equivalente para el electroimán según Weiss, este consta de un núcleo de hierro, sobre el cual asientan las bobinas alimentadas por la corriente. Las líneas de inducción magnética resultan concentradas fundamentalmente dentro del núcleo. Solo en el estrecho espacio de aire pasan por un medio de μ pequeña. El vector \mathbf{B} cruza el límite entre el espacio de aire y el núcleo siguiendo la normal a la superficie de separación. De aquí, según la ecuación 4, se deduce que la inducción magnética en el espacio de aire y en el núcleo tienen la misma magnitud. Aplicando el teorema de la circulación de \mathbf{H} al contorno que pasa por el eje del núcleo. La intensidad del campo se puede considerar que es la misma en todos los puntos del hierro e igual a

$$H_{hierr} = \frac{B}{\mu_0 \mu_{hierr}} \quad (14)$$

Para el aire

$$H_{aire} = \frac{B}{\mu_0 \mu_{aire}} \quad (15)$$

Se designa la longitud de la parte del contorno que se encuentra en el hierro por l_{hierr} y la del espacio de aire por l_{aire} . Entonces la circulación se puede expresar de la siguiente manera

$$H_{hierr} l_{hierr} + H_{aire} l_{aire} = NI \quad (16)$$

² FRISH, Serguéi y TIMOREVA, Alexandra. Curso de Física General Tomo II. Editorial Mir. 1977 Moscú

Donde N es el número total de espiras de las bobinas del electroimán según Weiss, e I , la intensidad de la corriente. De esta manera se tiene que

$$\frac{B}{\mu_0 \mu_{hierr}} l_{hierr} + \frac{B}{\mu_0 \mu_{aire}} l_{aire} = NI \quad (17)$$

De aquí

$$B = \mu_0 I \frac{N}{\frac{l_{aire}}{\mu_{aire}} + \frac{l_{hierr}}{\mu_{hierr}}} \approx \mu_0 I \frac{N}{l_{aire} + \frac{l_{hierr}}{\mu_{hierr}}} \quad (18)$$

Debido a que μ_{aire} difiere de la unidad en la quinta cifra después de la coma.

En el caso de l_{aire} como ya se había mencionado tiene un valor de 93mm, l_{hierr} es del orden de un metro y μ_{hierr} alcanza un valor de varios millares. Por eso el segundo sumando del denominador se puede despreciar y escribir que

$$B = \mu_0 I \frac{N}{l_{aire}} \quad (19)$$

Esta relación presenta la magnitud del campo magnético generado por el electroimán según Weiss en función de la corriente aplicada y longitud del entrehierro. En la práctica se busca conseguir el valor de un Tesla para el campo magnético, por consiguiente es recomendable que la distancia del entrehierro que se maneja debe permitir alcanzar esta magnitud cuando se aplique el valor de corriente máximo al equipo.

2.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

2.2.1 Efecto Joule. El efecto Joule³ hace referencia a la producción de calor en un conductor cuando circula una corriente eléctrica a través del mismo. Parte de la energía eléctrica se transforma en energía térmica debido a los continuos choques de los electrones móviles contra los iones metálicos del conductor, produciéndose un intercambio de energía cinética, que provoca un aumento de temperatura.

Los procesos energéticos que dan origen al efecto Joule se pueden interpretar de la siguiente forma⁴: los sólidos tienen generalmente una estructura cristalina, ocupando los átomos o moléculas los vértices de las celdas unitarias, y a veces también el centro de la celda o de sus caras. Cuando el cristal es sometido a una diferencia de potencial, los electrones son impulsados por el campo eléctrico a través del sólido, debiendo en su

³ "Efecto Joule." Microsoft® Encarta® 2007 [DVD]. Microsoft Corporation, 2006.

⁴ COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2007. [en línea]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule> [citado el 7 de enero, 2008]

recorrido a través de la intrincada red que lo forma. En su camino, los electrones pierden parte de su energía cinética en los inevitables choques con los átomos que constituyen el metal; estos átomos pueden oscilar alrededor de sus posiciones de equilibrio en la red metálica, y al incrementar su energía cinética de oscilación o de vibración se eleva la temperatura del conductor.

El efecto Joule puede ser enunciado de la siguiente manera: la cantidad de calor (Q) producida al paso de una corriente eléctrica por un conductor es proporcional a la resistencia del metal (R), al cuadrado de la intensidad (I) y al tiempo (t) que ésta fluya por el conductor. Matemáticamente se expresa como:

$$Q = I^2 R t \quad (20)$$

Así, la potencia disipada por efecto Joule será:

$$P = I^2 R \quad (21)$$

Debido a que el electroimán de Weiss está configurado internamente por dos bobinas conectadas en serie que a su vez son de un material metálico, éste está sujeto al efecto Joule. En la hoja de características del electroimán y verificando experimentalmente el dato, se determina que las bobinas que posee tienen una resistencia total de 7Ω ; cuando se está trabajando a la capacidad máxima del electroimán, por dichas bobinas fluyen 15 A. Por lo tanto puede determinarse la potencia disipada debido al efecto Joule de la siguiente manera:

$$P = (15A)^2 \times 7\Omega = 1575W \quad (22)$$

Dicha disipación de potencia a través del tiempo representa un calentamiento del equipo por lo que se hace necesario implementar un sistema de refrigeración.

2.2.2 Configuración del sistema de refrigeración. El electroimán según Weiss posee un módulo refrigerante propio que se encuentra en su interior, éste consiste en una red de canales por los cuales se debe hacer circular un fluido (que puede ser agua) a una tasa recomendada por el fabricante cuyo valor ($0.5 \text{ m}^3/\text{h}$) se encuentra especificado en la hoja de características del dispositivo. El módulo refrigerante mencionado cuenta con una entrada y una salida externas de líquido las cuales son ductos que se localizan en la parte posterior del electroimán, por lo tanto la tarea se resume a llevar el fluido desde y hacia estos canales a una velocidad controlada.

Después de estudiar diferentes topologías para sistemas de refrigeración y de verificar su concordancia con los requerimientos especificados anteriormente, se realizó la selección del sistema que mejor se ajusta al equipo y es igualmente accesible; esto es, que los materiales se pueden conseguir en el medio y los costos no son muy elevados.

Es muy importante considerar que el sistema de refrigerante debe hacerse por medio de flujo de líquido (específicamente agua) a una tasa volumétrica determinada que como ya se expresó está predefinida por el fabricante del electroimán, el control de ésta parte del proceso al no requerir de una exactitud extrema será echo en lazo abierto y de forma experimental.

Por tanto, el sistema de refrigeración construido consta de una serie de conductos que llevan agua corriente desde la tubería principal de abastecimiento del laboratorio hasta la entrada del complejo refrigerante interno propio del electroimán según Weiss, y desde la salida de éste conjunto hacia el drenaje del laboratorio.

El control de flujo de agua hacia el electroimán es totalmente manual y está a cargo del operario. Se realiza por medio de una válvula de paso proporcional, que permite por inspección directa, variar la cantidad volumétrica de flujo inyectada al dispositivo.

Otra de las consideraciones que se tuvo en cuenta para la elaboración del sistema de refrigeración fue la limitación que tiene el electroimán según Weiss con el cual se trabajó, de no permitir su uso por mas de quince minutos cuando está operando a su máxima capacidad (alimentándose con 15 A). Dicha condición fue atendida en el programa de control, el cual impide al usuario infringir ésta restricción.

2.3 FUENTE DE PODER HEWLETT PACKARD 6675A

Para proporcionar la energía necesaria al electroimán se utilizo una fuente de alimentación de corriente continua Hewlett Packard de la serie 6675A, la cual presenta las siguientes características.

Figura 8. Fuente de poder Hewlett Packard 6675A



Fuente: Agilent. Agilent Technologies Models 664xA, 665xA, 667xA, 668xA, and 669xA, Operating Guide GPIB DC Power Supplies. U.S.A.: Agilent Technologies, 2002.

2.3.1 Características de la fuente de voltaje⁵.

- Salida regulada en voltaje o corriente.

⁵ Agilent. Agilent Technologies Models 664xA, 665xA, 667xA, 668xA, and 669xA, Operating Guide GPIB DC Power Supplies. U.S.A.: Agilent Technologies, 2002.

- Protección contra sobrevoltajes, sobreintensidades, sobretemperatura, verificación de funcionamiento del equipo al encender.
- Medidor de voltaje.
- Medidor de corriente.
- Programación de voltaje o corriente por entrada análoga.
- Panel frontal que permite realizar las siguientes configuraciones: calibración, ajuste de la contraseña de calibración, configuración de los límites de protección contra sobrevoltajes y sobreintensidades, memorizar estados de funcionamiento, configurar la dirección GPIB del dispositivo, leer los códigos de error GPIB.
- Se puede programar y configurar de manera remota. Es compatible con comandos SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments).
- Brinda una tensión máxima de salida 122.85VDC.
- Intensidad máxima de salida de 18.43A.
- Resolución media de programación de 30mV en tensión.
- Resolución media de programación de 4.5mA en intensidad.
- Operación remota mediante la interfaz IEEE 488

La fuente Hewlett Packard 6675A se utilizó en este proyecto en su configuración de corriente constante, lo que facilita el diseño del programa de control, el cual se encarga de enviar el valor de corriente necesario para alcanzar el valor de campo magnético solicitado por el usuario. La fuente además envía información acerca de la corriente y voltaje suministrados en sus terminales de salida, este equipo además permite habilitar y deshabilitar sus salidas como mecanismo de protección.

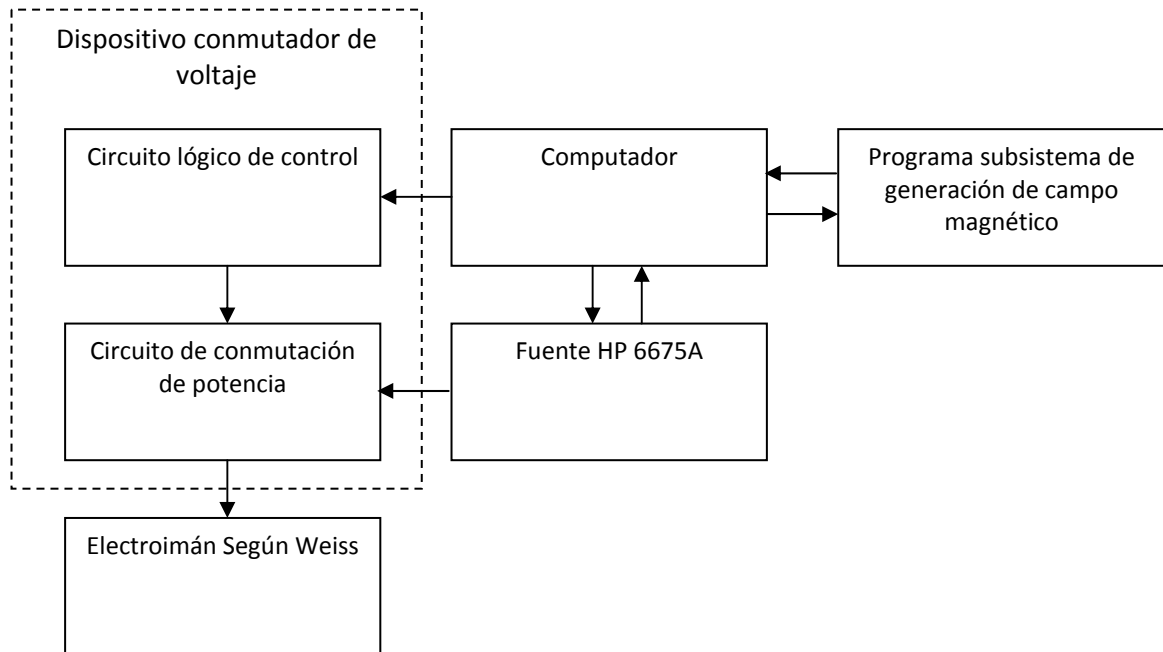
2.4 DISPOSITIVO CONMUTADOR DE VOLTAJE

La figura 7, muestra la dirección de las líneas de campo magnético generado por el electroimán concentradas en el núcleo, es posible invertir la dirección de estas líneas de flujo permitiendo generar al equipo dos sentidos para el campo magnético. Para controlar la dirección del campo se implementó un módulo encargado de conmutar la polaridad del voltaje aplicado a los terminales de alimentación del electroimán. Este dispositivo permite cambiar la dirección del campo de acuerdo a la necesidad del usuario teniendo en cuenta los siguientes parámetros.

- El dispositivo conmutador de voltaje debe ser capaz de manejar los niveles de corriente y voltaje suministrados por la fuente Hewlett Packard 6675A.
- Los voltajes Ldi/dt limitan la velocidad de conmutación, no es recomendable realizar cambios bruscos a altas corrientes simultáneamente con cambios de polaridad en el voltaje, esto puede generar chispas, dañar el dispositivo diseñado y la fuente Hewlett Packard 6675A.

- El tiempo de conmutación debe estar ajustado para que el dispositivo responda de manera adecuada.

Figura 9. Diagrama de bloques del dispositivo conmutador de voltaje

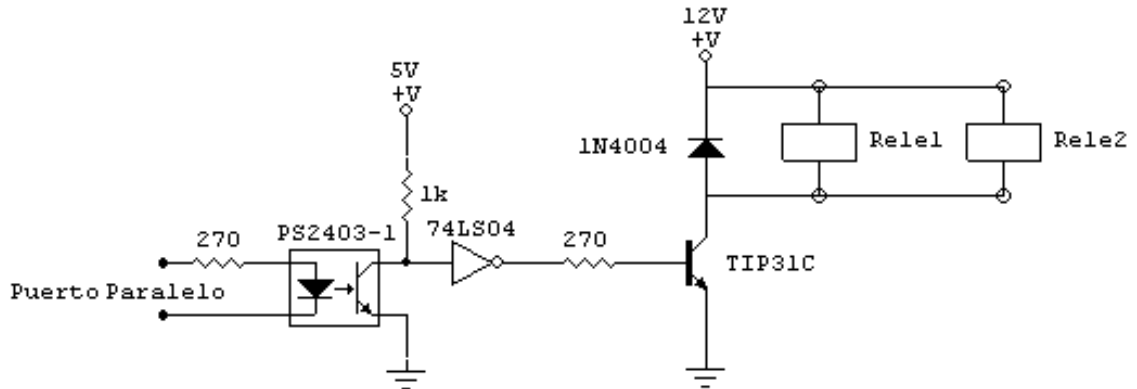


El programa de control de acuerdo a lo visto anteriormente realiza los siguientes pasos

- Antes de cambiar la polaridad del voltaje suministrado por la fuente, se inhabilita la salida.
- En el momento en que la salida de la fuente esté inhabilitada se realiza el proceso de conmutación en los contactos mecánicos de los relés.
- Se habilita la salida y se suministra el voltaje requerido.

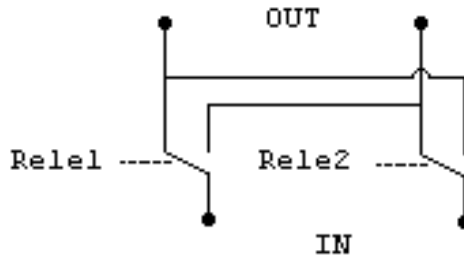
2.4.1 Circuito lógico de control. Esta etapa del dispositivo se encarga de recibir la señal enviada por el computador a través del puerto paralelo indicando una de las dos posibles direcciones que se desee para el sentido de la corriente suministrada por la fuente Hewlett Packard 6675A, esta señal se adecua y se envía a un transistor en configuración de corte y saturación, que permite activar o desactivar los solenoides encargados de cambiar los contactos mecánicos en el relé.

Figura 10. Diagrama del circuito lógico de control



2.4.2 Circuito de conmutación de potencia. Como ya se ha visto, la fuente Hewlett Packard 6675A maneja voltajes de 120VDC y corrientes de 15A es necesario realizar un circuito de conmutación de voltaje que permita manejar estas magnitudes de corriente y voltaje. Se escogió la opción de los relés por su costo y su tiempo de conmutación; el cual, para esta aplicación esta relacionado con el tiempo de estabilización de la salida de la fuente y el tiempo de espera donde se inhabilita la misma para evitar los voltajes Ldi/dt . Los relés escogidos poseen un contactor de dos posiciones lo que reduce el tamaño del dispositivo, además de permitir el manejo de corriente hasta de 30A, los solenoides de control funcionan con una alimentación de 12V. La figura 11 presenta el esquema descrito.

Figura 11. Circuito de conmutación de potencia



2.5 CONTROLADOR DEL SUBSISTEMA DE GENERACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO

2.5.1 Características del ordenador. El computador sobre el que se encuentra montado el programa de control que gobierna el subsistema para la generación de campo magnético, presenta las siguientes características:

- *Procesador:* AMD-k6(tm) 3D processor
- *Capacidad en memoria RAM:* 64 Mb
- *Tamaño de disco duro:* 4 Gb

- *Puertos disponibles:* COM1, COM4, LPT1, PCI-GPIB
- *Sistema operativo:* Microsoft Windows 98 4. 10. 1998

Cumple con los requerimientos para sustentar el controlador ya que a pesar de no ofrecer un hardware con características de rendimiento muy elevadas, el subsistema controlado no demanda velocidades de procesamiento considerables o altas capacidades de almacenamiento de datos. Además, cabe resaltar la posibilidad que tiene el ordenador para soportar la comunicación a través del bus estándar IEEE 488, gracias a la tarjeta hardware PCI-GPIB que posee. Esta característica es esencial puesto que la comunicación con la fuente de poder Hewlett Packard 6675A, que es el principal dispositivo a controlar se hace por medio de éste bus y siguiendo el estándar mencionado anteriormente.

Así mismo, el software de control se desarrolla en el lenguaje de programación LabVIEW 6.1, debido a que el computador no ofrece el soporte requerido para versiones posteriores; además, la versión utilizada presenta la versatilidad y las herramientas suficientes para cumplir con los requisitos del trabajo propuesto.

2.5.2 LabVIEW⁶. (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una plataforma de desarrollo gráfico para diseño, control y pruebas. Fue creado por National Instruments en 1986 inicialmente para funcionar sobre máquinas MAC, sin embargo pronto tuvo soporte para sistemas Windows, UNIX y Linux.

La programación G es el corazón de LabVIEW, y difiere de otras herramientas de desarrollo convencionales como C o Visual Basic, en que éstas están basadas en texto mientras que G es una programación gráfica y por lo tanto más intuitiva.

Los programas hechos con LabVIEW reciben el nombre de VIs (“Virtual Instruments”), lo que da una idea de uno de sus principales usos: el control de instrumentos. Los VIs constan de una interfaz interactiva de usuario y un diagrama de flujo de datos que hace las funciones de código fuente.

De forma más específica, la programación gráfica en LabVIEW se estructura como sigue:

- La interfaz interactiva de usuario de un VI se llama Panel Frontal, debido a que simula el panel de un instrumento físico. El panel frontal puede contener botones, interruptores, pulsadores, gráficas y otros controles e indicadores que se encuentran disponibles en las librerías del programa.
- El VI recibe instrucciones de un diagrama de bloques que se construye en G. El diagrama de bloques es la solución a un determinado problema a través de un algoritmo gráfico. Además, el diagrama de bloques es el código fuente del programa o VI.

⁶ RONCANCIO, Henry y CIFUENTES, Hector. Tutorial de LabVIEW. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. 2001

- Los VIs son jerárquicos y modulares, por lo tanto pueden utilizarse como programas de alto nivel o como subprogramas incluidos en otros programas. Cuando un VI se usa dentro de otro VI, se denominan subVI. El icono y los conectores de un VI funcionan como una lista de parámetros gráficos de forma que otros VIs pueden acceder y transferirle información fácilmente.

LabVIEW se usa principalmente para:

- Adquisición de datos
- Control de instrumentos
- Automatización industrial o PAC (Controlador de Automatización Programable)
- Diseño de control: prototipaje rápido y hardware-en-el-bucle (HIL)

Las principales características de LabVIEW son las siguientes⁷:

- Manejo de interfaces de comunicaciones:
 - Puerto serie
 - Puerto paralelo
 - GPIB
 - PXI
 - VXI
 - TCP/IP, UDP, DataSocket
 - Irda
 - Bluetooth
 - USB
 - OPC
- Capacidad de interactuar con otras aplicaciones:
 - Matlab
 - Simulink
 - ActiveX
 - DLL
- Herramientas para el procesado digital de señales.
- Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
- Adquisición y tratamiento de imágenes.
- Control de movimiento.
- Tiempo Real estrictamente hablando.
- Programación de FPGAs.
- Sincronización.

⁷ COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2007. [en línea]. <<http://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>> [citado el 12 de septiembre, 2007]

Se eligió la herramienta de programación LabVIEW puesto que es un lenguaje especializado en el control remoto de instrumentos electrónicos y la automatización de procesos. Así mismo, por ser una plataforma creada para interactuar con diferentes dispositivos de instrumentación presenta librerías específicas para comunicación a través de distintos puertos entre los que se encuentra el GPIB.

Además LabVIEW provee funciones exclusivas que son típicamente usadas en los algoritmos de automatización o control electrónico, las cuales generalmente son complejas y su implementación en otros lenguajes de programación no especializados requeriría de un alto grado de dificultad.

2.5.3 Especificaciones del controlador. El objetivo central del programa desarrollado es coordinar la generación de campo magnético por parte del electroimán según Weiss conforme a los requerimientos establecidos por el usuario. Para lograrlo es necesario controlar la corriente suministrada a las bobinas del dispositivo por la fuente de poder Hewlett Packard 6675A.

Como la fuente de poder utilizada permite su manejo remoto mediante GPIB, tan solo bastará con un programa que especifique el valor de corriente necesario para producir el campo magnético deseado, y que éste dato sea enviado hacia la fuente siguiendo la norma IEEE 488.

El programa también deberá ser capaz de detectar si la fuente de poder sobre la cual ejerce directamente control está conectada y disponible; además al iniciar, configurará la fuente HP 6675A para ser gobernada directamente desde el computador.

Así mismo, es importante considerar ciertos niveles de protección tanto para el electroimán como para la fuente de poder. Por éste motivo, deben limitarse la corriente y el voltaje con los cuales trabajan estos dispositivos a valores de operación seguros, que según las recomendaciones de los fabricantes se estipularon así:

$$V_{Máx} = 120 V \quad (23)$$

$$I_{Máx} = 15 A \quad (24)$$

El software; por lo tanto, debe introducir los niveles de protección ya establecidos, en la fuente de alimentación mediante el envío de comandos específicos para tal fin. Además será capaz de determinar si hubo un error en cualquier fase de la comunicación por GPIB, interrumpirla momentáneamente y advertir al usuario sobre el problema presentado.

Debido a la inclusión del conmutador para los terminales de la fuente en el subsistema de generación de campo magnético, se hace necesario su control de acuerdo a la dirección de campo magnético que elija el usuario. Como el mecanismo mencionado puede administrarse a través de una entrada lógica, la opción más recomendable será el uso del puerto paralelo del computador para su manejo.

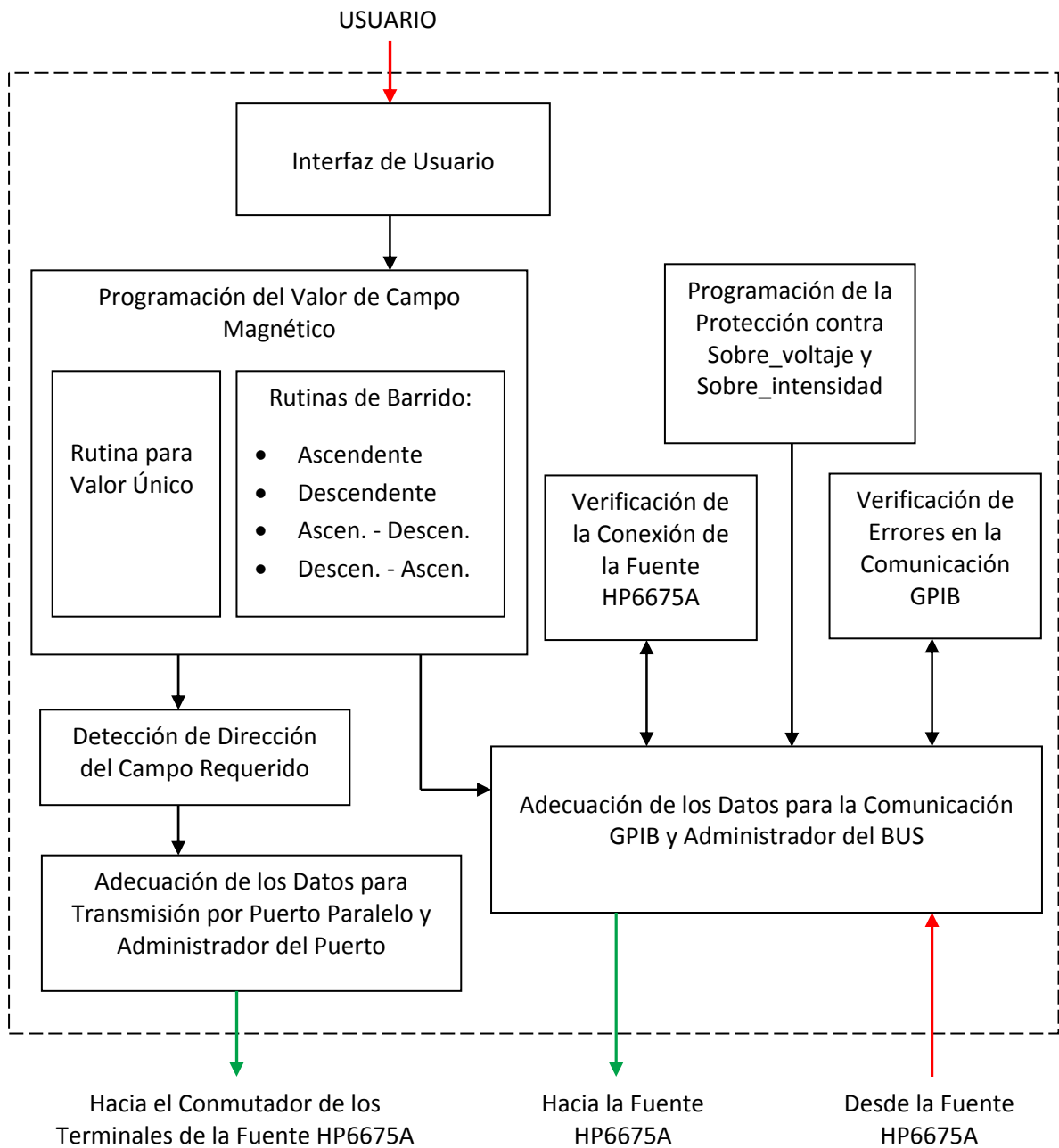
Lo anterior representa un control sobre la magnitud del campo generado y su dirección, pero generalmente evaluar las propiedades magnéticas de un material requiere someterlo a distintos valores de campo y verificar su comportamiento, por lo tanto con el fin de hacer más versátil la aplicación del sistema y al mismo tiempo facilitar la investigación se implementaron unas rutinas complementarias dentro del programa principal que se refieren a variaciones programables de campo magnético, estas rutinas son:

- Barrido ascendente: proporciona distintos valores de campo, constantemente crecientes y espaciados uniformemente desde un límite inferior hasta un límite superior con una resolución y un tiempo de paso definidos por el usuario.
- Barrido descendente: proporciona distintos valores de campo, constantemente decrecientes y espaciados uniformemente desde un límite superior hasta un límite inferior con una resolución y un tiempo de paso definidos por el usuario.
- Barrido ascendente - descendente: proporciona distintos valores de campo, primero crecientes y luego decrecientes, espaciados uniformemente desde un límite inferior hasta un límite superior y desde éste nuevamente al límite inferior con una resolución y un tiempo de paso definidos por el usuario.
- Barrido descendente - ascendente: proporciona distintos valores de campo, primero decrecientes y luego crecientes, espaciados uniformemente desde un límite superior hasta un límite inferior y desde éste nuevamente al límite superior con una resolución y un tiempo de paso definidos por el usuario.

Finalmente, se tiene la interfaz de usuario, que permite al operario del sistema seleccionar de manera completamente visual e intuitiva las tareas que desee llevar a cabo.

El siguiente diagrama de bloques ilustra la configuración del sistema de control descrito anteriormente.

Figura 12. Diagrama de bloques del controlador del subsistema de generación de campo magnético



2.6 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN CON EL CONTROLADOR⁸

La fuente de alimentación HP6675A se comunica con el computador por medio del bus GPIB, utilizando una tarjeta NI PCI-GPIB previamente instalada en el computador. El estándar GPIB conocido también como IEEE 488 presenta una funcionalidad que ha evolucionado en el tiempo y que se resume en los siguientes aspectos:

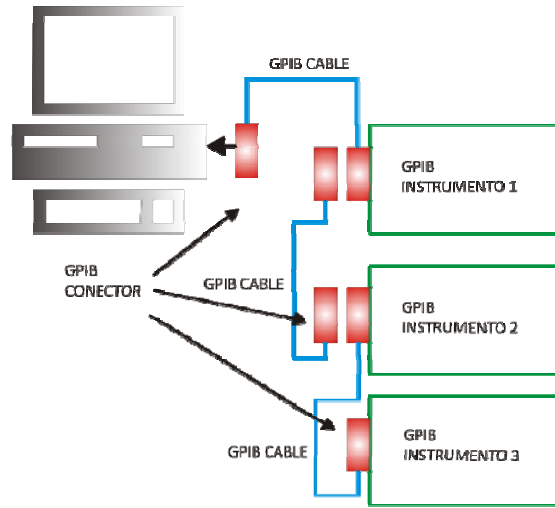
- IEEE 488.1 (1975): Especificación que define las características de nivel físico (mecánico y eléctrico), así como sus características funcionales básicas.
- IEEE 488.2 (1987): Especificación que define las configuraciones mínimas, los comandos y formatos de datos básicos y comunes a todos los equipos, el manejo de errores y los protocolos que se siguen en las comunicaciones.
- SCPI (Standard Commands for Programmable Instrumentation): Especificación construida sobre el estándar IEEE 488.2 que define una estructura de comandos estándar aceptados por múltiples instrumentos de muchos fabricantes, entre ellos Agilent Technologies

Las características más relevantes del bus GPIB, son las siguientes:

- Permite la interconexión de hasta 15 equipos, de los que uno de ellos es el controlador, el cual establece la función que debe ejercer cada uno de los otros.
- Un dispositivo conectado al bus, puede enviar o recibir información hacia o desde cualquiera de los otros 14 equipos. A veces, la propia naturaleza de un equipo hace que solo esté capacitado para recibir (p.e. una impresora), o solo capacitado para enviar (p.e. un contador), o ambas cosas (ejemplo: un osciloscopio, o un computador)
- El límite práctico de velocidad de intercambio de datos es de 500 Kbytes/s (o lo que es lo mismo 4 Mbits/s).
- La interconexión entre equipos se realiza utilizando cables de 25 hilos, finalizados en conectores de doble boca (macho por un lado y hembra por el otro), que permite la interconexión de los equipos en cualquier configuración (estrella, línea, o cualquier combinación de ellas).
- Las longitudes máximas permitidas en los cables es de 20 metros. Los cables que se comercializan son de 1, 2, 4 y 8 metros.

⁸ INTRODUCCION GPIB. [en línea]. España., 2003. Disponible en Internet: <http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_IT/>.

Figura 13. Interconexión de Equipos mediante el bus GPIB



Fuente: INTRODUCCION GPIB. [en línea]. España., 2003. Disponible en Internet: <http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_IT/>.

2.6.1 Estructura del bus GPIB. El bus GPIB está basado en 16 líneas activas, además de la tierra. Estas 16 líneas se organizan en tres buses:

- Bus de Datos (DIO1-DIO8) (Data input/output): Es un bus bidireccional de 8 líneas orientado a la transferencia de bytes o de caracteres ASCII.
- Bus de sincronización de la transferencia de datos: Es un conjunto de tres líneas (DAV: DATA Valid, NRFD: Not Ready For Data y NDAC: Not Data ACcepted) que se utilizan de forma coordinada para asegurar la transferencia de datos entre los equipos.
- Bus de control: Está constituido por 5 líneas (ATN: ATteNtion, IFC: InterFace Clear, SRQ: Service ReQuest, REN: Remote ENable, y EOI: End Or Identify) que se utilizan para transferir comandos entre los equipos relativos al modo de interpretar los datos que se transfieren o comandos básicos de gobierno de la interfaz del bus.

El controlador del subsistema de generación de campo magnético establece comunicación con la fuente Hewlett Packard 6675A a través del bus GPIB, esta interfaz facilita el diseño del software de control, además permite la comunicación con otros instrumentos adicionales requeridos para el desarrollo del proyecto.

Básicamente, la comunicación entre el computador y la fuente Hewlett Packard 6675A consiste en enviar instrucciones para controlar el valor de corriente que el instrumento genera, ese valor depende del campo magnético solicitado, además se debe verificar a través del comando de medición de voltaje y corriente que la fuente posee la confirmación de la orden dada. De la misma forma, a través del bus GPIB, se dan las instrucciones de inicialización del equipo e indicaciones para la protección del mismo.

2.6.2 Control de comunicación a través del puerto GPIB. Debido a la importancia de la comunicación entre los instrumentos utilizados para el proyecto se hace necesario controlar los posibles errores que puedan presentarse durante el proceso de intercambio de datos. LabVIEW 6.1 cuenta con un programa auxiliar especial para regular la comunicación a través de la interfaz IEEE 488 cuyo funcionamiento se describe a continuación.

Las funciones de manejo de bus GPIB con las que cuenta LabVIEW 6.1, tales como escritura y lectura son capaces de detectar errores que se presenten durante su ejecución. Estas funciones tiene implementado un registro de 13 bits llamado registro de status, los bits de este registro se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Valor numérico y simbólico bit en el registro de status

Bit de status	Valor numérico	Status simbólico
0	1	DCAS
1	2	DTAS
2	4	LACS
3	8	TACS
4	16	ATN
5	32	CIC
6	64	REM
7	128	LOK
8	256	CMPL
12	4096	SRQI
13	8192	END
14	16384	TIMO
15	-32768	ERR

Las funciones GPIB generan error cuando se activa el bit numero 15, cuando eso ocurre es necesario conocer el estado de todo el bus de status, lo que requiere el tratamiento de estos datos para informar al usuario el error que se está presentando, este proceso es llevado a cabo por la subrutina llamada “GPIB Error Report.vi”. Este programa interpreta los bits de status de una función GPIB y reporta el error que se presente como mensaje de texto. Cuando un error ocurre el programa presenta un cuadro de diálogo informando la situación. El usuario puede entonces decidir si continúa con el proceso que se esté llevando a cabo o finalizarlo. El diagrama de bloques de esta subrutina junto con la descripción de los errores que se pueden presentar en la comunicación GPIB se presenta en el anexo A.

3. MAGNETORRESISTENCIA

Los mecanismos físicos involucrados en el funcionamiento de la electrónica convencional están ligados a la conducción de portadores de carga en materiales semiconductores.

Esta conducción de portadores es controlada por los dispositivos electrónicos actuales a través de la aplicación de campos eléctricos. Sin embargo, los electrones presentan otra característica intrínseca (además de su carga) que puede ser explotada para controlar su transferencia: el espín. El estudio de los fenómenos electrónicos relacionados con éste parámetro origina una nueva rama de la electrónica, la magnetoelectrónica. Esta disciplina contiene varios campos de investigación y es actualmente uno de los polos de desarrollo hacia los cuales va enfocada la evolución de la electrónica convencional.

La magnetorresistencia (MR)⁹ es un fenómeno físico importante relacionado con la magnetoelectrónica, y consiste en la capacidad que tienen algunos materiales o sistemas de cambiar su resistencia eléctrica al ser sometidos a un campo magnético externo (resistencia dependiente del campo magnético). Normalmente, se expresa en valores relativos o porcentajes de variación de la resistividad respecto a un estado de imanación concreto (generalmente el estado desimanado). Matemáticamente se define, así:

$$MR(H) = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(H) - R(H_0)}{R(H_0)} \times 100\% \quad (25)$$

Donde $R(H_0)$ es la resistencia del material a campo magnético cero y $R(H)$ es la resistencia a campo H . Generalmente la magnetorresistencia es negativa, pues a saber la aplicación de un campo magnético causa un decrecimiento dramático en la resistencia eléctrica. Cuando se califica la MR como positiva o negativa, se hace referencia al incremento o decremento de la resistividad con el campo magnético. La MR no solo depende de la intensidad del campo magnético, sino también, en algunas ocasiones, de su orientación respecto a la corriente. Cabe anotar que algunos autores normalizan la magnetorresistencia con un valor de $R(H)$ (en lugar de $R(H_0)$ como en la fórmula 25) y por lo tanto, se pueden encontrar porcentajes del orden de miles.

El fenómeno de la MR puede originarse por varios motivos, lo que da lugar a varios tipos de magnetorresistencia¹⁰:

⁹ CALDERON, María José. Magnetic and Electric Properties of Systems with Colossal Magnetoresistance. Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC). 2001 Madrid

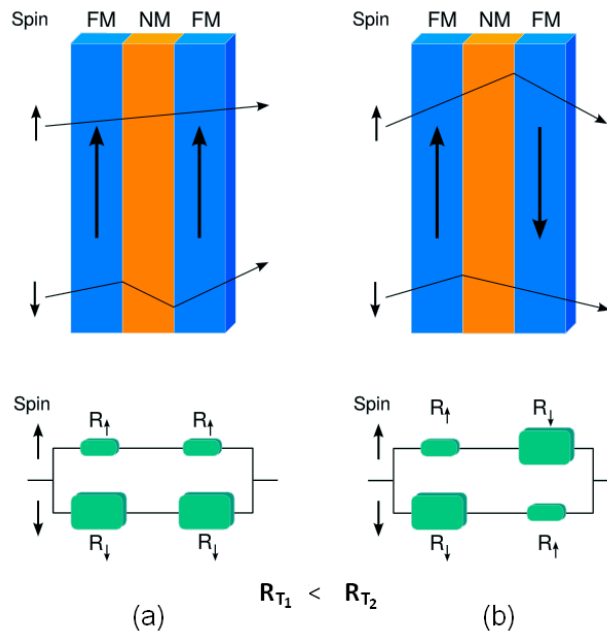
¹⁰ NAVARRO, José. Síntesis y Caracterización de Óxidos Magnetorresistivos del tipo $A_xSr_{2-x}FeMoO_6$ y su Aplicación a un Potenciómetro sin Contactos. Institut de Ciència de Materials de Barcelona. 2003

- *Magnetorresistencia ordinaria (OMR)*: este tipo de magnetorresistencia es característica de los metales. Se produce porque los electrones de conducción se ven sometidos a la componente magnética de la ley de Lorentz, perpendicular a su velocidad. La ley de Lorentz expresa: “Toda vez que una carga se desplaza dentro de un campo magnético, recibe una fuerza que es directamente proporcional al valor de la carga, a su velocidad, al campo magnético y al seno del ángulo formado por el vector velocidad y el vector campo magnético”¹¹. Esto provoca un “alargamiento” en la trayectoria que siguen, incrementando la resistencia eléctrica del material. La OMR es positiva y muy pequeña, típicamente inferior al 1%.
- *Magnetorresistencia anisótropa (AMR)*: la AMR junto con la OMR, fueron observadas por primera vez a mediados del siglo XIX por William Thomson, Lord Kelvin en el hierro metálico. Mayor en magnitud que la OMR, y presente únicamente en materiales ferromagnéticos y sus aleaciones, puede llegar hasta un 3%. En términos generales, la anisotropía hace alusión a la dependencia de una propiedad física con relación a la dirección de un agente externo. Por lo tanto, cuando se habla de magnetorresistencia anisótropa se refiere a la variación de la resistencia eléctrica dependiendo de la orientación del campo magnético aplicado al material. Generalmente, cuando el campo se aplica perpendicularmente la resistencia disminuye mientras que si aplica paralelamente la resistencia aumenta.
- *Magnetorresistencia gigante (GMR)*: este tipo de magnetorresistencia fue observada en 1988 por Albert Fert y Peter Grünberg (cuyo trabajo les valió en 2007 el premio Nobel de Física) en sistemas fabricados alternando capas de material ferromagnético (FM) con capas de material no magnético (NM). Los sistemas mencionados se diseñan de manera que en ausencia de campo magnético, las capas ferromagnéticas se ordenen en forma antiparalela mientras que cuando se aplique un campo magnético externo las capas se alineen paralelamente. Cuando los electrones de conducción atraviesan la estructura antiparalela, su flujo se hace más difícil debido a que habrá capas cuya dirección de magnetización no coincida con el espín del electrón; si por el contrario las capas ya están dispuestas paralelamente gracias a la acción del campo magnético aplicado, los electrones con espín coincidente con la dirección de magnetización fluirán con mayor facilidad a través de la estructura, generándose así una resistencia eléctrica total (R_T) menor. Este comportamiento se ilustra mejor en la figura 14.

La GMR puede llegar hasta un 40% a baja temperatura y presentar valores considerables a temperatura ambiente. Es por eso que tiene una gran importancia tecnológica para la fabricación de sensores magnetorresistivos y válvulas de espín.

¹¹ SAVELIEV, I. V. Curso de Física General. 3 ed. U.R.S.S.: MIR, 1982

Figura 14. Fenómeno de GMR. (a) Estructura multicapa sometida a un campo magnético externo y (b) sin aplicarle campo magnético.



Fuente: COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2007. [en línea].
 <http://es.wikipedia.org/wiki/Magnetorresistencia_gigante> [citado el 15 de octubre, 2007]

- *Magnetorresistencia túnel (TMR)*: el progreso tecnológico en el campo del crecimiento de películas delgadas (placas de materiales con espesores muy pequeños) durante la década de los noventa, hizo posible el crecimiento de capas de un grosor del orden de nanómetros. Esta escala permitió aplicar la física cuántica a los dispositivos multicapas fabricados y así explotar un fenómeno conocido como efecto túnel, el cual consiste en que una partícula puede atravesar una barrera aislante aún sin tener la energía suficiente para hacerlo. En 1995, Jagadeesh Moodera y su equipo de investigación, construyó una multicapa CoFe/Al₂O₃/Co basada en el efecto de tunelamiento con la que se conseguía una magnetorresistencia de 13% a temperatura ambiente.

Las uniones túnel son sistemas compuestos de capas ferromagnéticas separadas por delgados aislantes en los que la conducción se divide en dos canales de polarización de espín distinto y está fuertemente ligada al estado magnético de los ferromagnetos. Si estos ferromagnetos tienen los momentos magnéticos paralelos se puede producir transferencia de electrones de conducción a través de la barrera aislante por efecto túnel. El rendimiento de la unión decrece rápidamente cuando la diferencia de orientación de los momentos de los ferromagnetos aumenta, alcanzando un mínimo cuando son antiparalelos.

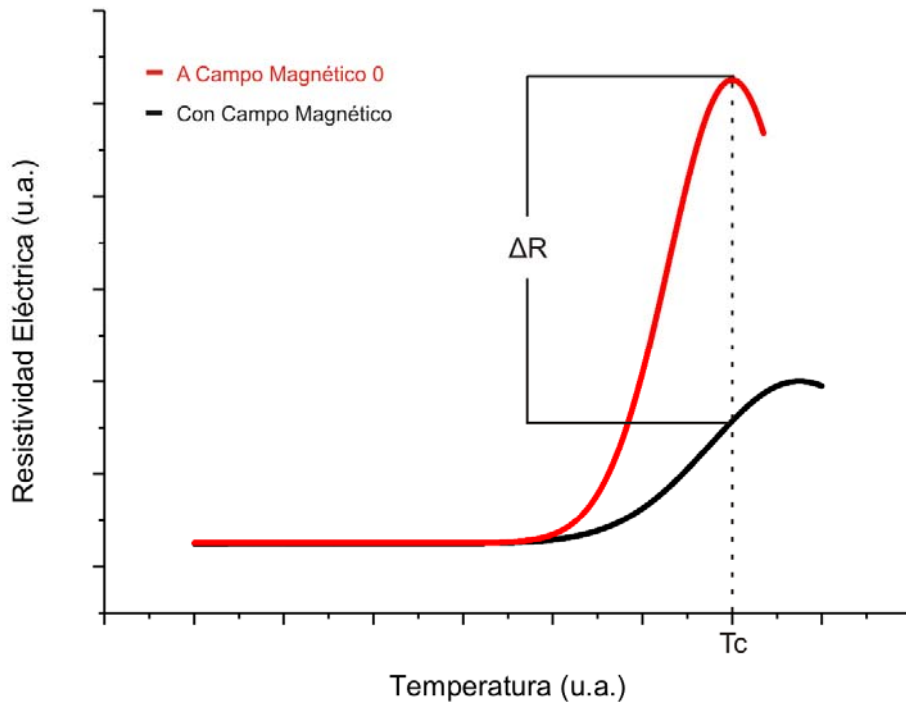
- *Magnetorresistencia colosal (CMR)*: de la que se tratará en la siguiente sección.

3.1 MAGNETORRESISTENCIA COLOSAL

La magnetorresistencia colosal (*CMR*)¹² es la propiedad de algunos materiales, principalmente óxidos con estructura de perovskita basados en manganeso (manganitas), que les permite cambiar considerablemente su resistencia eléctrica en presencia de un campo magnético. Los materiales que tienen como rasgo la *CMR* pueden mostrar magnetorresistencias muy superiores a las convencionales incluida la *AMR* y la *GMR*.

El fenómeno de Magnetoresistencia Colosal se presenta principalmente cerca de la temperatura de Curie o de transición ferro-paramagnética, T_c , y se manifiesta como un cambio brusco en la resistividad eléctrica del material, de varios órdenes de magnitud, cuando se aplica un campo magnético externo como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 15. Magnetorresistencia colosal



Los primeros estudios sobre *CMR*¹³ se realizaron en la década de los noventa, donde se observó que en las manganitas se pueden obtener valores de magnetorresistencia negativa notablemente mayores que los encontrados hasta ese momento, este descubrimiento reanimó el interés por ellas. Dicho efecto fue notado por Jin y Col. en el $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ y por von Helmolt y Col. En manganitas dopadas con Ba. El fenómeno se presentaba en

¹² COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2007. [en línea]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Magnetorresistencia_colosal> [citado el 16 de octubre, 2007]

¹³ SACANELL, Joaquín. Propiedades Eléctricas y Magnéticas, Separación de Fases y Comportamiento Dinámico en Manganitas. Universidad de Buenos Aires. 2006 Argentina

compuestos ferromagnéticos (*FM*), cerca de T_c y para campos magnéticos del orden de 5 Teslas. Estos compuestos además presentaban una transición metal aislante en T_c .

A partir de ese momento se realizaron numerosos trabajos de investigación, aplicando una gran variedad de técnicas experimentales y herramientas teóricas conocidas a diversos compuestos de esta familia con el objetivo de explicar el efecto de *CMR*. En un principio se suponía que los efectos de la aplicación de un campo magnético eran esencialmente dos: primero, cerca de T_c , reducir las fluctuaciones térmicas de los espines; segundo, por debajo de T_c , orientar los distintos dominios ferromagnéticos.

En los materiales que presentan *CMR*, cerca de T_c las fluctuaciones térmicas de los espines de los electrones dificultan la conducción; la reducción de esas fluctuaciones por la aplicación de un campo magnético externo produce una disminución de la resistividad eléctrica, dando lugar a una magnetorresistencia de valor apreciable. Al disminuir la temperatura por debajo de T_c , el efecto del campo es sólo el de orientar los dominios ferromagnéticos. Dado que se ha comprobado experimentalmente que en un monocristal el transporte eléctrico es indiferente a la orientación relativa de los dominios ferromagnéticos su magnetorresistencia será pequeña en ese régimen de temperaturas.

Sin embargo, si la muestra es un cerámico, en el interior de cada grano ocurrirá lo explicado anteriormente, mientras que el borde de grano actuará como una “barrera” para el paso de los electrones. En este caso sí habrá diferencia en la resistividad si las magnetizaciones de los granos cerámicos adyacentes están o no paralelas, porque la altura de la barrera puede depender de esa orientación relativa. Entonces es esperable que la *MR* de un policristal ferromagnético homogéneo sea distinta de cero a baja temperatura.

Posteriormente al descubrimiento de la *CMR*, se observaron valores de *MR* comparables a los obtenidos en muestras ferromagnéticas pero en sistemas cuyo estado estaba caracterizado por un arreglo regular de átomos de Mn^{3+} y Mn^{4+} , lo que se conoce como orden de carga (*CO*). En ese caso se propuso que este cambio en la resistividad eléctrica se debe a que el estado de *CO* puede ser transformado en ferromagnético por un campo del orden de los 10 T dando lugar a una alta *MR*. Por comparación con la magnitud del efecto observado a principios de la década del 90 en este caso también se suele hablar de *CMR* aunque haya otro mecanismo involucrado que la produce.

Además de las teorías mencionadas anteriormente para explicar las causas de la *CMR*, investigaciones recientes han puesto de manifiesto la importancia que tienen en la aparición del fenómeno otros efectos tales como la distorsión Jahn-Teller y la formación en las manganitas de clusters magnéticos conformados por 4 a 8 iones de manganeso.

En la actualidad, la investigación del fenómeno de magnetorresistencia colossal está en constante evolución y su explicación teórica aún se encuentra en estudio.

3.2 MANGANITAS LSMO

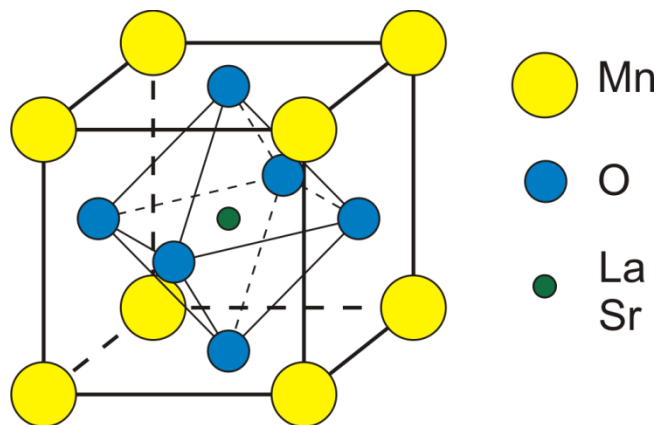
Una perovskita¹⁴ ideal es un compuesto químico que presenta una estructura cúbica, con un catión A en los vértices, un catión B en el centro del cubo, y aniones O^{2-} ubicados en los centros de las caras. Usualmente pueden ser representadas por una fórmula del tipo ABO_3 . Las perovskitas son compuestos fascinantes, ya que modificando los cationes A y B, pueden ser obtenidos materiales con propiedades fisico-químicas muy diferentes. Existen perovskitas aislantes ($SrTiO_3$), superconductoras ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$), ferroeléctricas ($BaTiO_3$), ferromagnéticas metálicas ($La_{2/3}Sr_{1/3}MnO_3$), antiferromagnéticas aislantes ($CaMnO_3$), entre otras.

Se denominan manganitas a las familias de perovskitas que contienen manganeso como principal componente. Su composición química es $A_{1-x}B_xMnO_3$; usualmente A es un elemento de tierra rara trivalente como La^{3+} , Nd^{3+} , Pr^{3+} , mientras que B es un elemento de tierra alcalino divalente tal como Ca^{2+} , Sr^{2+} , Br^{2+} . Estos materiales fueron descubiertos por Jonner y Van Santen.

Debido a que en el proyecto de investigación desarrollado se trabajó únicamente con manganitas LSMO, se modificará la manera de denotar la fórmula así, $La_{1-x}Sr_xMnO_3$, ya que en todos los sistemas que serán presentados A = lantano (La) y B = Estroncio (Sr).

La estructura cristalina madre de las manganitas es una perovskita cúbica, como se muestra en la figura 16. Los iones Mn^{3+} están situados en las esquinas rodeados por octaedros de O^{2-} , y los $La_{1-x}Sr_x$ ocupan el centro del cubo (la estructura también se puede representar con los $La_{1-x}Sr_x$ en las esquinas, y los manganesos en el centro). Cuando se modifica el nivel de dopante (Sr) los cationes siguen formando una red cúbica, pero los octaedros de O^{2-} se distorsionan modificando la estructura.

Figura 16. Estructura molecular de una manganita LSMO



Fuente: SACANELL, Joaquín. Propiedades Eléctricas y Magnéticas, Separación de Fases y Comportamiento Dinámico en Manganitas. Universidad de Buenos Aires. 2006 Argentina

¹⁴ HABERKORN, Néstor Fabian. Relación entre Estructura y Propiedades en Superredes de Perovskitas. Universidad Nacional del Sur. 2005 Argentina

Numerosos factores influyen en las propiedades de las manganitas, algunos de ellos son el dopaje (x) y la estequiometría o proporción del oxígeno en el compuesto. Para ciertos dopajes, estos compuestos presentan una transición al estado ferromagnético que se acompaña por un drástico aumento de la conductividad. Esta transición desde un aislante a un estado metálico magnético es una de las principales características de los materiales mencionados. En 1994 las manganitas llamaron fuertemente la atención, cuando se observó que presentaban magnetorresistencia colosal (CMR).

3.3 APLICACIONES DE LA MAGNETORRESISTENCIA EN NUEVAS TECNOLOGÍAS

La electrónica está fundamentada en el transporte de portadores de carga (electrones y huecos) en materiales semiconductores. Dicha conducción involucra ciertos mecanismos físicos que dependen de parámetros tales como el nivel de dopaje, las brechas de energía prohibidas, la captura y recombinación de cargas, entre otros.

Puesto que el electrón posee una carga eléctrica intrínseca, los dispositivos electrónicos convencionales basan su funcionamiento en controlar el flujo de electrones por medio de campos eléctricos. Esta conducción se ha aprovechado hasta hoy ingeniosamente, por ejemplo realizando circuitos que determinan respuestas a partir de valores de voltaje altos o bajos (1 y 0), que son los que conforman el alfabeto del mundo binario sobre el que se sustentan los equipos digitales.

Sin embargo, hay otra propiedad propia de los electrones (o huecos) que hasta ahora no ha sido tenida en cuenta. Esta propiedad es su momento magnético o *espín*.

El espín está cuantificado, pudiendo adoptar solo dos valores opuestos, *espín up* ó *espín down*. El comportamiento magnético de los materiales se determina en gran medida por la disposición de los espines en su estructura, por lo tanto surge la posibilidad de controlar el flujo de electrones ya no solo a través de campos eléctricos sino también por medio de campos magnéticos.

Esta reciente filosofía da origen a una nueva electrónica llamada magnetoelectrónica o espintrónica y su surgimiento está muy ligado con el descubrimiento del fenómeno de magnetorresistencia, que fue la primera manifestación apreciable de la acción del espín en los materiales.

Los dispositivos magnetoelectrónicos basan su funcionamiento en el efecto de magnetorresistencia, de los tipos de MR que se conocen actualmente, la más explotada es la GMR pues fue la primera que arrojó resultados convenientes de variación de resistencia a temperatura ambiente y en presencia de campos magnéticos relativamente débiles. Sin embargo, la CMR es objeto de una intensa investigación por parte de la comunidad científica en la actualidad puesto que la fabricación de los materiales que la presentan es mucho menos compleja y por lo tanto los costos se reducen notablemente. A continuación se presenta un cuadro comparativo entre la electrónica convencional y la magnetoelectrónica.

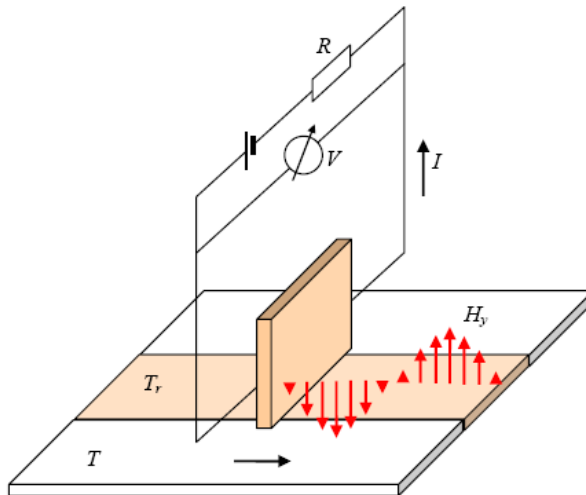
Cuadro 2. Comparación entre la electrónica convencional y la magnetoelectrónica

Electrónica Convencional	Magnetoelectrónica
Basada en el flujo de carga	Basada en la carga y en la dirección del espín
Limitada por la velocidad y el tamaño	Mayor velocidad y menor tamaño
Limitada por la disipación	Menor potencia requerida
Volatilidad	No volátil
Ampliamente desarrollada	Aun en estudio y experimentación

Algunas de las aplicaciones directas de la magnetorresistencia¹⁵ son:

- *Cabezas lectoras de medios magnéticos*: el principio de operación de una cabeza lectora de cinta basada en el efecto magnetorresistivo se esquematiza en la figura 17.

Figura 17. Principio de operación de una cabeza lectora magnetorresistiva



Fuente: FERNÁNDEZ, Juan C. Materiales Magnéticos. Universidad de Buenos Aires. 2004 Argentina

¹⁵ FERNÁNDEZ, Juan C. Materiales Magnéticos. Universidad de Buenos Aires. 2004 Argentina

La información se almacena en una cinta magnética en forma de una magnetización cuya dirección y magnitud varían en función de la posición en la cinta. Esto produce un campo magnético en los alrededores de la cinta, cuya intensidad depende de la posición.

Sobre la pista Tr de la cinta T se coloca una tira de la aleación magnetorresistiva, cuya resistencia se mide continuamente con la ayuda de la corriente de medición I . Las variaciones en la componente vertical (H_y) del campo magnético creado por la cinta grabada cambian la dirección de magnetización en la tira y producen entonces un cambio en su resistencia. Se obtiene así una señal de H_y en función del tiempo (una cabeza lectora convencional responde a la derivada temporal del flujo magnético, o sea proporcional a $\partial H/\partial t$).

El rendimiento de una cabeza magnetorresistiva es competitivo con el de una cabeza magnética convencional en términos de sensibilidad, inmunidad frente a ruido y diafonía (crosstalk). El método magnetorresistivo tiene la ventaja de la miniaturización, dado que se trabaja con películas delgadas del orden de los micrones de espesor, mientras que en una cabeza convencional un menor tamaño implica una fem inducida menor, lo que pone un límite al mínimo tamaño que puede usarse para tener una relación señal/ruido aceptable. Por otra parte, como la cabeza convencional responde a cambios del flujo magnético en el tiempo, hay una velocidad mínima de movimiento de la cinta por debajo de la cual la señal recibida es muy baja.

- *Sensores de campo magnético*: presentan una muy buena resolución y tienen un rango muy alto. Uno de las configuraciones implementadas en este tipo de sensores es el puente de Wheatstone, en el que cada rama corresponde a un magnetorresistor dispuesto de tal forma que un campo aplicado cause que su magnetización y la de su par opuesto rote hacia la dirección de la corriente, provocando un aumento de la resistencia; mientras en el otro par ocurre el fenómeno inverso y su resistencia disminuye.

Dentro del rango lineal de operación la tensión de salida resulta proporcional al campo magnético aplicado. En los sensores comerciales disponibles el rango de linealidad es inversamente proporcional a la sensibilidad del sensor. Por ejemplo, los sensores de Honeywell tienen una sensibilidad típica de 3 mV/Oe y el rango de linealidad es de unos 2KOe.

- *Válvulas de espín*: una aplicación del efecto GMR es la construcción de dispositivos integrados de alta sensibilidad a los campos magnéticos, llamados válvulas de espín (spin valves). Su estructura básicamente está conformada por cuatro capas: una capa antiferromagnética de "fijación" y dos películas delgadas magnéticas separadas por un espaciador no magnético. La película superior tiene su magnetización fija en una orientación (por el acople de intercambio con la capa antiferromagnética, mientras

que la película inferior (capa sensora) se deja libre para alinearse paralela o antiparalela en la presencia de campos magnéticos externos. La delgadez de la capa sensora la hace sensible a campos de valor muy bajo. Por otra parte, el espesor de la capa espaciadora no magnética es suficientemente grande para hacer despreciable el acoplamiento entre las dos películas magnéticas.

El principio de la disminución de la resistencia de la estructura GMR (las dos películas magnéticas y el espaciador) es el mismo que en las estructuras clásicas multicapa: el estado de menor resistencia se da cuando las películas magnéticas están ferromagnéticamente alineadas y el estado de alta resistencia se obtiene en la configuración antiferromagnética.

- *Memorias MRAM*: por Magnetic Random Access Memories, donde la información no está guardada a través de una carga en un condensador, como en el caso de las memorias semiconductoras tradicionales (DRAM), sino como el estado magnético (paralelo o antiparalelo) de sus interfaces conductoras. La estabilidad de la información magnética permite hacer memorias permanentes (como las FLASH), rápidas (como las SRAM) y de alta densidad, lo cual optimiza todas las memorias existentes en el mercado y promete un salto tecnológico importante.

Otras aplicaciones de la MR son tan diversas como brújulas de estado sólido, sensores de movimiento, potenciómetros sin contactos, acelerómetros, lectores de etiquetas o detección de minas antipersonales¹⁶.

¹⁶ FAJARDO, Dario Fernando. Implementación de la Técnica de Crecimiento de Materiales por Reacción de Estado Sólido. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, 2005.

4. SUBSISTEMA DE MEDICIÓN DE LA MAGNETORRESISTENCIA

Está íntimamente relacionado con el primer subsistema puesto que depende directamente de él y se puede considerar como la automatización de una de sus aplicaciones. Consiste en la implementación autónoma del método de las cuatro puntas para medir la resistencia de una muestra de material específica mientras se somete a un campo magnético externo. El subsistema de medición de magnetorresistencia consta de las partes que se mencionan a continuación.

Sonda de Resistividad: contiene la muestra de material sometida a estudio. La sonda de resistividad incluye las conexiones para los terminales involucrados en el método de las cuatro puntas, adicionalmente posee un sensor RTD de platino utilizado para medir la temperatura a la cual se encuentra la muestra evaluada.

Fuente de poder Tektronix PS2520G: suministra la corriente a la muestra de material investigado, esto es, para el método de las cuatro puntas. Se controla mediante computador a través del puerto GPIB.

Multímetro FLUKE 45: se encarga de medir el voltaje generado resultante del flujo de corriente a través de la muestra; su comunicación con el sistema de control y procesamiento de la señal de tensión obtenida obedece a la norma IEEE 488 puesto que el instrumento cuenta con una tarjeta de conexión al bus GPIB.

Controlador del subsistema de medición de la magnetorresistencia: está montado sobre un computador de escritorio y se desarrolla bajo el lenguaje de programación LabVIEW 6.1. Su función es la de administrar los dos dispositivos involucrados en el método de las cuatro puntas, éstos son la fuente de poder Tektronix PS2520G y el multímetro FLUKE 45. Además, se encarga de transformar las señales recibidas durante el proceso de medición en datos cuantificables tanto de campo magnético como de resistencia eléctrica.

Los datos obtenidos a partir de las anteriores etapas del subsistema de medición de magnetorresistencia se muestran y almacenan para su posterior análisis a cargo del usuario final.

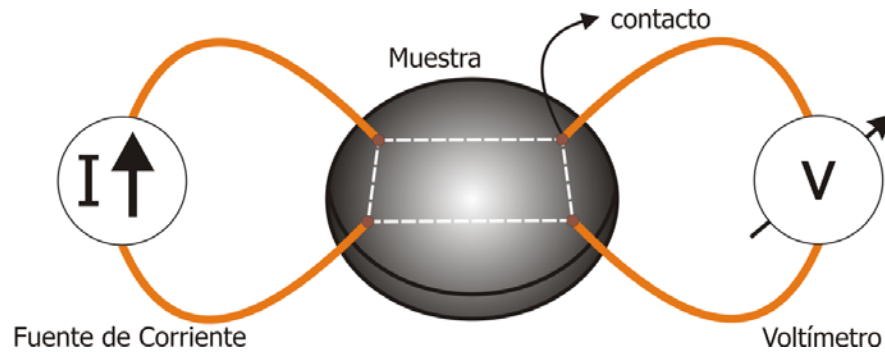
4.1 TÉCNICA DE LAS CUATRO PUNTAS

La técnica de cuatro puntas¹⁷ es uno de los métodos tradicionales más comunes para medir la resistividad en materiales. En la configuración de cuatro puntas, dos de ellas conducen la intensidad que se inyecta a la muestra, mientras las otras dos se usan para medir la diferencia de potencial producida debido al flujo de corriente en el material.

¹⁷ BUEGLER, M. A Hall Four-Point Probe on Thin Plates. Solid State Electron. 1967

Esta configuración de cuatro puntas fue propuesta originalmente en 1916 por Wenner para medir la resistividad de la Tierra, por lo que en el campo de la geofísica a esta técnica se le conoce como el método de Wenner. En 1954, esta técnica fue adoptada por Valdés para medir la resistividad de las obleas de semiconductores. Generalmente, las puntas están equiespaciadas y dispuestas en línea o formando un cuadrado entre si. Sin embargo, también son posibles otras configuraciones. En el presente trabajo se utilizó la geometría que se ilustra en la figura 18.

Figura 18. Configuración geométrica para la implementación de la técnica de las cuatro puntas



En las prácticas de ingeniería aplicada es común utilizar óhmetros que emplean el método de dos puntas para medir la resistencia de un elemento; sin embargo, cuando se trata de investigación de materiales, la medida de la resistividad con el método de los dos puntos es poco fiable. Hay una resistencia en los contactos del instrumento de medición, o en el instrumento de medición mismo, ésta resistencia adicional hace que la resistividad medida sea mayor a la real. Otro problema es que los contactos entre los electrodos metálicos y la muestra (si es de material semiconductor) tienden a tener otras propiedades eléctricas que pueden llevar a errores de estimación en la resistividad de la muestra. Muchos de éstos problemas se superan con la técnica de las cuatro puntas.

Existen argumentos teóricos que explican el motivo para usar cuatro puntas en lugar de dos. En el caso de usar únicamente dos puntas, cada punta sirve para aplicar el voltaje y también conducir la corriente. Así pues, en este caso la resistencia total R_T entre ambas puntas viene dada por la expresión:

$$R_T = 2R_C + 2R_{SP} + R_S \quad (26)$$

Donde R_C es la resistencia de contacto entre el metal de la punta y la muestra, R_{SP} es la resistencia distribuida (más conocida por su nombre en inglés spreading resistance), que es la resistencia bajo cada una de las puntas, y R_S es la resistencia del material que se pretende medir. La resistencia de contacto surge de contactar mecánicamente la punta metálica con la muestra. La resistencia distribuida obedece a la resistencia que encuentra la corriente

cuando fluye desde la punta metálica de pequeñas dimensiones hacia el material. Lo cierto es que ni R_C ni R_{SP} pueden determinarse con exactitud, lo que resulta en que la medida de R_S no puede extraerse con precisión de la resistencia medida con únicamente dos puntas.

De lo anterior, se justifica la razón para usar cuatro puntas en lugar de dos. En el caso de la configuración de cuatro puntas, aunque es cierto que las dos puntas que conducen la corriente todavía presentan las resistencias de contacto y distribuida asociadas a ellas, eso no es cierto para las dos puntas del voltaje, porque el voltaje se mide bien con un potenciómetro que no conduce corriente en absoluto, o bien con un voltímetro de alta impedancia que conduce muy poca corriente. Por lo tanto, en ambos casos las dos resistencias parásitas R_C y R_{SP} son despreciables.

Con la técnica de las cuatro puntas, para determinar la resistencia eléctrica de la muestra, asociada al voltaje medido entre 3 y 4 cuando se inserta corriente por 1 y 2, que se denota como $R_{12,34}$, únicamente basta con aplicar la relación:

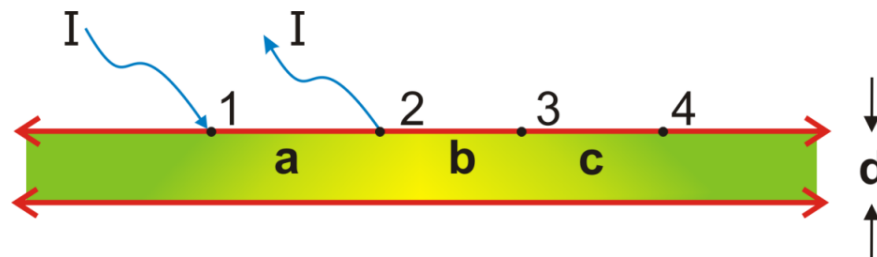
$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (27)$$

Donde V_{34} es el voltaje medido entre dos puntas e I_{12} es la intensidad de corriente inyectada por las dos restantes.

Pero si se desea conocer la resistividad eléctrica del material, es necesario tener en cuenta los argumentos matemáticos que se mencionan a continuación.

Se considera una muestra de material de resistividad ρ^{18} y espesor d que tiene forma plana semi-infinita con cuatro contactos 1, 2, 3, 4 a lo largo de su borde y espaciados por las distancias a , b y c respectivamente como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Una muestra de un plano semi-infinito con cuatro contactos a lo largo de su frontera



Fuente: VAN DER PAW, L. J. A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape. En: Philips Research Reports. Vol, 13. No 1, (febrero, 1958)

¹⁸ VAN DER PAW, L. J. A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape. En: Philips Research Reports. Vol, 13. No 1, (febrero, 1958)

Una corriente I entra a la muestra por 1 y sale por 2. La diferencia de potencial entre los puntos 3 y 4 debido a ésta corriente está dada por:

$$V_{34} = V_3 - V_4 = \frac{\rho I_{12}}{\pi d} \ln \left(\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right) \quad (28)$$

Por lo tanto, la resistencia asociada al voltaje medido entre 3 y 4 cuando se inserta corriente por 1 y 2, es:

$$R_{12,34} = \frac{\rho}{\pi d} \ln \left(\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right) \quad (29)$$

Siguiendo el mismo procedimiento se puede determinar la resistencia asociada al voltaje medido entre 1 y 4 cuando se inyecta corriente por 2 y 3 ($R_{14,23}$):

$$R_{14,23} = \frac{\rho}{\pi d} \ln \left(\frac{(a+b)(b+c)}{ca} \right) \quad (30)$$

Sumando las expresiones 29 y 30 y simplificando se tiene:

$$\exp \left(-\frac{\pi d R_{12,34}}{\rho} \right) + \exp \left(-\frac{\pi d R_{14,23}}{\rho} \right) = 1 \quad (31)$$

Si se considera una simetría adecuada en la ubicación de los terminales 1, 2, 3 y 4 para que las resistencias $R_{12,34}$ y $R_{14,23}$ sean iguales (tal como la que se muestra en la figura 18), se consigue la siguiente relación:

$$\rho = \frac{\pi d R_{12,34}}{\ln 2} \quad (32)$$

De donde

$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (33)$$

Por lo tanto la resistividad del material para la geometría descrita es:

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left(\frac{V_{34}}{I_{12}} \right) \quad (34)$$

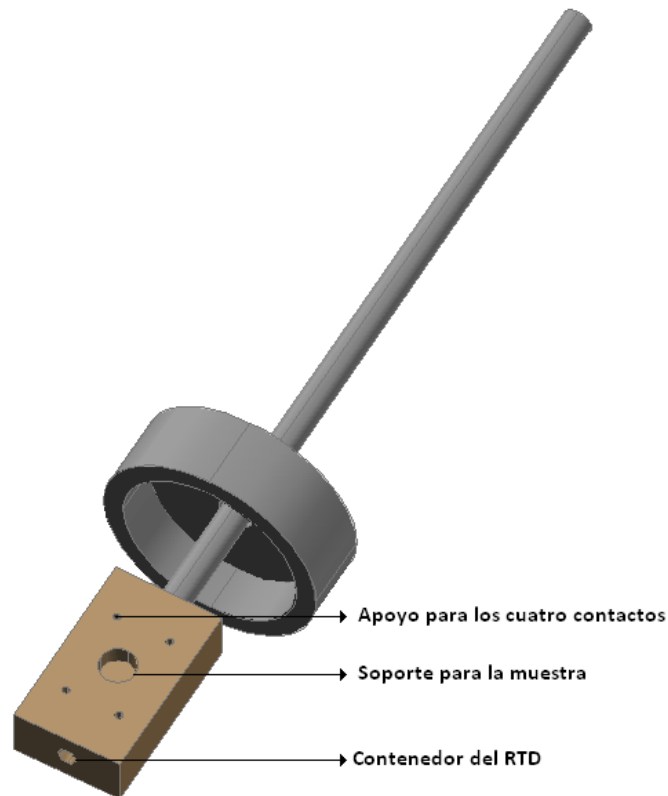
4.2 SONDA DE RESISTIVIDAD

La elaboración de éste dispositivo no hizo parte del desarrollo del actual proyecto de investigación. La sonda de resistividad es un elemento con el que ya contaba el Centro de Investigación en Materiales (CIMA) de la Universidad de Nariño, y está específicamente fabricada para la implementación de la técnica de las cuatro puntas. Se utiliza para medir el comportamiento resistivo de las muestras evaluadas al ser sometidas a diferentes temperaturas. Por lo tanto, la forma y materiales con que está diseñada se ajustan a tales propósitos.

La sonda de resistividad encierra el material que se encuentra bajo experimentación, consiste en un contenedor cilíndrico de aluminio, el cual tiene en su interior un soporte rectangular de cobre que sirve para sustentar la muestra, las cuatro puntas (cuatro alambres de cobre muy delgados) y un sensor RTD, usado para medir la temperatura a la que se encuentra el material evaluado.

El empleo de cobre y aluminio en la fabricación del dispositivo es debido a que éstos materiales son excelentes conductores térmicos. La siguiente figura presenta las principales características de la sonda de resistividad.

Figura 20. Esquema de la sonda de resistividad



Se determinó que para la medida de magnetorresistencia era muy conveniente utilizar la sonda de resistividad, pues con su empleo se logra una implementación más cómoda y

eficiente de la técnica de las cuatro puntas. Además los materiales de los cuales está fabricada, no interfieren en las mediciones puesto que no presentan una interacción magnética fuerte con el campo externo aplicado.

Para realizar la medición de magnetorresistencia se compacta primero el material investigado en una pastilla cilíndrica, posteriormente los cuatro alambres de cobre, incluidos en la sonda, se fijan a la muestra con soldadura de indio mediante presión. Se ubica la muestra dentro del contenedor de aluminio de la sonda de resistividad y finalmente se sitúa en medio de las bobinas de Helmholtz del electroimán considerando una orientación determinada de la muestra con respecto a la dirección del campo magnético generado.

4.3 FUENTE DE PODER TEKTRONIX PS2520G

La fuente de alimentación de corriente continua Tektronix PS2520G se encarga de proporcionar un valor de corriente limitado entre 0 y 500mA para la muestra estudiada, posee las siguientes características.

Figura 21. Fuente Tektronix PS2520G



Fuente: Tektronix, Inc. PS2520, PS2520G, PS2521 & PS2521G Programmable Power Supplies, Users Manual. U.S.A.: Tektronix, Inc, 1995.

- Tres salidas independientes que permiten operar en serie o paralelo. 2 salidas de 0 a 36V, de 0 a 1.5A y una salida de 0 a 6V de 0 a 3A.
- Resolución de 10 mV en tensión y 1 mA en corriente.
- Panel de control que permite una configuración fácil del instrumento.
- Protección contra sobrevoltajes y sobretensiones.
- Alta estabilidad, baja desviación de voltaje en la salida.
- Secuencia de verificación de funcionamiento correcto del equipo al encender.
- Incluye una interface GPIB que permite operar y programar de manera remota el equipo¹⁹

¹⁹ Tektronix, Inc. PS2520, PS2520G, PS2521 & PS2521G Programmable Power Supplies, Users Manual. U.S.A.: Tektronix, Inc, 1995.

4.4 MULTÍMETRO FLUKE 45

Para medir el voltaje que se produce en la muestra se utiliza el multímetro FLUKE 45 el cual presenta las siguientes características.

Figura 22. Multímetro FLUKE 45



Fuente: FLUKE. 45 Dual Display Multimeter, Users Manual. 4 ed. U.S.A.: FLUKE Corporation, 1997.

- 2 displays que permiten la visualización de 2 magnitudes simultáneamente (ejemplo voltaje en un display y frecuencia en el otro).
- Operación remota del instrumento a través de GPIB o RS-232.
- Sensibilidad de $1\mu\text{V}$ en voltaje DC.
- Posee tres velocidades de lectura de magnitud; lenta (2.5 lecturas por segundo), media (5 lecturas por segundo), alta (20 lecturas por segundo). La precisión en dígitos disminuye a medida que se aumenta la velocidad de lectura²⁰.

El proceso para configurar el equipo como medidor de voltaje es el siguiente

- Seleccionar el modo de voltaje
- Seleccionar el modo de autoescala
- Configurar en el modo de comunicación GPIB
- Escoger la dirección GPIB del dispositivo (valor entre 1 y 15)²¹

4.5 CONTROLADOR DEL SUBSISTEMA DE MEDICIÓN DE LA MAGNETORRESISTENCIA

La medida de resistencia en manganitas LSMO se realiza utilizando la técnica de las cuatro puntas que se explicó detalladamente en el numeral 4.1, el controlador se encarga en este caso de gobernar a la fuente de alimentación Tektronix PS2520G que suministra un valor de corriente que se puede escoger entre 0 y 500mA, y de medir el voltaje producido a través del multímetro FLUKE 45, teniendo en cuenta el tiempo de estabilización del valor de campo magnético externo y la velocidad de lectura del instrumento.

²⁰ FLUKE. 45 Dual Display Multimeter, Users Manual. 4 ed. U.S.A.: FLUKE Corporation, 1997.

²¹ Ibid.

4.5.1 Especificaciones del controlador. El programa de control del subsistema de medición de la magnetorresistencia se encarga de medir la resistencia eléctrica de la muestra conectada en la sonda de resistividad para una secuencia de valores de campo magnético externo aplicado. El controlador gobierna los equipos involucrados en este proceso que son el multímetro FLUKE 45 y la fuente de poder Tektronix PS2520G a través de la interfaz IEEE 488. Teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- El programa de control se encarga de configurar la fuente Tektronix PS2520G en modo de funcionamiento de regulación de corriente proporcionando una alimentación constante a la muestra, el valor de corriente es suministrado por el usuario.
- La corriente aplicada al material tiene un valor máximo de 500mA, esto se debe a que la muestra esta conectada con la fuente a través de alambres de cobre muy delgados, corrientes superiores ocasionan calentamiento y el desprendimiento de los mismos.
- La muestra genera un voltaje el cual se mide a través del multímetro FLUKE 45.
- El programa de control se encarga de realizar la división entre el valor de voltaje y corriente para obtener la resistencia de la muestra.

En el caso del multímetro FLUKE 45, se debe realizar una configuración inicial del equipo para la medición óptima de resistencia. Para esta aplicación las opciones seleccionadas fueron.

- Medida de voltaje en autoescala.
- Menor velocidad en el número de muestras por segundo capturadas por el instrumento, lo que aumenta los dígitos de precisión en la medida.

Otro aspecto a tener en cuenta para el diseño del controlador son las tareas de inicio cada vez que se quiera realizar el proceso de medición. Las rutinas implementadas se mencionan a continuación.

- Verificación de la disponibilidad de los equipos a utilizar.
- Configuración de los instrumentos utilizados para medir la magnetorresistencia.

La medida de la magnetorresistencia se puede obtener para variaciones de campo magnético en un rango de valores determinado. Esto implica almacenar los valores de resistencia medida de acuerdo al valor de campo magnético externo, dicho paso requiere la sincronización entre el subsistema de generación de campo magnético y el subsistema de medición de la magnetorresistencia. Esta etapa se realizó tomando la medida en tiempo

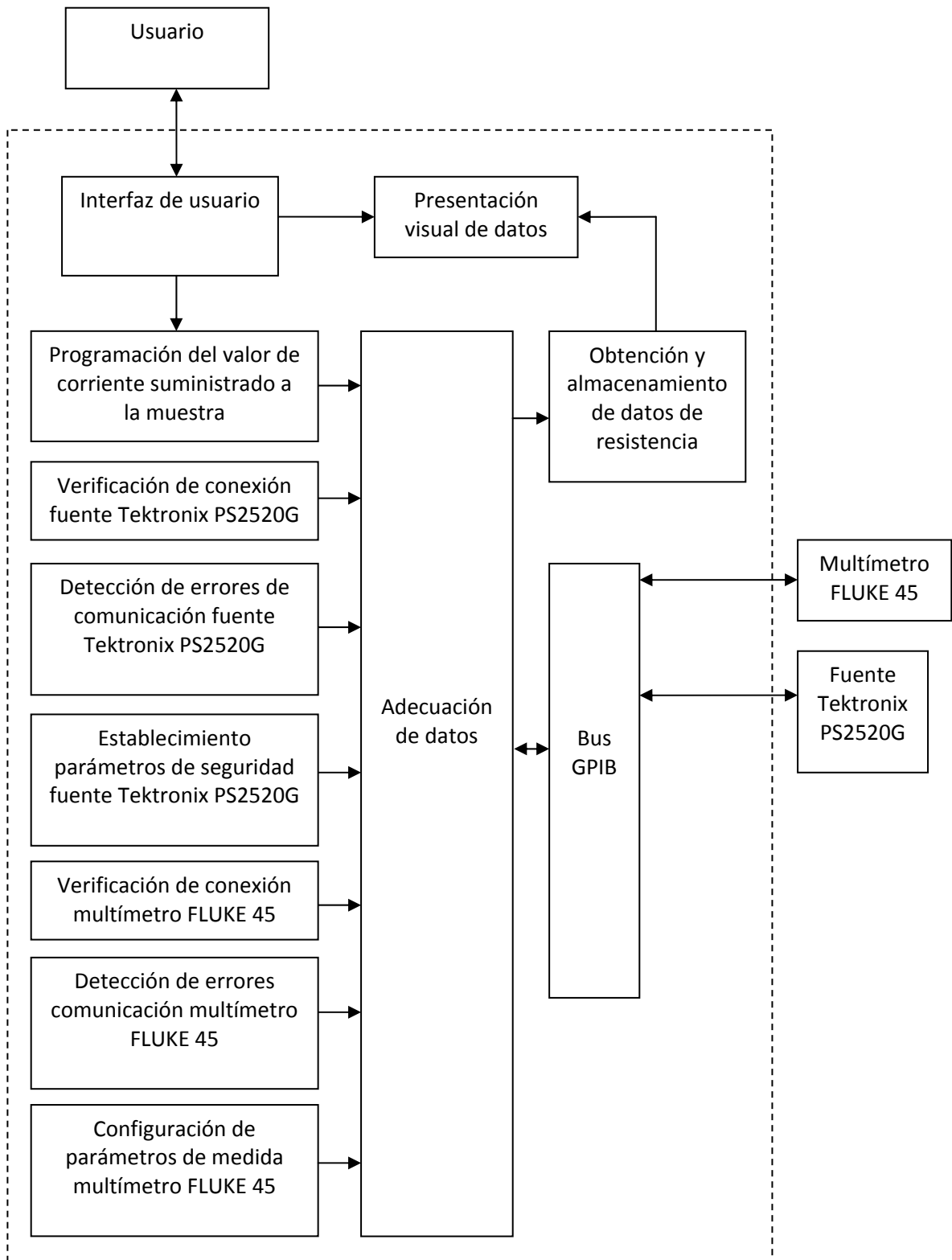
discreto en un intervalo que se puede establecer en el programa de control, el intervalo mencionado varia la separación de tiempo entre una medida de resistencia y otra, además de determinar el tiempo de realización de la prueba.

Mencionadas las características a tener en cuenta dentro del programa de control implementado, se tienen las siguientes funciones:

- Asignación del valor de corriente a la muestra de acuerdo con la necesidad del usuario.
- Almacenamiento de datos de resistencia y campo magnético.
- Presentación de los resultados en una gráfica durante el tiempo en que se realiza la medición.

Finalmente, la interfaz de usuario consta de un panel de control gráfico que permite el uso del programa implementado, de una manera fácil. Este panel funciona conjuntamente con el subsistema de generación de campo magnético planteado en el numeral 2.5.3. El diagrama de bloques del subsistema de medición de magnetorresistencia se presenta en la siguiente figura.

Figura 23. Diagrama de bloques del controlador del subsistema de medición de la magnetorresistencia



5. DETALLES EXPERIMENTALES

5.1 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL ELECTROIMÁN SEGÚN WEISS

El electroimán Según Weiss es un instrumento versátil que tiene la capacidad de generar campo magnético en un rango que va de 0 a 1 Tesla, este campo depende de la corriente aplicada al equipo y de la distancia entre los polos o longitud del entrehierro. Es necesario por lo tanto conocer el comportamiento de dicho campo experimentalmente, utilizando en este caso sensores de efecto Hall que se ofrecen en el mercado. Para este estudio se utilizó los sensores UGN3503UA y A1302, estos dispositivos registran campo magnético externo, entregando una señal de voltaje DC proporcional al campo aplicado en el rango de medida propio del sensor.

5.1.1 Sensor A1302. Es un sensor análogo de efecto Hall fabricado por Allegro MicroSystems, que provee una salida de voltaje proporcional al campo magnético externo aplicado, este dispositivo tiene un voltaje de trabajo igual al 50% del voltaje de alimentación y tiene una sensibilidad de 1.34mV/G^{22} . Para medir el campo magnético generado por el electroimán Según Weiss se utilizó un programa de control elaborado en LabVIEW, el cual realiza la tarea de variar el campo generado por el electroimán en sentido y en magnitud, además controla la alimentación del sensor y registrar el voltaje de salida, almacenando los valores de corriente aplicada al electroimán y voltaje de salida del sensor en un archivo plano de texto para su posterior análisis.

5.1.2 Sensor UGN3503UA. Es un sensor de efecto Hall fabricado por Allegro MicroSystems, capaz de medir cambios pequeños en el campo magnético externo aplicado, presenta una señal de salida con ruido muy bajo, además de funcionar en un amplio rango de temperatura sin alterar sus características eléctricas. Al igual que el sensor A1302 presenta un voltaje de trabajo, el cual aumenta o disminuye en valor proporcional al campo magnético, este dispositivo posee tres terminales los cuales son tierra, alimentación y salida²³, y su configuración es igual a la del sensor A1302 lo cual permitió utilizar el mismo montaje para la obtención de los datos de voltaje y corriente necesarios.

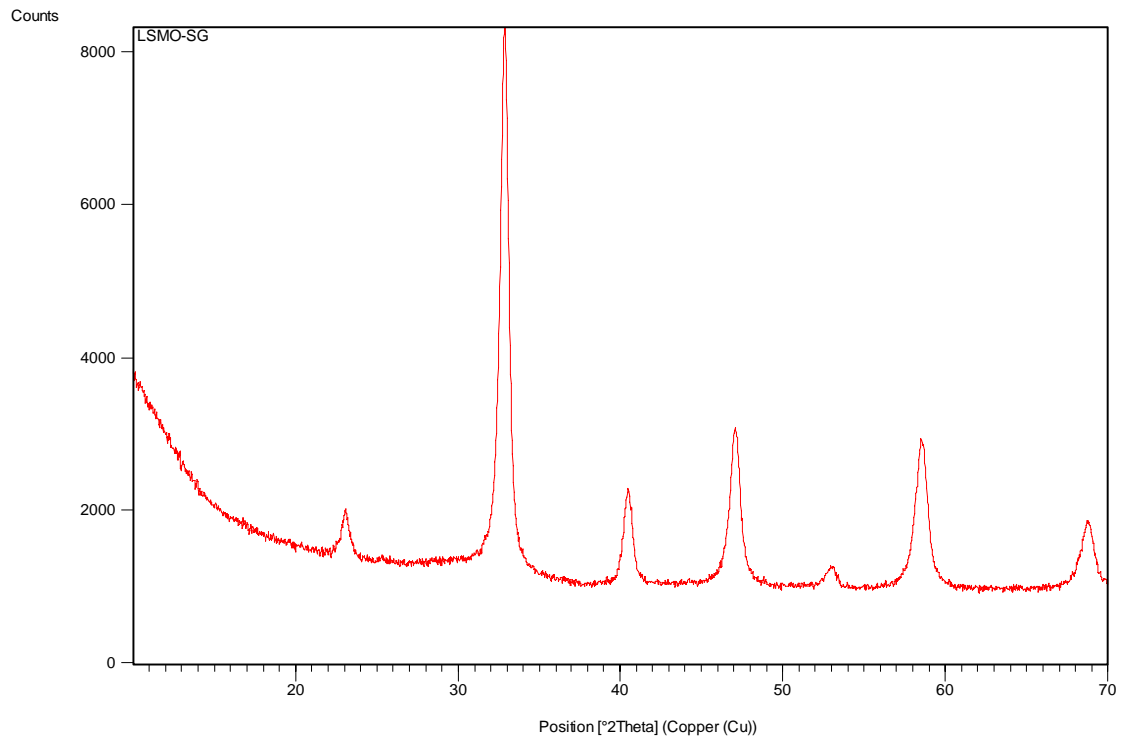
²² ALLEGRO MICROSYSTEMS. Ratiometric, linear Hall-effect sensors UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA [en línea]. U.S.A. : Allegro MicroSystems, Inc., 2002. Disponible en Internet: <<http://www.datasheetcatalog.com>>.

²³ ALLEGRO MICROSYSTEMS. Continuous-time ratiometric linear Hall effect sensors A1301 and A1302 [en línea]. U.S.A. : Allegro MicroSystems, Inc., 2005. Disponible en Internet: <<http://www.alldatasheet.com>>.

5.2 APLICACIÓN DEL SISTEMA EN LA MEDIDA DE LA MAGNETORRESISTENCIA EN MANGANITAS LSMO

5.2.1 Preparación de las muestras de manganita LSMO. Para las pruebas experimentales se utilizaron manganitas del tipo $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$. Este tipo de manganita fue sintetizada por el grupo de investigación en materiales cerámicos perteneciente al CIMA de la Universidad de Nariño, dicha preparación se llevó a cabo a través del método de Sol-Gel²⁴ el cual permite minimizar considerablemente las posibles impurezas del material resultante tal como se muestra en el difractograma de rayos X presentado en la figura 24, además con éste método se logra reducir el tamaño de grano hasta unas decenas de nanómetros, mejorando en éste aspecto a otros procedimientos como el de reacción de estado sólido con el que se logran dimensiones del orden de micrómetros.

Figura 24. Difractograma de rayos X para la manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$



Fuente: LSMO-SG DRX. Laboratorio de Caracterización de Materiales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

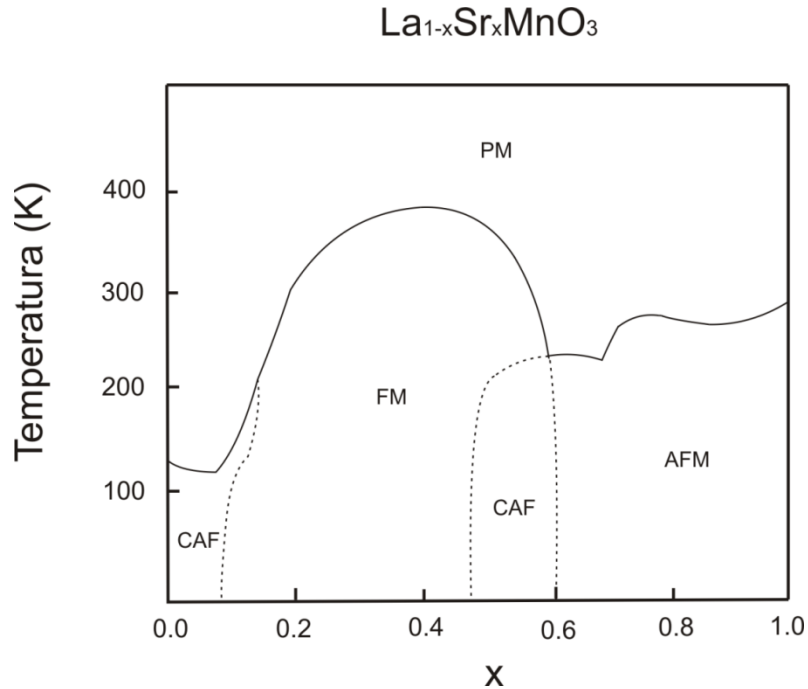
Como está especificado en la figura 24, la fórmula química del material fabricado es: $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$.

Un aspecto importante a considerar en las manganitas es su diagrama de fases, el cual muestra el comportamiento magnético del material dependiendo de la concentración del

²⁴ YANG, Wein-Duo. Microstructure, magnetoresistance and electrical properties of LaSrMnO films synthesized from citric acid and ethylene glycol

dopante (en este caso Sr) y de la temperatura. Para el caso del $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$, el diagrama de fases se presenta en la figura 25.

Figura 25. Diagrama de fases para el compuesto $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$



En la figura 25, se distinguen cuatro estados magnéticos que son: ferromagnético (*FM*), paramagnético (*PM*), antiferromagnético (*AFM*), y antiferromagnético cantedo (*CAF*). Para la concentración de dopante específica $x=0.35$ que corresponde al compuesto $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ tratado en este documento se puede observar que a temperatura ambiente se tendrá un comportamiento ferromagnético. Cabe anotar que ésta es una característica importante para obtener efectos magnetorresistivos apreciables, aunque sería más deseable variar la concentración del dopante de tal forma que sea posible trabajar cerca de la zona de transición ferro-paramagnética a temperatura ambiente a fin de incrementar la MR, sin embargo esta no es una tarea correspondiente al presente trabajo investigación.

El material, mediante el método de Sol-Gel utilizado, se obtiene en forma de polvo; sin embargo, esta presentación no es conveniente para efectuar las mediciones correspondientes a la caracterización eléctrica y magnética del mismo, las cuales se tratan en el presente documento. Por lo tanto, es necesario compactar el material para conseguir una muestra sólida de geometría definida.

Para tal fin, se utiliza un pastillero cilíndrico de acero inoxidable (material que no tiene una interacción magnética fuerte) con el propósito de no alterar las propiedades de la

manganita, y por medio de una prensa mecánica se aplican 5000 lb de presión al polvo durante un tiempo de 10 a 30 segundos, posteriormente se extrae.

De ésta manera se obtienen muestras en forma de pequeñas pastillas cilíndricas de 5.3 mm de diámetro y espesor de 0.6 mm aproximadamente, las cuales se presentan en la siguiente figura.

Figura 26. Fotografía de una muestra de manganita LSMO



Finalmente, las pastillas son llevadas a un proceso térmico conocido como sinterización con el fin de compactar más sus átomos y así darles mayor consistencia y la suficiente resistencia mecánica para su manipulación. Este proceso consiste en someter la manganita a una temperatura de 850 grados centígrados por 13 horas en atmósfera de aire. Toda esta práctica se efectúa en una mufla Lindberg/Blue M modelo numero BF51866A-1, la cual se muestra en la figura 27.

Figura 27. Mufla Lindberg/Blue M utilizada en el proceso de sinterización de las muestras



5.2.2 Medición de la resistividad eléctrica mediante el método de las cuatro puntas. La resistividad de un material es directamente proporcional a la resistencia del mismo y la constante de proporcionalidad está determinada estrictamente por la geometría de la muestra. Por lo tanto, para conocer la resistividad de las manganitas empleadas, basta con medir su resistencia eléctrica y luego multiplicar este valor por un factor dependiente de la configuración con la cual se efectuó la medición (como se describe en la ecuación 34).

Para encontrar la resistencia de las muestras, se realizaron curvas características $V-I$ (Voltaje-Corriente) utilizando valores de corriente continua desde 0 hasta 400 mA y a temperatura ambiente para cada pastilla de manganita, con el fin de establecer si presentaban un comportamiento lineal (óhmico) y de ser así, determinar para qué rango de corrientes se cumplía esta característica. Con la región óhmica ya definida, la resistencia eléctrica viene dada por la pendiente de la recta encontrada.

Típicamente la resistencia de las muestras a temperatura ambiente está alrededor de los 0.09Ω para LSMO valor mucho menor que los correspondientes a los cables que se utilizan para su medición (1Ω). Por lo tanto es necesario un procedimiento en el cual se pueda independizar el resultado obtenido de la resistencia de estos últimos. La técnica que permite ésta independencia es el método de las cuatro puntas.

Como se explicó en el capítulo 4.1, en el método de las cuatro puntas, se utiliza cables independientes para la aplicación de corriente y la medición de tensión. De esta forma, al no circular corriente por los cables que miden la tensión no habrá una caída de potencial en ellos debida a la resistencia de los mismos y la tensión será mayormente debida a la resistencia de la muestra.

Para la aplicación del método de cuatro puntas, la pastilla del material a medir se ubica en la sonda de resistividad (de la cual se habla en el numeral 4.2 del presente documento) como se muestra en figura 28. La manganita se sitúa sobre un portamuestras de cobre macizo que sirve también de soporte para los cuatro cables unifilares utilizados en la medición, los cuales se sueldan a la muestra siguiendo la configuración descrita en la figura 18.

Figura 28. Muestra de manganita ubicada en la sonda de resistividad



La corriente se inyecta a la pastilla a través de los puntos correspondientes por medio de la fuente de poder Tektronix PS2520G y el voltaje se mide entre los puntos restantes con un multímetro FLUKE 45. Se realizó la automatización de este sistema de medición a través de un programa desarrollado en LabVIEW 6.1 cuya interfaz de usuario se muestra en el anexo B. La comunicación de control del computador con la fuente de poder Tektronix PS2520G y el multímetro FLUKE 45 se hace por medio del bus GPIB.

La resistividad ρ del material se relaciona con la resistencia para la geometría empleada en el procedimiento experimental descrito anteriormente mediante la ecuación.

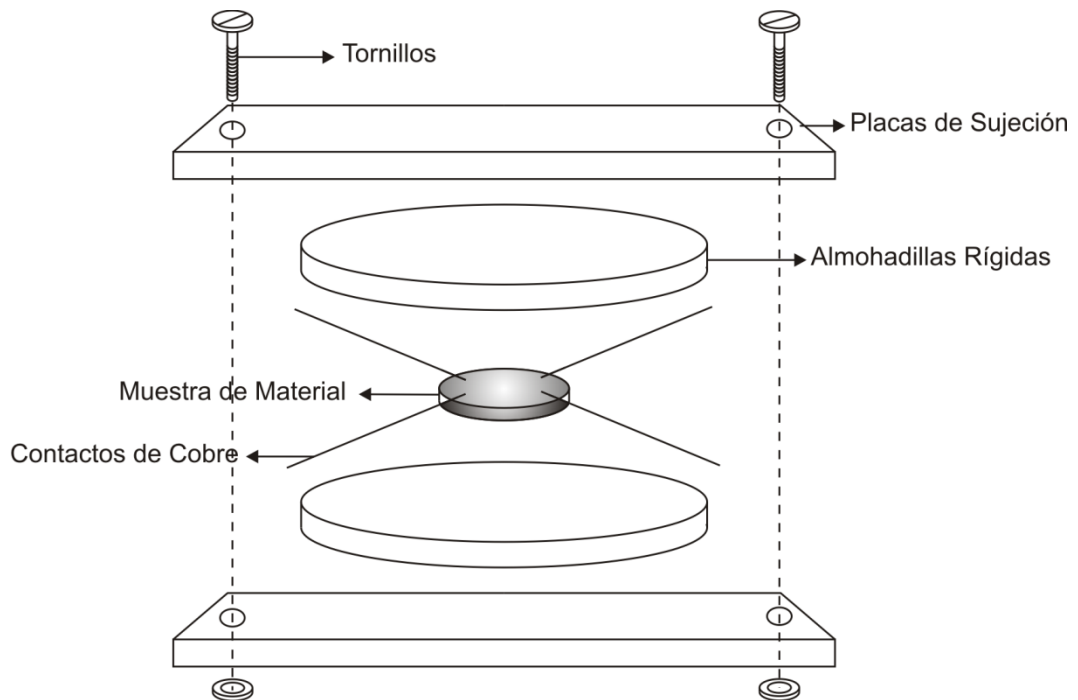
$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} R \quad (35)$$

Siendo R la resistencia medida y d el espesor de la pastilla.

Para realizar la unión de los cuatro contactos a la pastilla se probó con tres diferentes métodos: presión, pintura de plata y soldadura de indio. Estas técnicas se describen a continuación.

- *Método de presión:* como su nombre lo indica, éste método consiste en contactar la muestra por medio de la aplicación de presión mecánica, para tal fin se fabricó un dispositivo en forma de prensa que mantendría los cuatro alambres de cobre unidos a la manganita en una posición fija, el dispositivo se muestra en la figura 29.

Figura 29. Mecanismo diseñado para aplicar el método de presión

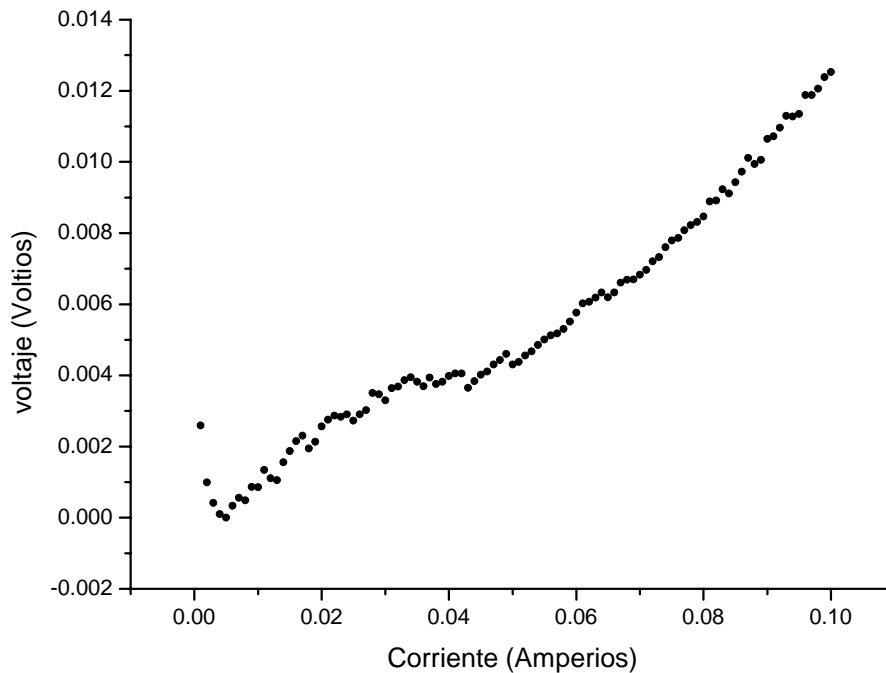


Como el mecanismo sería igualmente utilizado para las posteriores mediciones de la magnetorresistencia, para su diseño se tuvo en cuenta que no estuviera elaborado con materiales que presentaran una interacción magnética fuerte con el propósito de no afectara la homogeneidad del campo magnético externo aplicado con el electroimán de Weiss. De esta forma, las tapas fueron fabricadas con acrílico mientras que para aplicar presión a la muestra se utilizaron tornillos y tuercas de bronce.

Sin embargo, no fue posible realizar ninguna prueba con éste método, puesto que las pastillas presentaron poca resistencia mecánica y al someter la muestra a presión se resquebrajaba con facilidad.

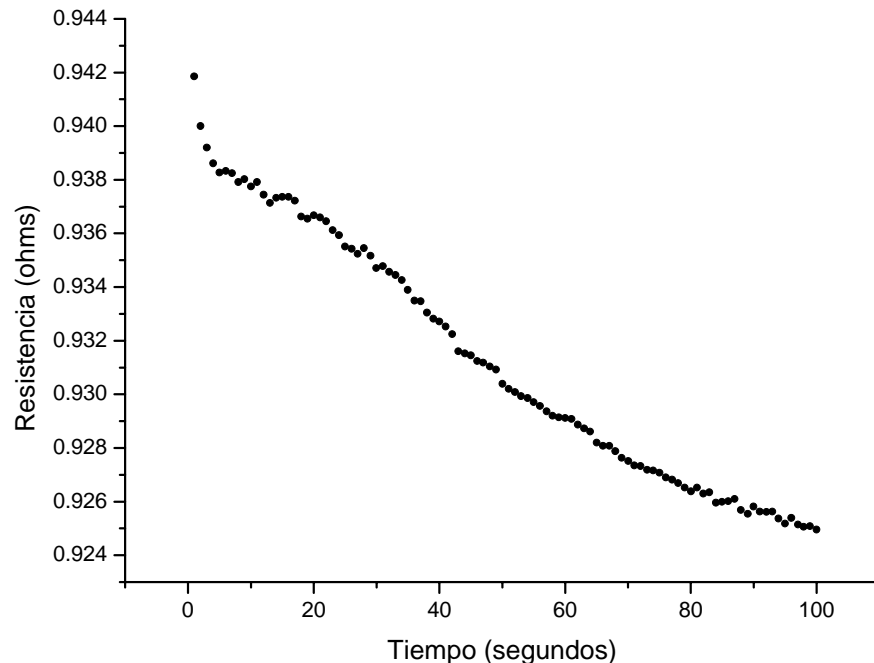
- *Método de pintura de plata*: se utilizó pintura de plata de referencia *electronic conductive tinture super star*, para soldar los cuatro contactos a la muestra. En principio se obtuvieron buenos resultados de adherencia después de dejar secar la pintura por aproximadamente 20 minutos como lo recomendaba el fabricante, sin embargo las curvas de medición registradas mediante éste método resultaron muy ruidosas y las pendientes de las gráficas observadas no tenían una tendencia clara sobre todo para los primeros valores de corriente aplicada. Una de las curvas obtenidas con el método de pintura de plata es la que se muestra a continuación.

Figura 30. Curva V-I para la manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ obtenida con el método de pintura de plata



Posteriormente se determinó que la pintura de plata disminuía su resistividad con el tiempo, por lo tanto para los primeros valores de medición se presentaba una resistencia alta en los contactos lo que generaba un ruido considerable. La disminución de la resistencia eléctrica con el tiempo se debe a que la pintura de plata utilizada presenta una resistividad dependiente de la temperatura, por lo tanto al hacer circular corriente por los contactos, éstos se calentaban levemente provocando que la resistencia de la pintura bajara. Para sustentar ésta explicación se realizó una curva resistencia contra tiempo, de una muestra de pintura de plata sola, la gráfica obtenida es la siguiente.

Figura 31. Curva resistencia-tiempo para una muestra de pintura de plata de referencia *electronic conductive tinture super star* y una corriente de 150 mA



En la gráfica se nota claramente la disminución de la resistencia a través del tiempo. Por ésta razón el método de pintura de plata se consideró inapropiado.

- *Método de soldadura de indio*: el indio es un metal muy utilizado en soldaduras especiales puesto que es extremadamente maleable y tiene la propiedad de adherirse a distintos materiales. Existe una gran variedad de técnicas usadas para soldar con indio y éstas dependen esencialmente de las características tanto de los materiales a ensamblar como de la utilidad que se busque. Para el caso del método de cuatro puntas se prefirió recubrir con indio los puntos de la muestra de manganita en donde irían los contactos de cobre, y luego aplicando presión leve se une el contacto a

dicho punto. Así se logra una adherencia y conducción óptimas. Los resultados utilizando soldadura de indio fueron muy buenos por eso se decidió para posteriores mediciones recurrir a éste método.

Finalmente cabe anotar que existen muchas fallas experimentales a tener en cuenta cuando se hacen medidas de resistividad. A continuación se describen algunas sugerencias²⁵ para evitar errores en la medición:

- Hacer buenos contactos eléctricos en la muestra, se sugiere limpiar el área de contacto de la muestra con alcohol o un solvente apropiado. Si es posible rayar la muestra cortarla para exponer una superficie fresca. Utilizar contactos nuevos.
- El sistema de medición debe ser calibrado antes de realizar la medida.
- La impedancia de entrada del voltímetro tiene que ser al menos 5 órdenes de magnitud más alta que la resistencia de la muestra.
- Los instrumentos de medida deben ser probados antes de realizar la medición. Primero se prueban en cortocircuito, luego en circuito abierto y posteriormente con una muestra ya conocida.
- El área de los contactos debe ser mínima para aumentar la precisión.
- Para muestras pequeñas se debe tener en cuenta que los cables sean independientes, es decir que no hagan contacto entre sí.
- El voltaje o la corriente aplicados pueden causar calentamiento del material y por tanto variación en su resistividad, por lo tanto se recomienda trabajar con corrientes y voltajes bajos.
- Muchos materiales no obedecen la ley de Ohm, por lo tanto es importante realizar una relación de voltaje contra corriente aplicada y hacer la medición en la región lineal (óhmica) del material.
- Si uno de los contactos del voltímetro está dañado, el material estará desconectado de éste y el instrumento mostrará un voltaje aleatorio. Para verificar que ésta no sea la situación se debe medir el voltaje cuando la fuente de corriente se ajuste a 0 A.
- La resistividad de algunos materiales depende de la cantidad de luz a la que son expuestos, por esto se recomienda que durante la medición, se bloquee toda la luz hacia el material.

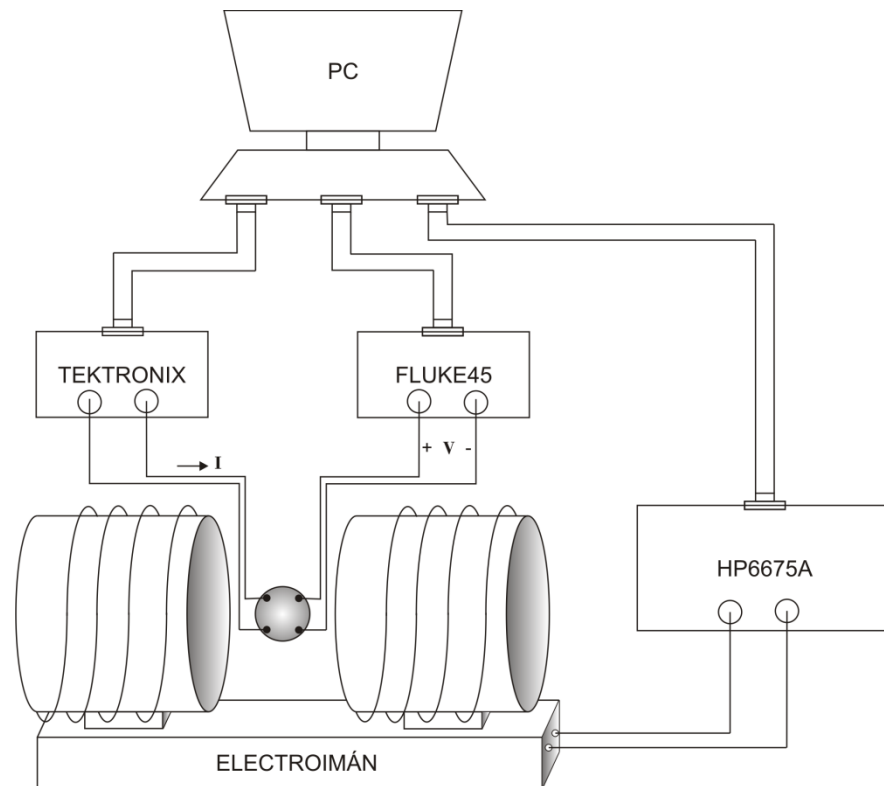
²⁵ WEBSTER, John G. *Handbook Measurement, Instrumentation and sensor Handbook*. CCR Press

5.2.3 Medición de la magnetorresistencia. La medición de la magnetorresistencia es uno de los objetos del presente trabajo, por tanto se lleva a cabo con el sistema previamente desarrollado, del cual se habla en el capítulo 4.

El procedimiento experimental a seguir es muy similar al descrito en la sección inmediatamente anterior de medición de resistividad, puesto que también se aplica la técnica de cuatro puntas. Sin embargo ahora la sonda que contiene la muestra, se ubica entre los polos del electroimán según Weiss con el fin de someterla a un campo magnético cuya magnitud puede variar entre 0 T y 1 T controladamente mediante el sistema desarrollado, pudiéndose además invertir el sentido del campo aplicado y logrando así un rango de variación dos veces mayor (desde -1 T hasta 1 T). Los pasos para el manejo del programa que gobierna la medida de la magnetorresistencia se explican con mayor detalle en las secciones 6.2.3 y 6.2.4.

Se realizaron mediciones de magnetorresistencia para las muestras de manganita LSMO. Distintas pruebas fueron efectuadas cambiando tanto el valor de la corriente suministrada a la pastilla del material como el rango de variación de campo magnético. El esquema del sistema de medición de la magnetorresistencia se presenta en la siguiente figura.

Figura 32. Esquema del sistema de medición de la magnetorresistencia

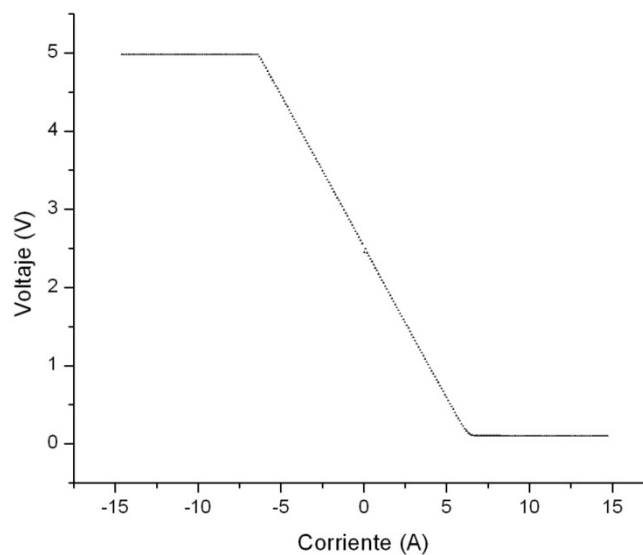


6. RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 MEDICIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE APLICADA EN EL ELECTROIMÁN

6.1.1 Medición con el sensor A1302.

Figura 33. Respuesta en voltaje del sensor A1302 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss



Las pruebas realizadas al sensor presentan una relación lineal entre la corriente aplicada al electroimán y la respuesta de voltaje del dispositivo de medición, sin embargo se observa que aproximadamente en un valor 6A el campo externo está fuera del rango que puede registrar el sensor. Esta prueba se realizó con una longitud del entrehierro igual a 0.093m.

Observado el comportamiento del sensor en su respuesta de voltaje contra la corriente aplicada al electroimán, se realizaron pruebas para estudiar el comportamiento del campo generado por el equipo en relación con la longitud del entrehierro, igual que en la medida observada en la figura 33, se realizó el mismo proceso variando la distancia entre los polos mediante las ruedas de acción manual del electroimán, esto permite observar el aumento en la pendiente de la curva voltaje vs corriente a medida que la longitud del entrehierro disminuye.

Figura 34. Respuesta en voltaje del sensor A1302 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss, con una longitud del entrehierro igual a 0.053m

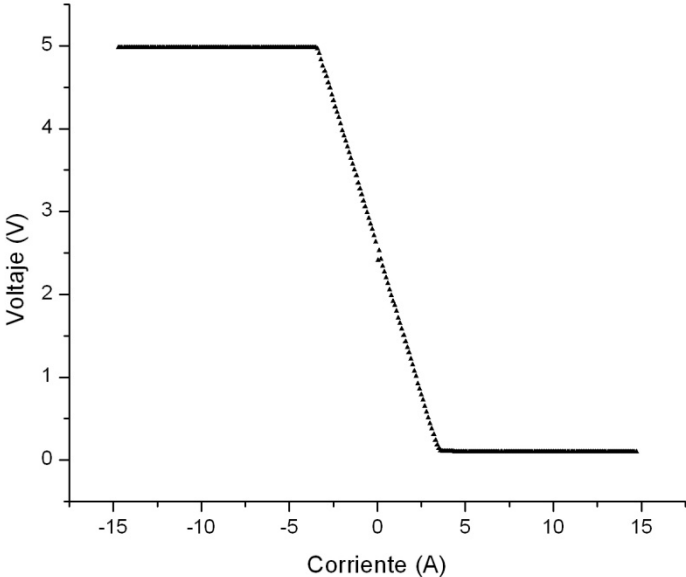


Figura 35. Respuesta en voltaje del sensor A1302 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss, con una longitud del entrehierro igual a 0.043m

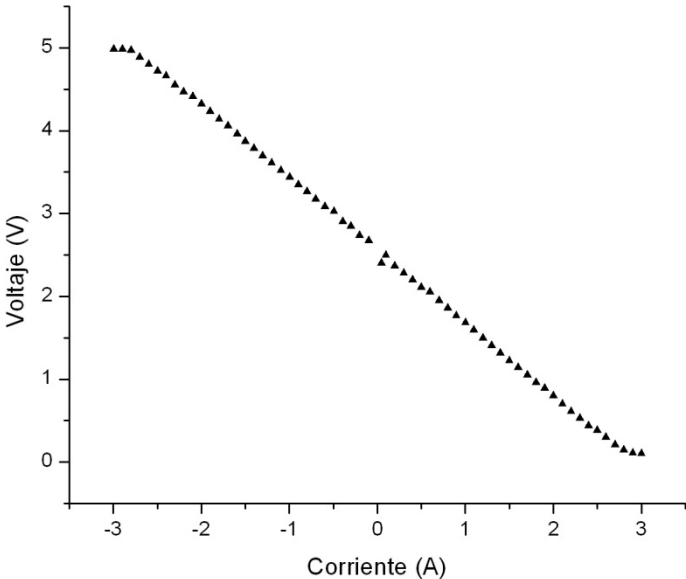


Figura 36. Respuesta en voltaje del sensor A1302 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss, con una longitud del entrehierro igual a 0.033m

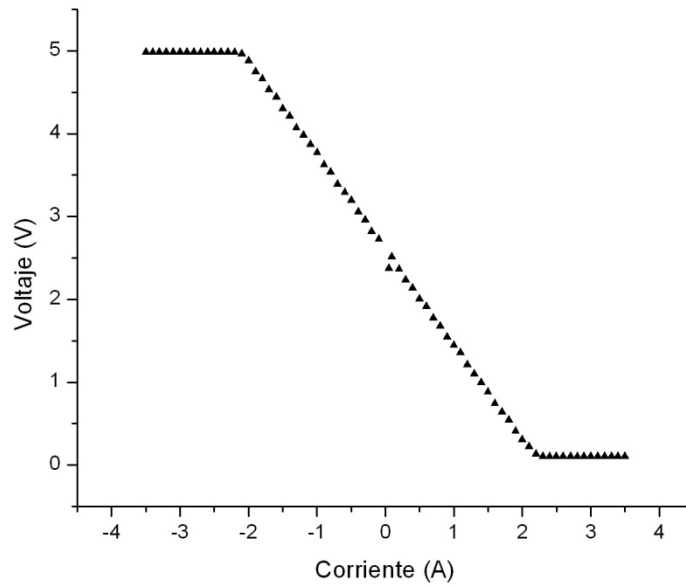
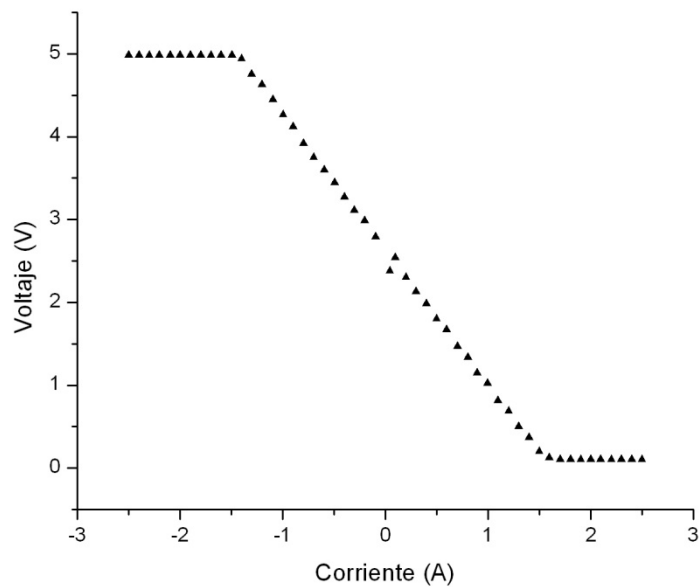
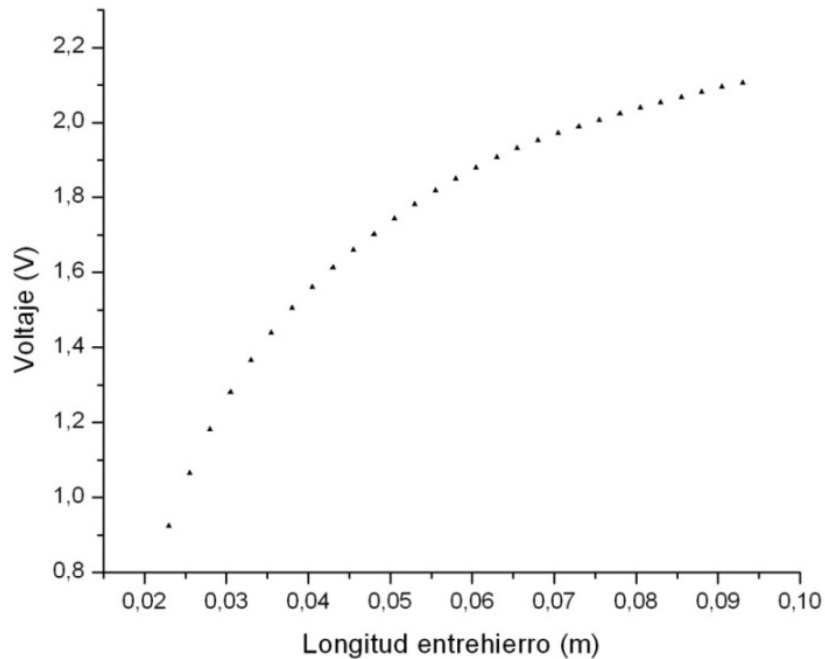


Figura 37. Respuesta en voltaje del sensor A1302 Vs. corriente aplicada al Electroimán según Weiss, con una longitud del entrehierro igual a 0.023m



Otra prueba realizada consistió en evaluar el cambio de voltaje de salida del sensor aplicando un valor de corriente constante al electroimán, disminuyendo la longitud del entrehierro en pasos de 0.0025m.

Figura 38. Respuesta en voltaje del sensor A1302 Vs. Longitud del entrehierro, con una corriente aplicada al electroimán de 1A



6.1.2 Medición con el sensor UGN3503UA. El comportamiento del sensor UGN3503UA permitió observar la influencia de la dirección del campo magnético incidente en su respuesta de voltaje, de acuerdo a la dirección de ubicación del dispositivo. Se observó este hecho en las figuras 39 y 40 en las que se invirtió la cara activa del sensor (dada en la hoja de características del dispositivo) con respecto a la dirección del campo incidente. Se aprecia también que el rango de media es menor que el del sensor A1302, dado que se realizaron pruebas en las mismas condiciones que el dispositivo anterior.

Figura 39. Respuesta en voltaje del sensor UGN3503UA Vs. Corriente aplicada al electroimán según Weiss, con su cara activa dirigida hacia el norte magnético y un entrehierro de longitud igual a 0.093m

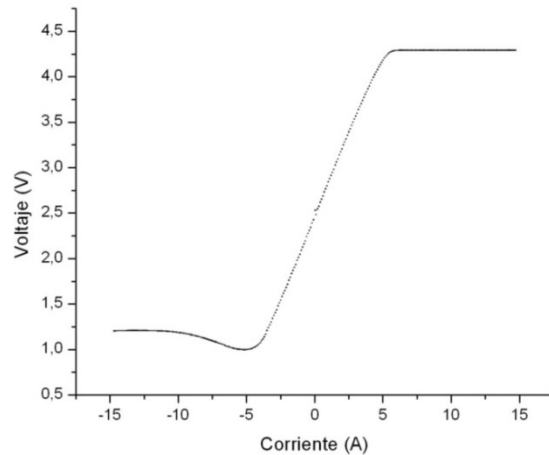
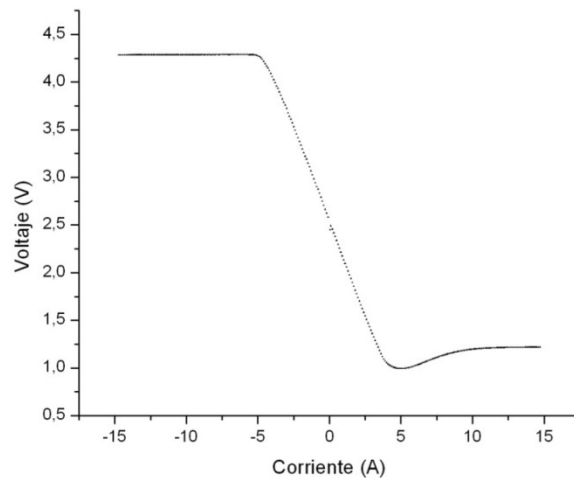


Figura 40. Respuesta en voltaje del sensor UGN3503UA Vs. Corriente aplicada al electroimán según Weiss, con su cara activa dirigida hacia el sur magnético y un entrehierro de longitud igual a 0.093m



6.1.3 Correlación de los resultados obtenidos con la caracterización teórica del electroimán de Weiss. Debido a que el sensor A1302 presenta una mejor respuesta y su rango de variación es más amplio, se eligió a éste como dispositivo para caracterizar el electroimán según Weiss del Centro de Investigación en Materiales.

El voltaje de salida proporcionado por el sensor A1302 está relacionado con el campo magnético al cual se encuentra sometido por la expresión:

$$V = V_0 \pm kB \quad (36)$$

Donde k es la sensibilidad del sensor expresada en mV/G y V_0 es el voltaje de trabajo del dispositivo (voltaje del sensor para un campo magnético nulo), el signo \pm depende de la dirección del campo externo aplicado.

De acuerdo con lo anterior el campo magnético será

$$B = \frac{V - V_0}{\pm k} \quad (37)$$

El valor de V_0 encontrado experimentalmente fue de 2.491V y el valor de k en el caso del sensor A1302 es de 1.34mV o lo que es lo mismo 0.00134V, este valor es proporcionado por el fabricante en condiciones normales de funcionamiento del dispositivo.

Con la ecuación 37 se procede a obtener las curvas de campo magnético Vs corriente aplicada al electroimán, de acuerdo a las pruebas hechas con el sensor A1302. Se realizaron barridos de campo en forma ascendente para diferentes longitudes de entrehierro. Las curvas obtenidas se presentan a continuación, así mismo se muestra la recta teórica para cada caso.

Figura 41. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.093m

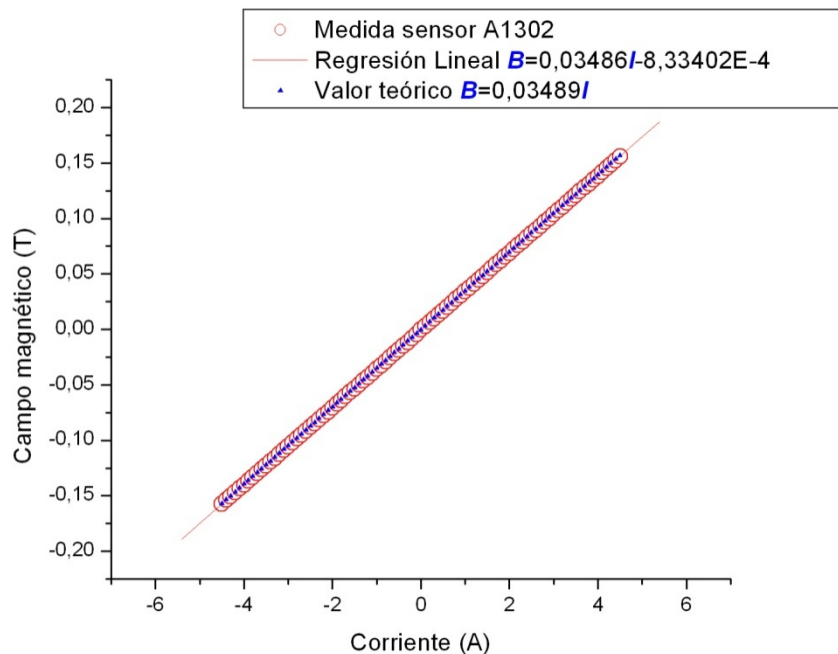


Figura 42. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.08m

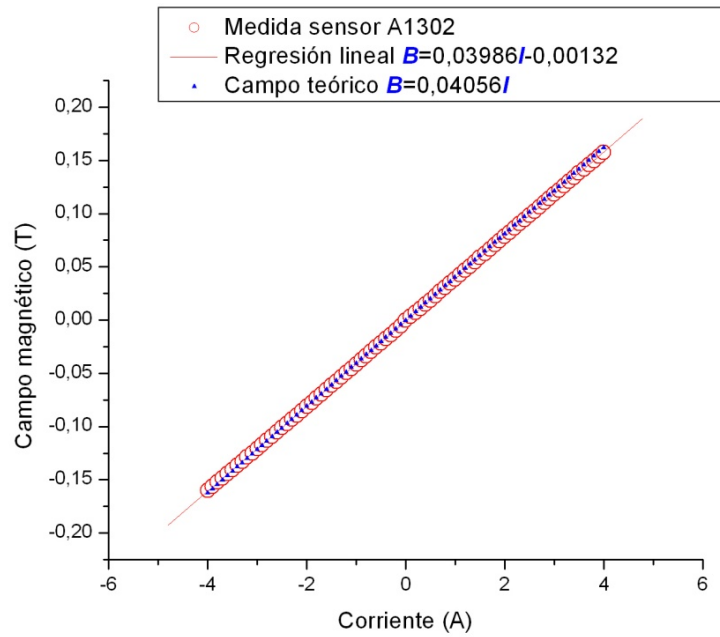


Figura 43. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.07m

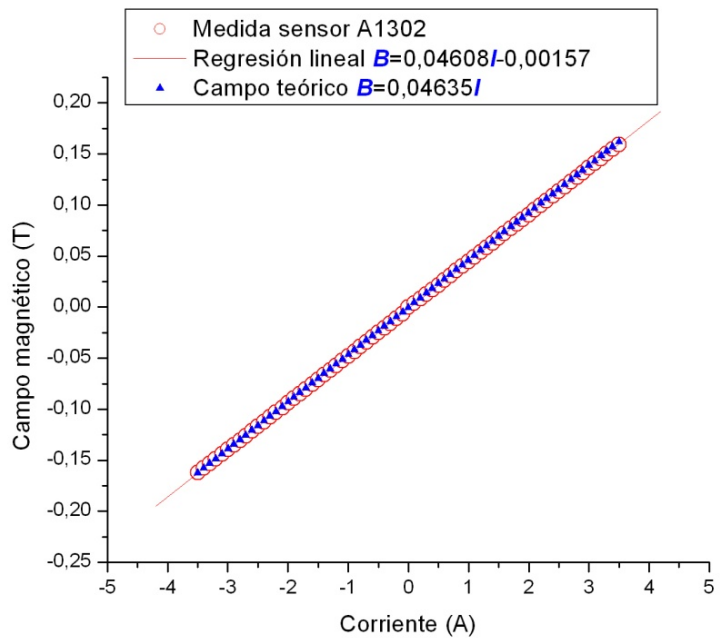


Figura 44. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.06m

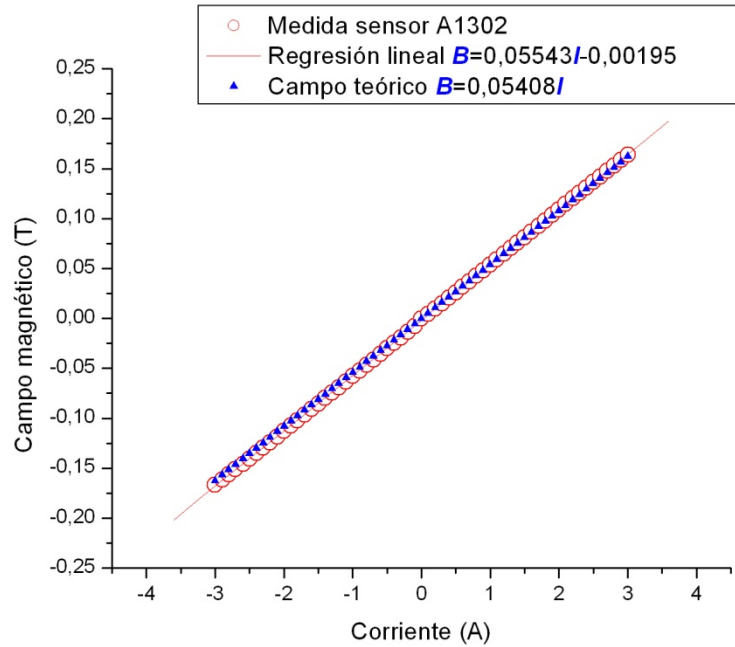


Figura 45. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.05m

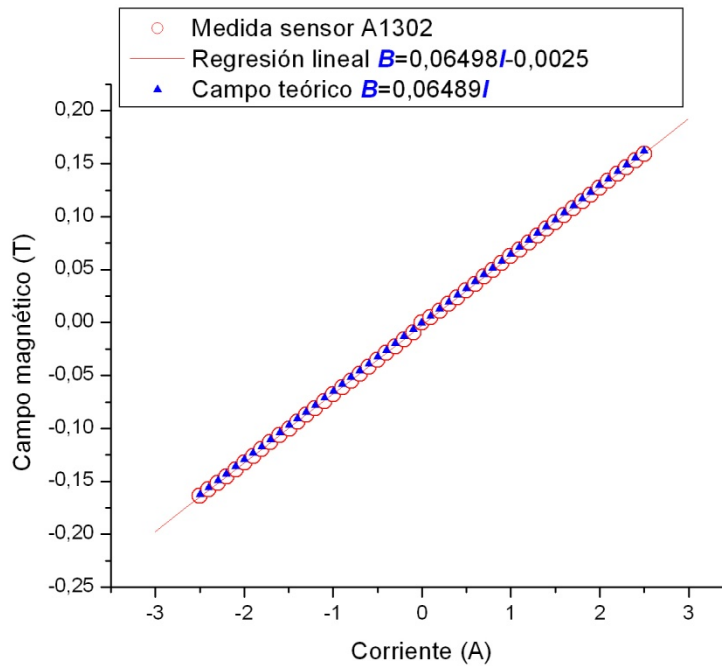


Figura 46. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.04m

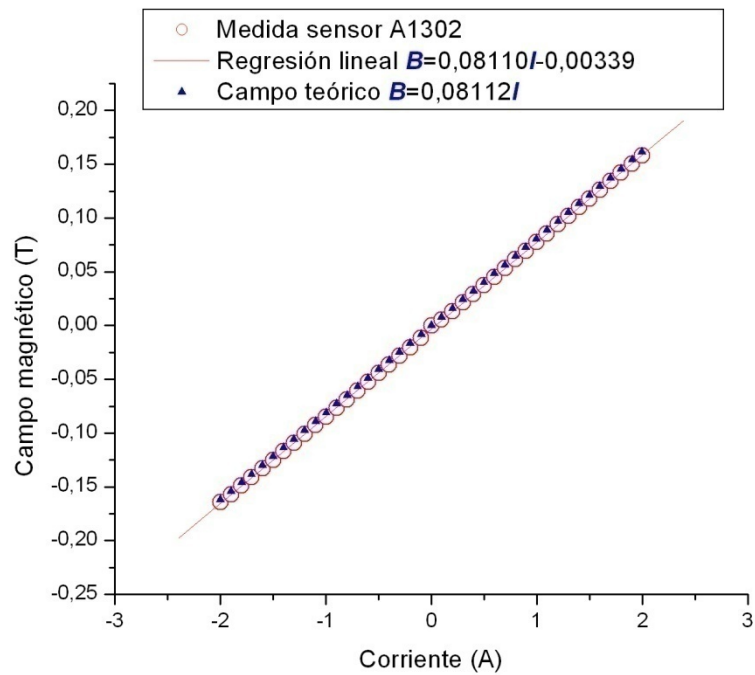


Figura 47. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.03m

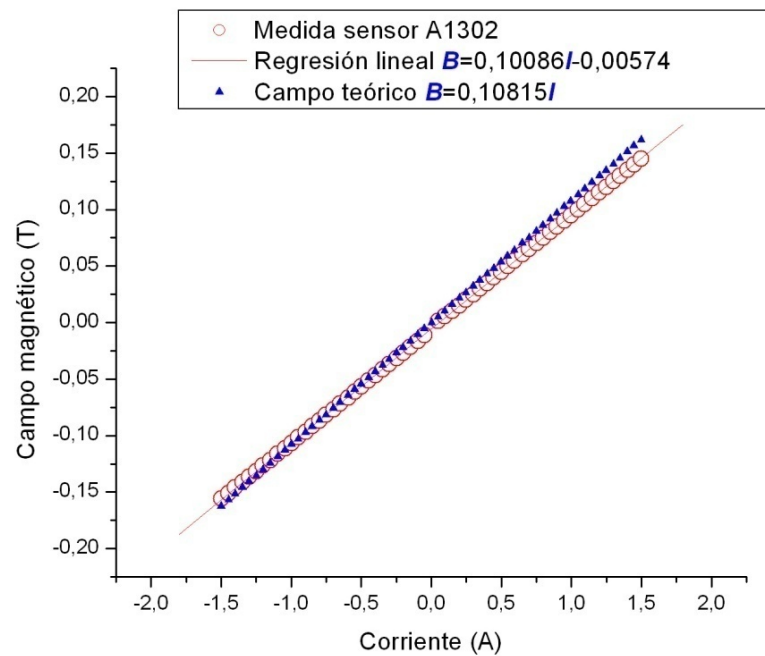
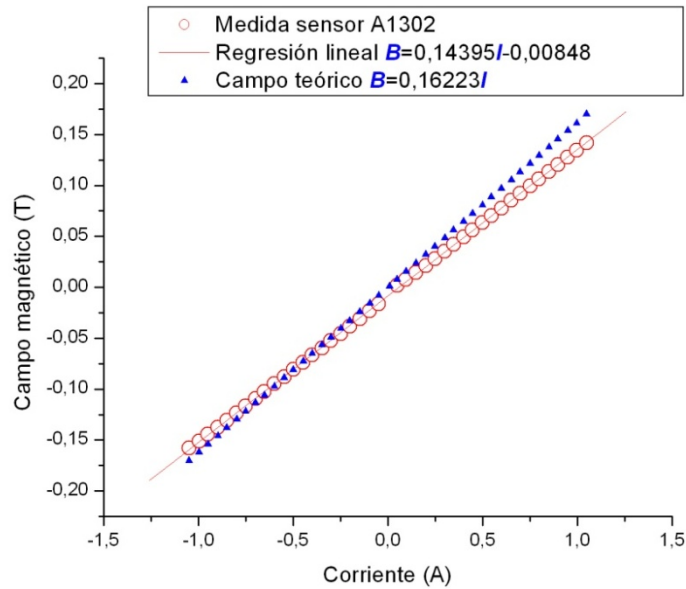


Figura 48. Campo magnético teórico del Electroimán y campo medido por el sensor A1302 Vs. Corriente aplicada, con un entrehierro de longitud igual a 0.02m



Para calcular el campo teórico es necesario recordar la relación.

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad (38)$$

Donde μ_0 es la permitividad en el vacío igual a $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}/\text{A}$, N es el número de vueltas del electroimán, l la longitud del entrehierro e I es la corriente aplicada. Reemplazando los datos se tiene

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T}\cdot\text{m}}{\text{A}} * 2582 * I}{l} \quad (39)$$

Finalmente se obtiene una expresión de campo magnético en función de la corriente.

$$B = 3.24463 \cdot 10^{-3} \frac{I}{l} \quad (40)$$

Donde B se expresa en Teslas, I en amperios y l en metros. Esta relación permite obtener el campo magnético teórico con los valores de corriente aplicados al electroimán en la prueba realizada con el sensor.

Para calcular el error entre el modelo teórico y los resultados experimentales se realizó la comparación de las pendientes de las rectas obtenidas teóricamente y por medición para los

mismos valores de corriente y de longitud de entrehierro. Los resultados se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Resultados y errores

Distancia entrehierro (m)	Pendiente experimental (T/A)	Coefficiente de correlación	Pendiente Teórica (T/A)	Error relativo (%)
0,093	0,03486	1	0,03489	0,08188
0,08	0,03986	0,99999	0,04056	1,72090
0,07	0,04608	0,99999	0,04635	0,58672
0,06	0,05543	0,99999	0,05408	2,50146
0,05	0,06498	0,99998	0,06489	0,13447
0,04	0,08110	0,99998	0,08112	0,01963
0,03	0,10086	0,99994	0,10815	6,74457
0,02	0,14395	0,99995	0,16223	11,26896

Otro aspecto necesario a estudiar experimentalmente es la dependencia del campo magnético generado y la longitud del entrehierro, esta prueba se efectuó aplicando un valor de corriente constante al electroimán y reduciendo la distancia del entrehierro mediante las ruedas de acción manual. Posteriormente se obtuvo el campo teórico de acuerdo con la relación 38, teniendo en cuenta que ahora el valor de corriente es constante.

Figura 49. Campo magnético teórico y medido Vs. Distancia entre los polos, con una corriente aplicada al electroimán de 0.5A

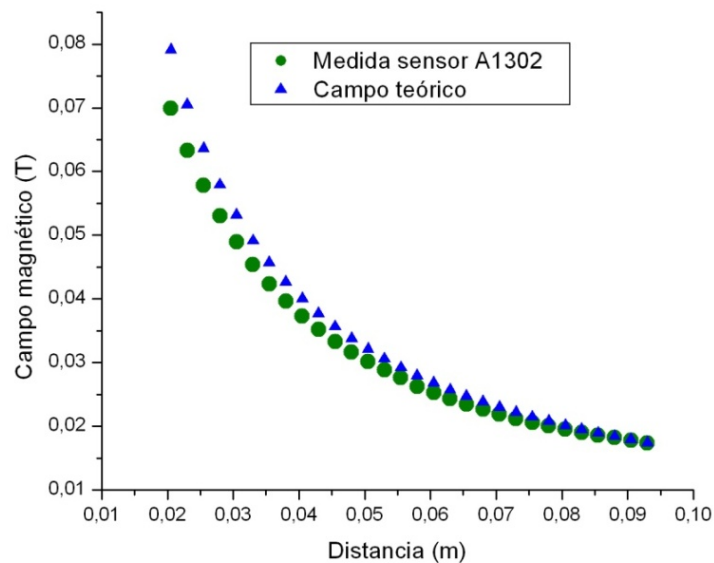
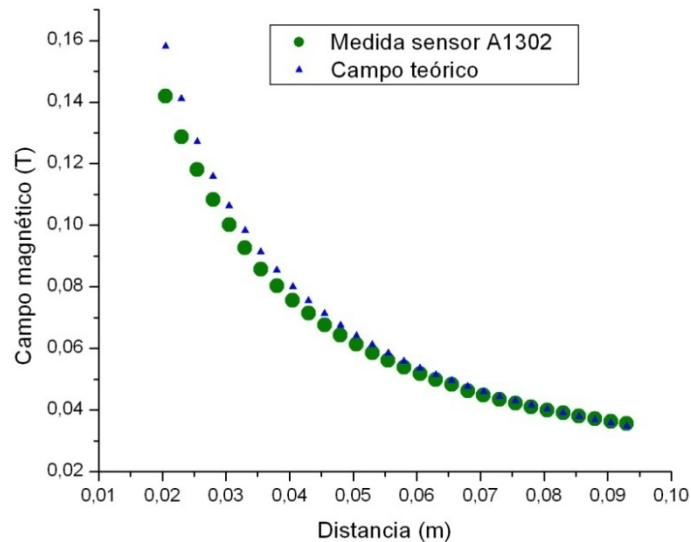


Figura 50. Campo magnético teórico y medido Vs. Distancia entre los polos, con una corriente aplicada al electroimán de 1A



El cuadro 3 confirma la validez del modelo teórico planteado en el numeral 2.1.3 para describir el campo generado por el electroimán en función de la corriente aplicada. Para longitudes de entrehierro que van de 0.04m a 0.09m se presenta errores como máximo de 2.5% en el valor del campo suministrado en la practica por el electroimán. Por otro lado valores de entrehierro menores a 0.03m generar un error cada vez mayor.

Como se comprobó experimentalmente el campo generado por el electroimán no varia linealmente con la longitud del entrehierro, esto se refleja en que a distancias cercanas a cero el campo crece rápidamente lo cual causa fenómenos como la saturación del núcleo que implica que la relación entre corriente aplicada y campo magnético generado deje de ser lineal.

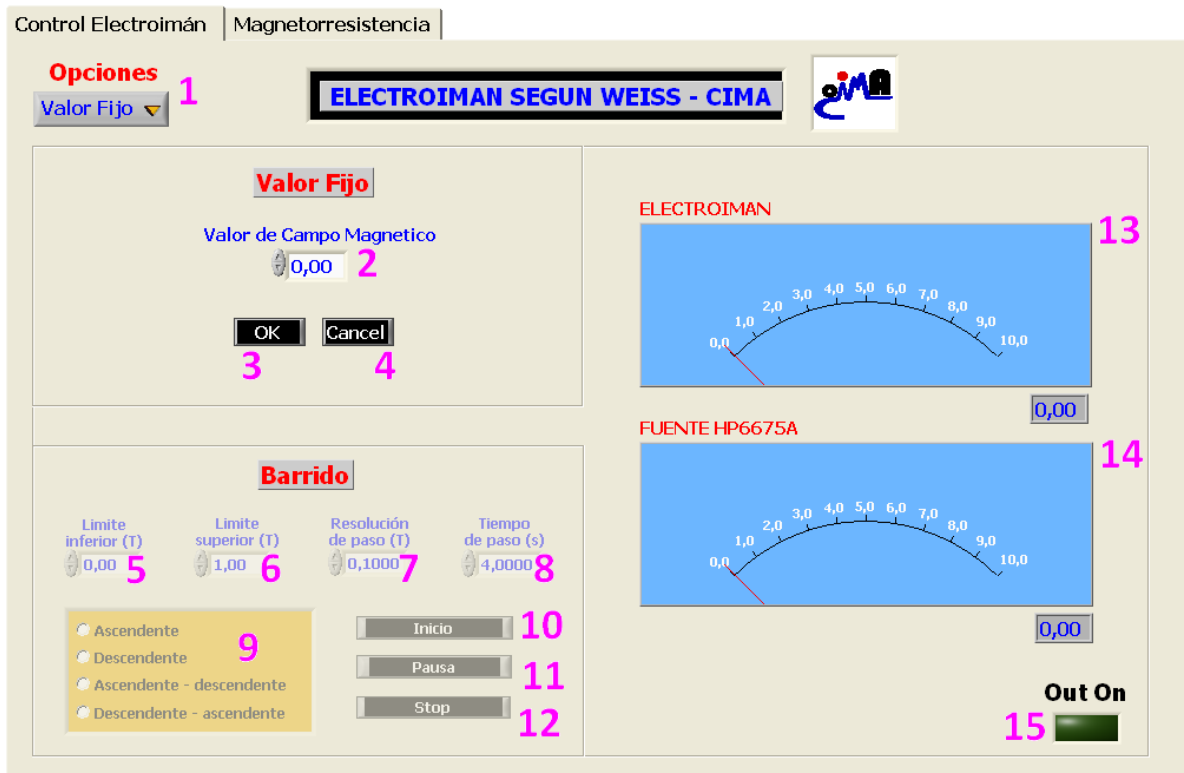
Para longitudes de entrehierro pequeñas (menores a 0.03m) la relación teórica obtenida no se aproxima a las mediciones realizadas puesto que se presentan errores hasta del 11%, para estos casos se necesita contar con instrumentos de medida mas especializados que permitan una mejor calibración. Por este motivo en el software de control del sistema es posible cambiar la función característica que relaciona el campo magnético generado y la corriente suministrada al electroimán de una forma sencilla como se explica en el anexo C.

6.2 SOFTWARE DE CONTROL DEL SISTEMA DESARROLLADO

6.2.1 Interfaz de usuario del controlador para el subsistema de generación de campo magnético. Se encuentra en la pestaña *Control Electroimán* dentro del panel superior del programa principal desarrollado. Presenta cuatro partes centrales que son: selector de

opciones, panel de valor fijo, panel de barrido y panel de visualización. Las funciones de éstas partes y sus correspondientes controles se mencionan a continuación, cabe anotar que los números con que se identifica a cada botón corresponden a los ilustrados en la figura 51:

Figura 51. Pantalla del controlador para el subsistema de generación de campo magnético



- *Seleccionador de Opciones* (1). Es un navegador que le permite al usuario elegir el modo de control del electroimán. Presenta dos alternativas que son *Valor Fijo* y *Barrido*.
- *Panel de Valor Fijo*. Contiene los controles requeridos para habilitar la generación de un valor de campo magnético definido por el usuario, éstos son:
 - *Valor de Campo Magnético* (2): es un control numérico en el cual se introduce el valor del campo a ser producido (en Teslas), su rango va generalmente desde -1 T hasta 1 T, dependiendo de la distancia entre polos con la cual se esté trabajando.
 - *Botón OK* (3): pulsador que habilita la generación del valor especificado en (2).

- *Botón Cancel* (4): pulsador que deshabilita la generación de campo magnético.
- *Panel de Barrido*. Presenta las opciones necesarias para realizar un barrido de campo magnético, esto es, generar un conjunto de valores de campo magnético secuencialmente dentro de un rango definido por el usuario. Contiene los siguientes controles:
 - *Límite Superior* (5): es el mayor valor de campo magnético requerido en la secuencia de barrido. Su rango generalmente va desde -0.99 T hasta 1 T
 - *Límite Inferior* (6): es el menor valor de campo de la secuencia. Su rango por lo general va desde -1 T hasta 0.99 T
 - *Resolución de Paso* (7): se refiere a la magnitud del incremento de valor de campo magnético entre elementos consecutivos que conforma la secuencia. El mínimo incremento es de 0.005 T y el máximo de 1.99 T
 - *Tiempo de Paso* (8): es el tiempo que permanece un valor generándose a través del electroimán antes de pasar a su inmediatamente posterior. El tiempo de paso mínimo es de 4 segundos y el máximo de 300 segundos.
 - *Opciones de Barrido* (9): presenta las posibles opciones de ordenamiento que tendrá la secuencia generada, éstas son:
 - Ascendente: los valores de campo generados son constantemente crecientes y espaciados uniformemente de acuerdo a (7), desde un límite inferior definido en (6), hasta un límite superior dado por (5), con un tiempo de paso establecido en (8).
 - Descendente: los valores de campo generados son constantemente decrecientes y espaciados uniformemente de acuerdo a (7), desde un límite superior definido en (5), hasta un límite inferior dado por (6), con un tiempo de paso establecido en (8).
 - Ascendente-Descendente: la secuencia de valores de campo generada es primero creciente y luego decreciente. Los límites superior e inferior, la resolución de paso y el tiempo de paso se definen en (5), (6), (7) y (8) respectivamente.
 - Descendente-Ascendente: la secuencia de valores de campo generada es primero decreciente y luego creciente. Los límites superior e inferior, la resolución de paso y el tiempo de paso se definen en (5), (6), (7) y (8) respectivamente.
 - *Botón Inicio* (10): pulsador que inicia o reanuda la secuencia de barrido.
 - *Botón Pausa* (11): pulsador que se utiliza cuando se quiere hacer una pausa en la secuencia de barrido.
 - *Botón Stop* (12): pulsador que sirve para finalizar el barrido antes de que éste haya concluido normalmente (de acuerdo a las especificaciones dadas por el usuario).

- *Panel de Visualización*. Consta de éstos elementos:
 - *Visualizador Electroimán* (13): muestra la magnitud del campo magnético que está siendo generado.
 - *Visualizador Fuente HP6675A* (14): muestra el valor de corriente que está suministrando la fuente de poder HP6675A al electroimán.
 - *Out On* (15): dependiendo de su estado (encendido o apagado) indica si se está generando campo magnético y al mismo tiempo si la fuente HP está entregando o no corriente al electroimán de Weiss.

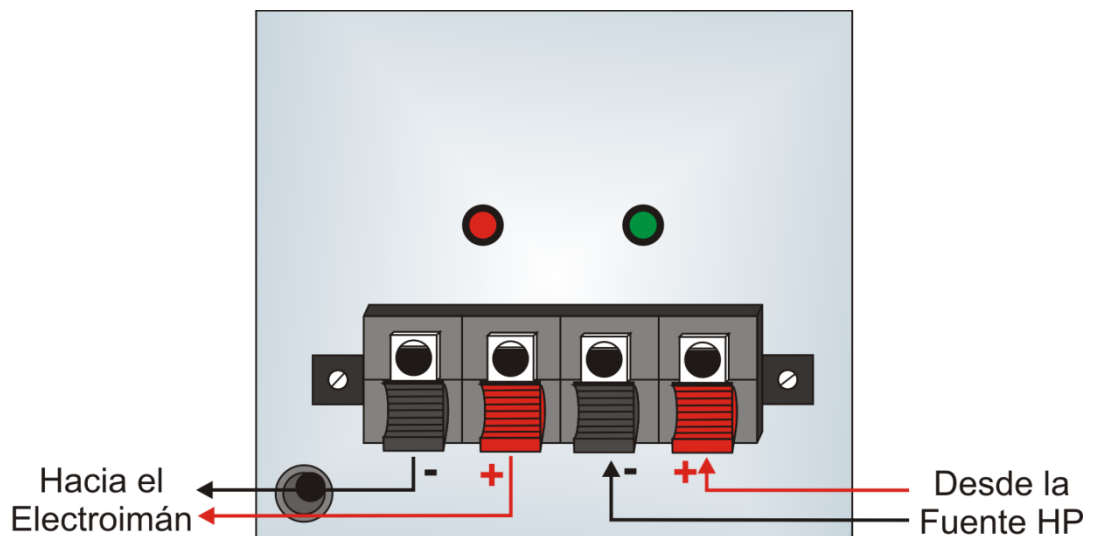
6.2.2 Protocolo para el manejo del programa de control del electroimán según Weiss.

A pesar de que la interfaz de usuario es bastante intuitiva se sugieren seguir los siguientes pasos para hacer un uso adecuado y eficiente del programa de control.

1. Preliminares:

- a. Asegurar la disponibilidad de todos los elementos que conforman el subsistema de generación de campo magnético, estos son: electroimán, sistema de refrigeración, fuente de poder HP6675A, dispositivo conmutador de voltaje y computador.
- b. Realizar las respectivas conexiones eléctricas de los siguientes equipos: fuente de poder HP6675A, conmutador de voltaje y computador. Encenderlos.
- c. Conectar los extremos de alimentación del electroimán según Weiss y las salidas de la fuente HP6675A al dispositivo conmutador de voltaje como se muestra en la figura 52.

Figura 52. Conexiones del panel frontal del dispositivo conmutador de voltaje



- d. Conectar la fuente de poder HP6675A al ordenador mediante el puerto GPIB y definir su dirección de bus como 5.
 - e. Conectar el puerto paralelo del dispositivo conmutador de voltaje al puerto LPT1 del computador.
 - f. Poner en funcionamiento el sistema de refrigeración.
2. Ejecutar la aplicación *ElectroimanWeiss.vi* de LabVIEW 6.1. El programa inicia haciendo una verificación de los equipos del sistema que se encuentren conectados. Si uno de los dispositivos (fuente de poder HP6675A, multímetro FLUKE 45 o fuente de poder Tektronix PS2520G) no está disponible, ya sea porque no está encendido o porque su dirección de bus GPIB no coincide con la asignada en el software de acuerdo al cuadro 4, se abrirá una ventana de diálogo indicándolo.

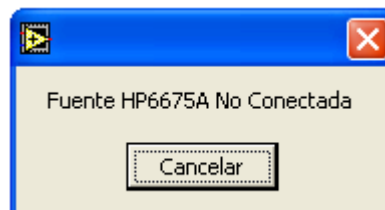
Cuadro 4. Direcciones del bus GPIB asignadas a cada dispositivo del sistema.

Equipo	Dirección GPIB asignada*
Fuente de poder Hewlett Packard 6675A	5
Multímetro FLUKE 45	3
Fuente de poder Tektronix PS2520G	8

*Nota: Para conocer cómo configurar la dirección de cada dispositivo ver anexo D.

Si aparece el cuadro de diálogo de error para la fuente HP6675A que se muestra en la figura 53, hacer click en “Cancelar” y verificar la conexión de la fuente para iniciar nuevamente el programa.

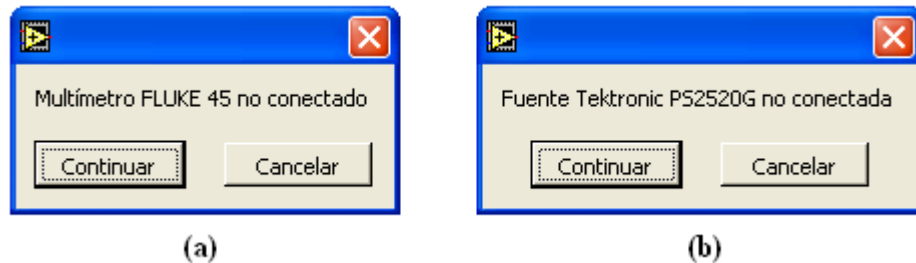
Figura 53. Ventana de diálogo correspondiente a un error en la fuente HP6675A



Las ventanas de diálogo correspondientes a un error en el multímetro FLUKE 45 o la fuente Tektronix PS2520G que se pueden ver en la figura 54, presentan dos opciones: “Cancelar” y “Continuar”. Pulsar “Cancelar” para detener la ejecución del programa y reconectar los equipos, esto cuando el módulo de medida de magnetorresistencia del cual se hablará en la sección 6.2.3, vaya a ser utilizado, o

“Continuar” para seguir con la aplicación , cuando sólo vaya a trabajarse en el módulo de control del electroimán.

Figura 54. Ventanas de diálogo correspondientes a un error en (a) el multímetro FLUKE 45 o (b) la fuente Tektronix PS2520G



3. Posteriormente aparecerá una nueva ventana de diálogo que permite indicar la longitud del entrehierro a la cuál se va a trabajar, El cuadro se presenta en la figura 55.

Figura 55. Ventana de diálogo para especificar la distancia entre los polos del electroimán según Weiss



En la casilla correspondiente, digitar la distancia a la cuál se encuentran los polos del electroimán y hacer click sobre el botón OK.

4. Ubicarse en la pestaña *Control Electroimán*.
5. Elegir en el menú *Opciones* la pestaña *Valor Fijo* si se requiere generar un valor de campo magnético específico, o la pestaña *Barrido* si se desea realizar un barrido dentro de un rango de valores de campo.
6. Si se eligió la opción *Valor Fijo*, los controles disponibles del panel respectivo se habilitarán. En la ventana *Valor de Campo Magnético* introducir el valor de campo

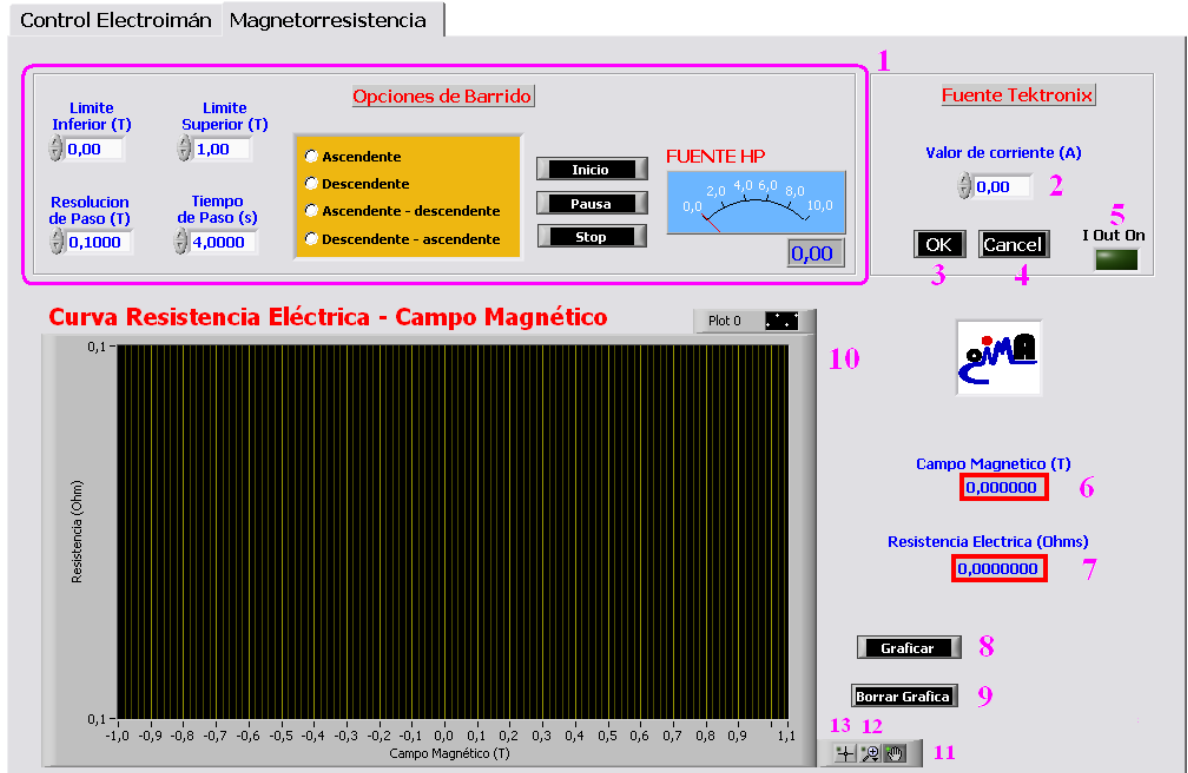
requerido y posteriormente hacer click sostenido sobre el pulsador *OK* hasta que el indicador de salida *Out On* esté encendido. Para cancelar la generación del campo seleccionado hacer click sostenido sobre el pulsador *Cancel* hasta que *Out On* se apague. El valor del campo magnético que está siendo generado y la corriente que está suministrando la fuente HP6675A se pueden observar en el panel de visualización.

7. Si se eligió la opción *Barrido*, se habilitarán los controles disponibles del panel respectivo. Para el intervalo de valores de campo magnético requerido:
 - Seleccionar el límite inferior, el límite superior, la resolución y el tiempo de paso, e introducirlos en las casillas correspondientes.
 - Elegir entre una de las opciones de barrido descritas en el numeral 6.2.1 y hacer click en el pulsador *Inicio* para comenzar la generación de la secuencia de valores de campo magnético.
 - Para realizar una pausa en medio de la secuencia sin detenerla, hacer click en el pulsador *Pausa*, la salida seguirá habilitada; para reanudar la secuencia hacer click nuevamente en *Inicio*.
 - Si se desea cancelar y salir de la secuencia click en *Cancel*, la salida se deshabilita inmediatamente.

Para realizar un cambio ya sea de secuencia de barrido (modificación del límite inferior, el límite superior o el tipo de barrido) o de opción de control del electroimán (*Valor Fijo*, *Barrido*) se debe asegurar que la salida del sistema (*Out On*) se encuentre apagada.

6.2.3 Interfaz de usuario del controlador para el subsistema de medición de la magnetorresistencia. El programa de medida de la magnetorresistencia funciona conjuntamente con el programa de generación de campo magnético descrito en el numeral 6.2.1. El panel de control esta compuesto por 3 partes principales que son: fuente Tektronix, curva resistencia eléctrica – campo magnético y opciones de barrido.

Figura 56. Panel de control del programa de medición de la magnetorresistencia



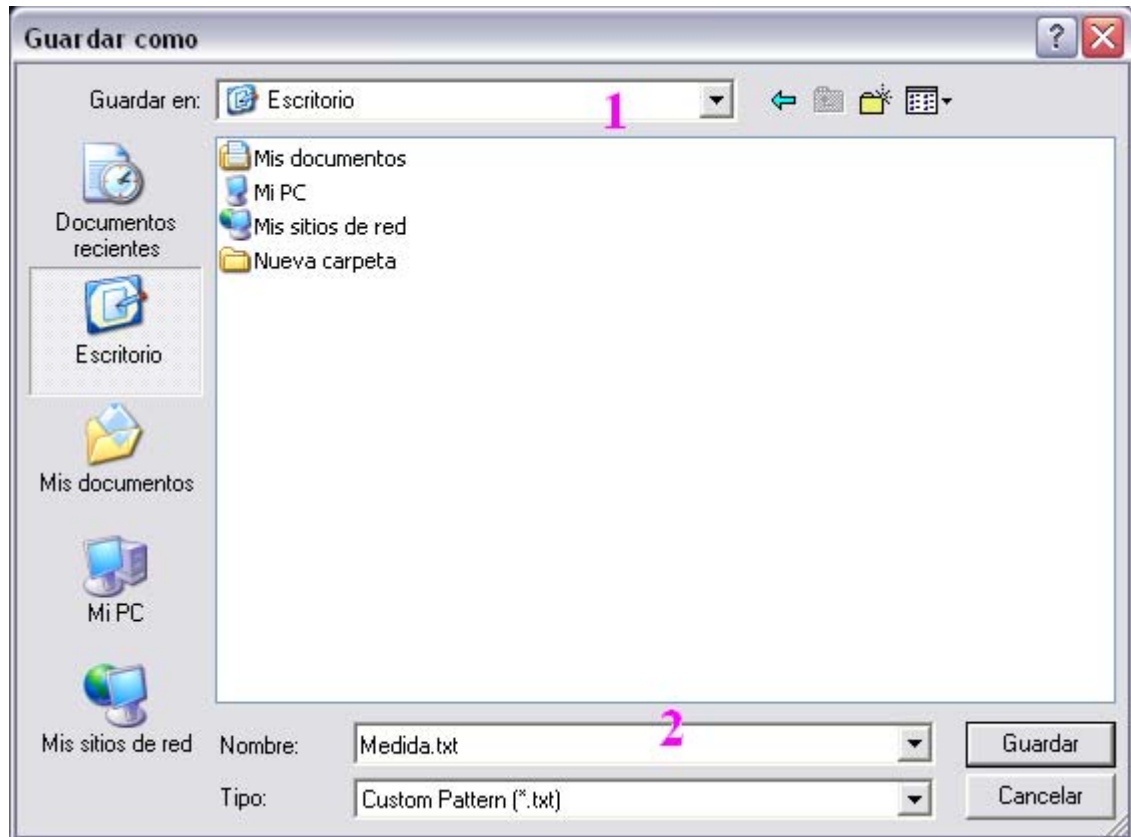
En la figura 56, se identifica con números las partes que constituyen el panel de control. A continuación se explica la función de cada uno de ellas.

- Fuente Tektronix. Este panel permite ajustar el valor de corriente suministrado a la muestra a través de la fuente.
 - *Valor de corriente (A)* (2): es un control numérico en el cual se ingresa el valor deseado de corriente en amperios a suministrar a la muestra hasta un valor máximo de 0.5A.
 - *Botón OK* (3): habilita el suministro de corriente a la muestra activando la salida numero 2 de la fuente de poder.
 - *Botón Cancel* (4): deshabilita el suministro de corriente a la muestra desactivando la salida numero 2 de la fuente de poder.
 - *Indicador I Out On* (5): permite conocer el estado de la salida número 2 de la fuente Tektronix PS2520G habilitada (encendido) o deshabilitada (apagado).

- Curva resistencia eléctrica – campo magnético. Consta de los siguientes elementos
 - *Campo Magnético (T)* (6): es un visualizador que permite conocer el valor del campo externo aplicado a la muestra durante el proceso de medición.
 - *Resistencia Eléctrica (ohms)* (7): es un visualizador que presenta el valor de la resistencia medida en la muestra por el método de las cuatro puntas durante el proceso de medición.
 - *Botón Graficar* (8): el usuario tiene la opción de observar el comportamiento de la resistencia eléctrica en el material con respecto al campo magnético externo aplicado. Al momento de hacer click en el botón *graficar* el programa comienza a visualizar los datos medidos.
 - *Botón Borrar Gráfica* (9): en el momento que se desee, o antes de iniciar otra medida, esta opción permite borrar los datos que se están presentado en la pantalla.
 - *Visualizador de grafico* (10): presenta los datos obtenidos en la medición en un espacio de 2 dimensiones, en eje *y* se presenta la resistencia eléctrica y en eje *x* el valor de campo magnético.
 - *Opciones de manejo de gráfica*: son tres opciones que permiten manipular la gráfica obtenida, la opción (11) sirve para cambiar la posición de la gráfica en el plano, la opción (12) permite realizar aumentar y disminuir el tamaño de la imagen, además de permitir acercamientos en sectores determinados de la misma, y la opción (13) se encarga de bloquear la visualización para evitar cualquier cambio en la gráfica.

- *Opciones de barrido* (1). Este panel corresponde a las opciones que permite configurar el programa de generación de campo magnético y sus funciones se explicaron detalladamente en el numeral 6.2.1. El botón *inicio* en este panel se encarga de iniciar el proceso de medida y de activar el cuadro de dialogo que se presenta en la figura 57, permitiendo al usuario almacenar los datos de resistencia eléctrica y campo magnético en un archivo de texto (Ver anexo E).

Figura 57. Cuadro de diálogo para el almacenamiento de datos obtenidos en la medición de la magnetorresistencia

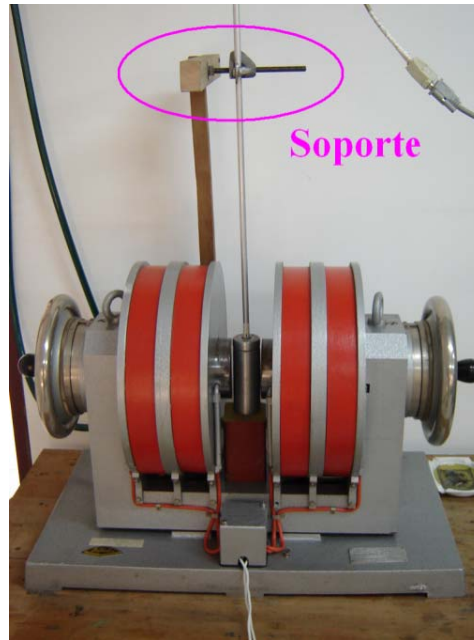


En la figura 57, la opción (1) permite seleccionar el sitio de almacenamiento del archivo de texto guardado, el programa tiene como lugar de almacenamiento predeterminado el escritorio. La opción (2) permite colocar el nombre al archivo de acuerdo a la necesidad del usuario, el programa también realiza la función de reemplazar archivos de texto con el mismo nombre en caso de ser requerido.

6.2.4 Protocolo para el manejo del programa de medida de la magnetorresistencia. El proceso de medida de la magnetorresistencia se lleva a cabo a través de una serie de etapas que permiten el desarrollo correcto de la prueba experimental a realizar en el material seleccionado. Con el fin de evitar errores en la medida a causa de factores externos a los que se tienen en cuenta para este método se recomienda seguir los siguientes pasos:

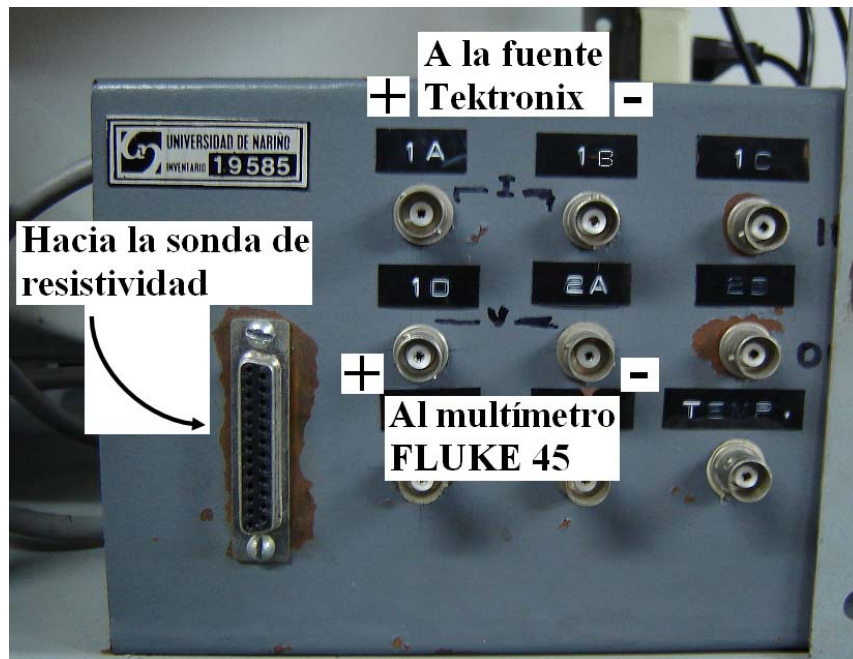
- Estado apagado para la fuente Tektronix PS2520G y el multímetro FLUKE 45.
- Una vez soldada la muestra del material en la sonda de resistividad esta se debe colocar en el soporte asignado en el centro entre los polos del electroimán según Weiss (figura 58).

Figura 58. Montaje de la sonda de resistividad



- Conectar la sonda de resistividad en el panel de conexión asignado (figura 59).

Figura 59. Panel de conexiones para la medida de la magnetorresistencia



- Para suministrar la corriente a la muestra se utiliza la salida numero 2 de la fuente Tektronix, conectar el terminal positivo de la fuente en la entrada (1A) y el terminal negativo en la entrada (1B) del panel de conexiones (figura 59).
- Conectar el terminal de voltaje del multímetro FLUKE 45 en la entrada (1D) y el terminal común en la entrada (2A) del panel de conexiones (figura 59).
- Encender el multímetro FLUKE 45 y la fuente Tektronix PS2520G.
- Ejecutar la aplicación *ElectroimanWeiss.vi* en LabVIEW 6.1 y ubicar la pestaña magnetorresistencia.
- Escoger la rutina de control sobre el electroimán a ejecutar de acuerdo a la necesidad del usuario, seleccionando en las opciones descritas en los numerales 6.2.1. y 6.2.2, hacer click en el botón *inicio*.
- Si se desea almacenar los datos escoger en el cuadro de dialogo (figura 57) la ubicación y el nombre del archivo que almacenará los valores de resistencia eléctrica y campo magnético.
- Si se desea observar la gráfica de los resultados obtenidos seleccionar la opción *graficar* de la aplicación *ElectroimanWeiss.vi* en LabVIEW 6.1.

Una vez terminado la medición o mediciones a realizar se finaliza la ejecución del proceso como se describe a continuación

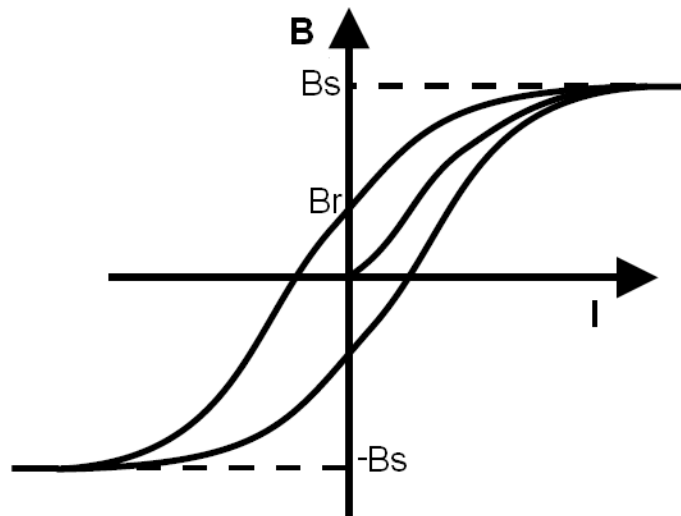
- Click sobre el botón *cancel* y luego sobre el botón *stop*, se cierra la aplicación *ElectroimanWeiss.vi* en LabVIEW 6.1.
- Apagar la fuente Tektronix PS2520G.
- Apagar el multímetro FLUKE 45.
- Desconectar los cables ubicados en el panel de conexiones, los instrumentos y la sonda de resistividad

6.3 DEMAGNETIZACIÓN DEL ELECTROIMÁN

6.3.1 Imanación del núcleo. Para concentrar el campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz, y por consiguiente incrementar su magnitud, el electroimán según Weiss posee un núcleo de hierro. Además, las piezas polares intercambiables que se instalan en el espacio ubicado entre las bobinas, también están fabricadas con el mismo material.

Por ser el hierro un elemento ferromagnético, tiende a magnetizarse con facilidad y conservar ese estado. A continuación se muestra una curva característica de imanación para un material ferromagnético convencional.

Figura 60. Curva de histéresis para un material ferromagnético



Si se supone que inicialmente tanto I como B son nulos ($I = 0$ y $B = 0$), al aumentar I se comprobará que aumenta también B puesto que los dipolos del material empiezan a alinearse con el campo externo. Si se sigue aumentando la intensidad, el campo crece hasta que se llega a la saturación del material, es decir, hasta que ya no es posible alinear más dipolos; el valor máximo que alcanza se denomina campo de saturación B_s . Si en este punto se empieza a disminuir el valor de I , B disminuye más lentamente de lo que aumentó en el proceso inverso; además para $I=0$ no se alcanza $B=0$ sino un valor B_r llamado campo remanente. Se debe disminuir aún más el valor de la intensidad, haciéndola negativa, para conseguir que el campo magnético resultante tome valor nulo. Intensidades negativas consiguen cambiar el sentido del campo hasta llegar nuevamente a la saturación pero en sentido opuesto. A partir de aquí, el comportamiento del material ferromagnético es análogo al descrito en el ciclo positivo.

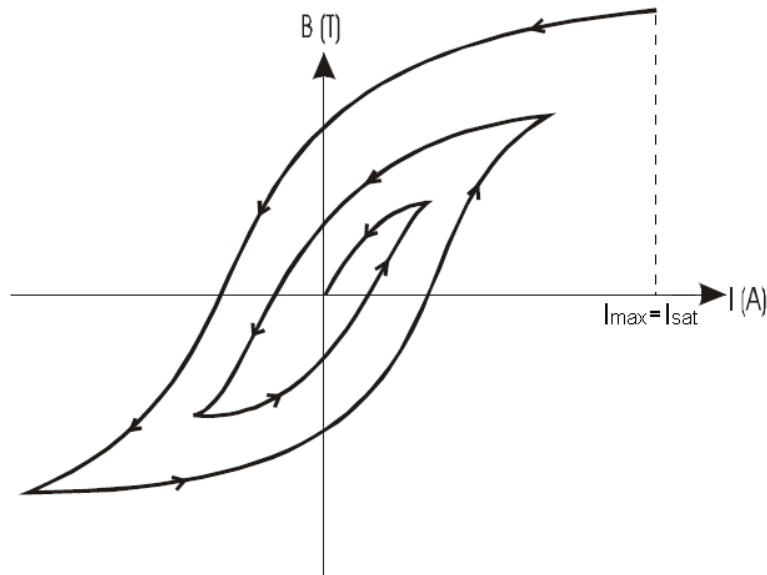
Por lo tanto al hacer funcionar el electroimán se presenta una imanación inherente del núcleo; o lo que es lo mismo, se genera un campo magnético remanente B_r . Este campo puede ser perjudicial para el buen resultado de las mediciones.

Cuando se tienen efectos por remanencia los resultados al trabajar con electroimanes son prácticamente aleatorios pues dependen de estados anteriores que son generalmente desconocidos. Por lo tanto se debe desarrollar un proceso de desimanación del electroimán que garantice la validez de los cálculos realizados en el proceso de caracterización teórico.

6.3.2 Proceso de demagnetización. Antes de proseguir con la descripción del proceso de demagnetización, cabe anotar que éste únicamente busca suprimir los efectos del campo remanente generado por el núcleo del electroimán sin tener en cuenta la presencia de otros campos magnéticos tales como el terrestre; es decir, al final del proceso no se obtendrá un campo resultante cero pero si muy próximo a éste valor.

La desimanación²⁶ del núcleo del electroimán se realiza por medio de la generación de un ciclo iterativo de inversión de campo magnético decreciente. Este procedimiento se requiere en el momento en el que se detecta que al anular la corriente magnetizante la densidad de flujo magnético no se anula. Cuando se presente este comportamiento, el material se puede desimanar invirtiendo la corriente magnetizante un cierto número de veces y disminuyendo su intensidad en cada inversión.

Figura 61. Curva representativa del algoritmo de demagnetización



Fuente: TORRES, Javier, CRUZ, Beatriz y MARIN, William. Caracterización y Calibración Automática de Bobinas de Helmholtz en DC. En: Scientia et Technica Año XIII. No. 34, (mayo, 2007). Universidad Tecnológica de Pereira

En la Figura 61, se presenta el proceso seguido para desimanar un material ferromagnético. Este trabajo se inicia con una corriente I_{max} igual a la corriente de saturación que decrece hasta un valor de cero, se invierte la alimentación del electroimán para alcanzar la magnitud de I_{max} con polaridad negativa, aumentando otra vez la corriente hasta cero. De nuevo se invierte la fase en la alimentación de la maquina y se incrementa la corriente hasta un valor ligeramente menor que I_{max} , comenzando una nueva iteración del procedimiento hasta terminar en cero.

La realización de este procedimiento en forma manual es engorrosa, pues se debe invertir la alimentación de la fuente en cada paso por cero. Por esto es recomendable automatizar el proceso para hacerlo más versátil y rápido.

²⁶ TORRES, Javier, CRUZ, Beatriz y MARIN, William. Caracterización y Calibración Automática de Bobinas de Helmholtz en DC. En: Scientia et Technica Año XIII. No. 34, (mayo, 2007). Universidad Tecnológica de Pereira

6.3.3 Implementación del software de demagnetización. El algoritmo descrito en la sección anterior se programó en LabVIEW 6.1, básicamente controla de acuerdo al proceso requerido, la magnitud de la corriente suministrada al electroimán por la fuente HP6675A y su dirección, los cambios de polaridad se realizan automáticamente mediante el conmutador de voltaje diseñado para el proyecto.

La interfaz del software de demagnetización que se muestra en la figura 62, consta únicamente de un pulsador de inicio del proceso y de una barra de visualización para indicar el progreso del algoritmo. Cabe anotar que la ejecución completa del procedimiento de demagnetización demanda aproximadamente 15 minutos.

Figura 62. Interfaz para el software de demagnetización

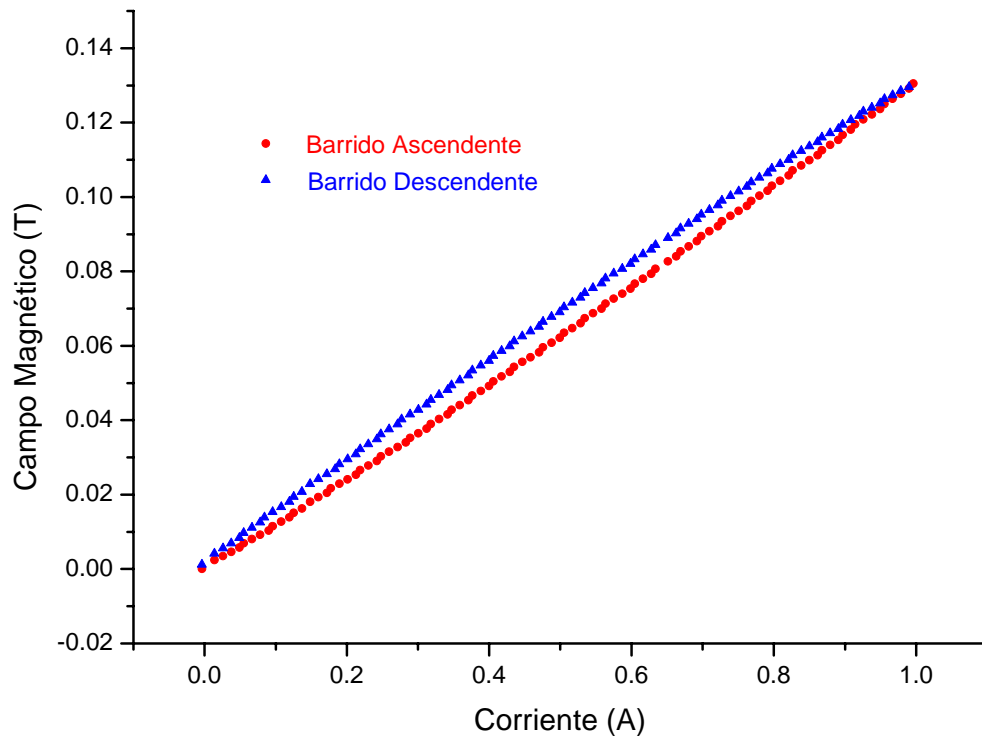


Para iniciar el programa descrito, únicamente se debe ejecutar la aplicación *Demagnetizar.vi* y hacer click sobre el botón *Demagnetizar*.

6.3.4 Validación experimental del algoritmo de demagnetización. Para comprobar la validez del software implementado se realizaron tres pruebas con la ayuda del sensor A1302.

En primer lugar se desea verificar si existe una imanación de magnitud considerable en el núcleo del electroimán, para esto se realiza un barrido ascendente – descendente entre 0 y 1 A teniendo una longitud de entrehierro fija de 2 cm. Se elige la menor longitud de entrehierro posible para poder observar con mayor facilidad la influencia de la magnetización propia de los polos móviles del electroimán de Weiss. Con las condiciones antes mencionadas se obtuvo la siguiente curva de medición.

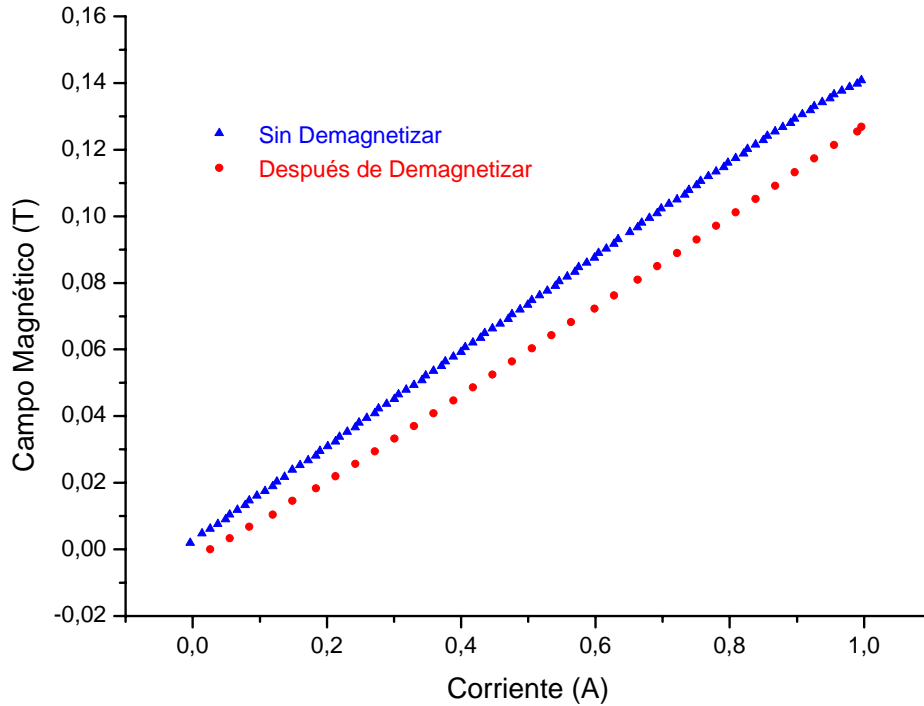
Figura 63. Curva Campo magnético Vs Corriente aplicada al electroimán al realizar un barrido ascendente – descendente



Se puede apreciar en la figura 63, la influencia de la magnetización del núcleo del electroimán, puesto que después de realizado el barrido ascendente se presenta una remanencia de campo y por lo tanto las medidas realizadas durante el barrido descendente no coinciden con las primeras.

Establecido ya el efecto del campo remanente se procede a comprobar si el algoritmo de demagnetización funciona adecuadamente. Para ello se genera un campo de 1 T (el máximo campo que es capaz de producir el electroimán con el cual se trabaja) por aproximadamente 3 minutos y posteriormente se realiza un barrido ascendente desde 0 hasta 1 A. Se repite el mismo procedimiento, pero aplicando antes de realizar el barrido el programa de demagnetización desarrollado. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente figura.

Figura 64. Curva Campo magnético Vs Corriente aplicada al electroimán antes y después de aplicar el proceso de demagnetización



Se observa la diferencia de valores que se presenta en cada punto del barrido, puesto que después de aplicado el algoritmo de demagnetización se elimina el campo remanente, además el offset de la curva disminuye notoriamente.

Finalmente, se aplicó un campo magnético de 1 T por aproximadamente 2 minutos, terminado ese tiempo se realiza una medida con el sensor ubicado entre los polos del electroimán, posteriormente se aplica el algoritmo de demagnetización y se efectúa la misma medición; por último se hace una medida con el sensor alejado del electroimán. Los resultados alcanzados se relacionan en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Medidas de verificación del algoritmo de demagnetización usando el sensor A1302

Condiciones de la Medición	Campo Magnético Obtenido (Gauss)
Sensor ubicado por fuera del electroimán	0

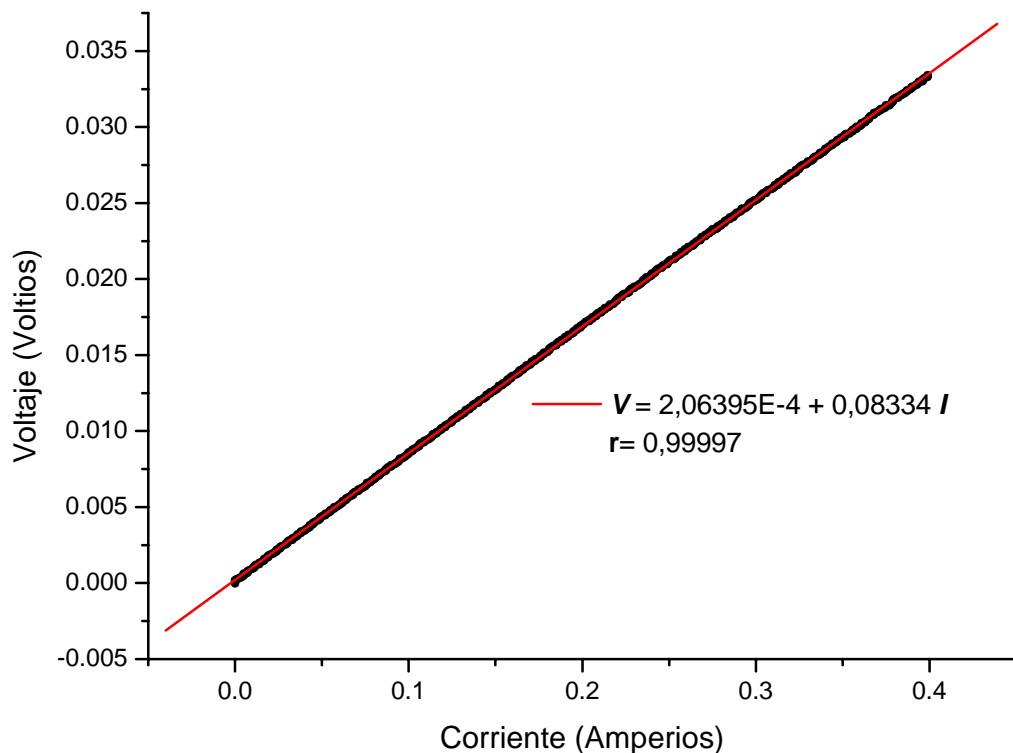
Sensor ubicado entre los polos del electroimán sin demagnetizar	17.612
Sensor ubicado entre los polos del electroimán demagnetizado	0.075

Por lo tanto se confirma la validez del algoritmo de demagnetización implementado.

6.4 MAGNETORRESISTENCIA

6.4.1 Resistividad eléctrica de las manganitas LSMO. En la figura 65, se muestra la variación del voltaje medido en función de la corriente inyectada para la manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ por el método de las cuatro puntas. Para cada valor de corriente aplicada se realizó una medida de voltaje la cual fue registrada. El valor de la corriente inyectada varía en el rango de 0 a 400 mA con pasos de 1 mA. Todas las medidas se realizaron a temperatura ambiente.

Figura 65. Gráfica V-I para la muestra de manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ a temperatura ambiente



La pendiente de la gráfica que se obtiene por el método de regresión lineal representa la resistencia equivalente medida por la técnica de cuatro puntas en la pastilla, y es de 0.08334Ω .

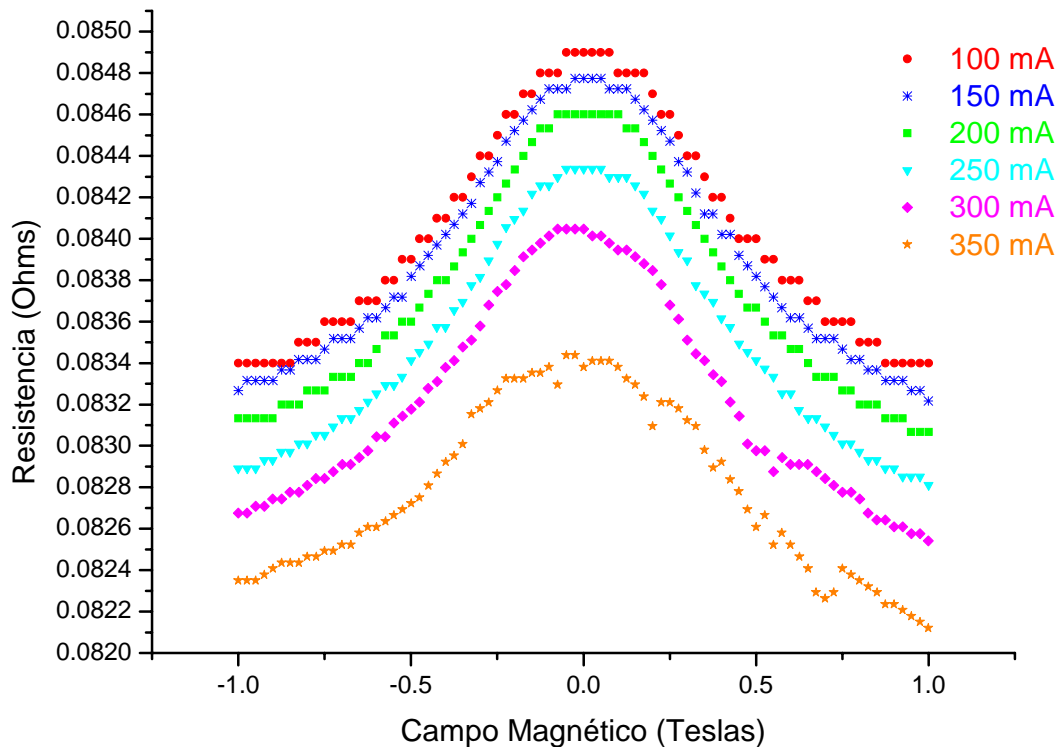
La resistencia R encontrada está directamente relacionada con la resistividad ρ del material mediante la ecuación.

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} R \quad (41)$$

Donde d es el espesor de la pastilla, el cuál se estableció como 0.06 cm con la ayuda de un nonio o calibrador. Por lo tanto la resistividad del material es de $0.0226 \Omega \cdot \text{cm}$.

6.4.2 Magnetorresistencia de las manganitas LSMO. En la figura 66, se muestran las curvas de variación de la resistencia eléctrica dependiente del campo magnético aplicado para una muestra de manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$. Se realizaron a temperatura ambiente y mediante la técnica de cuatro puntas. El campo magnético externo aplicado varía en un rango de -1 T a 1 T . Cada curva corresponde a un valor de corriente suministrada a la muestra del material, el cual se modificó desde 100 mA hasta 350 mA .

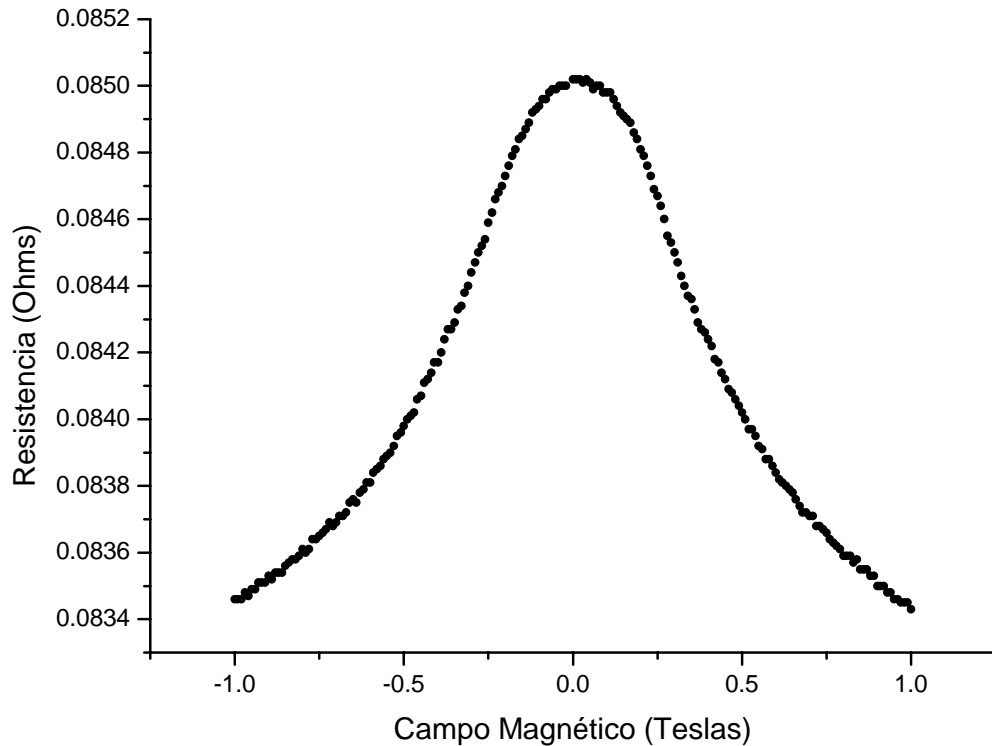
Figura 66. Curvas Resistencia-Campo Magnético para diferentes corrientes suministradas a la muestra de $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ a temperatura ambiente



Se observa que la resistencia eléctrica del material decrece a medida que la corriente suministrada a la muestra se incrementa, de igual forma para valores mayores de corriente inyectada las gráficas obtenidas presentan mucho más ruido, esto debido a que el flujo de corrientes más elevadas hace que la pastilla de manganita aumente su temperatura y por lo tanto se añada un notable ruido térmico en la medición. Por lo anterior es recomendable hacer las mediciones de magnetorresistencia con una corriente inyectada que no supere los 200 mA.

Para describir el comportamiento magnetorresistivo del $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ se decidió seleccionar la gráfica que corresponde a una corriente inyectada a la muestra de 150 mA, la cual se presenta a continuación.

Figura 67. Curva Resistencia-Campo Magnético del $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ para una corriente suministrada a la muestra de 150 mA a temperatura ambiente

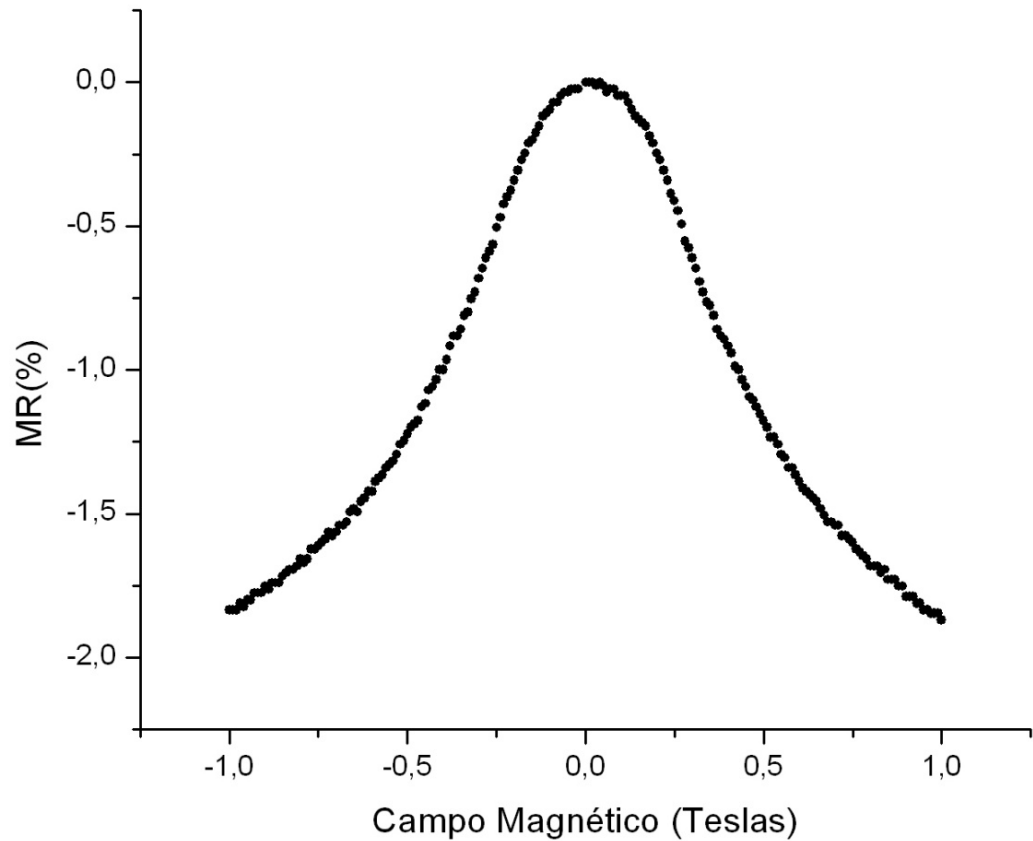


La magnetorresistencia (MR) se expresa en porcentaje mediante la siguiente fórmula.

$$MR(H) = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R(H) - R(H_0)}{R(H_0)} \times 100\% \quad (42)$$

Con la medición descrita por la figura 67, y aplicando la ecuación 43 para cada uno de los valores graficados, se obtiene la siguiente gráfica de magnetorresistencia.

Figura 68. Curva magnetorresistiva para el compuesto $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ a temperatura ambiente



Se observa un valor de MR máximo de alrededor de -1.8% para los valores extremos de campo magnético (-1 T y 1 T). La magnetorresistencia encontrada es negativa, coincidiendo con la literatura sobre este tipo de compuestos.

7. CONCLUSIONES

Mediante la elaboración de un sistema de refrigeración en lazo abierto es posible lograr el funcionamiento adecuado y permanente del electroimán según Weiss, debido a que el caudal de agua requerido por el equipo no es de estricta precisión.

El campo magnético generado por el electroimán según Weiss depende directamente de la corriente aplicada al mismo, y del inverso de la distancia de separación entre los polos o longitud del entrehierro, esto confirma las aproximaciones teóricas realizadas por el modelo físico del equipo, estableciendo su validez.

La elaboración del software de automatización y control a partir de sub instrumentos virtuales facilita su adaptación para controlar nuevos equipos e implementar otras clases de pruebas que se pueden realizar en los materiales a partir de los equipos disponibles en el CIMA.

La automatización del electroimán según Weiss y los equipos auxiliares de medida como el multímetro FLUKE 45 y la fuente de poder Tektronix PS2520G lograda a través del software implementado en LabVIEW facilita de gran manera el análisis de información al usuario, al adquirir medidas de una buena precisión y en gran número, lo que facilita la obtención de conclusiones a partir del manejo de los datos recopilados.

Los resultados de magnetorresistencia para el compuesto $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ muestran un máximo de 1.8%, valor muy reducido comparado a los típicos de magnetorresistencia colosal; esto debido a que dicho fenómeno se manifiesta únicamente en temperaturas cercanas a la temperatura de Curie para el material estudiado y las pruebas realizadas en el proyecto desarrollado se hicieron a temperatura ambiente.

Los estudios de materiales como las manganitas LSMO son de conocimiento mundial, los resultados obtenidos en otros laboratorios en gráficas de magnetorresistencia, voltaje y corriente comprueban el funcionamiento adecuado del método de automatización y control implementado en el CIMA para la medida de magnetorresistencia mediante el método de las cuatro puntas.

Debido a la magnitud de las corrientes y voltajes exigidos por el electroimán se hizo necesario realizar un control para evitar cambios bruscos en el valor de la corriente suministrada por la fuente HP 6675A al equipo, puesto que éste presenta una alta respuesta inductiva. Para lograrlo se incrementó el tiempo de cambio de valor en la corriente, que se reflejó en el aumento del tiempo utilizado para realizar las pruebas, sin embargo se logró evitar problemas relacionados con este fenómeno, además de proteger los dispositivos utilizados.

Los errores obtenidos en las mediciones de campo magnético, hacen necesaria la búsqueda de sensores especializados que permitan conocer el comportamiento real del equipo en sus límites de funcionamiento, lo cual posibilitaría obtener una caracterización apropiada del mismo. Sin embargo el software desarrollado permite cambiar fácilmente la función de calibración del equipo.

Los resultados obtenidos al evaluar la magnetorresistencia en la manganita $\text{La}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{MnO}_3$ evidencian la posibilidad de utilizar este tipo de compuesto para el desarrollo posterior de sensores de campo magnético.

8. RECOMENDACIONES

Continuar la investigación y el trabajo iniciado con la automatización de la medida de la magnetorresistencia en manganitas LSMO para mejorar el sistema desarrollado, con la adquisición de nuevos equipos, y la integración de los mismos en un sistema que evalúe las propiedades magnéticas y eléctricas de los materiales sintetizados en el CIMA a través de nuevas pruebas, lo que permitirá profundizar en el conocimiento y posibles aplicaciones de los materiales fabricados en el centro.

Realizar una puesta a tierra para la red eléctrica del edificio de Laboratorios Especializados de la Universidad de Nariño, puesto que éste cuenta con una gran cantidad de equipos que manejan una potencia eléctrica elevada y necesitan por tanto protección para evitar daños en el mismo dispositivo y en sus operarios.

Implementar un sistema de variación de temperatura que trabaje conjuntamente con el de medición de la magnetorresistencia; de ésta forma, se podrá realizar una caracterización completa del material bajo estudio.

BIBLIOGRAFIA

AGILENT. Agilent Technologies Models 664xA, 665xA, 667xA, 668xA, and 669xA, Operating Guide GPIB DC Power Supplies. U.S.A.: Agilent Technologies, 2002.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. Continuous-time ratiometric linear Hall effect sensors A1301 and A1302 [en línea]. U.S.A. : Allegro MicroSystems, Inc., 2005. Disponible en Internet: <[http// www.alldatasheet.com](http://www.alldatasheet.com) >.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. Ratiometric, linear Hall effect sensors UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA [en línea]. U.S.A. : Allegro MicroSystems, Inc., 2002. Disponible en Internet: <[http// www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com) >.

BAIRD, David C. Experimentación. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México. 1991. 207 p.

BISBAL, R., DE LEAL, C., ZAMBRANO, A. y NG LEE, Y. “*Estudio de lantano manganitas sustituidas por estroncio*”. Universidad Central de Venezuela, Facultad de ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 2001

BUEGHLER, M. A Hall Four-Point Probe on Thin Plates. Solid State Electron. 1967

CALDERON, María José. Magnetic and Electric Properties of Systems with Colossal Magnetoresistance. Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC). 2001 Madrid

COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2007. [en línea]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule> [citado el 7 de enero, 2008]

COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2007. [en línea]. <[http:// es.wikipedia.org/w/index.php?title=LabVIEW&oldid=9285129](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=LabVIEW&oldid=9285129)> [citado el 12 de abril, 2007]

COLABORADORES DE WIKIPEDIA. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2007. [en línea]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Magnetorresistencia_colosal> [citado el 16 de octubre, 2007]

"Efecto Joule." Microsoft® Encarta® 2007 [DVD]. Microsoft Corporation, 2006.

FAJARDO, Dario Fernando. Implementación de la Técnica de Crecimiento de Materiales por Reacción de Estado Sólido. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, 2005.

FERNÁNDEZ, Juan C. Materiales Magnéticos. Universidad de Buenos Aires. 2004 Argentina

FLUKE. 45 Dual Display Multimeter, Users Manual. 4 ed. U.S.A.: FLUKE Corporation, 1997.

FRISH, Serguéi y TIMOREVA, Alexandra. Curso de Física General Tomo II. Editorial Mir. 1977 Moscú

HABERKORN, Néstor Fabian. Relación entre Estructura y Propiedades en Superredes de Perovskitas. Universidad Nacional del Sur. 2005 Argentina

INTRODUCCION GPIB. [en línea]. España., 2003. Disponible en Internet: <[http:// www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_IT/](http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_IT/)>.

NAVARRO, José. Síntesis y Caracterización de Óxidos Magnetorresistivos del tipo $A_xSr_{2-x}FeMoO_6$ y su Aplicación a un Potenciómetro sin Contactos. Institut de Ciència de Materials de Barcelona. 2003

PELETEIRO SALGADO, Xosé. Medidas Experimentais de diversos campos magnéticos. Campo Magnético Terrestre. En: Boletín das Ciencias XVII Congreso de Enciga. Ponencias de Física e Química. [en línea]. No. 56, (noviembre, 2004).<http://www.enciga.org/congreso/2004/guia_congreso_resumida.pdf> [citado el 15 de mayo, 2007]

RESNICK y HALLIDAY. Física. Continental S.A. 1970 México

RONCANCIO, Henry y CIFUENTES, Hector. Tutorial de LabVIEW. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. 2001

SACANELL, Joaquín. Propiedades Eléctricas y Magnéticas, Separación de Fases y Comportamiento Dinámico en Manganitas. Universidad de Buenos Aires. 2006 Argentina

SAVELIEV, Igor Vladimirovich. Curso de Física General Tomo II. Editorial Mir. 1970 Moscú

SERWAY, Raymond A. Física Mc Graw Hill. 1992 México

TEKTRONIX, Inc. PS2520, PS2520G, PS2521 & PS2521G Programmable Power Supplies, Users Manual. U.S.A.: Tektronix, Inc, 1995.

TORRES, Javier, CRUZ, Beatriz y MARIN, William. Caracterización y Calibración Automática de Bobinas de Helmholtz en DC. En: Scientia et Technica Año XIII. No. 34, (mayo, 2007). Universidad Tecnológica de Pereira

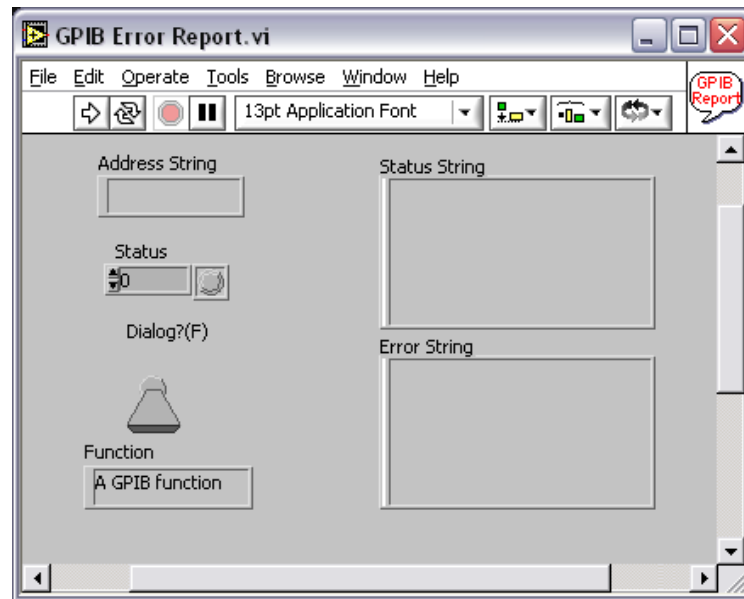
UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO. Práctica 6, Solenoides, Bobinas y Transformadores. [en línea]. < http://www.ucab.edu.ve/ucabnuevo/informatica/recursos/practica6_labf.pdf> [citado el 12 de abril, 2007]

VAN DER PAW, L. J. A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape. En: Philips Research Reports. Vol, 13. No 1, (febrero, 1958)

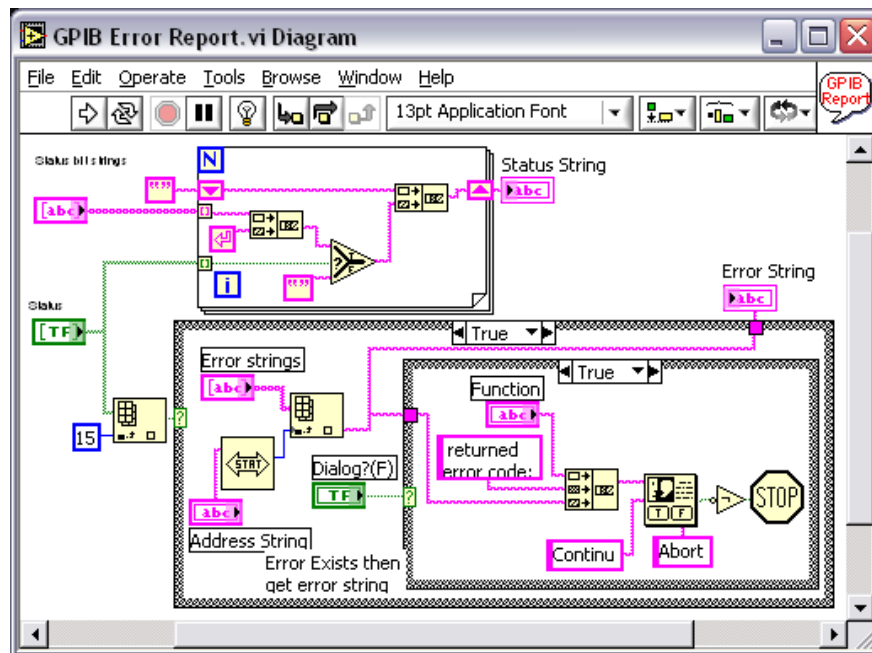
WEBSTER, John G. *Handbook Measurement, Instrumentation and sensor Handbook*. CCR Press

ANEXOS

Anexo A. SubVI “GPIB Error Report.vi”. (a) Interfaz de usuario, (b) diagrama de bloques y (c) Cuadro de errores GPIB que el programa puede detectar con su descripción



(a)



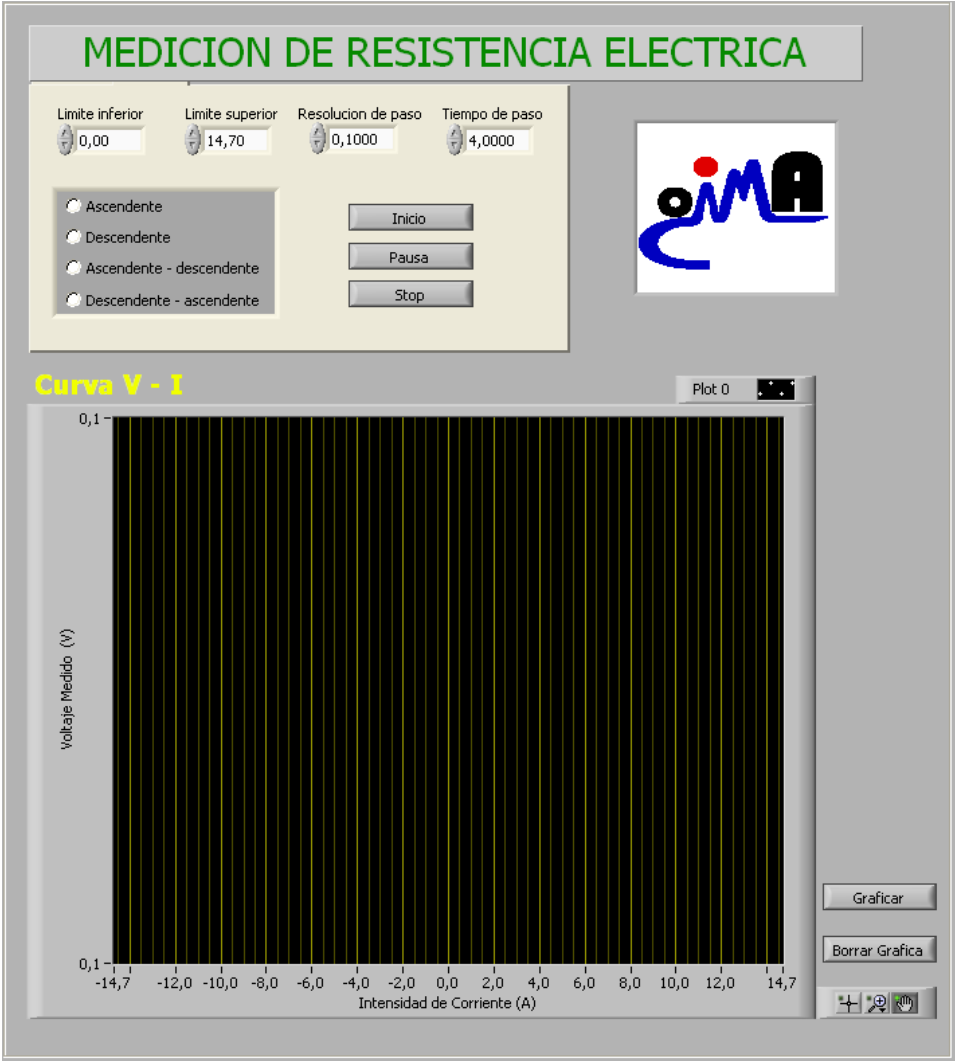
(b)

Error GPIB	Símbolo	Descripción
0	EDVR	Error connecting to driver or device. Este error se puede presentar cuando no se encuentra o no se puede abrir correctamente el controlador del dispositivo GPIB
1	ECIC	Command requires GPIB Controller to be Controller-In-Charge. Este error ocurre cuando el dispositivo no puede realizar una tarea debido a que se requiere ser controlador o cuando un dispositivo demanda servicio de controlador a un equipo que no está designado para esta tarea.
2	ENOL	No Listeners on the GPIB. Este error se presenta cuando se realiza una operación de escritura sobre el bus y no hay dispositivos que reciban la información o si se envía operaciones de comando y no hay equipos presentes.
3	EADR	GPIB Controller not addressed correctly. Este error se presenta cuando el dispositivo es el controlador a cargo y no se direcciona apropiadamente antes de iniciar la transferencia de información.
4	EARG	Invalid argument or arguments to function call. Ocurre cuando una función del controlador se utiliza con un parámetro inválido.
5	ESAC	Command requires GPIB Controller to be System Controller. Este error ocurre cuando el dispositivo no es el controlador del sistema pero se necesita que lleve a cabo una operación.
6	EABO	I/O operation aborted. Ocurre cuando una operación de entrada/salida se finaliza debido al timeout.
7	ENEB	Nonexistent GPIB interface. Este error se presenta cuando el acceso a un dispositivo no se puede encontrar en el sistema.
8	EDMA	DMA hardware error detected. Ocurre cuando el controlador tiene DMA (acceso directo a memoria) activo pero no se puede utilizar, debido a que el sistema no puede proveer una dirección física a los dispositivos.
9	EBTO	DMA hardware uP bus timeout. Ocurrió timeout para el acceso directo a memoria debido a limitaciones en el hardware.
10	EOIP	Asynchronous I/O operation in progress. Se presenta cuando se intenta comenzar una operación de entrada/salida asíncrona mientras que la interface se encuentra en estado sin sincronizar.
11	ECAP	No capability for operation. Este error ocurre cuando se trata de utilizar una característica del controlador que no está implementada o no se puede utilizar actualmente por modificaciones en el hardware.
12	EFSO	File system operation error. Ocurre cuando no se encuentran problemas en el acceso a un archivo específico.
13	EOWN	Shareable board exclusively owned. Tarjeta compartida exclusivamente por el propietario.

14	EBUS	GPIB bus error. Este error se presenta mientras se envían comandos por el bus GPIB, ocasionado por funciones que indirectamente envían bytes de comando.
15	ESTB	Serial poll byte queue overflow. Error en el byte de finalización cuando se realiza encuesta en serie.
16	ESRQ	SRQ stuck in ON position. Ocurre cuando el dispositivo es incapaz de espera a que el bit RQS cambie al estado set durante una operación.
17	ECMD	Unrecognized command. Comando no reconocido.
19	EBNP	Board not present. Dispositivo no esta presente.
20	ETAB	Table error. Se presenta cuando hay un problema con una tabla usada por una función, en el caso de que se encuentren más dispositivos que se ajusten a la tabla o más de ellos requieran servicio del controlador.
21	ELCK	GPIB interface is locked and cannot be accessed. Este error ocurre cuando no se puede llevar a cabo una operación debido a un bloqueo existente por otro proceso que esta utilizando la misma interfaz.
22	EARM	The ibnotifyCallback failed to rearm. Se presenta cuando el mecanismo notificación de un evento asíncrono falla.
23	EHDL	The input handle is invalid or out of range. Se presenta cuando hay conflictos de hardware
26	EWIP	Wait in progress on specified input handle. Ocurre cuando se intenta ejecutar un proceso dentro de una función llamada que utiliza recursos de la función inicial.
30	NADDR	No GPIB address input. No se ha ingresado dirección GPIB.
31	NSTRG	No string input (write). No hay caracteres para escribir.
32	NCNT	No count input (read). No hay caracteres para leer.
40	EMOM	Out of memory (MacBus read or write). Se ha excedido la capacidad de la memoria.
41	EMIM	Insufficient memory (MacBus read or write). Memoria insuficiente.
61	EPAR	Serial Port Parity Error: error de paridad.
62	EORN	Serial Port Overrun: sobrepaso de tiempo.
63	EOFL	Port Receive Buffer Overflow: sobrepaso en memoria de puerto.
64	EFRM	Serial Port Framing Error: error de paquete.
65	SPTMO	Serial Port Timeout, Bytes Not Received at Serial Port: bytes no recibidos.

(c)

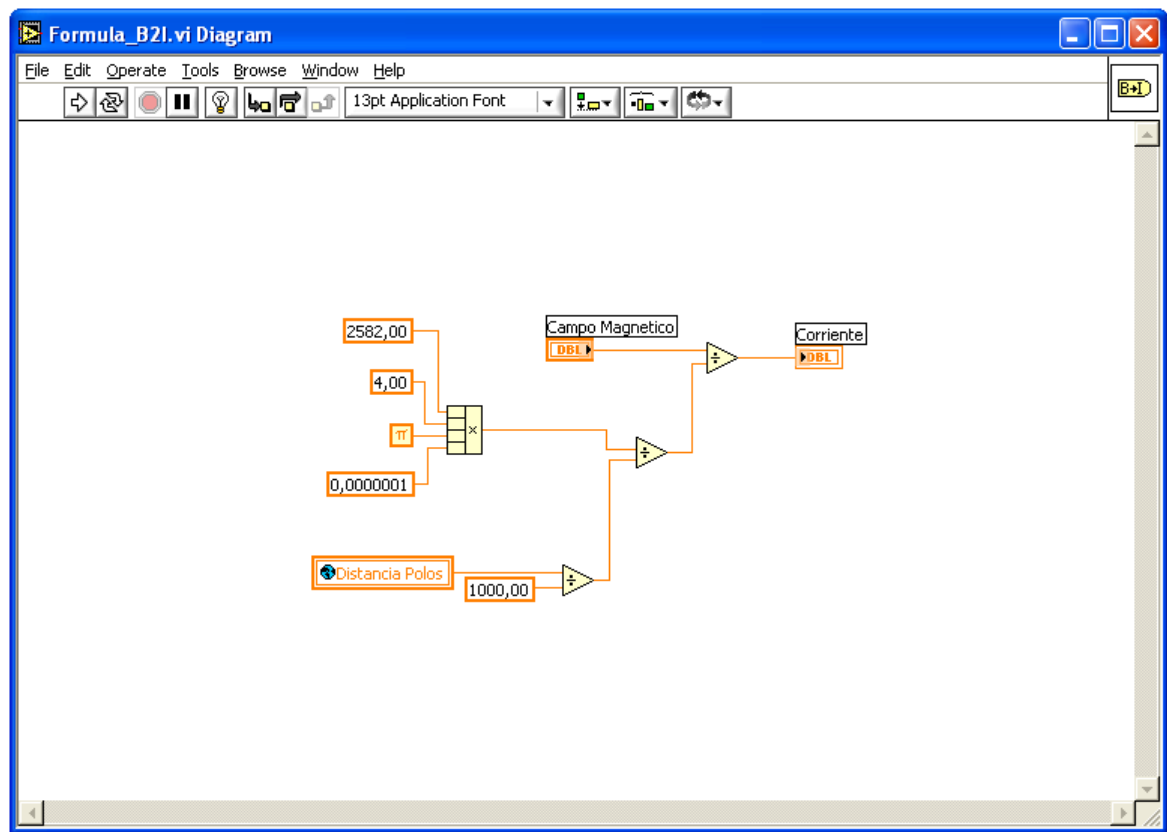
Anexo B. Interfaz de usuario para el software de medición de la resistencia eléctrica



Anexo C. Modificación de la función de calibración para el electroimán según Weiss

La función de calibración que relaciona el campo magnético deseado con la corriente suministrada al electroimán se encuentra en la subrutina Formula_B2I.vi del programa principal desarrollado.

El diagrama del subVI Formula_B2I.vi se muestra en la siguiente figura.



En la figura se presenta la función de calibración que relaciona el campo magnético requerido con la corriente suministrada al electroimán de Weiss, y que fue obtenida a través de una caracterización teórica y experimental. La variable numérica “Campo Magnético” corresponde al valor del campo magnético solicitado por el programa principal. Al final del último nodo de división se tendrá el valor respectivo de “Corriente” que resulta necesario para producir dicho campo magnético. La variable global “Distancia Polos” se refiere a la distancia de los polos a la cual se está trabajando, esta variable se solicita al usuario al inicio del programa principal como se explicó en la sección 6.2.2 del presente documento.

Como se puede observar en la figura anterior, la función de calibración obtenida es:

$$\text{"Corriente"} = \frac{\text{"Campo Magnetico"}}{\frac{4\pi * 10^{-7} * 2582}{\text{"Distancia Polos"}/1000}}$$

Que corresponde con la ecuación de caracterización obtenida en la sección 2.1.3. Por lo tanto, si se desea modificar la función de calibración, basta con editar el subVI "Formula_B2I.vi"

Anexo D. Configuración de las direcciones GPIB para los dispositivos que intervienen en el sistema

Para la fuente de poder Hewlett Packard 6675A La dirección GPIB debe ser configurada desde el panel frontal de la fuente (la dirección predeterminada del dispositivo es 5). Para ingresar la dirección deseada se deben seguir los siguientes pasos:

1. Encender la fuente HP6675A
2. Presione el Botón “Adress”.
3. Digite la dirección deseada en el panel numérico.
4. Presione el Botón “Enter”

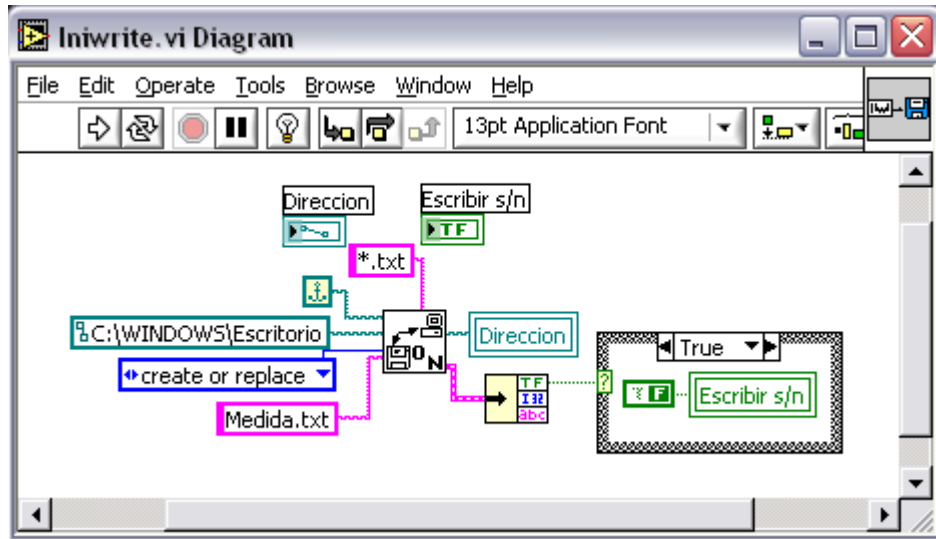
Para el multímetro FLUKE 45 Para configurar la dirección GPIB del multímetro FLUKE 45 (la dirección predeterminada es 3) se deben seguir los siguientes pasos:

1. Encender el multímetro FLUKE 45.
2. Presionar el botón “2ND”.
3. Presionar el botón “MIN MX” (ADDR).
4. Presionar los botones que indican “flecha hacia arriba” y “flecha hacia abajo” para verificar las direcciones disponibles, éstas aparecerán en el display.
5. Presionar el botón “AUTO” para seleccionar la dirección deseada
6. Finalmente presionar cualquier otra tecla para volver a la visualización normal del multímetro a excepción de los botones mencionados anteriormente.

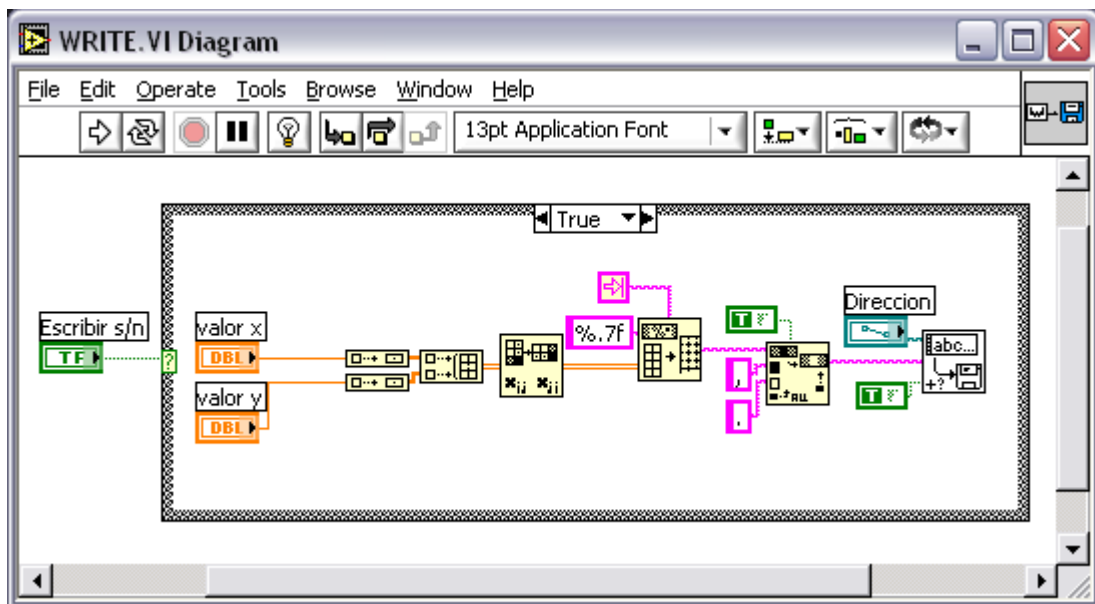
Para la fuente de poder Tektronix PS2520G La configuración de la dirección GPIB para la fuente de poder Tektronix PS2520G (la dirección predeterminada para éste equipo es 8) se realiza de la siguiente manera:

1. Encienda la fuente de poder Tektronix PS2520G.
2. Asegúrese que la función “AUTO SEQ” esté inactiva (el indicador de “AUTO” debe estar apagado”).
3. Presione el botón “LOCAL”.
4. Digite la dirección GPIB deseada en el panel numérico.
5. Presione el botón “return”.

Anexo E. SubVI para almacenamiento de datos en un archivo plano. (a) Diagrama de bloques de inicialización de escritura del archivo y (b) diagrama de bloques de escritura en un archivo de texto

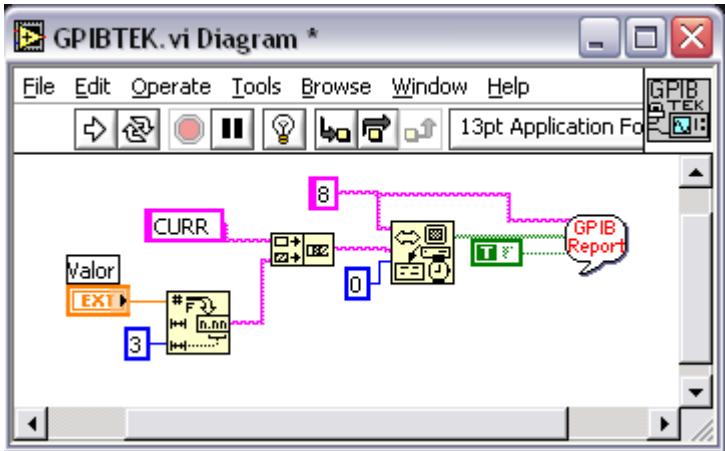


(a)

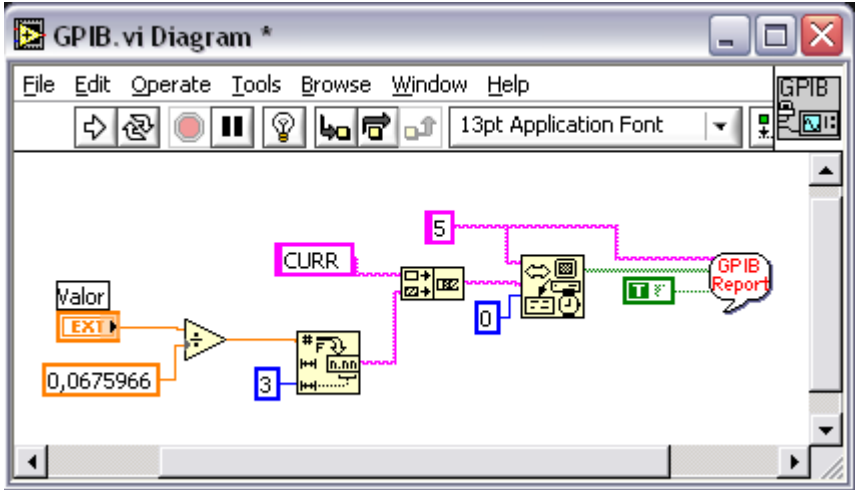


(b)

**Anexo F. Subrutina de envío de datos a la fuente Tektronix PS2520G “GPIBTEK.vi”.
Diagrama de bloques**



Anexo G. Subrutina de envío de datos a la fuente HP 6675A “GPIB.vi”. Diagrama de bloques

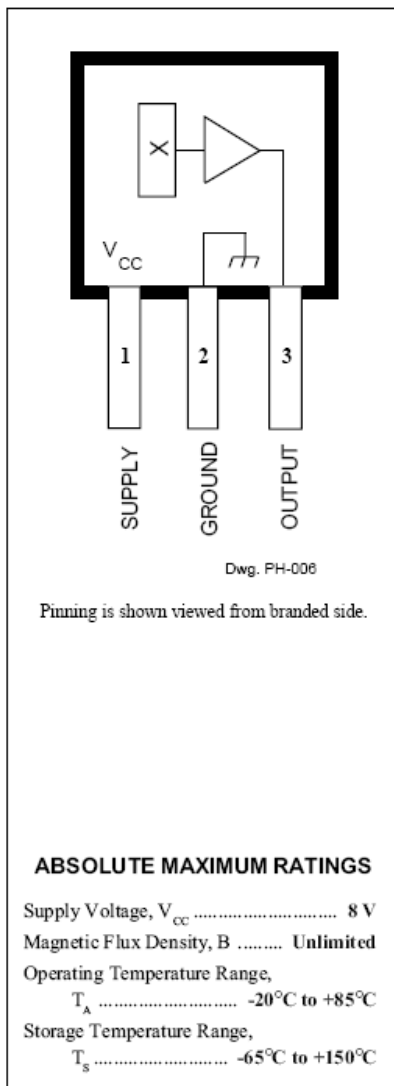


Anexo H. Hoja de características del sensor UGN3503UA de Allegro Microsystems

3503

Data Sheet
27501B†

RATIOMETRIC, LINEAR HALL-EFFECT SENSORS



The UGN3503LT, UGN3503U, and UGN3503UA Hall-effect sensors accurately track extremely small changes in magnetic flux density—changes generally too small to operate Hall-effect switches.

As motion detectors, gear tooth sensors, and proximity detectors, they are magnetically driven mirrors of mechanical events. As sensitive monitors of electromagnets, they can effectively measure a system's performance with negligible system loading while providing isolation from contaminated and electrically noisy environments.

Each Hall-effect integrated circuit includes a Hall sensing element, linear amplifier, and emitter-follower output stage. Problems associated with handling tiny analog signals are minimized by having the Hall cell and amplifier on a single chip.

Three package styles provide a magnetically optimized package for most applications. Package suffix 'LT' is a miniature SOT-89/TO-243AA transistor package for surface-mount applications; suffix 'U' is a miniature three-lead plastic SIP, while 'UA' is a three-lead ultra-mini-SIP. All devices are rated for continuous operation over the temperature range of -20°C to +85°C.

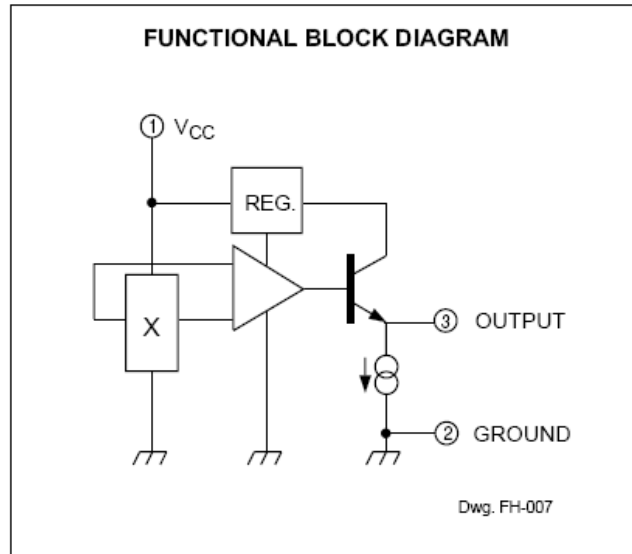
FEATURES

- Extremely Sensitive
- Flat Response to 23 kHz
- Low-Noise Output
- 4.5 V to 6 V Operation
- Magnetically Optimized Package

Always order by complete part number, e.g., UGN3503UA.



3503
RATIOMETRIC,
LINEAR
HALL-EFFECT SENSORS



ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 5\text{ V}$

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			Units
			Min.	Typ.	Max.	
Operating Voltage	V_{CC}		4.5	—	6.0	V
Supply Current	I_{CC}		—	9.0	13	mA
Quiescent Output Voltage	V_{OUT}	$B = 0\text{ G}$	2.25	2.50	2.75	V
Sensitivity	ΔV_{OUT}	$B = 0\text{ G to } \pm 900\text{ G}$	0.75	1.30	1.75	mV/G
Bandwidth (-3 dB)	BW		—	23	—	kHz
Broadband Output Noise	V_{out}	$BW = 10\text{ Hz to } 10\text{ kHz}$	—	90	—	μV
Output Resistance	R_{OUT}		—	50	220	Ω

All output-voltage measurements are made with a voltmeter having an input impedance of at least 10 k Ω .

Magnetic flux density is measured at most sensitive area of device located 0.0165" (0.42 mm) below the branded face of the 'U' package; 0.0195" (0.50 mm) below the branded face of the 'UA' package; and 0.0305" (0.775 mm) below the branded face of the 'LT' package.



115 Northeast Cutoff, Box 15036
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000
Copyright © 1985, 2002 Allegro MicroSystems, Inc.

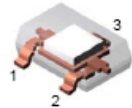
Anexo I. Hoja de características del sensor A1302 de Allegro Microsystems

A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

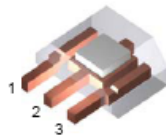
Package LH, 3-pin Surface Mount

1. VCC
2. VOUT
3. GND



Package UA, 3-pin SIP

1. VCC
2. GND
3. VOUT



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage, V_{CC}	8 V
Output Voltage, V_{OUT}	8 V
Reverse-Supply Voltage, V_{RCC}	-0.1 V
Reverse-Output Voltage, V_{ROUT}	-0.1 V
Output Sink Current, I_{OUT}	10 mA
Operating Temperature	
Ambient, T_A , Range E	-40°C to 85°C
Ambient, T_A , Range K	-40°C to 125°C
Maximum Junction, $T_{J(max)}$	165°C
Storage Temperature, T_S	-65°C to 170°C

The A1301 and A1302 are continuous-time, ratiometric, linear Hall-effect sensors. They are optimized to accurately provide a voltage output that is proportional to an applied magnetic field. These devices have a quiescent output voltage that is 50% of the supply voltage. Two output sensitivity options are provided: 2.5 mV/G typical for the A1301, and 1.3 mV/G typical for the A1302.

The Hall-effect integrated circuit included in each device includes a Hall sensing element, a linear amplifier, and a CMOS Class A output structure. Integrating the Hall sensing element and the amplifier on a single chip minimizes many of the problems normally associated with low voltage level analog signals.

High precision in output levels is obtained by internal gain and offset trim adjustments made at end-of-line during the manufacturing process.

These features make the A1301 and A1302 ideal for use in position sensing systems, for both linear target motion and rotational target motion. They are well-suited for industrial applications over extended temperature ranges, from -40°C to 125°C.

Two device package types are available: LH, a 3-pin SOT23W type for surface mount, and UA, a 3-pin ultramini SIP for through-hole mount. Each package is available in a lead (Pb) free version (suffix, -T) with 100% matte tin plated lead-frame.

Features and Benefits

- Low-noise output
- Fast power-on time
- Ratiometric rail-to-rail output
- 4.5 to 6.0 V operation
- Solid-state reliability
- Factory-programmed at end-of-line for optimum performance
- Robust ESD performance



A1301 and A1302

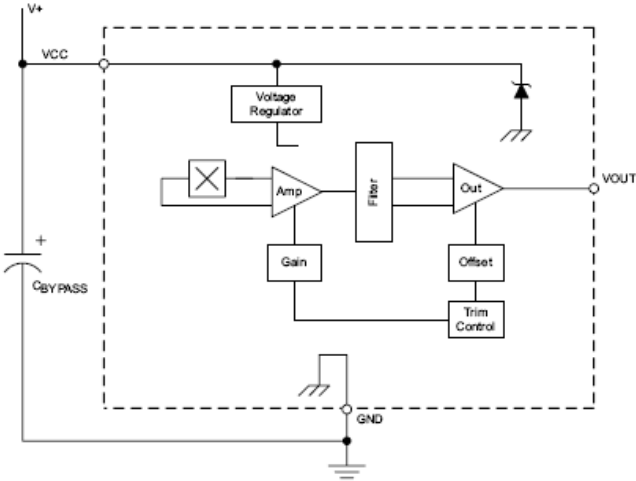
Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Product Selection Guide

Part Number	Pb-free	Packing*	Package	Ambient, T _A	Sensitivity (Typical)	
A1301ELHLT	–	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	–40°C to 85°C	2.5 mV/G	
A1301ELHLT-T	Yes					
A1301EUA	–	Bulk, 500 pieces/bag	SIP	–40°C to 125°C		
A1301EUA-T	Yes					
A1301KLHLT	–	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount			–40°C to 125°C
A1301KLHLT-T	Yes					
A1301KUA	–	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		–40°C to 85°C	
A1301KUA-T	Yes					
A1302ELHLT	–	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount	–40°C to 85°C		1.3 mV/G
A1302ELHLT-T	Yes					
A1302EUA	–	Bulk, 500 pieces/bag	SIP	–40°C to 125°C		
A1302EUA-T	Yes					
A1302KLHLT	–	7-in. tape and reel, 3000 pieces/reel	Surface Mount		–40°C to 125°C	
A1302KLHLT-T	Yes					
A1302KUA	–	Bulk, 500 pieces/bag	SIP		–40°C to 125°C	
A1302KUA-T	Yes					

*Contact Allegro for additional packing options.

Functional Block Diagram



Terminal List

Symbol	Description	Number	
		Package LH	Package UA
VCC	Connects power supply to chip	1	1
VOUT	Output from circuit	2	3
GND	Ground	3	2



A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

DEVICE CHARACTERISTICS over operating temperature range, T_A , and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise noted

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Electrical Characteristics						
Supply Voltage	V_{CC}	Running, $T_J < 165^\circ\text{C}$	4.5	–	6	V
Supply Current	I_{CC}	Output open	–	–	11	mA
Output Voltage	$V_{OUT(High)}$	$I_{SOURCE} = -1\text{ mA}$, Sens = nominal	4.65	4.7	–	V
	$V_{OUT(Low)}$	$I_{SINK} = 1\text{ mA}$, Sens = nominal	–	0.2	0.25	V
Output Bandwidth	BW		–	20	–	kHz
Power-On Time	t_{PO}	$V_{CC(min)}$ to $0.95 V_{OUT}$; $B = \pm 1400\text{ G}$; Slew rate = $4.5\text{ V}/\mu\text{s}$ to $4.5\text{ V}/100\text{ ns}$	–	3	5	μs
Output Resistance	R_{OUT}	$I_{SINK} \leq 1\text{ mA}$, $I_{SOURCE} \geq -1\text{ mA}$	–	2	5	Ω
Wide Band Output Noise, rms	V_{OUTN}	External output low pass filter $\leq 10\text{ kHz}$; Sens = nominal	–	150	–	μV
Ratiometry						
Quiescent Output Voltage Error with respect to ΔV_{CC} ¹	$\Delta V_{OUTQ(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Sensitivity Error with respect to ΔV_{CC} ²	$\Delta \text{Sens}_{(V)}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Output						
Linearity	Lin	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 2.5	%
Symmetry	Sym	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	–	± 3.0	%
Magnetic Characteristics						
Quiescent Output Voltage	V_{OUTQ}	$B = 0\text{ G}$; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.4	2.5	2.6	V
Quiescent Output Voltage over Operating Temperature Range	$V_{OUTQ(\Delta T_A)}$	$B = 0\text{ G}$	2.2	–	2.8	V
Magnetic Sensitivity	Sens	A1301; $T_A = 25^\circ\text{C}$	2.0	2.5	3.0	mV/G
		A1302; $T_A = 25^\circ\text{C}$	1.0	1.3	1.6	mV/G
Magnetic Sensitivity over Operating Temperature Range	$\text{Sens}_{(\Delta T_A)}$	A1301	1.8	–	3.2	mV/G
		A1302	0.85	–	1.75	mV/G

¹Refer to equation (4) in Ratiometric section on page 4.

²Refer to equation (5) in Ratiometric section on page 4.

A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Characteristic Definitions

Quiescent Output Voltage. In the quiescent state (no significant magnetic field: $B = 0$), the output, V_{OUTQ} , equals one half of the supply voltage, V_{CC} , throughout the entire operating ranges of V_{CC} and ambient temperature, T_A . Due to internal component tolerances and thermal considerations, however, there is a tolerance on the quiescent output voltage, ΔV_{OUTQ} , which is a function of both ΔV_{CC} and ΔT_A . For purposes of specification, the quiescent output voltage as a function of temperature, $\Delta V_{OUTQ(\Delta T_A)}$, is defined as:

$$\Delta V_{OUTQ(\Delta T_A)} = \frac{V_{OUTQ(T_A)} - V_{OUTQ(25^\circ C)}}{Sens(25^\circ C)} \quad (1)$$

where $Sens$ is in mV/G, and the result is the device equivalent accuracy, in gauss (G), applicable over the entire operating temperature range.

Sensitivity. The presence of a south-polarity (+B) magnetic field, perpendicular to the branded face of the device package, increases the output voltage, V_{OUT} , in proportion to the magnetic field applied, from V_{OUTQ} toward the V_{CC} rail. Conversely, the application of a north polarity (-B) magnetic field, in the same orientation, proportionally decreases the output voltage from its quiescent value. This proportionality is specified as the magnetic sensitivity of the device and is defined as:

$$Sens = \frac{V_{OUT(-B)} - V_{OUT(+B)}}{2B} \quad (2)$$

The stability of the device magnetic sensitivity as a function of ambient temperature, $\Delta Sens_{(\Delta T_A)}$ (%) is defined as:

$$\Delta Sens_{(\Delta T_A)} = \frac{Sens(T_A) - Sens(25^\circ C)}{Sens(25^\circ C)} \times 100\% \quad (3)$$

Ratiometric. The A1301 and A1302 feature a ratiometric output. This means that the quiescent voltage output, V_{OUTQ} , and the magnetic sensitivity, $Sens$, are proportional to the supply voltage, V_{CC} .

The ratiometric change (%) in the quiescent voltage output is defined as:

$$\Delta V_{OUTQ(\Delta V)} = \frac{\Delta V_{OUTQ(V_{CC})} / \Delta V_{OUTQ(5V)}}{V_{CC} / 5V} \times 100\% \quad (4)$$

and the ratiometric change (%) in sensitivity is defined as:

$$\Delta Sens_{(\Delta V)} = \frac{Sens(V_{CC}) / Sens(5V)}{V_{CC} / 5V} \times 100\% \quad (5)$$

Linearity and Symmetry. The on-chip output stage is designed to provide linear output at a supply voltage of 5 V. Although the application of very high magnetic fields does not damage these devices, it does force their output into a nonlinear region. Linearity in percent is measured and defined as:

$$Lin+ = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (6)$$

$$Lin- = \frac{V_{OUT(-B)} - V_{OUTQ}}{2(V_{OUT(-B)} - V_{OUTQ})} \times 100\% \quad (7)$$

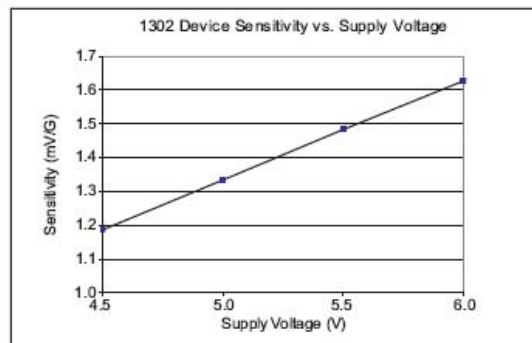
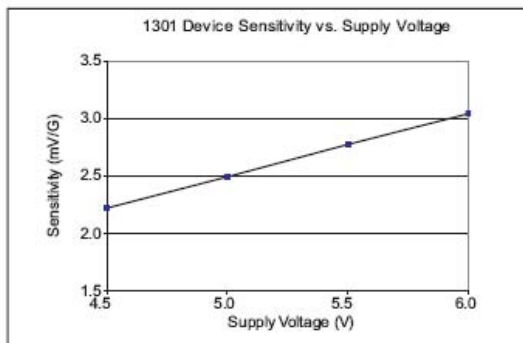
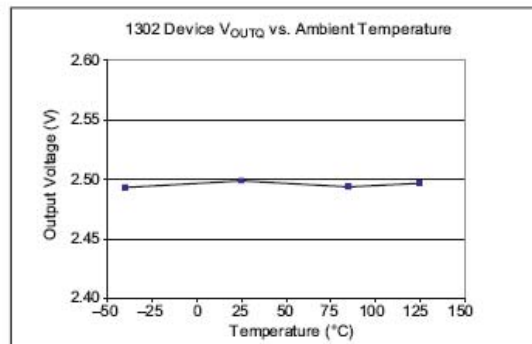
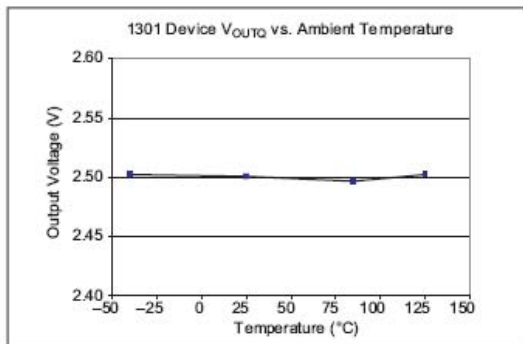
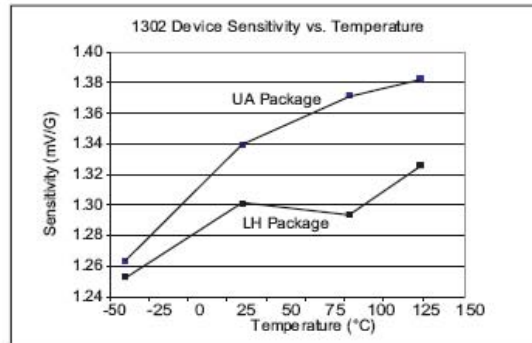
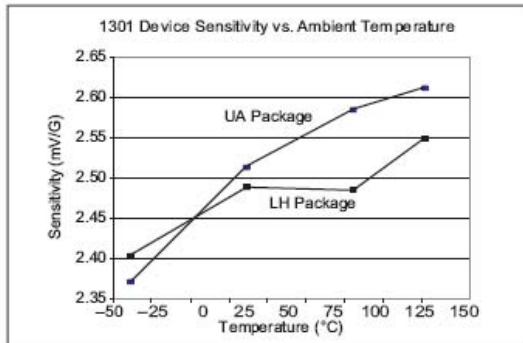
and output symmetry as:

$$Sym = \frac{V_{OUT(+B)} - V_{OUTQ}}{V_{OUTQ} - V_{OUT(-B)}} \times 100\% \quad (8)$$

A1301 and A1302

Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Typical Characteristics (30 pieces, 3 fabrication lots)

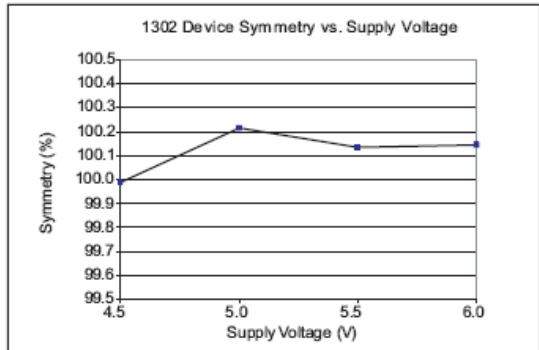
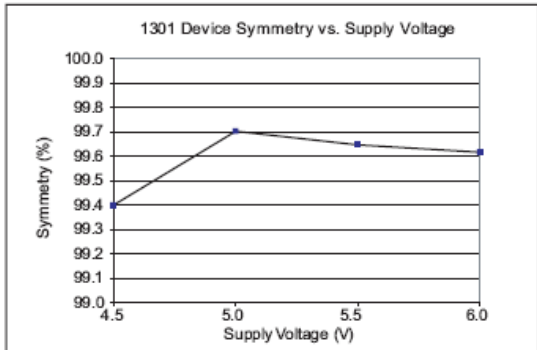
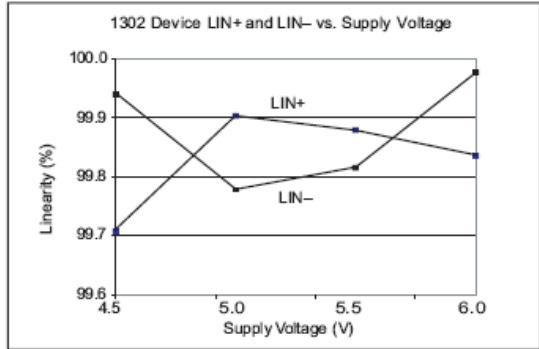
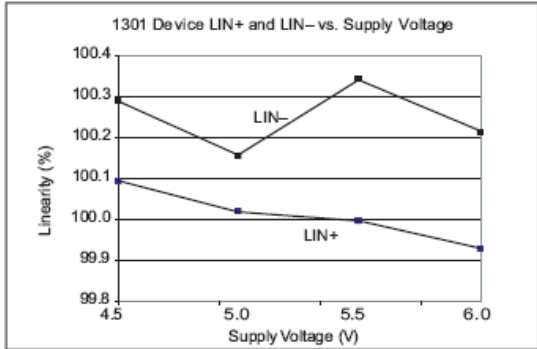
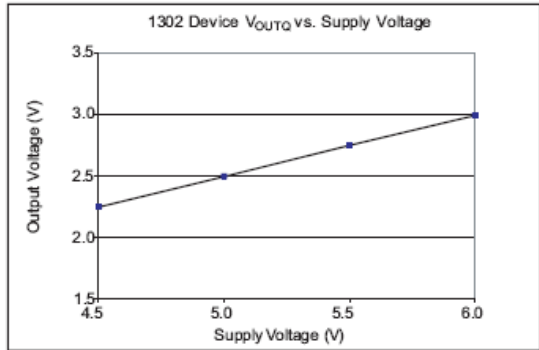
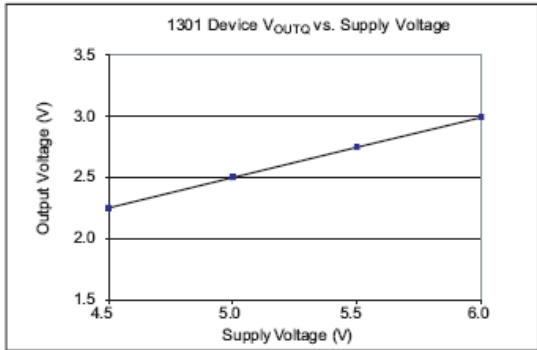


Continued on the next page...

A1301 and A1302

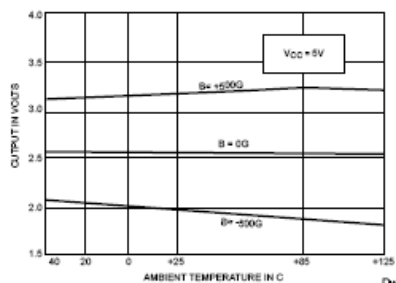
Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensors

Typical Characteristics, continued
(30 pieces, 3 fabrication lots)



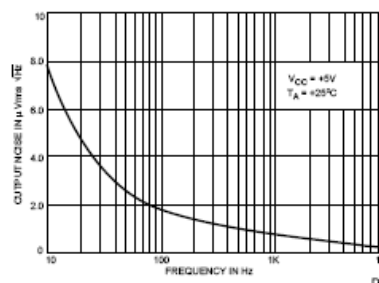
3503
RATIOMETRIC,
LINEAR
HALL-EFFECT SENSORS

OUTPUT VOLTAGE AS A FUNCTION OF TEMPERATURE



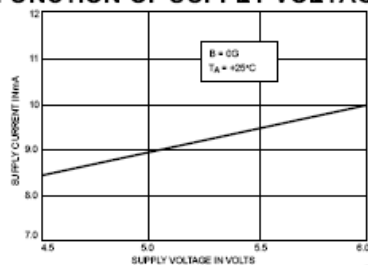
Dwg. A-12.573

OUTPUT NOISE AS A FUNCTION OF FREQUENCY



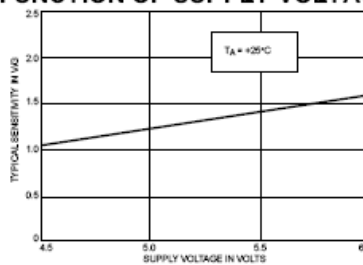
Dwg. A-12.505

SUPPLY CURRENT AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



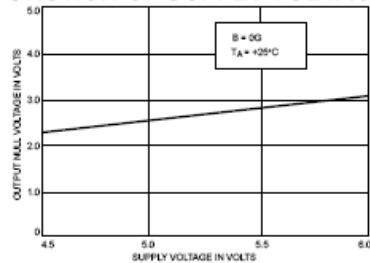
Dwg. A-12.506

DEVICE SENSITIVITY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



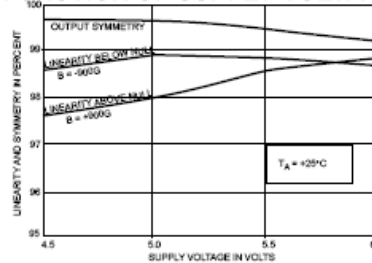
Dwg. A-12.507

OUTPUT NULL VOLTAGE AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



Dwg. A-12.508

LINEARITY AND SYMMETRY AS A FUNCTION OF SUPPLY VOLTAGE



Dwg. A-12.509

Anexo J. Lista de códigos SCPI utilizados para controlar la fuente HP 6675A, la fuente Tektronix PS2520G y el multímetro FLUKE 45

Código	Descripción	Instrumento
*RST	Reinicializa las condiciones del instrumento	Fuente Tektronix, fuente HP6675A, multímetro FLUKE 45
*IDN?	Solicita referencia de identificación al instrumento (Fabricante y serie del modelo)	Fuente Tektronix, fuente HP6675A, multímetro FLUKE 45
CURR VALOR	Programa el valor de corriente asignado de acuerdo al valor deseado	Fuente Tektronix, fuente HP6675A
VOLT VALOR	Programa el valor de voltaje asignado de acuerdo al valor deseado	Fuente Tektronix, fuente HP6675A
MEAS:CURR VALOR	Lee el valor de corriente suministrado por la fuente a través del amperímetro interno del mismo instrumento	Fuente Tektronix, fuente HP6675A
MEAS:VOLT VALOR	Lee el valor de voltaje suministrado por la fuente a través del voltímetro interno del mismo instrumento	Fuente Tektronix, fuente HP6675A
OUTP ON	Habilita los terminales de salida de la fuente	Fuente Tektronix, fuente HP6675A
OUTP OFF	Deshabilita los terminales de salida de la fuente	Fuente Tektronix, fuente HP6675A
VAL1?	Solicita el valor medido en display 1 del instrumento	multímetro FLUKE 45
VOLT: PROT VALOR	Programa el valor de voltaje al cual la fuente deshabilita las salidas	Fuente Tektronix, fuente HP6675A
VDC	Configura al instrumento para medición de voltaje directo	Multímetro FLUKE 45
AUTO	Configura al instrumento para medición en auto escala	Multímetro FLUKE 45
RATE VAL	Configura la velocidad de lectura de acuerdo con los siguientes valores: S (lento). M (medio) y F (rápido)	Multímetro FLUKE 45