



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DETERMINACIÓN DEL
CAMPO MAGNÉTICO
GENERADO POR UNA
SUPERCORRIENTE EN UN
ARILLO SUPERCONDUCTOR
DE $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

PRESENTA:

PAVEL DAVID SULCA CAVERO



DIRECTOR DE TESIS:

M. EN C. RAÚL WAYNE GÓMEZ Y GONZÁLEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Nombre del Alumno.

Sulca

Cavero

Pavel David

Tel. 5514858720

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

401490024

2. Datos del tutor.

Maestro en ciencias

Gómez

y González

Raúl Wayne

3. Datos del sinodal 1

Doctor

González

Morán

Tomás

4. Datos del sinodal 2

Doctor

Escamilla

Guerrero

Raúl

5. Datos del sinodal 3

Físico

Espejel

Paz

Raúl

6. Datos del sinodal 4

Doctora

Aburto

Espina

Andrea Luisa

7. Datos del trabajo escrito.

Determinación del campo magnético generado por una supercorriente en un arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

102 páginas

2016

Índice general

| | |
|--|-----------|
| Resumen | 5 |
| Introducción | 6 |
| 1. Superconductividad | 8 |
| 1.1. Antecedentes históricos | 8 |
| 1.2. El descubrimiento de la superconductividad | 9 |
| 1.3. Efecto Meissner-Ochsenfeld | 15 |
| 1.4. Clasificación de superconductores | 18 |
| 2. Diseño experimental | 20 |
| 2.1. Síntesis de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ | 20 |
| 2.1.1. Estequiometría. | 21 |
| 2.1.2. Síntesis. | 22 |
| 2.1.3. Conformación de un arillo superconductor. | 27 |
| 2.2. Diseño del dispositivo | 32 |
| 2.2.1. Bobinas de Helmholtz. | 33 |
| 2.2.2. Sistema de posicionamiento. | 39 |
| 2.2.3. Porta muestra. | 41 |
| 3. Sistema de medición y registro de datos | 45 |
| 3.1. Sensor de efecto Hall. | 45 |
| 3.2. Sensor de temperatura criogénico | 53 |
| 3.3. Sistema de recolección y almacenamiento de datos. | 56 |
| 3.3.1. Plataforma Arduino | 57 |
| 3.3.2. Registro de datos , almacenamiento y graficación. | 59 |
| 4. Experimentación y análisis de resultados | 64 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1. Pruebas iniciales | 64 |
| 4.1.1. Experimentación | 65 |
| 4.1.2. Análisis | 67 |
| 4.1.3. Resultados | 67 |
| 4.2. Mapeo del campo magnético respecto a la posición | 68 |
| 4.2.1. Experimentación | 68 |
| 4.2.2. Análisis | 69 |
| 4.2.3. Resultados | 70 |
| 4.3. Determinación de la corriente inducida en un arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ | 71 |
| 4.3.1. Experimentación | 71 |
| 4.3.2. Análisis | 71 |
| 4.3.3. Resultados | 72 |
| 4.4. Atenuación del campo magnético generado por la supercorriente a lo largo del eje de simetría principal del arillo | 73 |
| 4.4.1. Experimentación | 73 |
| 4.4.2. Análisis | 73 |
| 4.4.3. Resultados | 74 |
| 5. Conclusiones | 75 |
| Apéndice A | 76 |
| Apéndice B | 80 |
| Apéndice C | 85 |
| Apéndice D | 94 |
| Bibliografía | 99 |

Resumen

En este trabajo se diseñó y construyó un dispositivo experimental con el cual se hizo un perfil y se graficó el campo magnético de una muestra de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. La muestra superconductora se constituyó en forma de un arillo, que se puso en estado superconductor. Se obtuvo la magnitud de campo magnético en el centro del arillo, $B = (1.66 \times 10^{-4} \pm 2.17 \times 10^{-5})T$, generado por la corriente en la muestra; Con el valor de campo magnético se usó la ley de Biot-Savart y se obtuvo el valor de la supercorriente, $i = (3.179 \pm 0.414)A$.

Introducción

El descubrimiento de los superconductores de alta temperatura de transición, realizado por **J. Georg Bednorz y K. Alexander Müller** en 1986 [24], abrió la puerta para que este fenómeno pueda ser mostrado y estudiado desde etapas tempranas, ya que poco tiempo después de este descubrimiento se logró sintetizar un material $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ cuya temperatura crítica T_c es de $90K$, con lo cual ya no era necesario enfriar al material con helio líquido.

El propósito principal de este trabajo es diseñar, construir y poner en operación un dispositivo capaz de mapear el campo magnético generado por una supercorriente inducida en ese material.

En el Capítulo 1 se hace una breve descripción del fenómeno de la superconductividad.

El Capítulo 2 consta de dos secciones:

- Sección 2.1: Síntesis del material y su conformación como un arillo.
- Sección 2.2: Diseño del dispositivo. Se diseñó un soporte para la muestra superconductora y para los sensores utilizados; también se hizo un arreglo de bobinas de Helmholtz para cancelar la componente del campo magnético terrestre.

El Capítulo 3 consta de lo siguiente;

- a) Para medir la temperatura baja se diseñó un circuito amplificador, acoplado a un diodo comercial de Si (1N4001) de bajo costo. La señal analógica del amplificador se digitaliza en un microprocesador (Arduino) y se alimenta a una PC vía un puerto USB, la cual registra los datos.
- b) Para medir la magnitud del campo magnético con un sensor Hall (3515), también de bajo costo, se siguió el mismo procedimiento recién descrito, con la única diferencia en el circuito amplificador es la inclusión de un restador de voltaje para la señal del sensor.

- c) El diodo se calibró usando dos valores extremos de referencia, el primero en una mezcla de agua con hielo y el segundo en nitrógeno líquido.
- d) El sensor Hall se calibró comparándolo contra un gaussmetro comercial (Bell-5080)

En el Capítulo 4 se describen los experimentos realizados, los resultados obtenidos y su análisis.

Las Conclusiones del trabajo aparecen en el capítulo 5.

Capítulo 1

Superconductividad

1.1. Antecedentes históricos

En los estudios de fenómenos eléctricos, muchos experimentos demostraron la variación de la resistencia eléctrica con la temperatura, con lo cual se llegó a definir el parámetro “coeficiente de temperatura” (una propiedad intensiva de los materiales respecto a los cambios de temperatura), que afectaba la conducción eléctrica¹. La conductividad eléctrica en los metales se define como el flujo de electrones a través del mismo. Normalmente éstos ofrecen una resistencia u oposición al tránsito de electrones disipando parte de su energía en forma de calor; para mantener este flujo se aplica un voltaje y así reemplazar la energía perdida[13, 12, 5].

En los inicios del siglo XX tres teorías explicaron la variación en la resistencia eléctrica de conductores metálicos sometidos a bajas temperaturas; James Dewar afirmó que la resistencia debería disminuir y llegar a cero a la temperatura de $0K$; Kelvin sostuvo que al disminuir la temperatura, los electrones se congelarían, lo que impediría el flujo de tal manera que incrementaría la resistencia. Por último, Mathiessen planteó que la resistencia eléctrica después de una temperatura muy baja se tornaría constante, pero nunca llegaría a ser cero[10, 18].

¹La conductividad es el recíproco a la resistividad de un material

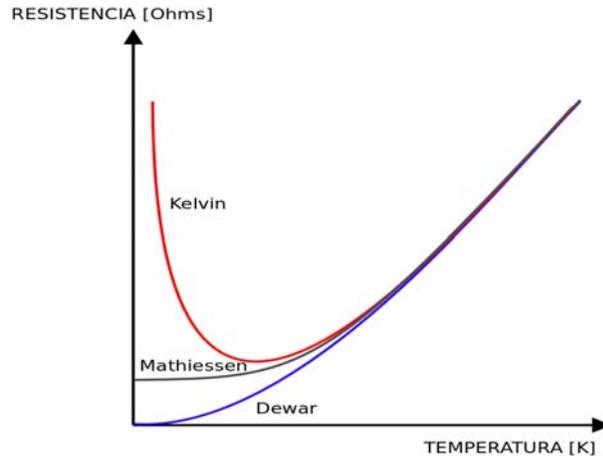


Figura 1.1.1: *Teorías de la resistencia eléctrica en metales respecto a la temperatura a inicios del siglo XX [12].*

Cualitativamente, estas tres teorías cuyo objetivo fué explicar la variación de la resistencia eléctrica a bajas temperaturas se observó experimentalmente en presencia de defectos en los materiales (impurezas). Sin embargo por experimentación se descubrió un fenómeno, posteriormente llamado superconductividad, que no estaba relacionado con ninguna de las tres teorías. Algunos materiales sometidos a temperaturas muy bajas, y que presentan este fenómeno, caen fuera del ámbito de las tres teorías mencionadas y dieron inicio a nuevas formulaciones, hipótesis y experimentos para explicar su comportamiento, que a la postre presentaron nuevas propiedades y características que generaron un gran desarrollo tecnológico en el área.

1.2. El descubrimiento de la superconductividad

El siglo XIX fué el inicio de una carrera criogénica; los científicos de la época comenzaron a licuar gases, lo que llevó a obtener fluidos con temperaturas muy bajas. En esta carrera por la licuefacción de gases, poco a poco la temperatura fué acercándose a valores próximos al cero absoluto. Hacia la mitad del siglo XIX se habían licuado la mayoría de gases conocidos; el único gas que no se había podido licuar era el helio. En 1908, en la universidad de Leyden se logró licuar helio por primera vez, obteniendo una temperatura de 4.22 K . Esta fué la temperatura más cercana al cero absoluto que se alcanzó en esa época. Tal logro fué realizado en los laboratorios de bajas temperaturas bajo la dirección del físico holandés Heike Kamerlingh Onnes, quien mantuvo la hegemonía en experimentos de criogenia hasta 1923 (15 años), al ser el único laboratorio en el mundo en contar con helio líquido y realizar estudios con la temperatura más baja conocida. En 1913 se le otorgó el

premio Nobel de física a Onnes por licuar helio[26, 27].

Fue en 1911 cuando Onnes, al estudiar el comportamiento de la resistividad eléctrica de los metales como función de la temperatura, propuso utilizar mercurio tridestilado (lo que garantizaba una alta pureza) con el objetivo de corroborar el comportamiento lineal de la resistividad respecto a la temperatura y verificar si, extrapolándola, ésta llegaría a anularse al llegar a cero absoluto. Para su sorpresa la resistividad del mercurio se anuló a una temperatura ligeramente mayor que la del helio líquido ($4.2 K$), la cual se denominó temperatura crítica (T_c).

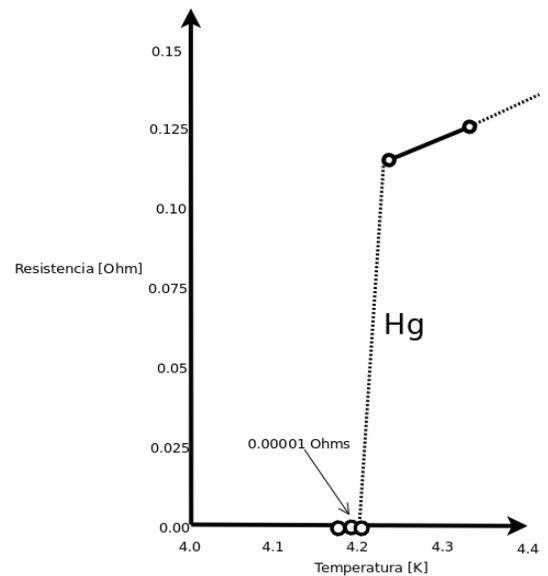
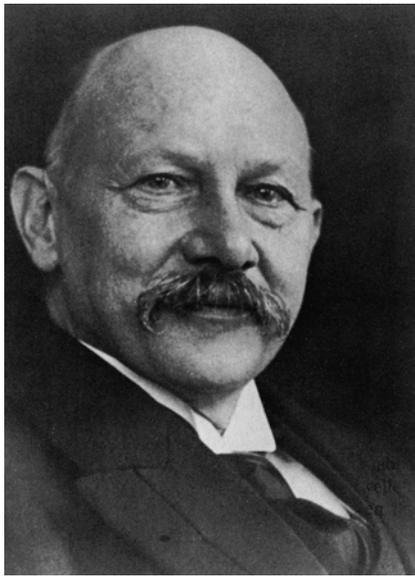


Figura 1.2.1: a) *Kamerlingh Onnes* [11]. b) *Fenómeno que observó Onnes en la transición del mercurio a estado superconductor* [33].

Onnes y su equipo repitieron el experimento hasta estar seguros de este asombroso resultado, y constataron el descubrimiento de un nuevo fenómeno, al cual el propio Onnes nombró posteriormente “superconductividad”. Las expectativas de aplicaciones generadas por este descubrimiento fueron muy grandes, aunque éstas se vieron frustradas, en mayor o menor grado, poco tiempo después.

El fenómeno resultó tan interesante que desencadenó una gran cantidad de investigaciones, entre las cuales se puede citar la búsqueda intensiva de nuevos materiales que presentaran el fenómeno de superconductividad, así como el desarrollo de teorías fenomenológicas (todavía no se desarrollaba la mecánica cuántica) para explicarlo.

El experimento de Onnes muestra un estado en el que la resistencia eléctrica de ciertos materiales desaparece al llegar a muy bajas temperaturas, esta caída de la resistencia se da de manera abrupta

al pasar a una temperatura de transición o crítica.

En el año 1925 el físico Fritz Walter Meissner, alumno de Max Planck, construyó el tercer licuefactor más grande de helio conocido y junto al físico Robert Ochsenfeld comenzaron a hacer estudios a bajas temperaturas en materiales; en 1933 descubrieron que los materiales superconductores tienen la capacidad de expeler un campo magnético al enfriarse por debajo de la temperatura crítica T_c ; este fenómeno fue llamado efecto Meissner^{II}.

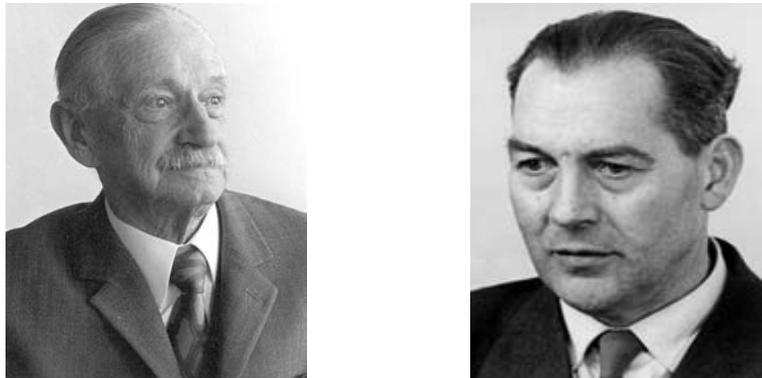


Figura 1.2.2: *Fritz W. Meissner y Robert Ochsenfeld [27].*

En el año 1935 los hermanos Fritz y Heinz London desarrollaron una teoría fenomenológica para tratar de explicar la superconductividad y describir el efecto Meissner; ellos partieron de las ecuaciones de Maxwell, y demostraron que el campo magnético en el interior del superconductor se atenúa con una longitud característica (longitud London). Fritz London sugirió por primera vez que la superconductividad es una manifestación de la mecánica cuántica.

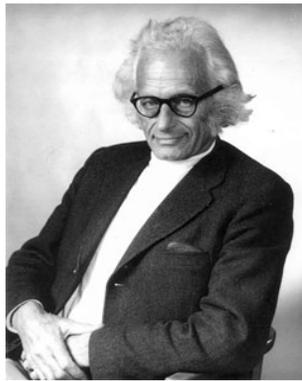


Figura 1.2.3: *Heinz y Fritz London[25].*

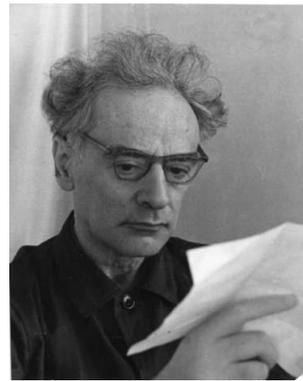
^{II}Este efecto sólo lleva el nombre de Meissner, ambos físicos lo descubrieron, el nombre de Ochsenfeld fué excluido.

La desaparición de la resistividad se da cuando el material se encuentra por debajo de una temperatura crítica (T_c) y de un campo magnético crítico (H_c), esta es la idea fundamental de la superconductividad. Estas dos cantidades invariantes son conocidas como las propiedades termodinámicas de un superconductor. Muchos de los metales al ser llevados a temperaturas muy bajas, entran en estado de superconductividad. En un material en estado superconductor, la corriente puede fluir continuamente sin disiparse, al no existir oposición al flujo de electrones por el material, y no es necesario aplicar un potencial.

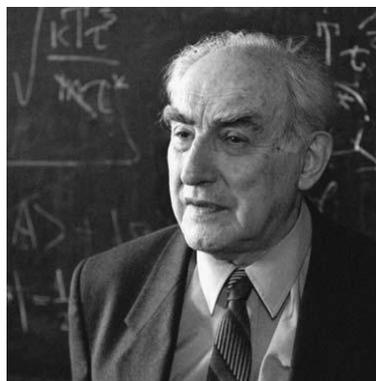
En 1950 Fröhlich descubrió que la temperatura de transición esta relacionada con la masa de los iones del material. También en los años 50 el ruso Alexei Abrikosov, con base en los trabajos de Ginzburg y Landau, esbozó una teoría del comportamiento de los superconductores respecto al campo magnético externo.



(a) **Herbert Fröhlich**



(b) **Lev Landau**



(c) **Vitaly Ginzburg**



(d) **Alexei Abrikosov**

Figura 1.2.4: *Contribuciones en los años 50 a la superconductividad [12].*

Fue hasta 1972 cuando J. Bardeen, L. Cooper y J.R. Schrieffer desarrollaron una teoría de primeros principios llamada teoría **BCS** (por las siglas de los nombres de quienes la idearon), en la que se da una explicación cuántica para la aparición de la superconductividad. La teoría **BCS** parte de la existencia de los pares de Cooper (pareja de electrones con momento y espín opuestos, unidos

por una fuerza atractiva generada por la red de iones positivos). Por este descubrimiento, en 1972 recibieron el premio Nobel de física^{III}.

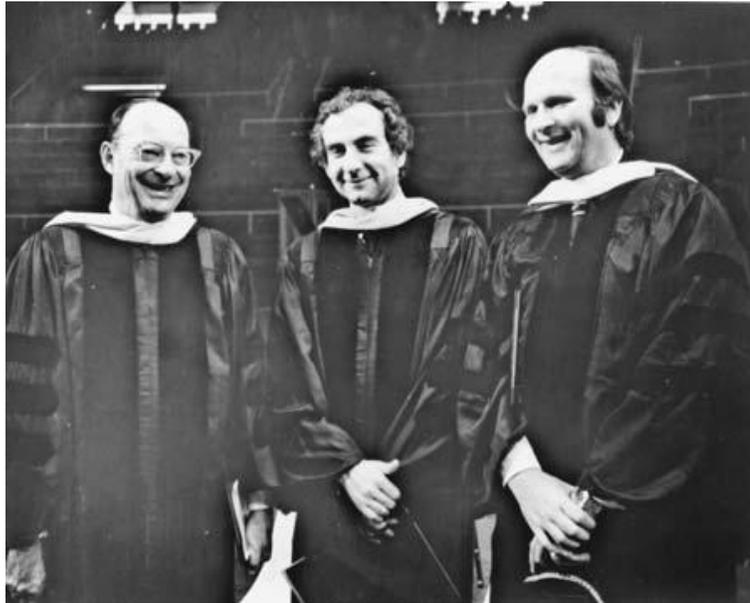


Figura 1.2.5: *En orden de izquierda a derecha (BCS): John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer [12].*

En 1962 científicos de la compañía Westinghouse desarrollaron el primer cable superconductor a base de niobio y titanio. Sin embargo lo más destacado de ese año fué cuando Brian Josephson quien fuera alumno de Pippard en los laboratorios Cavendish, predijo que entre dos superconductores, que incluso pueden estar separados por un aislante, fluye una supercorriente, observando un efecto de tunelaje. Este fenómeno, conocido como efecto Josephson, le atribuyó en 1973 el premio Nobel de física.



Figura 1.2.6: *Brian Josephson [12].*

^{III}John Bardeen, es el único científico que ha recibido dos premios Nobel en la misma disciplina, el primero por el descubrimiento del efecto transistor en 1956 y el segundo por la teoría BCS en 1972.

En 1973 Johnston obtuvo una temperatura crítica de $13.7K$ usando óxido de titanio y litio. En el mismo año Matthias, en una aleación de Nb_3Ge , elevó la temperatura crítica a $23.3K$. Durante los siguientes trece años los físicos concluyeron que no era posible llegar por encima de la T_c de Matthias para superconductores.



Figura 1.2.7: *Bernd Matthias* [12].

Sin embargo, en 1986 Alexander Müller y George Bednorz publicaron el artículo “Possible High T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O System” en el que expusieron una $T_c = 35K$ en un superconductor cerámico, lo que dió inicio al estudio de los superconductores de alta temperatura. Por este hallazgo recibieron en 1987 el premio Nobel de física.



Figura 1.2.8: *J.G. Bednorz y K. A. Müller* [12].

Ese mismo año Maw-Wuen Wu y Paul O. W. Chu descubrieron que el cerámico $Y_1Ba_2Cu_3O$ es superconductor con una $T_c = 93K$. A partir de ese momento se dió inicio a la investigación con cupratos de la familia de perovskitas de cobre y, en el año 2000 se obtuvo el superconductor $Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_8$ con una $T_c = 138K$. El 3 de septiembre de 2015 A.P. Drozdov, M. I. Erements, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, S. I. Shylin. investigadores del instituto de química Max-Planck en conjunto con la universidad de Mainz publicaron el artículo: “Conventional superconductivity

at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system” que hasta ahora es la temperatura crítica más alta registrada en un superconductor [6].

1.3. Efecto Meissner-Ochsenfeld

El efecto Meissner-Ochsenfeld fue descubierto experimentalmente cuando se aplicó un campo magnético externo (\vec{H}) a materiales en estado superconductor^{IV}. El descubrimiento llevó a observar que cuando un material está en estado superconductor ($T < T_c$) y se aplica el campo magnético externo \vec{H} , éste es expulsado por el superconductor. Se esperaba que el campo externo quedara atrapado como si se tratase de un conductor perfecto^V; se determinó que los materiales en estado de superconducción expulsan y rechazan el campo magnético de su interior con un comportamiento diamagnético perfecto, cancelando todo flujo de campo en su interior ($\vec{B} = 0$); a este descubrimiento se le llamó *efecto Meissner* [32, 51, 50]. La figura 1.3.1 distingue a un conductor de un superconductor.

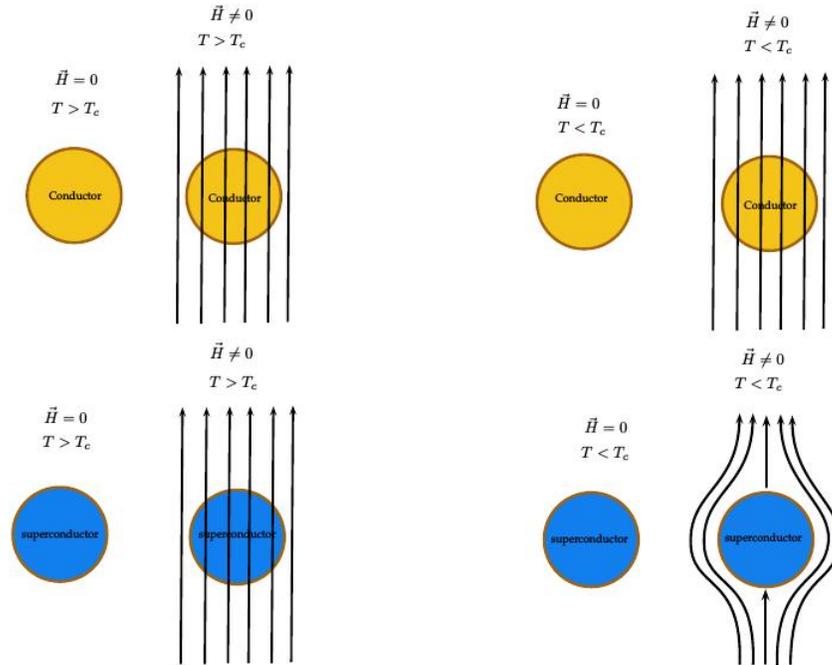


Figura 1.3.1: Comparación de un conductor y un superconductor respecto a un campo magnético externo [18].

- Se observa un conductor sin aplicarle campo magnético externo. Seguidamente se aplica un campo magnético externo (\vec{H}) y el campo aplicado atraviesa al conductor.

^{IV}El campo aplicado fue menor al campo crítico \vec{H}_c , que puede soportar un material en estado superconductor.

^VSe considera a un conductor perfecto cuando al enfriarlo su resistencia eléctrica disminuye y llega a anularse.

- La temperatura del conductor se disminuye y se aplica un campo magnético externo (\vec{H}), éste atraviesa al conductor sin importar qué tan baja sea su temperatura.

Las imágenes inferiores de la figura (azul) representan a un superconductor que se coloca en las condiciones antes descritas:

- El superconductor tiene una temperatura por encima del valor de la temperatura crítica ($T > T_c$) y no entra en fase de superconducción; se le aplica un campo magnético externo (\vec{H}) y se observa que el campo lo atraviesa completamente.
- El material superconductor se somete a un descenso de temperatura, por debajo de la temperatura crítica ($T < T_c$), al estar por debajo de T_c el material entra al estado de superconducción (resistencia eléctrica cero). Se aplica un campo magnético externo (\vec{H}), el campo no puede atravesar al superconductor y es rechazado por el material, a este fenómeno se le llama efecto Meissner.

El estado superconductor se da cuando al enfriar el material por debajo de su T_c , la resistencia eléctrica es nula y presenta efecto Meissner.

El estado superconductor esta delimitado por una superficie de tres variables: temperatura T_c , densidad de corriente \vec{J}_c y el campo magnético \vec{H}_c [50, 21].

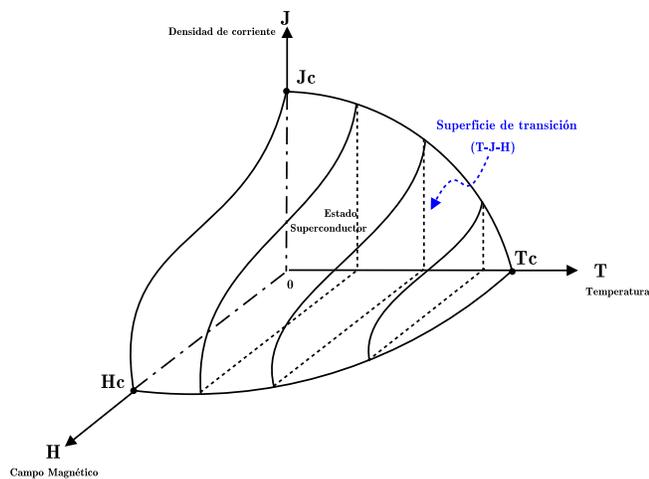


Figura 1.3.2: *El estado superconductor en un material esta limitado por el espacio generado de las variables (T, H, J) [44].*

Temperatura crítica: Se denomina temperatura crítica o de transición cuando al descender la temperatura del material se alcanza un valor T_c , en este punto, el material entra en estado superconductor. La superconductividad está limitada por el valor máximo T_c (cada material superconductor

tiene un T_c característico)[44, 40].

Campo magnético crítico: El campo crítico es una variable importante para un superconductor, si un material esta en estado superconductor ($T < T_c$) y aplicamos un campo magnético externo \vec{H} , el material permanecerá en estado superconductor siempre que el campo magnético aplicado sea menor a un valor límite que el material pueda soportar ($\vec{H} < \vec{H}_c$); a este valor se le denota como \vec{H}_c (el campo crítico varía de acuerdo al material). Si el campo aplicado es mayor al valor de campo crítico ($\vec{H} > \vec{H}_c$) el estado superconductor desaparece [44, 40, 26].

Corriente crítica: Es el máximo valor de corriente suministrado que puede soportar un material en estado superconductor ($T < T_c$) sin perder este estado. La corriente crítica se denota por \vec{J}_c . Si en un material en estado superconductor se transporta corriente y ésta es menor a la corriente crítica ($\vec{J} < \vec{J}_c$) el material mantiene su estado de superconductividad; si la corriente es mayor a la corriente crítica ($\vec{J} > \vec{J}_c$) el estado superconductor desaparece [44, 40].

De una manera resumida, un material superconductor es aquél que, en determinadas condiciones, reúne las siguientes características:

- Resistencia nula
- Efecto Meissner-Ochsenfeld



Figura 1.3.3: Levitación de un imán de neodimio debido al efecto meissner-Oschenfeld del arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

1.4. Clasificación de superconductores

Una de las primeras observaciones en el comportamiento de los superconductores fué que al aumentar la corriente (persistente) generada en ellos (supercorriente) el fenómeno desaparecía abruptamente. Rápidamente se determinó que la ruptura de la superconductividad se debía a la penetración del campo magnético generado por la supercorriente en el material, denominado campo magnético crítico (\vec{H}_c). Usando este parámetro se clasifican a los superconductores, como superconductores tipo I y superconductores tipo II.

Superconductores tipo I: En 1956 Lewis descubrió los denominados superconductores tipo I. Es decir, para un conjunto de sustancias-metales con bajo punto de fusión y con otras propiedades eléctricas semejantes existe una relación común que vincula el campo crítico a la temperatura crítica. Los superconductores tipo I están compuestos principalmente por metales puros: Mercurio, Estaño, Titanio, Zinc, Galio, Cadmio, Indio. Los superconductores de tipo I presentan temperaturas críticas en un intervalo de $0.01K$ a $10K$ y expelen por completo el campo magnético externo presentando efecto Meissner-Ochsenfeld. La figura 1.4.1 muestra el diagrama de fase para un superconductor tipo I; Si el material se encuentra en la región limitada por la T_c y \vec{H}_c , su resistencia es nula y presenta efecto Meissner (el campo interno del material es $\vec{B} = 0$); Si el campo magnético externo rebasa el valor de campo magnético crítico \vec{H}_c , el material pierde estado superconductor instantáneamente [40, 44, 17, 21, 50, 51].

Superconductores tipo II: Estos materiales superconductores son en su mayoría aleaciones y alcanzan valores de temperatura crítica, campo magnético crítico y corriente crítica (T_c , \vec{H}_c y \vec{J}_c) mayores a los superconductores del tipo I, por un mecanismo que todavía no se entiende completamente. Un superconductor de tipo II tiene dos valores de campo magnético crítico (\vec{H}_{c1} , \vec{H}_{c2}) asociados, para los cuales el material está:

- En estado superconductor.
- En estado superconductor-normal (mixto).
- En estado normal (sin superconductividad).

Cuando los superconductores tipo II se encuentran en estado de superconducción por debajo de \vec{H}_{c1} , al aplicarle un campo magnético externo se comportan como superconductores de tipo I (diamagnético perfecto).

Si el campo magnético externo aplicado es mayor a \vec{H}_{c1} y no supera \vec{H}_{c2} el material entra al estado mixto donde tendrá regiones que presenten superconductividad y otras en estado normal; también se le conoce como fase de vorticidad. Si el campo externo aplicado supera \vec{H}_{c2} el estado superconductor desaparece [40, 44, 17, 21, 50, 51].

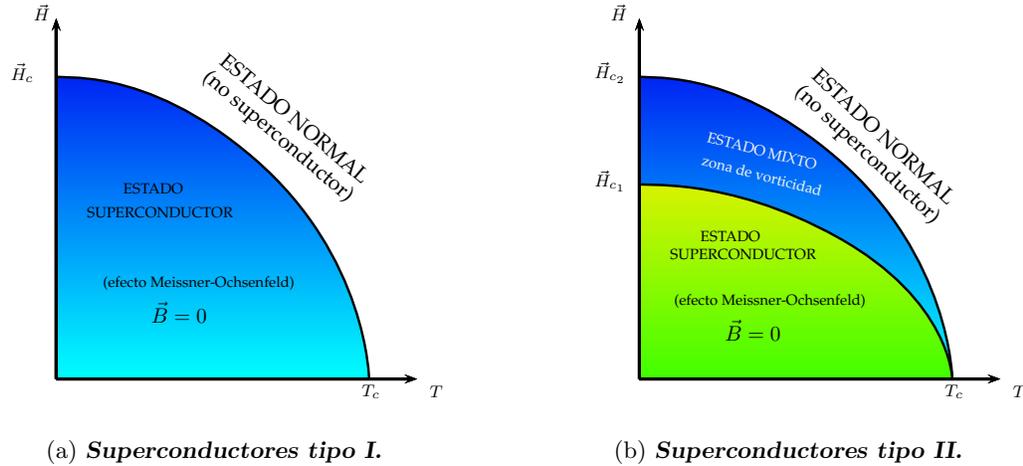


Figura 1.4.1: *Diagrama de fases [45].*

Los vórtices se forman cuando el campo magnético externo penetra y atraviesa al superconductor. Las regiones de comportamiento normal inducen vórtices que son rodeados por corrientes superconductoras de apantallamiento que separan los vórtices del resto del material superconductor. En el estado mixto el campo magnético que penetra tiene las dos siguientes propiedades importantes:

- La primera, la penetración del flujo está cuantizada; este hecho demuestra que la superconductividad es un efecto cuántico, el flujo forma tubos llamados vórtices.
- La segunda, los tubos forman una red triangular denominada “Red de Abrikosov” de tal manera que su distribución minimiza la energía de toda la red.

Los superconductores de tipo II evidencian efectos de anclaje en los vórtices de corriente denominados “pinning centers”, los defectos de la red cristalina atrapan el flujo debido a un pozo de potencial [11, 7, 12].

El material superconductor elegido para la realización de este trabajo es un superconductor de tipo II, un cerámico cuya estructura a base de óxido de itrio, bario y cobre ($Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$). En el siguiente capítulo se describe con detalle la síntesis de este compuesto.

Capítulo 2

Diseño experimental

En este capítulo se describe la síntesis del compuesto superconductor que se obtuvo usando un proceso de reacción en estado sólido (muestra experimental), así como su conformación geométrica. Además se diseñaron y construyeron dos dispositivos experimentales, el primero para anular la componente de campo magnético terrestre y el segundo un sistema de posicionamiento para mover el sensor y medir el campo magnético generado por el superconductor.

2.1. Síntesis de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

El compuesto $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ descubierto en 1987 por Maw-Kuen Wu, de la universidad de Alabama y Paul Chu de la universidad de Houston muestra tener superconductividad a una temperatura menor a $T_c = 92K$. Es un compuesto cerámico, con estructura perovskita de la familia de los cupratos donde el contenido de oxígeno es importante para la superconductividad en el sistema [30][1].

Debido a que su temperatura crítica es $92K$, este material se llevó a su estado superconductor al enfriarlo con nitrógeno líquido que esta a una temperatura de $77K$ al ser un superconductor de alta temperatura.

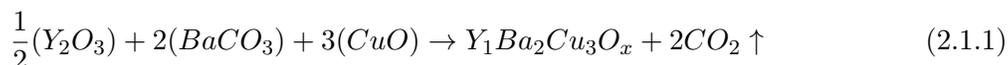
A continuación se describe la síntesis del compuesto experimental y la formación de un arillo con el material.

2.1.1. Estequiometría.

La síntesis del compuesto superconductor $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, se obtuvo por una reacción de estado sólido, usando los siguientes reactivos:

1. Carbonato de Bario ($BaCO_3$) al 99.2% de pureza.
2. Óxido de Itrio (III) (Y_2O_3) al 99.99% de pureza.
3. Óxido Cúprico (CuO) al 99.0% de pureza.

La ecuación de balance para la reacción es:



En la ecuación 2.1.1 el valor de x depende de la valencia con la que actúa el cobre. Sin embargo, la valencia más frecuente en los compuestos de cobre es +2, lo cual implica que $x=6.5$. A reserva de mencionar posteriormente un comportamiento peculiar de este compuesto, se usa ese valor de x para el cálculo de las proporciones correspondientes de los reactivos. El compuesto resultante se denota como $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ con $\delta = 0.5$.

En la tabla 2.1.1 se presentan las proporciones molares necesarias para sintetizar 1 mol del compuesto.

| Elemento | Compuesto | Peso | gramos-mol |
|---|-----------|------------------------------------|------------|
| Y_1 | Y_2O_3 | $\frac{1}{2} [2(88.905) + 3(16)]$ | 112.905 |
| Ba_2 | $BaCO_3$ | $2 [(137.327) + (12.011) + 3(16)]$ | 394.676 |
| Cu_3 | CuO | $3 [(63.541) + (16)]$ | 238.623 |
| Suma de los gramos mol del compuesto $Y_1Ba_2Cu_3O_{6.5}$ | | | 746.204 |

Tabla 2.1.1: *Peso de los compuestos*

Se elaborará una muestra de 12 gramos, por lo que se requieren las siguientes cantidades de reactivos:

$$Y_2O_3 = \frac{112.905}{746.204}(12g)$$

$$BaCO_3 = \frac{394.676}{746.204}(12g)$$

$$CuO = \frac{238.623}{746.204}(12g)$$

| | |
|----------|----------|
| Y_2O_3 | 1.8156 g |
| $BaCO_3$ | 6.3469 g |
| CuO | 3.8373 g |

Tabla 2.1.2: *Valores teóricos para preparar 12 gramos de muestra.*

2.1.2. Síntesis.

Posterior al cálculo estequiométrico y la determinación de la cantidad de muestra a preparar, se procede a la síntesis del material, una parte relevante del proceso es la precisión en el peso de cada compuesto para cumplir con la estequiometría deseada. Los reactivos tienen la característica de ser hidrofílicos, lo que significa que su masa está aumentada por la humedad que absorben del medio ambiente. Para tener exactitud en la masa de cada reactivo, éstos se desecaron en una mufla a $150^{\circ}C$ durante dos horas con el propósito de deshidratarlos.



Figura 2.1.1: *Desecado de los compuestos antes de pesarlos.*

Una vez que los reactivos fueron desecados, se pesaron en una balanza analítica; las masas que se obtuvieron se presentan en la tabla 2.1.3:

| | |
|----------|----------------------|
| Y_2O_3 | $(1.816 \pm 0.005)g$ |
| $BaCO_3$ | $(6.347 \pm 0.005)g$ |
| CuO | $(3.837 \pm 0.005)g$ |

Tabla 2.1.3: *Peso experimental de los compuestos*

Los reactivos se mezclaron y molieron homogéneamente en un mortero de ágata hasta formar un polvo muy fino color gris claro; la mezcla fue vertida en un crisol de alúmina y horneada durante dos horas a una temperatura de 750°C ; esta primera calcinación se hizo para volatilizar los carbonatos en la mezcla.

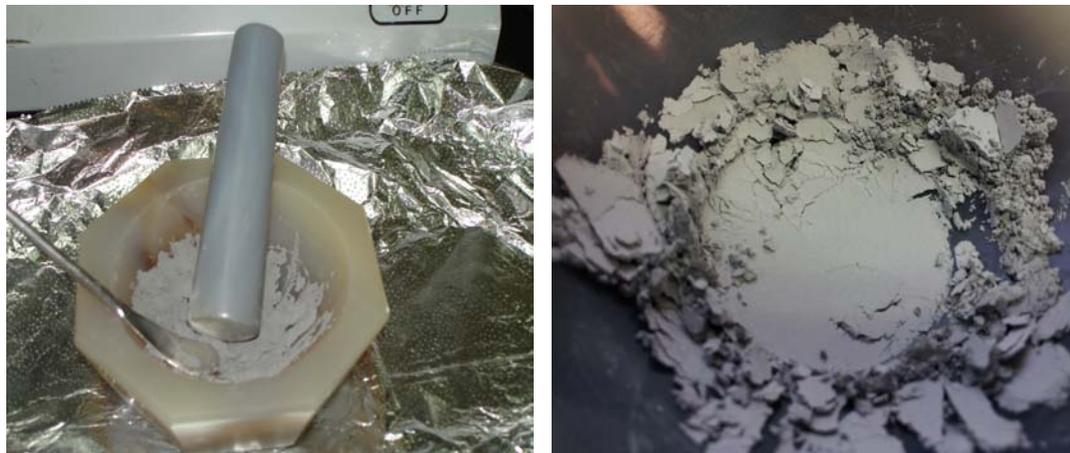


Figura 2.1.2: *Molienda y mezcla en mortero de ágata, polvo fino y tamizado.*

Transcurrido el tiempo de la primera calcinación, la muestra se retiró del horno, se observó que la coloración en la mezcla cambió, tornándose más oscura. Nuevamente se molió y mezcló el producto utilizando un mortero de ágata hasta conseguir la textura de talco muy fino. El compuesto molido se introdujo una vez más al horno a una temperatura de 800°C por un periodo de cinco horas. Después del tiempo de horneado, se retiró la muestra y se repitieron los procesos de molido y mezclado, para volver a ser calcinada a 850°C durante seis horas.

El color del compuesto cambió a gris oscuro (casi negro), con un cambio de textura, presentando mayor dureza respecto a las calcinaciones anteriores de tal forma que, al molerlo, fué necesario golpear ligeramente al compuesto para fracturarlo e ir reduciéndolo a un talco fino. Todas estas calcinaciones se hicieron al aire, es decir sin flujo de gases particulares.

El comportamiento peculiar del compuesto superconductor $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, presenta una tendencia a absorber oxígeno del medio ambiente, con lo cual el compuesto deja de ser estequiométrico. Mejor aún, si el contenido de oxígeno aumenta, la estequiometría obliga a un cambio en la valencia de algunos átomos de cobre, lo que provoca que δ disminuya su valor. Cuando esto sucede, se presentan las características superconductoras del compuesto y éstas aumentan conforme $\delta \rightarrow 0$.



(a) *Primera calcinación.*



(b) *Segunda calcinación.*



(c) *Tercera calcinación.*



(d) *Cuarta calcinación.*

Figura 2.1.3: *Distinta coloración en las diferentes calcinaciones efectuadas.*

Por último, la formación del compuesto superconductor se realizó mediante un horneado final a 920°C por doce horas, en una atmósfera controlada rica en oxígeno (con flujo constante de este gas), con la finalidad de incrementar este elemento en la estructura superconductora. El tratamiento térmico se realizó en un horno tubular programable modelo GSL-1500X, que puede operar con flujo de gases particulares [22].

Se programó el horno GSL-1500X con la siguiente secuencia:

1. Iniciar un calentamiento gradual desde temperatura ambiente hasta 900°C , en cuatro horas, con un incremento de temperatura de $3.7 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$.
2. Mantener la temperatura constante durante doce horas a 900°C (a esta temperatura se da la formación de la estructura del $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$).
3. Después de permanecer doce horas a 900°C , se hizo descender la temperatura a 450°C en un lapso de cuatro horas.

4. Se mantuvo la temperatura a 450°C por doce horas más (periodo de oxigenación de la muestra).
5. Transcurrida la fase de oxigenación, el horno se apagó automáticamente hasta llegar a temperatura ambiente.

Si no se cuenta con un horno de atmósfera controlada, el proceso puede realizarse en una mufla convencional siguiendo la misma secuencia descrita pero, para oxigenar el $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, se debe retirar del horno la muestra que está a 450°C e inmediatamente enfriarla a 4°C para atrapar la mayor cantidad de oxígeno dentro de la estructura.

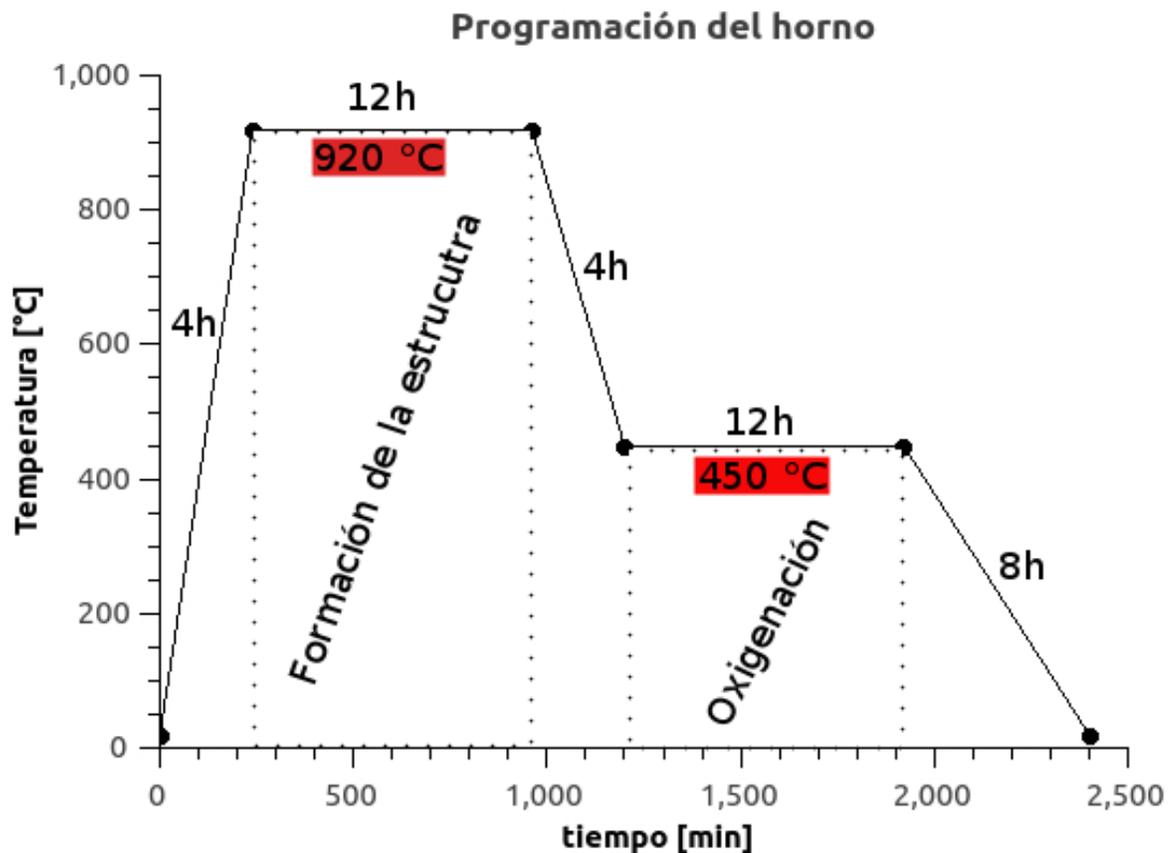


Figura 2.1.4: *Secuencia de horneado para horno GSL-1500X.*

Al retirar la muestra del horno GSL-1500X, se observó que su color es oscuro, el material se tornó negro con una consistencia rígida y al iluminarla se observaron brillos en la superficie (pequeños cristales).

A continuación se molió la muestra por última vez con dos propósitos; el primero, aplicar la técnica

de difracción de rayos X en polvos y el segundo, conformar una estructura geométrica adecuada para la experimentación (arillo).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.1.5: a) Horno *GSL-1500X*. b) Tanque oxígeno conectado al horno para obtener atmósfera controlada. c) Muestra de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ posterior al horneado, el superconductor se horneó al interior de una navecilla alúmina para combustión.

Para realizar el análisis de difracción de rayos X se separó una porción de polvo (compuesto superconductor) que se depositó en un porta muestras de vidrio. Esta técnica de rayos X se usa para la caracterización de estructuras cristalinas y no es destructiva. El análisis de difracción en la muestra se realizó usando una corrida larga de 2θ , la cual se cotejó con una base de datos que permitió determinar haber llegado a la fase del $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. La figura 2.1.6 muestra el espectro obtenido así como el ajuste a la base de datos. La comparación del espectro de la muestra se ajusta a una estructura superconductora de $Y_1Ba_2Cu_3O_{6,8}$, con $\delta = 0.2$.

La difracción de rayos X se hizo usando un difractómetro con monocromador de níquel y fuente de cobalto (SIEMENS D-5000); el muestreo se realizó de 6 a 120 grados a temperatura ambiente, con un paso de $0.02 \frac{\text{grados}}{\text{segundo}}$ y para identificar la fase se usó el programa “Macht” con la base ICSS.

Del capítulo anterior, se sabe que un superconductor al ser enfriado y estar por debajo de su T_c entra a estado de superconducción ($R = 0$) y presenta efecto Meissner, que es otra forma experimental de probar superconductividad. El arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ fué enfriado por debajo de su T_c usando nitrógeno líquido y presentó efecto Meissner.

Mediante la aplicación de estas dos pruebas (difracción de rayos X y efecto Meissner) se garantizó el haber obtenido un superconductor de la familia del $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

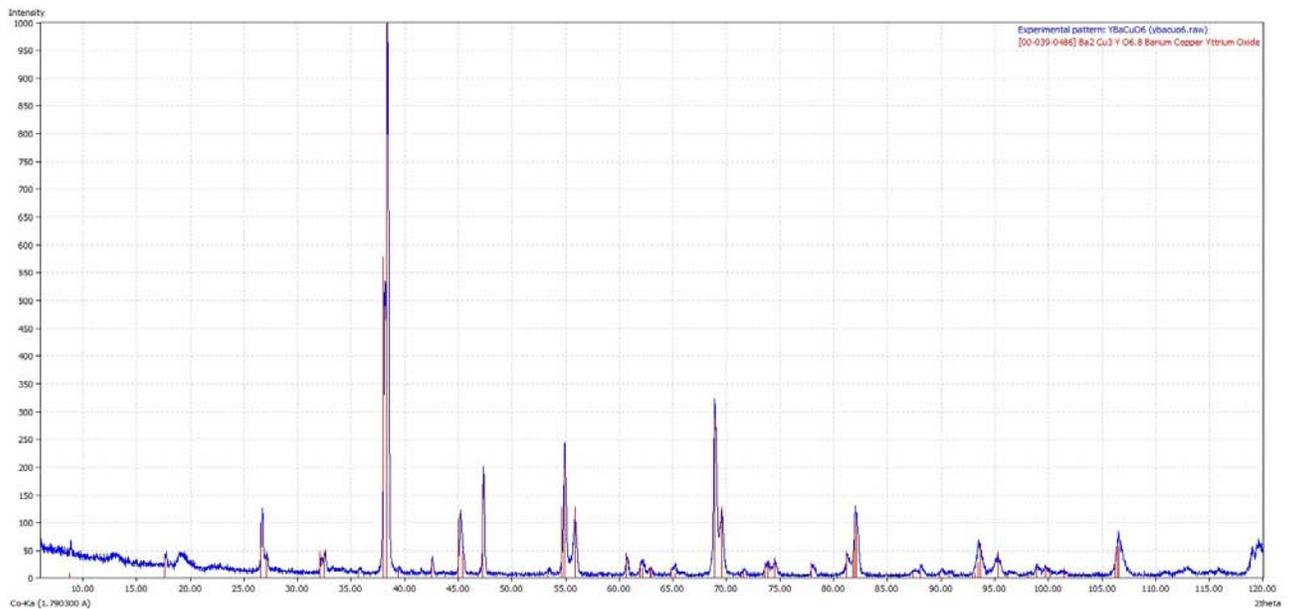


Figura 2.1.6: *Difracción de Rayos-X, corrida larga.*

2.1.3. Conformación de un arillo superconductor.

Para realizar las medidas de campo magnético inducido en la muestra superconductor, el polvo descrito en la sección anterior fué sometido a un prensado en moldes de acero inoxidable, los que se combinaron para formar un cilindro hueco (arillo) con la muestra de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Es importante mencionar que los moldes se diseñaron para la obtención de discos u obleas. Hubo la necesidad de combinar varios moldes hasta lograr el arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Se eligió la geometría de arillo por ser muy aproximada a un toroide.

Posteriormente los moldes de acero inoxidable se pulieron a espejo con un abrasivo para metales y

un paño de algodón, para evitar que el polvo superconductor se adhiriera a las superficies de los moldes.



Figura 2.1.7: *Moldes utilizados para conformar el arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. a) vista frontal. b) vista superior.*

En la tabla 2.1.4 se muestran las dimensiones de los moldes utilizados.

| | <i>Diámetro interior</i> | <i>Diámetro exterior</i> | <i>Altura</i> |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <i>Molde 1</i> | $(3.41122 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ | $(5.69976 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ | $(3.00736 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ |
| <i>Molde 2</i> | $(1.53416 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ | $(3.40614 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ | $(1.43764 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ |
| <i>Molde 3</i> | | $(3.40360 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ | $(1.42748 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ |
| <i>Molde 4</i> | | $(1.50368 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ | $(1.46304 \pm 1.27 \times 10^{-6})cm$ |

Tabla 2.1.4: *Dimensiones de los moldes utilizados para conformar el arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.*

El molde 1 de mayor tamaño (cilindro hueco), tiene una cavidad donde puede insertarse el molde 3 (cilindro) con mucha exactitud. Se introdujo el molde 3 en el molde 1, de tal manera que formó una base plana en su interior para contener el polvo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. El molde 4 (cilindro pequeño) se centró en el espacio interior generado por los moldes 1 y 3, lo que creó el orificio del arillo. El polvo superconductor se vertió en el espacio formado por los moldes 1 y 3 con una cucharilla, como se observa en la figura 2.1.8. Por último se cubrió el polvo con el molde 2 (cilindro hueco) insertándolo en los moldes 1 y 4. Todo este arreglo se sometió a un prensado de diez toneladas durante cuatro horas en una prensa hidráulica.



Figura 2.1.8: a) *Implementos para formar el arillo.* b) y c) *Arreglo de moldes.* d) *Polvo superconductor vaciado en el interior de los moldes.*

Cuando se extrajo el arillo después del prensado, se observó que éste se encontraba fracturado. Se repitió el mismo proceso de conformación del arillo en varias ocasiones, y en todas ellas el arillo presentó fracturas. La causa de este fenómeno fue la rotación o movimiento del molde 4 al instante de extraer el arillo. La solución fue retirar los moldes 2 y 4 simultáneamente ortogonal a la muestra.

Una vez que el arillo se extrajo sin fracturas, un segundo problema se presentó, la muestra se desmoronaba. Esto se resolvió agregando unas gotas de acetona al polvo antes del prensado. Así se formó un lodo que al ser prensado tuvo mayor cohesión.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.1.9: a) Lodo formado al agregar acetona a la muestra. b) Arreglo experimental antes del prensado. c) y d) Prensado de muestra.

Posterior a la extracción del arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ se horneó la muestra a $900^\circ C$ durante doce horas para conferirle dureza; transcurrido este lapso, se descendió la temperatura a $450^\circ C$ y se mantuvo así por doce horas más. En la última etapa de horneado se oxigenó por última vez la muestra en una atmósfera controlada (flujo de oxígeno).

Al retirar el arillo del horno, inmediatamente se sometió a un choque térmico al introducirlo en una mezcla de agua con hielos y enfriarlo súbitamente a $0^\circ C$ con la finalidad de atrapar la mayor cantidad de oxígeno en la estructura.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.1.10: a) *Extracción de moldes 2 y 4 simultáneamente.* b) *Arillo superconductor conformado listo para su horneado.* c) *Horneado del arillo.*

Al arillo conformado, se le hicieron mediciones para determinar sus dimensiones, las que se presentan a continuación en la tabla 2.1.5.

| Masa | Diámetro interior | Diámetro exterior | Altura |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $(9.742 \pm 5 \times 10^{-3})g$ | $(1.3448 \pm 1.27 \times 10^{-4})cm$ | $(3.2528 \pm 1.27 \times 10^{-4})cm$ | $(0.3108 \pm 1.27 \times 10^{-4})cm$ |

Tabla 2.1.5: *Dimensiones del arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.*

El arillo superconductor presentó una disminución de masa respecto a la masa inicial que era de doce gramos; esto fue debido a la pérdida de polvo en cada proceso de molienda y de vaciado al interior de los moldes.



Figura 2.1.11: *Levitación de un imán de Neodimio. a) Efecto Meissner en el arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, en un baño de nitrógeno líquido y arena. b) Efecto Meissner en el centro del arillo.*

Por último se realizó la prueba de efecto Meissner al arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. La muestra se sumergió en un baño de nitrógeno líquido con $T = 77K$ (la temperatura del nitrógeno líquido es menor a la temperatura crítica del compuesto $T_c \sim 95K$).

La levitación de un imán de neodimio colocado sobre el arillo $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ en las condiciones descritas (efecto Meissner) corroboró la obtención de un superconductor de la familia del $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ con $\delta < 0.5$, en concordancia con los resultados de la difracción de rayos X.

2.2. Diseño del dispositivo

Se diseñó y construyó un dispositivo posicionador de bajo costo con materiales de uso cotidiano, un sistema para anular la componente total del campo magnético terrestre en el laboratorio y un sistema para obtener los valores del campo magnético del superconductor; Para el procesado de datos se utilizó software y hardware libre^I.

Se construyó lo siguiente:

- Bobinas de Helmholtz: Se utilizaron para anular la componente horizontal del campo magnético terrestre.
- Sistema de posicionamiento: Consta de dos grados de libertad de movimiento, se construyó

^IEl sistema de colecta de datos se explicará en el capítulo 3.

para montar y mover los sensores Hall.

- Recipiente portamuestras: se construyó para colocar el arillo superconductor en un baño de nitrógeno líquido; este aparato rota sobre su eje, lo que agrega un grado más de libertad al sistema de posicionamiento.

El aparato de medición descansa sobre una placa de aluminio (figura 2.2.1). La placa se rectificó en una fresadora y a la postre se maquinaron dos surcos paralelos de igual profundidad que sirvieron para fijar las bobinas de Helmholtz a la placa mediante dos abrazaderas de nylon. Se barrenaron orificios en la placa de aluminio con el objetivo de fijar el aparato posicionador con tornillos.



Figura 2.2.1: *Aparato posicionador sobre la placa de aluminio con bobinas de Helmholtz.*

2.2.1. Bobinas de Helmholtz.

Para evitar que la componente horizontal del campo magnético terrestre alterara la magnitud del campo magnético generado por la supercorriente (que es pequeño), se diseñó un arreglo de bobinas de Helmholtz que generaron un campo magnético en sentido opuesto al campo magnético terrestre para así anularlo.

El campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz en su centro geométrico se calcula con la ecuación 2.2.1.

$$B_H = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 N i}{R} \quad (2.2.1)$$

Las bobinas fueron diseñadas y construidas usando los siguientes elementos:

- Dos rines de aluminio para bicicleta.
- Alambre magneto (calibre 16).
- Cuatro bornes de conector banana (rojo, negro).
- Dos piezas de nylomaq.

En la construcción de las bobinas se usó la ecuación 2.2.1 que describe al campo magnético generado debido a la corriente i que circula en un número N de espiras en las bobinas. Con este arreglo se generó un campo de igual magnitud pero en sentido contrario al terrestre ($B_H = B_{tierra}$). El campo magnético generado se controla usando una fuente variable de corriente directa. Se fijó la corriente eléctrica en $i = 0.3 A$, se despejó N de la ecuación 2.2.1.

$$N = \left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{B_H R}{\mu_0 i} \quad (2.2.2)$$

El valor de campo magnético terrestre B_{tierra} para la ciudad de México se tomó de los reportes del observatorio geomagnético de Teoloyucan^{II}. En la figura 2.2.2 se observa la carta magnética del territorio nacional, las isolíneas de intensidad magnética en color azul cruzan la república mexicana; se observa que la ciudad de México se localiza entre las isolíneas de valor $42000nT$ y $40000nT$.

^{II}<http://geomaglinux.geofisica.unam.mx/COEonline.html>

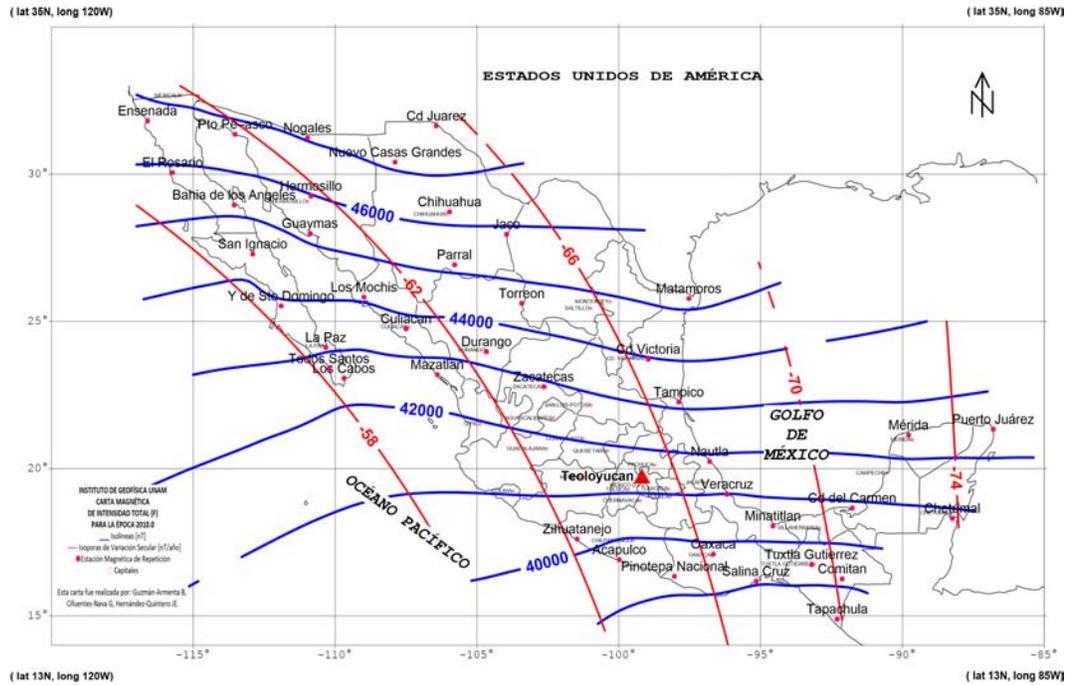


Figura 2.2.2: Carta magnética de la república mexicana.

Al sustituir la magnitud del campo magnético terrestre en la ecuación 2.2.2, se obtuvo el número de vueltas de alambre magneto para cada bobina. La aproximación del número de espiras para cada bobina se calculó con base en los datos observados del campo magnético terrestre por el observatorio geomagnético de Teoloyucan. En la figura 2.2.3 se observa que la magnitud del campo magnético terrestre en la ciudad de México oscila en un intervalo de 40600 nT a 40680 nT .^{III}

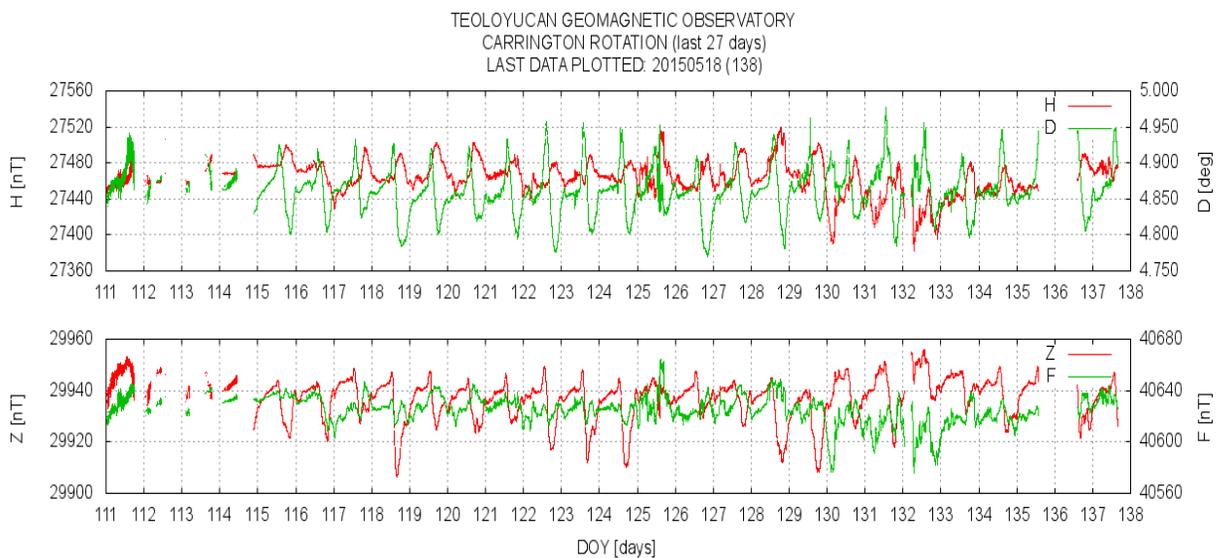


Figura 2.2.3: Mapeo de 27 días del campo magnético terrestre cercano a la ciudad de México.

^{III}Se observa la variación del campo magnético terrestre durante el día y a lo largo de 27 días

Se tomó el promedio de las mediciones de campo magnético terrestre $B_{tierra} = 40640 \text{ nT}$ en la ciudad de México, al sustituir el valor en la ecuación 2.2.2, se obtiene:

$$N = \left(\frac{5}{4}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{(40.64 \times 10^{-6} T)(0.1535 m)}{(4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2})(0.3 A)} \quad (2.2.3)$$

$$N = 23 \text{ vueltas} \quad (2.2.4)$$

posteriormente se contruyó cada bobina con veintitrés vueltas de alambre magneto calibre 16, se fijó la fuente de corriente a $i = 0.3 \text{ A}$. Con estos valores se generó un campo magnético \vec{B}_H de igual magnitud al campo magnético terrestre \vec{B}_{tierra} .

$$\|\vec{B}_H\| = \|\vec{B}_{tierra}\| \quad (2.2.5)$$

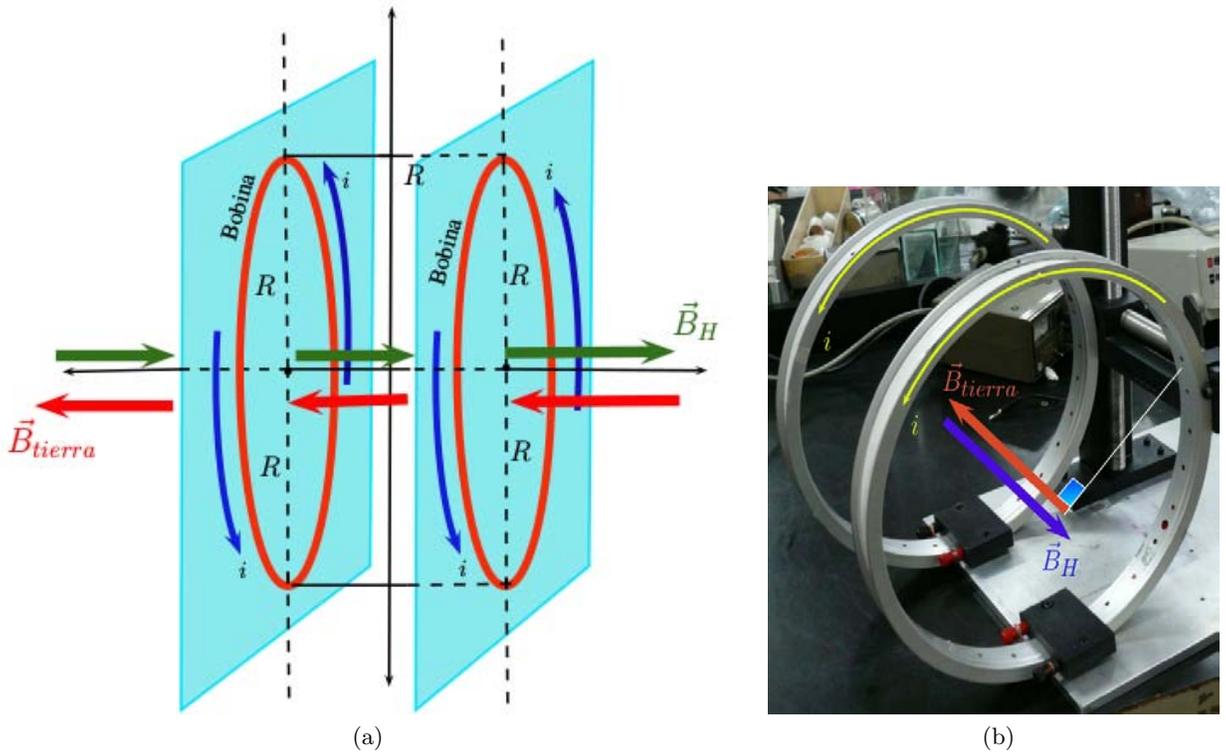


Figura 2.2.4: a) Esquema para las bobinas de Helmholtz. b) Bobinas de Helmholtz armadas con rines de bicicleta.

Se fijaron las bobinas de Helmholtz a la placa de aluminio, es importante localizar el centro geométrico de cada bobina y por estos puntos hacer pasar una línea recta de longitud igual al radio (R)

de cada bobina. Se fijó el sensor Hall a una distancia a la mitad del radio de las bobinas ($\frac{R}{2}$) sobre la línea que cruza el punto medio del arreglo. Para encontrar el centro en cada bobina se usó una construcción con regla y compás, tomando dos cuerdas de círculo (bobina) y proyectándolas para encontrar el centro del círculo con dos rectas perpendiculares que se intersectan en un sólo punto.

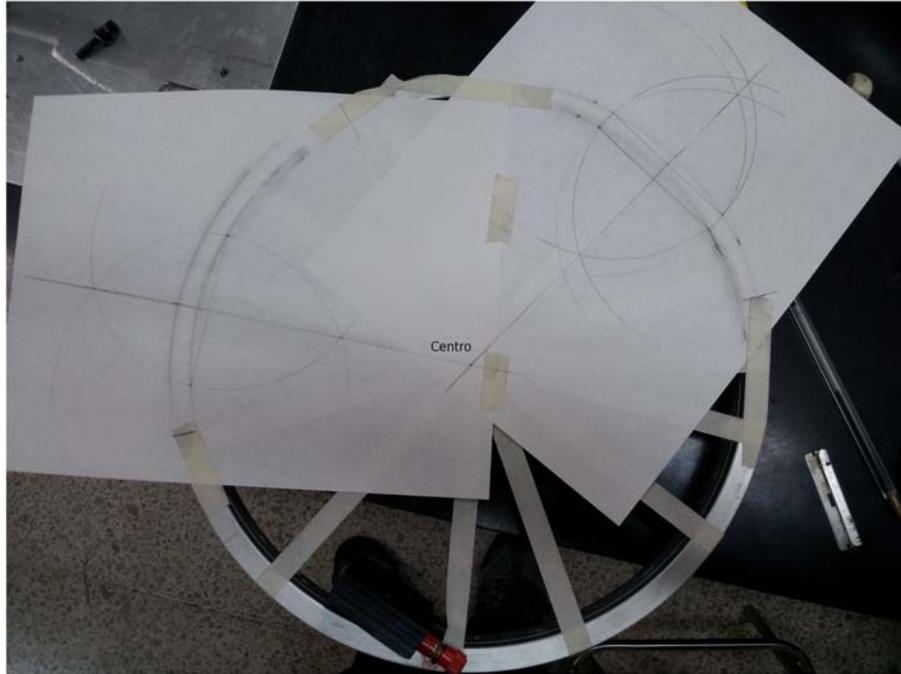


Figura 2.2.5: *Ubicación del centro geométrico de cada bobina, aplicando geometría plana.*

Enseguida se pegaron tiras de cinta adhesiva en las bobinas como diagonales, en el cruce éstas se localizó el punto de intersección de las perpendiculares. En este punto se horadó un pequeño agujero (centro geométrico de cada bobina).

Una vez montadas las bobinas en la placa de aluminio, se hizo pasar el haz de un láser por los agujeros horadados (centro de cada bobina), para fijar el sensor Hall colocado en la punta de una varilla de acrílico; dicha punta se ubicó a una distancia $\frac{R}{2}$ en el arreglo de bobinas de Helmholtz.

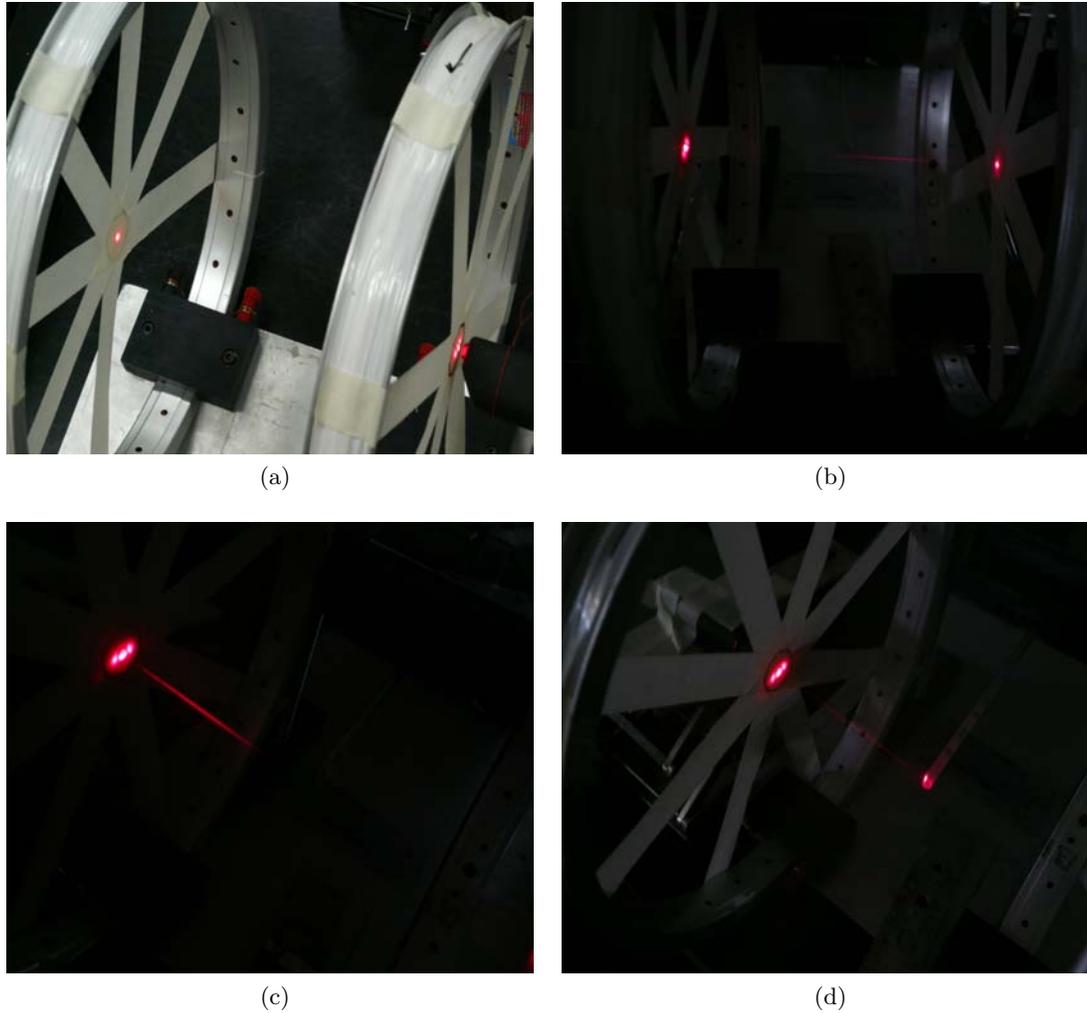


Figura 2.2.6: *a) Bobinas paralelas, sujetas a la placa de aluminio. b) y c) Alineación del centro de ambas bobinas con un haz de láser. d) Sensor Hall en la punta de la varilla de acrílico ubicada a la mitad de la distancia R , en el centro geométrico de las bobinas de Helmholtz.*

Con el sensor al centro del arreglo (imagen 2.2.6 inciso d), se asignó el origen del posicionador en los ejes vertical y horizontal. Se colocó un vernier para cada eje lo que logró un control óptimo en el desplazamiento del sensor al girar los tornillos sin fin que movían cada eje.

Con una brújula se encontró la dirección de la componente total del campo magnético terrestre. Con esta dirección se orientó el arreglo de bobinas en posición ortogonal al campo magnético terrestre. La polaridad de corriente se conectó para que el campo magnético generado por las bobinas resultara en dirección opuesta al campo magnético terrestre.

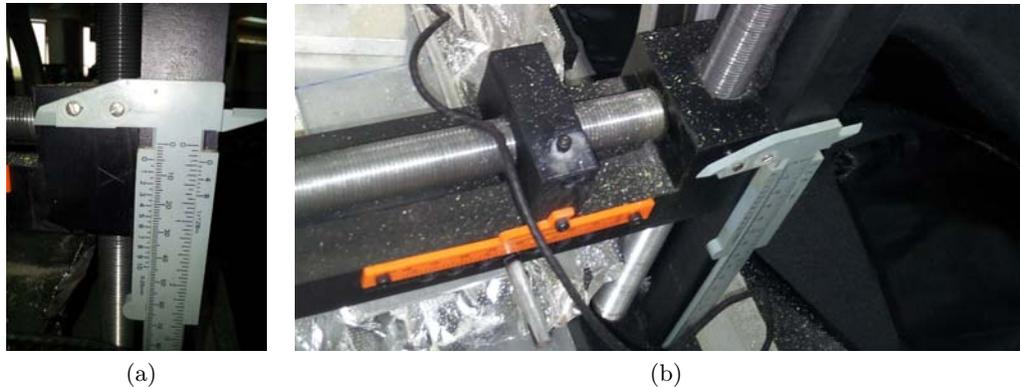


Figura 2.2.7: a) Vernier de plástico (gris) que se colocó para medir el desplazamiento vertical del sensor. b) Vernier (amarillo) que mide el desplazamiento horizontal del sensor.

2.2.2. Sistema de posicionamiento.

El sistema de posicionamiento se construyó con tres materiales:

- NYLOMAQ “SL” para construir la estructura.
- Dos redondos de Aluminio, se construyeron dos tornillos sin fin.
- Dos redondos de latón, se hicieron agarraderas.
- Tornillos allen, para armar la estructura.

Diseño y manufactura del posicionador

El posicionador es un sistema que se elaboró con NYLOMAQ “SL”. El Nylomaq es una poliamida con las características mecánicas de rigidez, dureza, bajo coeficiente de fricción y resistencia al desgaste. Se usa en la industria para la fabricación de diversos productos como ruedas, engranes, rodillos, mandriles, empaques, etc. Es de fácil maquinado y bajo costo, lo que lo hace idóneo para la construcción de las piezas del posicionador.

El diseño del posicionador se realizó usando el software gratuito SketchUp^{IV} [43]. Este software permite dimensionar y proyectar adecuadamente las piezas obteniendo planos detallados y precisos para cada una de ellas (apéndice C). Las características del diseño del posicionador fueron las

^{IV}SketchUp es un modelador de diseño en 3D utilizado en arquitectura, ingeniería y recientemente en el modelado para impresión 3D
<http://www.sketchup.com/es>

siguientes: liviano, desarmable y con posibilidad de ensamblarse a dos configuraciones diferentes dependiendo del uso experimental.

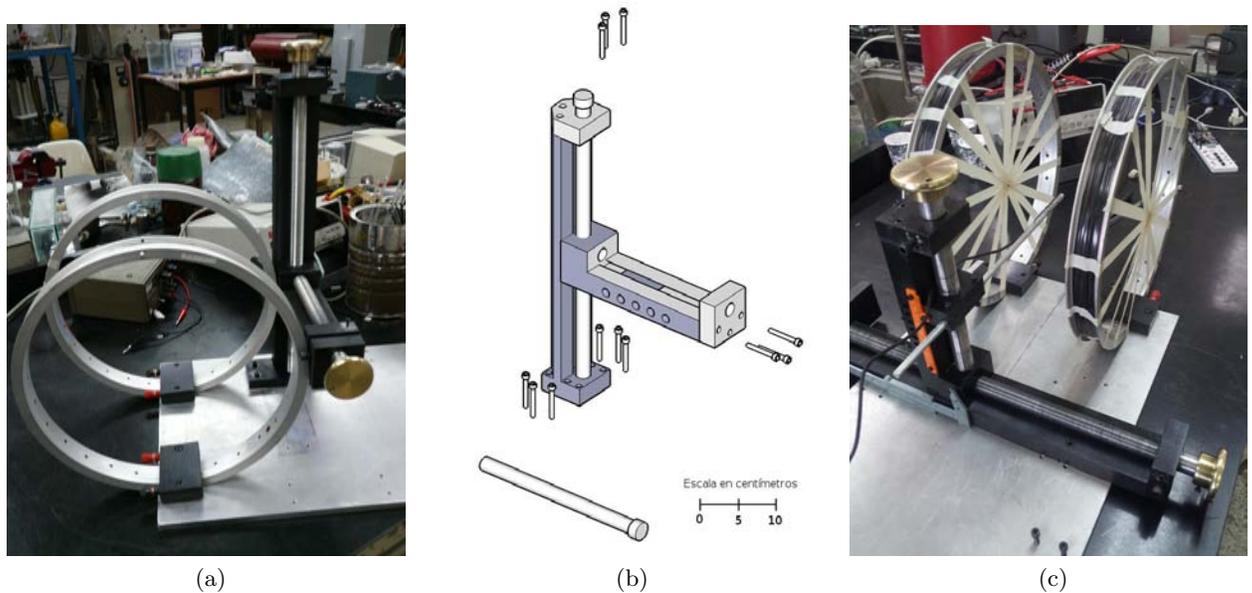


Figura 2.2.8: a) Primera configuración del posicionador. b) Diseño del posicionador en el software SketchUp. c) Segunda configuración del posicionador.

El posicionador consta de seis piezas hechas en nylomaq, dos tornillos sin fin (22 cm y 46 cm) elaborados en un redondo de aluminio de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro, los cuales se maquinaron en un torno y se les hizo una cuerda de 16 hilos por pulgada en cada uno. Es importante el tamaño de la cuerda debido a que la precisión de movimiento para el sensor Hall depende del paso del tornillo. Se hicieron dos manijas de latón en una fresadora para manipular el movimiento de rotación de los tornillos y así mover el sensor en dos dimensiones.

En la manufactura del posicionador las piezas de nylomaq se trabajaron a baja velocidad en la fresadora. Para lograr el corrimiento de los sensores respecto a cada eje, se usaron colas de milano en cada carro, elaboradas con un cortador de una pulgada con una inclinación de 45° .

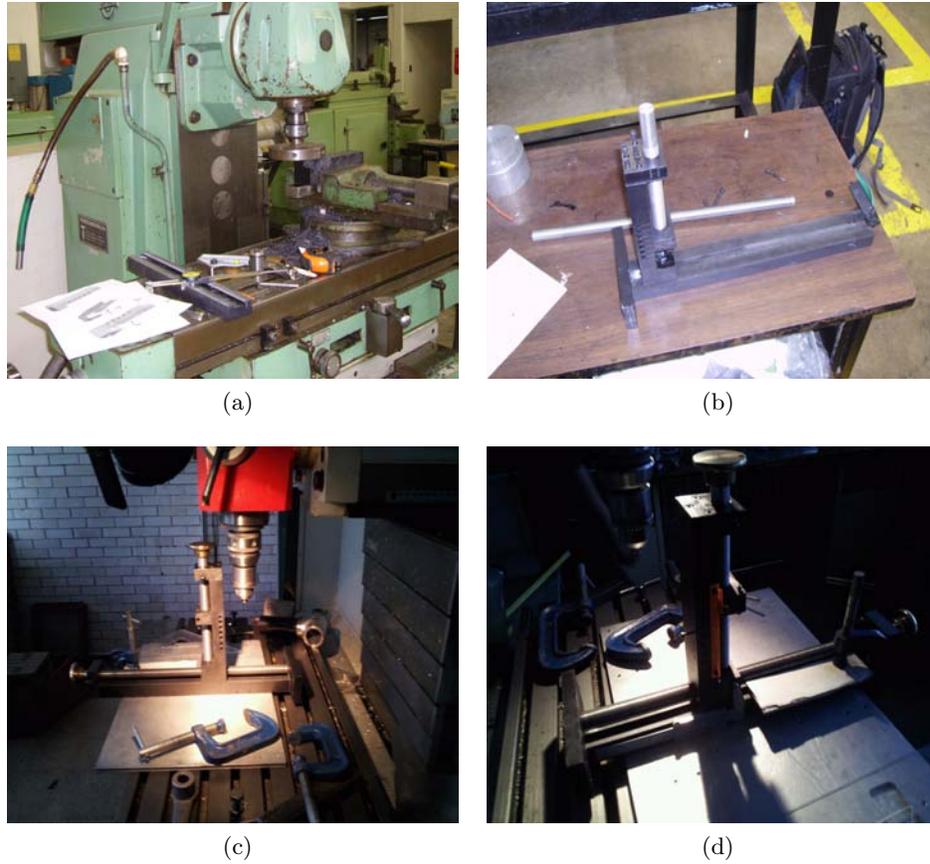


Figura 2.2.9: a) Piezas del posicionador en nylomaq fabricadas en la fresadora. b) Piezas ensambladas formando el posicionador. c) y d) Barrenado del posicionador y la placa de aluminio para unirlos con tornillos allen.

Al concluir la elaboración y armado del posicionador, éste se fijó a la placa de aluminio que ya contenía las bobinas de Helmholtz. Con esto se completó el sistema de movimiento en dos ejes para el sensor y el sistema para anular el campo magnético terrestre.

2.2.3. Porta muestra.

Por último se diseñó y construyó un porta muestra de aluminio en el que se colocó el arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ en un baño de nitrógeno líquido. Este aditamento consta de dos piezas de aluminio: la primera pieza es una base rectangular con barreno al centro, cuyas medidas se muestran en la tabla 2.2.1.

| largo | ancho | espesor | diámetro del barreno | profundidad del barreno |
|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| $(102.8 \pm 0.05)mm$ | $(76.2 \pm 0.05)mm$ | $(19.9 \pm 0.05)mm$ | $(22 \pm 0.05)mm$ | $(7.2 \pm 0.05)mm$ |

Tabla 2.2.1: Medidas de la base para el portamuestra.

En esta base se trazaron líneas radiales al barreno con una separación de 15° entre ellas, estas líneas permiten controlar la medida de rotación para la muestra.

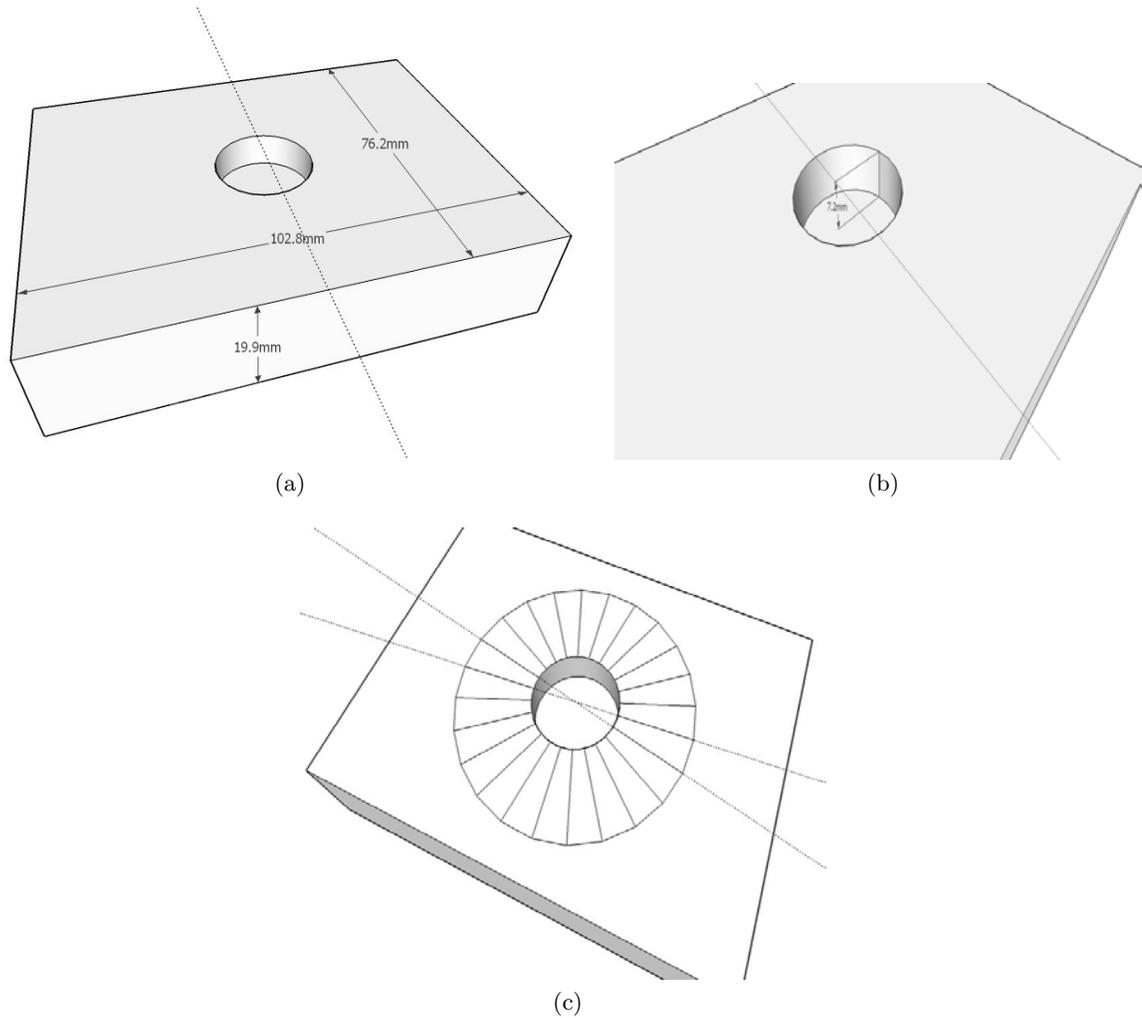


Figura 2.2.10: *Diseño de la base para el portamuestra usando el programa SketchUp. a) Vista de las dimensiones de la base. b) Profundidad del barreno. c) Medidas de 15° alrededor del barreno.*

La segunda pieza del portamuestra se construyó en una sola estructura a partir de un redondo de aluminio. Con el torno se le dió forma de un recipiente para contener nitrógeno líquido y a la muestra de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Esta pieza tiene una reducción al centro que sirve como eje de rotación y se une al barreno (fig. 2.2.11). En la tabla 2.2.2 presentan las dimensiones del portamuestra.

| Recipiente | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Díámetro exterior | Díámetro interior | Profundidad | Altura |
| $(62.5 \pm 0.05)mm$ | $(58.0 \pm 0.05)mm$ | $(20.0 \pm 0.05)mm$ | $(22.0 \pm 0.05)mm$ |
| Eje | | | |
| | Altura | Díámetro | |
| | $(61.0 \pm 0.05)mm$ | $(22.0 \pm 0.05)mm$ | |

Tabla 2.2.2: *Dimensiones del portamuestra, se presentan las medidas del recipiente y el eje de rotación.*

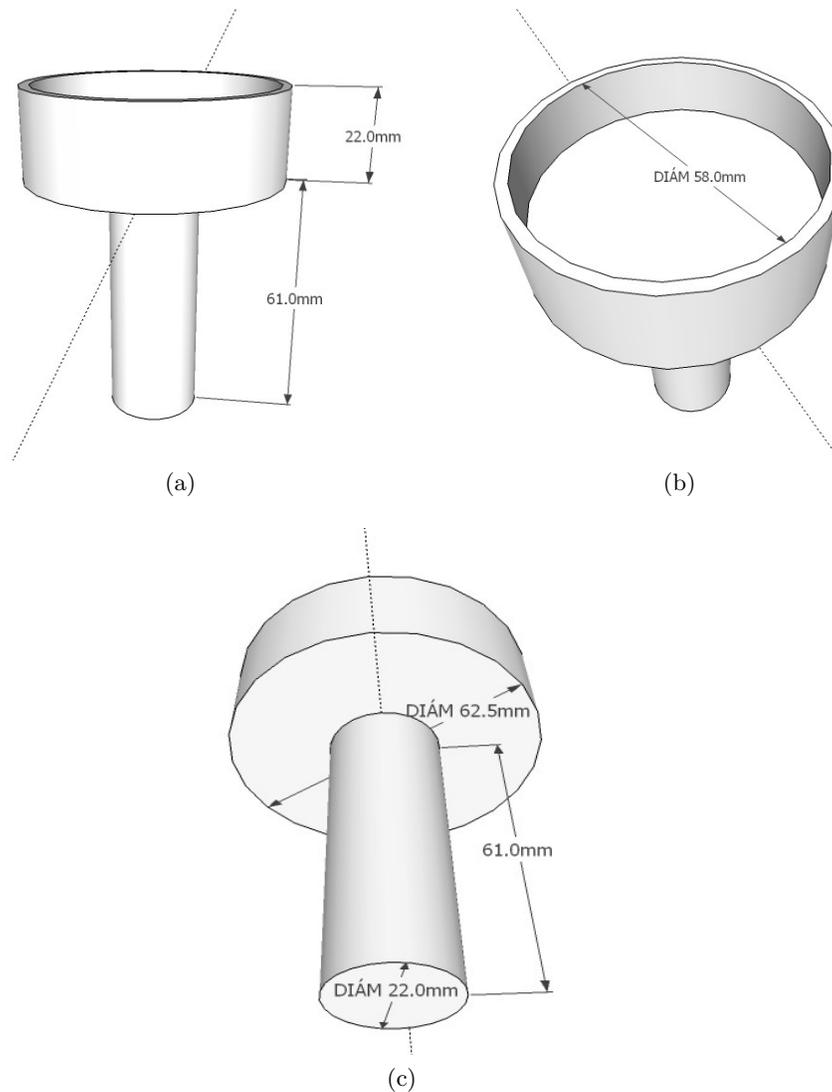
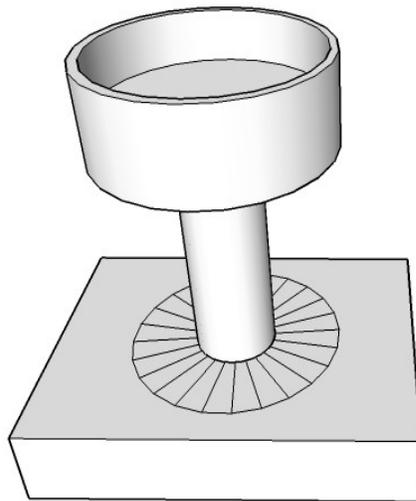
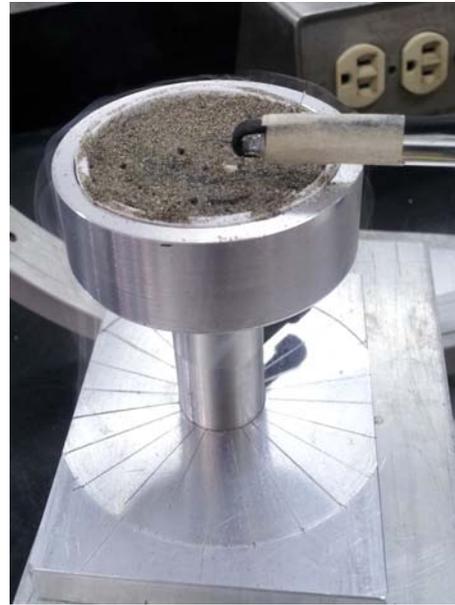


Figura 2.2.11: *Diseño del portamuestra usando el software SketchUp. a) Medidas de altura del recipiente y portamuestra. b) Medida del diámetro interior del recipiente. c) Medidas del diámetro exterior del recipiente así como el diámetro del eje de rotación.*

Para evitar que el nitrógeno líquido congelara las piezas de aluminio, se cortó la base de un vaso de unicel que encajara perfectamente en el recipiente de aluminio. Con esto se evitó el congelamiento de la estructura y el desperdicio de nitrógeno líquido. La estructura terminada se muestra en la figura 2.2.12.



(a)



(b)

Figura 2.2.12: a) *Diseño del portamuestras en el programa SketchUp.* b) *Protamuestra en dos piezas elaborado en aluminio.*

Con las bobinas de Helmholtz, el posicionador y el portamuestra terminados, se tienen los elementos necesarios para mover el sensor Hall, Colocar el arillo en un baño térmico de nitrógeno líquido e iniciar las mediciones y registro de datos del campo magnético generado por el superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Capítulo 3

Sistema de medición y registro de datos

En este capítulo se diseñó un sistema de medición de campo magnético y temperatura (sistema electrónico) y un sistema de recolección de datos (sistema digital) por medio de una computadora.

Las señales analógicas de cada sensor se amplificaron y se calibraron con un circuito diseñado específicamente para este propósito. Las señales se digitalizaron para su almacenamiento, se guardaron en un archivo (base de datos) de computadora, posteriormente se procesaron y analizaron. El registro y secuencia de control en la lectura de datos para los sensores, se realizaron usando el microcontrolador ATMEGA328, incluido en la plataforma de hardware libre ARDUINO.

El dispositivo se usó para medir el campo magnético generado por la supercorriente atrapada (capítulo 4) en el arillo superconductor y, aplicando la ley de Biot-Savart, se determinó el valor del campo magnético en el eje axial, a partir del cual se infirió el valor de la supercorriente.

3.1. Sensor de efecto Hall.

En 1879 en la universidad Johns Hopkins, el científico E. H. Hall hizo un descubrimiento relevante en la conducción de corriente eléctrica a través de metales que están en interacción con un campo magnético. Este descubrimiento fue un avance trascendente para la física de materiales. Hall explicó un fenómeno que hasta entonces era desconocido.

El descubrimiento cambió radicalmente la manera de medir campos magnéticos porque hasta esa época las mediciones se hacían usando bobinas. En la actualidad la medición experimental de campos magnéticos se realiza mediante sensores que presentan este efecto (Gaussmetros, Teslametros o sensores de campo magnético) [23, 41, 15].

El sensor utilizado en este experimento fue un circuito integrado de efecto Hall comercial de bajo costo; con éste se construyó un Gaussmetro para determinar el campo magnético generado por el arillo superconductor $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

A continuación se explica brevemente el efecto Hall clásico. Cuando se aplica un campo eléctrico a un conductor o semiconductor, se establece una corriente \vec{i} colineal al campo eléctrico. Si además existe un campo magnético \vec{B} perpendicular a la dirección de la corriente, los portadores de carga son desviados lateralmente hacia la superficie del material. En particular, si el material consiste en una placa rectangular, los portadores de carga son desviados a las caras laterales, donde se van acumulando hasta que generan un campo eléctrico \vec{E}_H que se opone al efecto del campo magnético [41, 15].

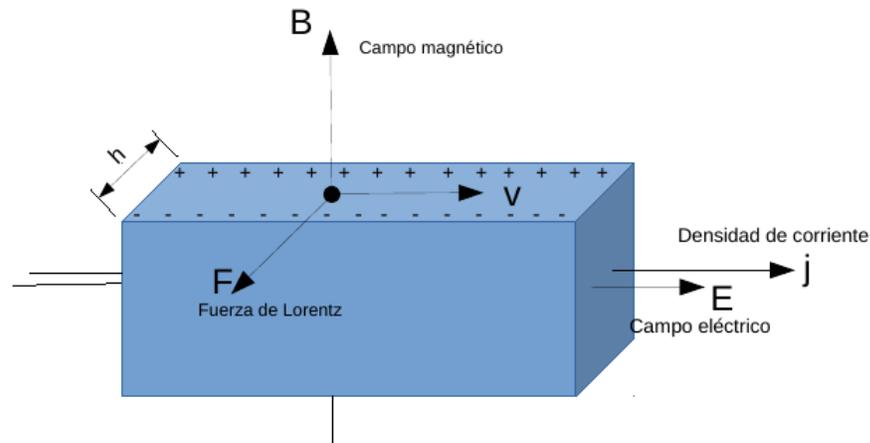


Figura 3.1.1: *Placa rectangular que presenta efecto Hall clásico.*

Una vez que se establece el estado estacionario, se cumplen las siguientes relaciones:

$$qvB = qE_H \quad (3.1.1)$$

en donde q es la carga de los portadores y v es la rapidez con la que se mueven ; eliminando a q se

obtiene

$$vB = E_H = \frac{\Delta V_H}{h} \quad (3.1.2)$$

en donde ΔV_H es la diferencia de potencial entre las caras opuestas del material (conductor o semiconductor) y h la separación entre ellas. El signo de ΔV_H permite determinar el signo de la carga de los transportadores. Esto fue lo que motivó el estudio de Hall.

Si el número de portadores de carga por unidad de volumen es n , entonces la corriente generada por la diferencia de potencial aplicado es:

$$i = nqvA = nqv(hl) \quad (3.1.3)$$

con l el espesor, entonces

$$\Delta V_H = \frac{iB}{nqh} = R_H \frac{iB}{h} \quad (3.1.4)$$

y

$$\Delta V_H = \frac{ihB}{nqhl} = \frac{iB}{nql} = R_H iB \quad (3.1.5)$$

$$\Delta V_H = R_H iB \quad (3.1.6)$$

El valor de $R_H = \frac{l}{nq}$ depende del espesor de cada sensor, de la diferencia de potencial aplicada y del material del que esté hecho.

La expresión 3.1.6, muestra una relación intrínseca del voltaje Hall de un material respecto a un campo magnético.

El sensor de efecto Hall que se usó es el modelo 3515 de la compañía AllegroMicrosystems que, dadas sus especificaciones de operación, debe conectarse a un voltaje de $5V$ para tener un óptimo desempeño, con una la resolución de $5 \frac{mV}{G}$ [4].

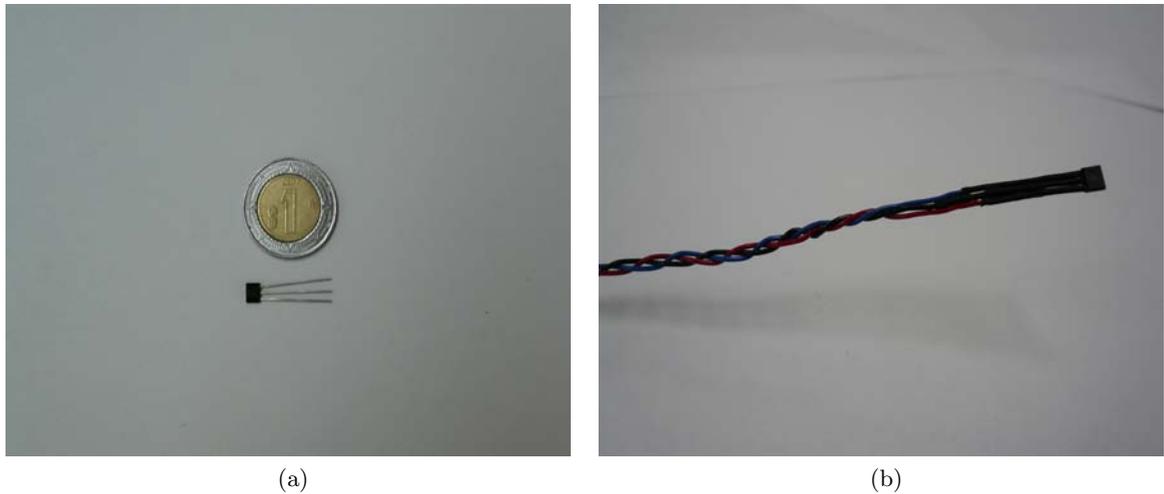


Figura 3.1.2: *a) Dimensiones del sensor Hall 3515. b) Cableado del sensor Hall 3515.*

El sensor Hall se acopló a tres cables: voltaje de operación (rojo), tierra (negro) y voltaje de salida (azul). El cable de operación se conectó a una fuente de voltaje que suministró $5V$ al sensor de manera constante. El voltaje de salida se conectó a un multímetro de precisión con el que se midió el voltaje Hall asociado al campo magnético generado por el arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Primero, se probó que la conexión y el funcionamiento del sensor fuesen adecuados. Con un imán de neodimio se determinaron los voltajes Hall asociados a la intensidad de campo magnético respecto a la distancia; los cambios de voltaje se registraron en el multímetro conectado al voltaje de salida del sensor. En ausencia de campo el multímetro marcó $2.5006V$. Cuando se hizo esta prueba se constató el funcionamiento del sensor y se comprobó la conexión.

La hoja de datos del sensor Hall 3515 describe un comportamiento lineal de éste. Con un Gaussmetro modelo Bell-5080 se comparó la linealidad del sensor 3515, ambos aparatos se colocaron en iguales condiciones lo que proporcionó una referencia para convertir voltaje Hall a unidades de campo magnético (Gauss) [4].

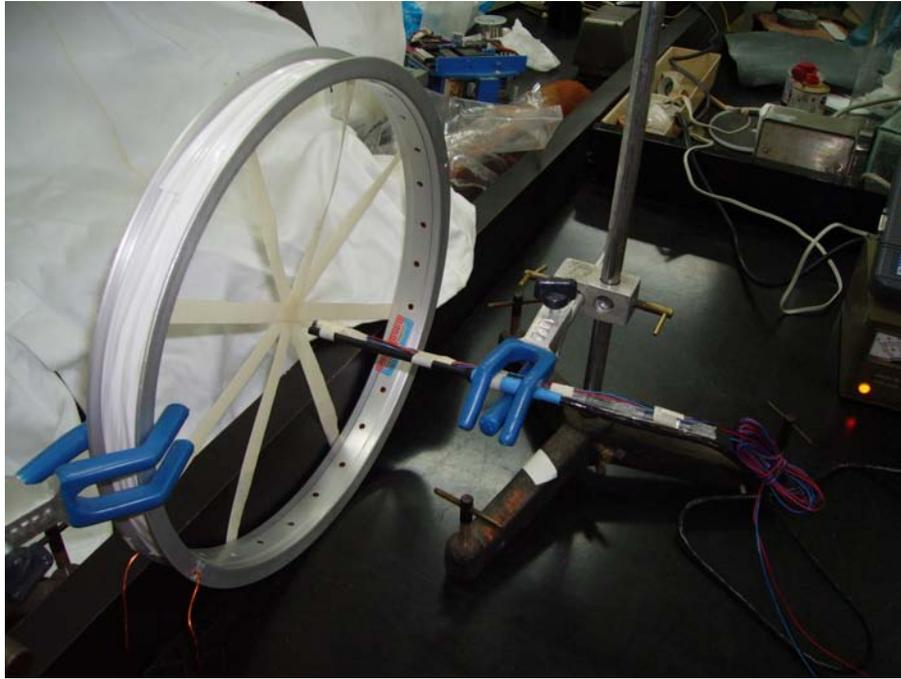


Figura 3.1.3: *Prueba de linealidad del sensor 3515, la sonda del Gaussmetro Bell-5080 junto al sensor 3515 están midiendo en las mismas condiciones el campo magnético generado en el centro de una bobina.*

El sensor Hall y el Gaussmetro Bell se colocaron en el centro de una bobina; ambos aparatos midieron la misma magnitud de campo magnético generado por la bobina. En este experimento se usó una de las dos bobinas que se construyeron^I. Con una fuente de corriente directa se alimentó la bobina; el campo magnético generado por ésta depende de la corriente suministrada, al conocer el número de vueltas de la bobina, el radio y la corriente que se suministró. Se usó la ecuación 3.1.7 para calcular el valor del campo generado, estos valores se compararon con las mediciones que se hicieron con el Gaussmetro Bell-5080. Se concluyó que este aparato está bien calibrado, por lo que fue suficiente comparar el sensor Hall con el Gaussmetro Bell.

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2R} \quad (3.1.7)$$

El sensor Hall registró voltaje (observado en el multímetro), al mismo tiempo el Gaussmetro Bell-5080 registró valores de campo magnético, ambos aparatos se situaron en idénticas condiciones, el primero reporta las mediciones en unidades de voltaje y el segundo en unidades de campo magnético (Gauss o Teslas), el funcionamiento del Gaussmetro Bell-5080 está basado también en efecto Hall.

^IEn el capítulo dos se construyó un arreglo de bobinas.

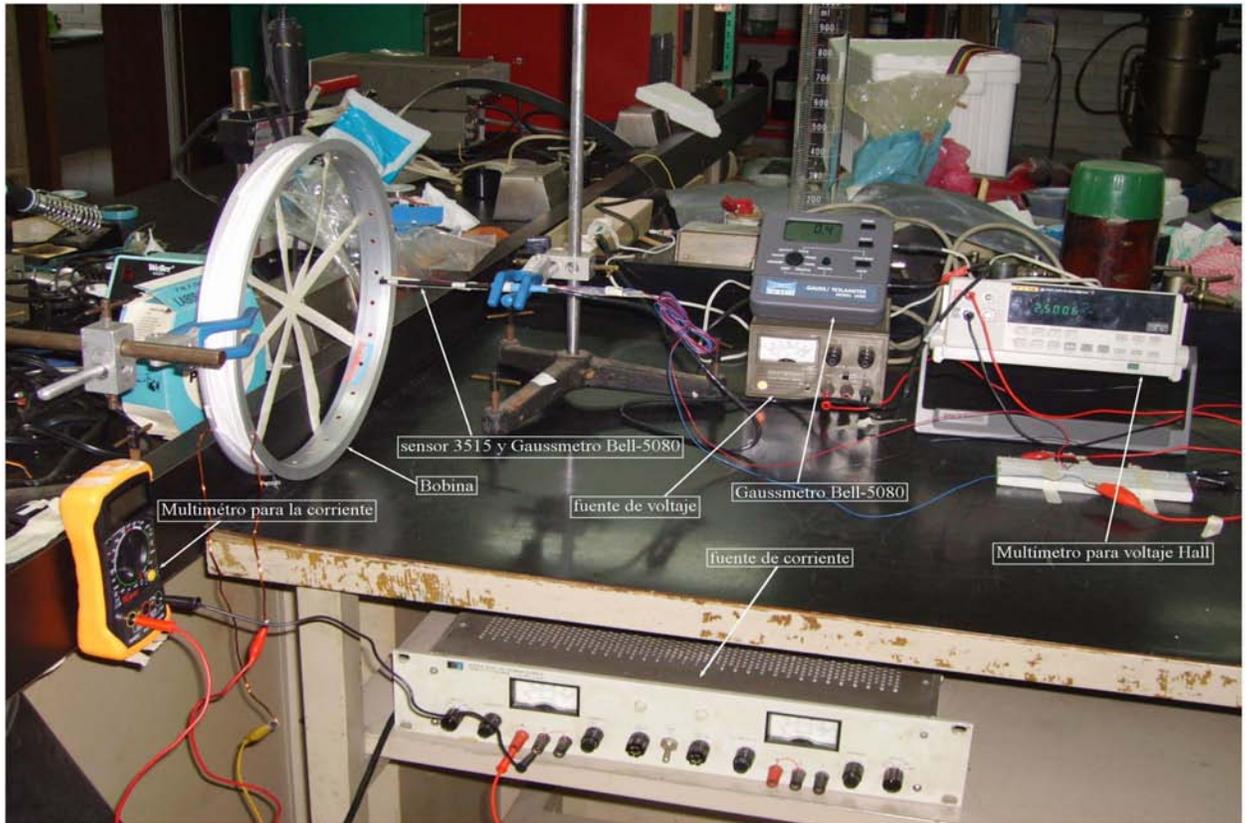


Figura 3.1.4: *Esquema experimental. a) Fuente de corriente directa (bajo la mesa). b) Bobina conectada a la fuente de corriente. c) Multímetro (amarillo), mide la corriente de la fuente a la bobina. d) Fuente de voltaje, suministra 5V al sensor Hall. e) Multímetro de precisión, mide el voltaje de salida del sensor Hall. f) Gaussmetro Bell-5080 (sobre la fuente). g) Sensor Hall 3515 (centro de la bobina). h) Sonda Hall del Gaussmetro Bell-5080 (centro de la bobina).*

La correlación del sensor Hall y el Gaussmetro Bell-5080 se obtuvo al colocarlos en condiciones idénticas y medir simultáneamente el valor del campo magnético generado por la bobina. Los datos obtenidos (voltaje Hall y campo magnético) se graficaron^{II} definiendo la corriente suministrada a la bobina como variable independiente. En ambas gráficas se observó un fenómeno lineal, es decir, el sensor Hall y el Gaussmetro tienen un comportamiento lineal.

Posteriormente se aplicó una regresión lineal a cada aparato (cada gráfica) y se obtuvo una ecuación de ajuste lineal para cada recta; con estas ecuaciones se hizo la calibración del sensor Hall y la conversión de voltaje a unidades de campo magnético.

^{II}Las gráficas de este trabajo se hicieron usando el software libre R.

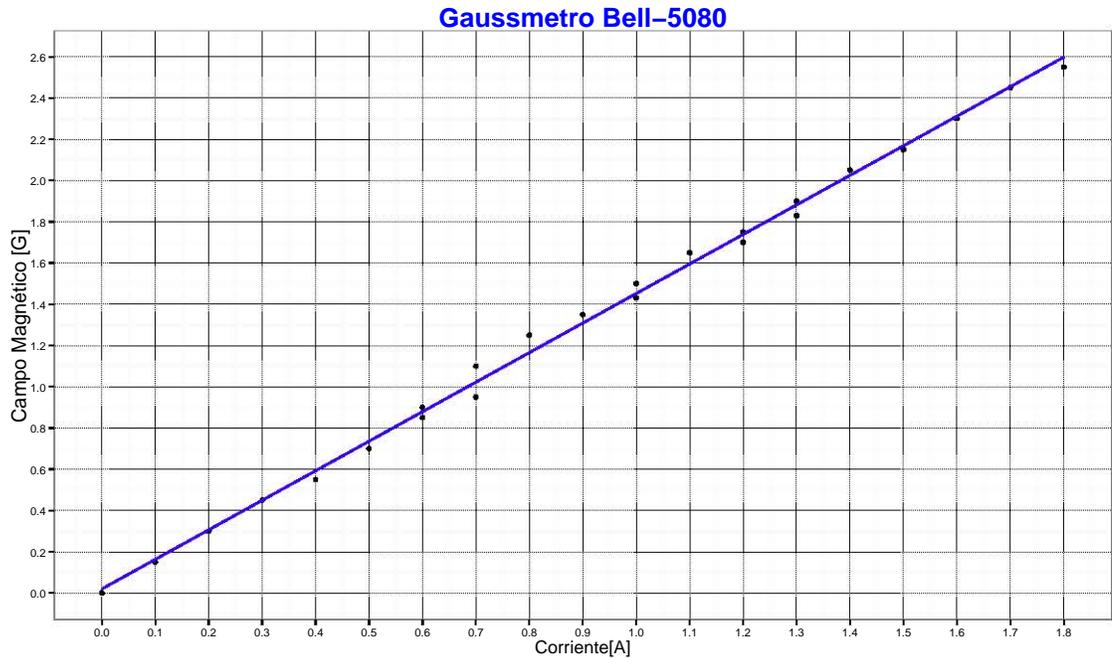


Figura 3.1.5: Gráfica de campo magnético generado por la bobina respecto a corriente suministrada, los datos son tomados con el Gaussmetro Bell-5080. La gráfica muestra el ajuste lineal con $R^2 = 0.997$.

$$B = (1.4322 \pm 0.0124) \frac{G}{A} i + (0.0196 \pm 0.0133)G \quad (3.1.8)$$

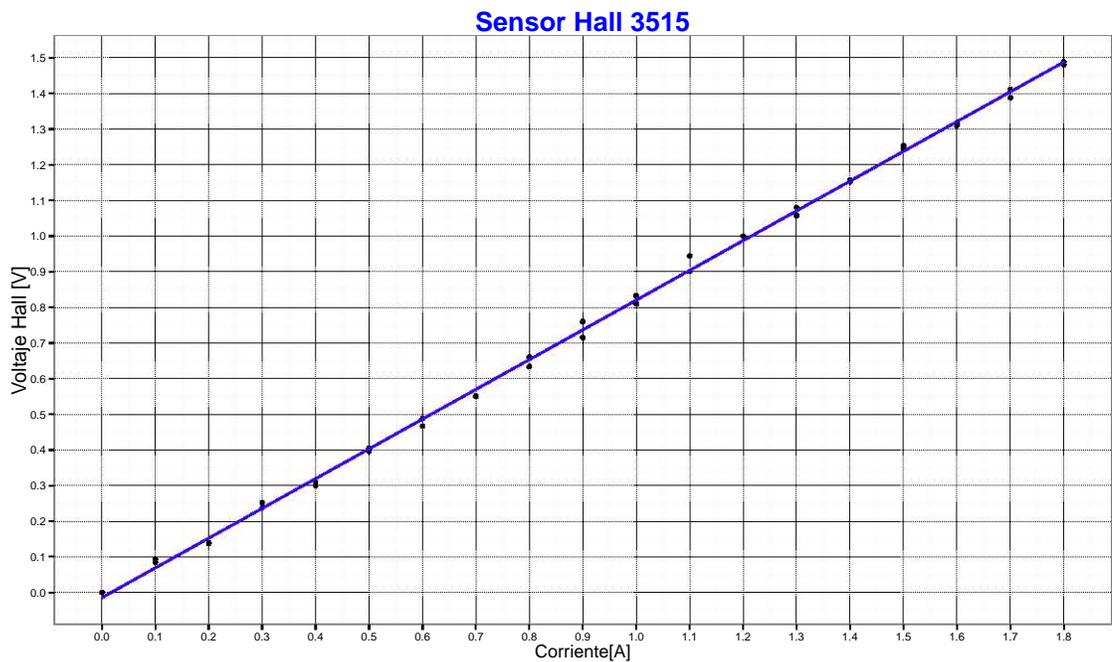


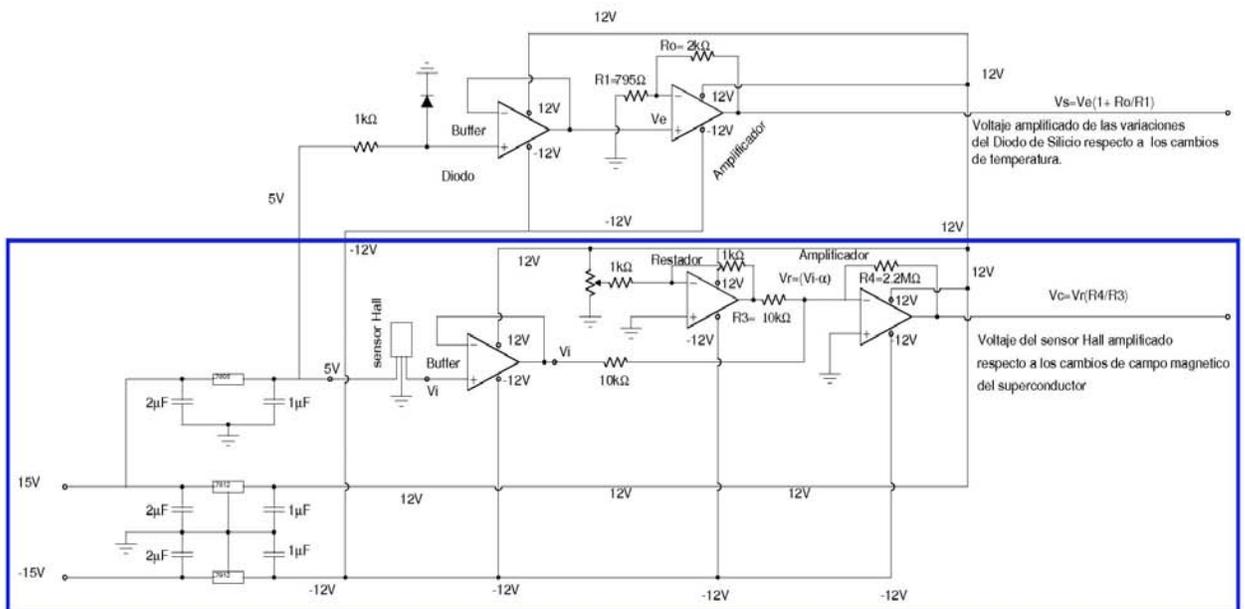
Figura 3.1.6: Gráfica de campo magnético generado por la bobina respecto a corriente suministrada, los datos son tomados con el sensor Hall 3515 (voltaje). La gráfica muestra el ajuste lineal con $R^2 = 0.998$.

$$V_{Hall} = (0.8346 \pm 0.0046) \frac{V}{A} i - (0.0145 \pm 0.0049)V \quad (3.1.9)$$

De las regresiones lineales se comparó el valor del coeficiente de determinación (R^2) y se observó que el comportamiento lineal y la sensibilidad de ambos aparatos no tiene discrepancia. La corriente i se despejó de la ecuación 3.1.9 y se sustituyó en la ecuación 3.1.8. En este proceso se obtuvo una expresión que permite convertir voltaje a campo magnético, preservando la linealidad. La ecuación 3.1.10 se usó para programar el microcontrolador de la plataforma Arduino.

$$B = (1.7160 \pm 0.02434) \frac{G}{V} V_{Hall} + (0.04446 \pm 0.0218)G \quad (3.1.10)$$

Los valores de campo magnético registrados por el sensor Hall en las primeras pruebas en el arillo superconductor resultaron ser pequeños. Por esta razón se construyó un circuito amplificador con la finalidad de medir el campo magnético del arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ [47, 48, 49].



Circuito para amplificación de voltaje Hall

Figura 3.1.7: *Diseño del circuito de amplificación. Encerrado en el paralelogramo se encuentra el circuito que amplificó el voltaje de salida del sensor Hall 3515. Fuera del paralelogramo se observa el circuito que amplificó la señal del sensor de temperatura (diodo).*

El circuito amplificador para el sensor Hall consta de una sección que regula el voltaje de entrada ($\pm 15V$) a $5V$ que se usó para hacer funcionar el sensor 3515 y el diodo de silicio (sensor de tem-

peratura). Otra sección regula los voltajes de $\pm 15V$ a $\pm 12V$, para alimentar los amplificadores operacionales (TL081) [49].

Se usaron amplificadores operacionales para la construcción de los siguientes dos circuitos: el primero amplifica el voltaje generado por el diodo de silicio: consta de un buffer o seguidor que se conecta a un amplificador de voltaje; el segundo se creó para el sensor Hall: consta de un buffer que se conecta a un restador de voltaje y a su vez a un amplificador de voltaje.

Las señales amplificadas (analógicas) se introdujeron a la plataforma Arduino, en donde se convirtieron en señales digitales. Posteriormente estas señales fueron enviadas a una computadora usando un puerto USB. Las señales se recolectaron y con ellas se estructuró una base de datos que se guardó en un archivo. Los datos se almacenaron para después filtrarlos y analizarlos.

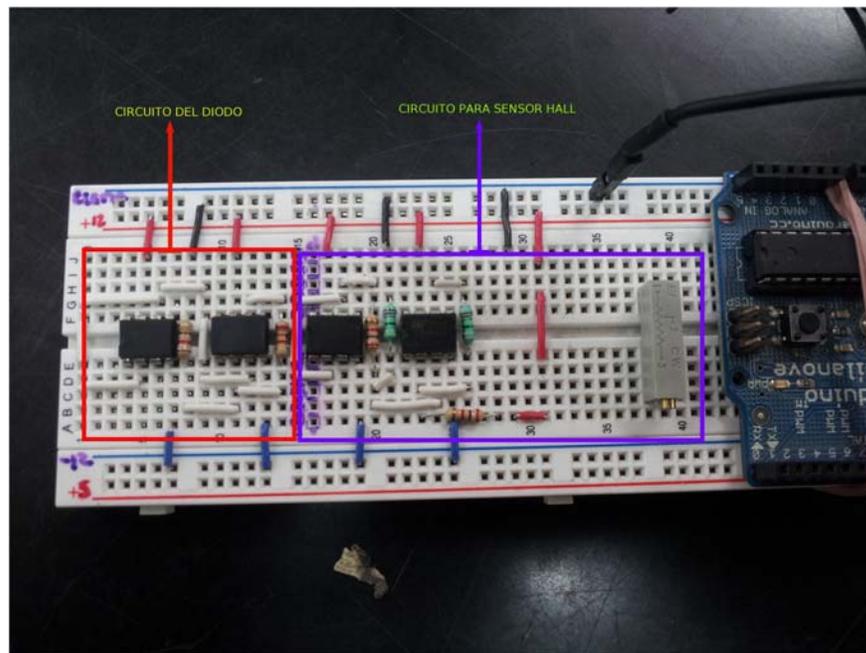


Figura 3.1.8: *Círculo amplificador. El cuadro rojo encierra la sección que amplifica la señal del sensor de temperatura (diodo). El cuadro azul encierra la sección que amplifica la señal del sensor de campo magnético (3515).*

3.2. Sensor de temperatura criogénico

En el proceso experimental la temperatura es una variable importante que afecta desde la adquisición de datos, hasta la superconducción del arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Las primeras pruebas que se hicieron con el sensor 3515 resultaron tener variaciones debido a los cambios de temperatura. Estas mediciones se hicieron con la punta Hall sin colocarle un aislante térmico, el sensor se en-

contró en contacto directo con los vapores de nitrógeno líquido, exponiéndose a enfriamientos y calentamientos. Las variaciones de temperatura afectaron los datos obtenidos (voltajes colectados); se solucionó al encapsular el sensor Hall en espuma de poliuretano (aislante térmico), evitando que los vapores de nitrógeno líquido entraran en contacto y enfriaran la punta Hall.

Una variable importante para determinar las propiedades de un superconductor es la temperatura, con el fin de medirla se diseñó un sensor criogénico para sensar, en el tiempo las variaciones de temperatura del arillo, en estado superconductor. Con este sensor se registraron los cambios de temperatura en la muestra. El sensor criogénico se construyó con un diodo de silicio 1N4001 de bajo costo. Este diodo se mantuvo en contacto con el superconductor durante todo el proceso experimental registrando los cambios en su temperatura [14][36].

El diodo operó conectado a un circuito diseñado para amplificar la señal y recolectar los datos. El diodo semiconductor de silicio tiene una respuesta lineal dentro de un intervalo de temperaturas entre $300K$ y $50K$; la temperatura del nitrógeno líquido es de $77K$, la temperatura ambiente dentro del laboratorio era de $293K$. Estos datos sitúan al diodo dentro del intervalo de linealidad [29][39].

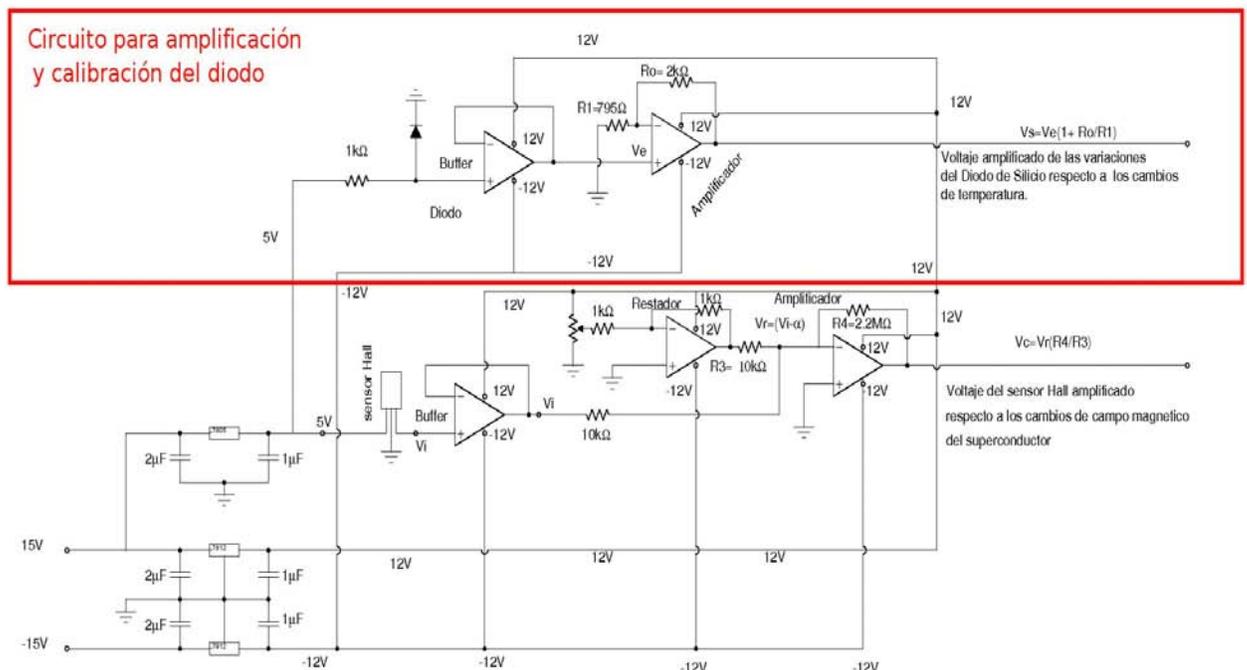


Figura 3.2.1: Diseño del circuito de amplificación. Encerrado en el paralelogramo se encuentra el circuito que amplificó la señal del sensor de temperatura (diodo).

Debido a que se usó una resistencia adecuada ($1k\Omega$) para polarizar el diodo se mantuvo la linealidad en el comportamiento respecto a la temperatura[35], se usaron dos valores de temperatura para

generar una recta de calibración, el primer valor se registró al introducir el diodo en una mezcla de agua con hielos a una temperatura de $273K$ ($0^{\circ}C$), a esta temperatura el diodo registró un voltaje de $0.694V$. El segundo valor se obtuvo en el momento de sumergir el diodo en nitrógeno líquido a una temperatura de $77K$ ($-196^{\circ}C$). Para esta temperatura se registró un voltaje de $1.046V$.

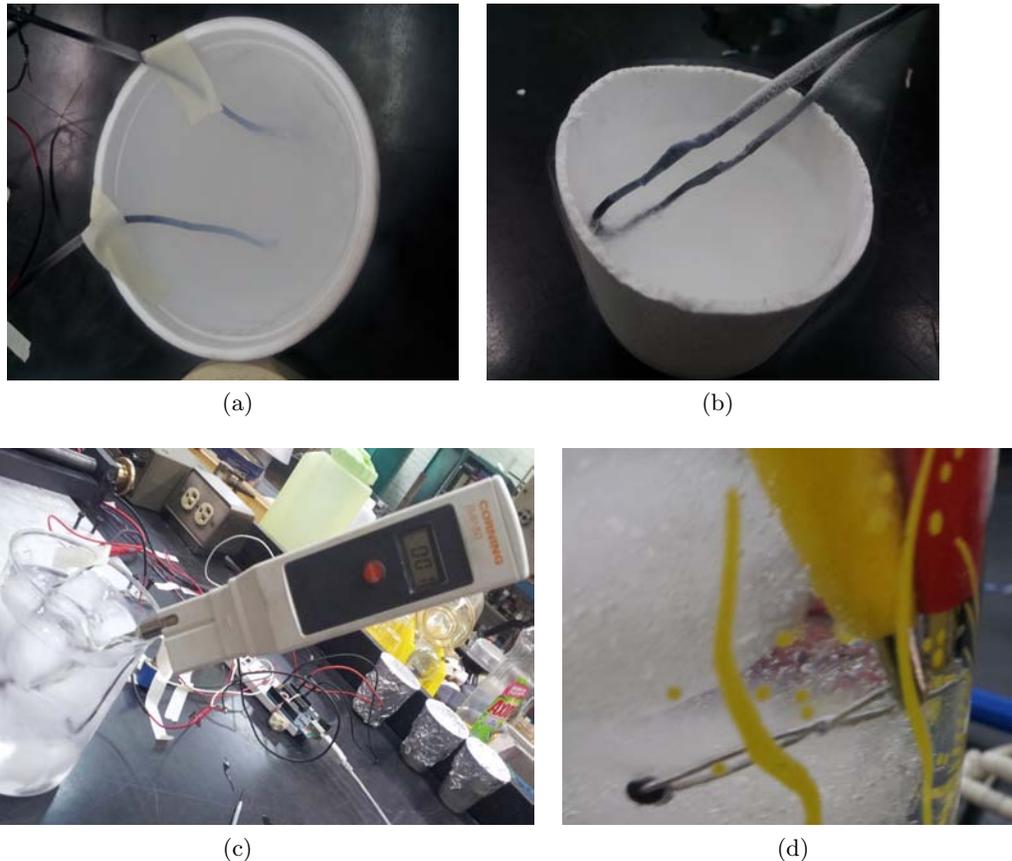


Figura 3.2.2: *El diodo se convirtió en un sensor de temperatura criogénico. a) y b) Se sumergió el diodo en nitrógeno líquido a $77K$. c) Mezcla de agua con hielos a $273K$. d) Se introdujo el diodo en la mezcla de agua con hielos.*

Los datos obtenidos con el diodo determinaron dos puntos para elaborar una gráfica de voltaje como función de la temperatura [39, 29, 36]. La ecuación de la recta que pasa por estos dos puntos, proporcionó los factores de conversión entre el voltaje y la temperatura.

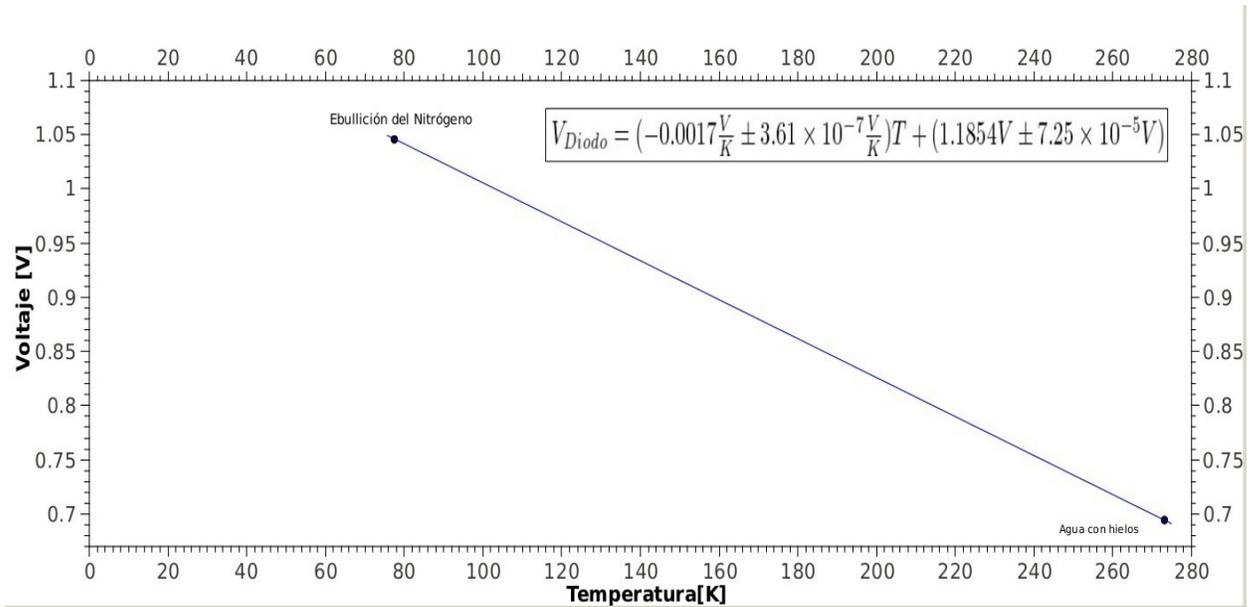


Figura 3.2.3: Gráfica de voltaje vs temperatura del diodo (sensor de temperatura criogénico), se hizo un ajuste lineal para obtener un factor de conversión entre temperatura y voltaje.

Se hizo un ajuste lineal para relacionar el voltaje del diodo con la temperatura, la ecuación del ajuste es:

$$V_{diodo} = (-1.7 \times 10^{-3} \pm 3.61 \times 10^{-7}) \frac{V}{K} T + (1.1854 \pm 7.25 \times 10^{-5}) V \quad (3.2.1)$$

Los parámetros de esta ecuación se usaron en la programación del microcontrolador de la plataforma Arduino. Finalmente se obtuvo un sensor criogénico con el que se midió la temperatura del arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ entre $77 K$ y $260 K$.

3.3. Sistema de recolección y almacenamiento de datos.

Así las señales analógicas enviadas por los sensores (Hall y diodo), midieron el campo magnético y la temperatura. Estas señales se ingresaron a la plataforma Arduino donde su microcontrolador las convirtió a señales digitales, mismas que se enviaron a una computadora personal.

El microcontrolador se programó usando los parámetros de las ecuaciones 3.1.10 y 3.2.1. Con la plataforma Arduino fue posible adquirir datos secuenciales respecto a una base temporal, es decir, cada cierto instante se muestreó el campo magnético y la temperatura. Esto permitió agregar la variable tiempo al experimento, automatizando el proceso y acoplado las variables; Con esto se

obtuvieron gráficas temporales para cada sensor.

3.3.1. Plataforma Arduino

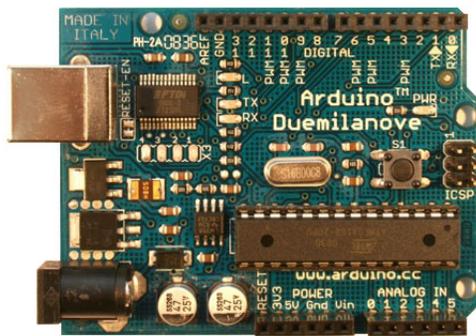
La plataforma Arduino se desarrolló en 2005 en el Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea en Italia, como un proyecto para acercar a diseñadores y artistas al manejo de sistemas electrónicos y computacionales. La idea era potenciar su creatividad y desarrollar entornos interactivos. Los microcontroladores eran caros y su programación complicada para usuarios con una formación diferente a áreas de cómputo y electrónica. Massimo Banzi inició esta innovadora idea visualizando una plataforma de bajo costo y programación sencilla. Los microcontroladores de la familia “Atmel AVR”^{III} (Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8, etc) fueron elegidos para el diseño de Arduino por su bajo costo. Una aportación importante la hizo el estudiante colombiano Hernando Barragán, tesista del instituto, quien contribuyó con el desarrollo de un prototipo de tarjeta llamada “Wiring”, misma que después se convirtió en la plataforma Arduino; también ayudó a desarrollar el lenguaje y ambiente de desarrollo (IDE) para Arduino con base en el lenguaje de programación Processing (muy parecido a C++) [16, 9, 34, 42].

Cuando el grupo dirigido por Banzi optó por liberar el hardware y software, Arduino se convirtió en un proyecto libre con mucha aceptación en el entorno académico^{IV} por su bajo costo, facilidad de uso y ser multiplataforma (Windows, Mac OS, Gnu/Linux). Desde un principio Arduino fue concebido como un entorno de enseñanza-aprendizaje destinado a usuarios sin conocimientos previos en electrónica, ciencias o programación. Tom Igoe conocido por sus múltiples trabajos en computación física, al tener conocimiento del proyecto Arduino, se unió al grupo de Banzi como colaborador. En conjunto proyectaron masivamente la plataforma Arduino para su uso en instrumentación y proyectos científicos, además lograron su producción y distribución en los Estados Unidos [38].

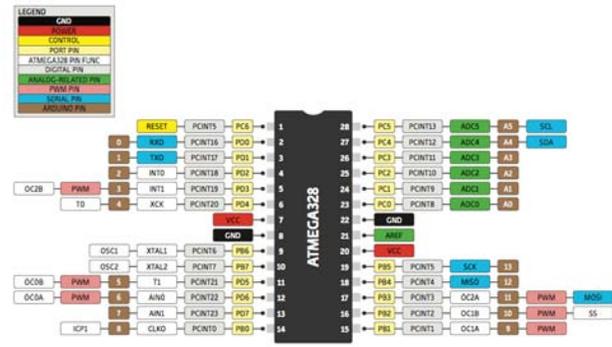
Arduino podría definirse como una placa para prototipos electrónicos que usa un lenguaje de programación que controla y gestiona componentes eléctricos (circuitos) conectados a él.

^{III}Utilizado originalmente en la industria automotriz; de ahí su bajo costo.

^{IV}Al proyecto Arduino se unieron muchos desarrolladores quienes contribuyeron de forma desinteresada.



(a)



(b)

Figura 3.3.1: a) Placa Arduino “Duemilanuove”. b) Componentes del microcontrolador ATmega328 embebido en la placa Arduino [34].

La placa “Arduino Duemilanuove” se seleccionó debido a que es el primer modelo que contó con un puerto USB para interactuar con la computadora, a diferencia de modelos anteriores cuyo enlace es vía puerto serial. Con esta placa se obtuvo el registro de datos y control de los sensores (campo magnético y temperatura), la placa se fabricó en el año 2009 y usa un microcontrolador ATmega328 [8].

Las características principales de la placa Arduino “Duemilanuove” se presentan en la tabla 3.3.1.

| Microcontrolador | ATmega328 |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Voltaje de operación | 5V |
| Votaje de entrada (recomendado) | 7-12V |
| Voltaje de entrada (límite) | 6-20V |
| Pines Digitales I/0 | 14 (6 son de salida PWM) |
| Pines de entrada analógicos | 6 |
| Corriente DC por pin I/0 | 40 mA |
| Corriente DC por 3.3V en cada pin | 50mA |
| Memoria FLASH | 32kb (2kb usados en el bootloader) |
| SRAM | 32kb |
| EEPROM | 2kb |
| Velocidad del reloj | 16Mhz |

Tabla 3.3.1: Características generales de la placa Arduino “Duemilanuove” [38].

Los sensores se conectaron a la plataforma Arduino, las señales de salida de cada sensor se introdujeron al microcontrolador que registró, convirtió y almacenó los datos del experimento. El esquema^V de la conexión se muestra en la figura 3.3.2.

^VEl esquema se realizó con el software libre “Fritzing” creado para diseñar proyectos con Arduino.

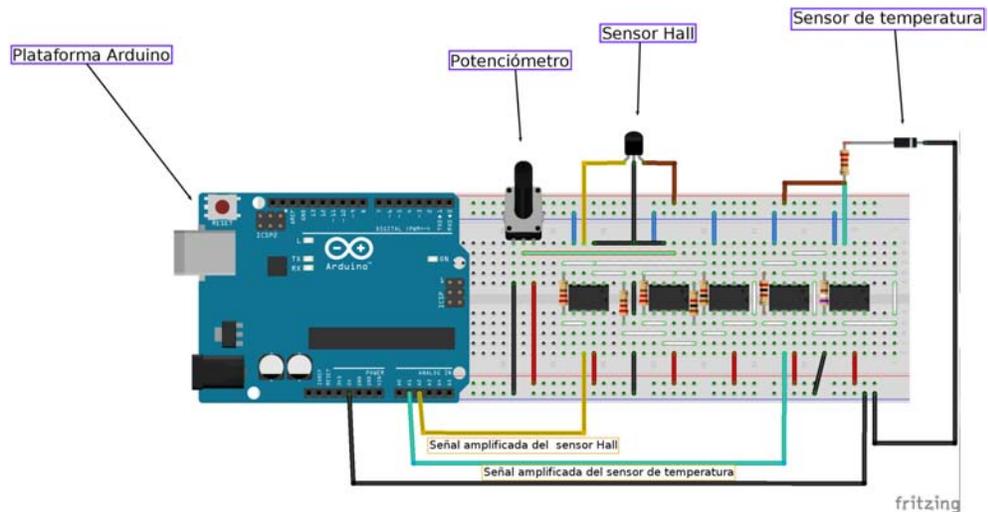


Figura 3.3.2: *Bosquejo del circuito amplificador y sensores conectados a la placa Arduino Duemilanove.*

3.3.2. Registro de datos , almacenamiento y graficación.

Con la plataforma Arduino se obtuvieron los datos experimentales, los voltajes de los sensores (sensor 3515 y diodo) se amplificaron (circuito amplificador), se calibraron (ecuaciones 3.1.10 y 3.2.1) y se conectaron a los pines analógicos del microcontrolador ATmega-328 (Pin 1 y Pin 3 de Arduino). Las señales de entrada se digitalizaron y la plataforma Arduino se programó para que estructure los datos en tres columnas:

- La primera columna (variable tiempo) se refiere a la duración de lectura que hace el microcontrolador de cada dato; esta variable sirvió como contador de tiempo para el experimento.
- La segunda columna es el voltaje que se midió del sensor Hall 3515, la señal antes de salir del microcontrolador se convirtió de voltaje a campo magnético (Gauss).
- La tercera columna es el voltaje del diodo, las mediciones del diodo también se calibraron y antes de digitalizarse se hizo la conversión de voltaje a temperatura (K).

Las tres variables se acomodaron en un arreglo a tres columnas con n renglones, siendo n el contador (se le declaró como una variable entera e inicializada en cero). Con el contador se determinó el tiempo de colecta de datos, con este tiempo se infirió el número de datos que se tomaron en cada región de mapeo para el arillo superconductor.

A continuación se muestra el diagrama de flujo para el experimento.

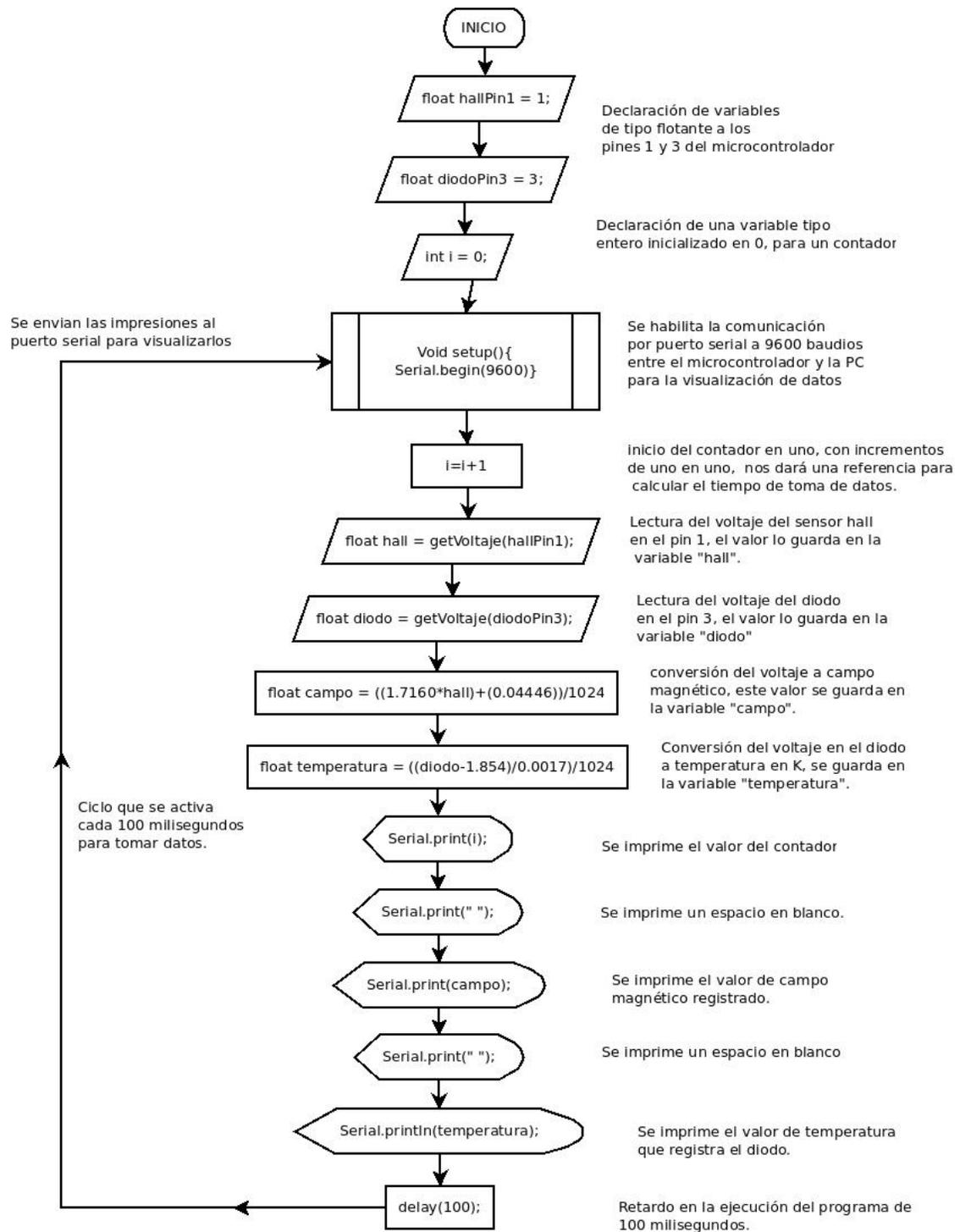


Figura 3.3.3: Diagrama de flujo de la programación de Arduino, utilizado para tomar los datos de los sensores.

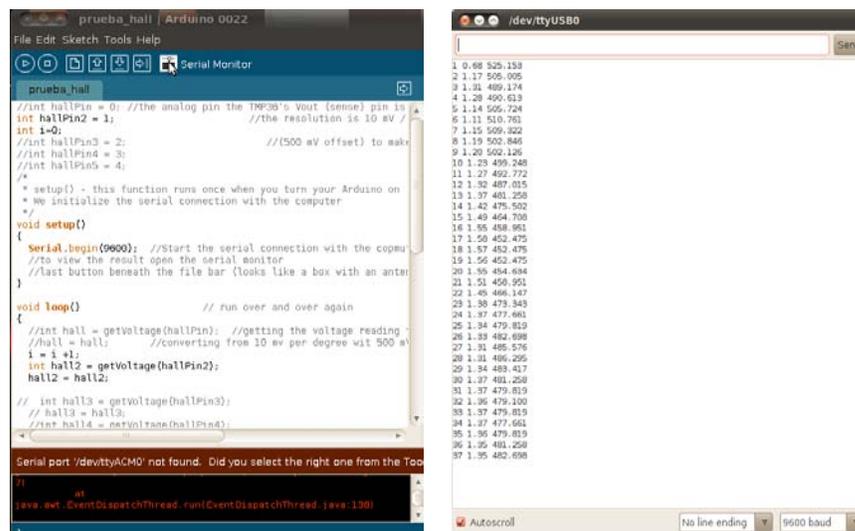
En el IDE^{VI} de Arduino, se hizo la visualización de datos recolectados usando el puerto serial a 9600 baudios^{VII}; estos datos pueden guardarse en un archivo para su análisis.

^{VI}Ambiente de desarrollo integrado conocido por sus siglas en Inglés IDE (Integrated Development Environment).

^{VII}El baudio es una unidad usada en telecomunicaciones para medir la velocidad de transmisión de datos en una línea digital.

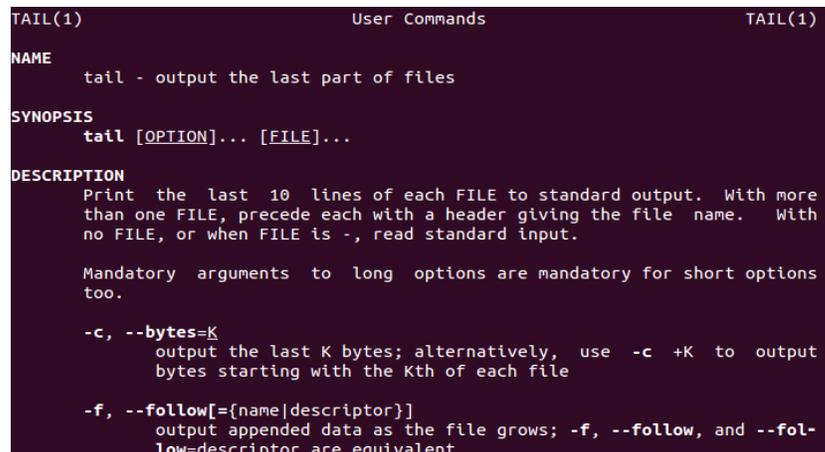
Los datos se guardaron en un archivo despues de leer directamente la información que cruza por el puerto USB de la computadora la información se interceptó antes de llegar al visualizador del IDE. La forma de obtener este flujo de datos depende del sistema operativo utilizado. Para realizar el experimento se usó el sistema operativo GNU/Linux. El Kernel de Linux cuenta con comandos para hacer monitoreo de periféricos, es decir puede leer y desplegar el tráfico de los diversos puertos de entrada y salida de la computadora así como los componentes de hardware.

El comando “**tail**” despliega en pantalla las 10 últimas líneas de ejecución de un archivo; este comando se usó para leer el flujo de datos del puerto USB conectado a la plataforma Arduino.



(a)

(b)



(c)

Figura 3.3.4: a) IDE de Arduino. Dentro de este ambiente de desarrollo se escribió el programa ejecutado por el microcontrolador. b) Visualizador de flujo de datos del IDE de Arduino. c) Características del comando “tail”, con diferentes sintaxis, se observa la opción “tail -f”, que despliega continuamente los datos que se leen del puerto USB.

En el sistema operativo GNU/Linux se usó la terminal para localizar las conexiones de los diferentes puertos, las cuales fueron localizadas en el directorio “/dev”. Se generó un listado en este directorio ubicando la conexión “ttyUSB0” de Arduino; a este archivo se aplicó el comando “tail” para mostrar en la pantalla el flujo de datos que pasa por el puerto USB y, para almacenarlos en un archivo, se usó una función de concatenación de GNU/Linux. La sintaxis “tail -f /dev/ttyUSB0 > archivo.dat” direcciona el flujo de datos que pasan por el puerto USB a un archivo en la computadora.

```

huaccra@ollin:/dev$ tail -f ttyUSB0
1410 1.50 461.110
1411 1.40 473.343
1412 1.37 476.221
1413 1.40 474.782
1414 1.40 474.782
1415 1.36 479.100
1416 1.43 470.465
1417 1.53 456.073
1418 1.66 440.242
1419 1.70 435.205
1420 1.60 449.597
1421 1.49 462.549
1422 1.40 474.063
1423 1.43 470.465
1424 1.42 472.623
1425 1.40 474.063
1426 1.38 475.502

```

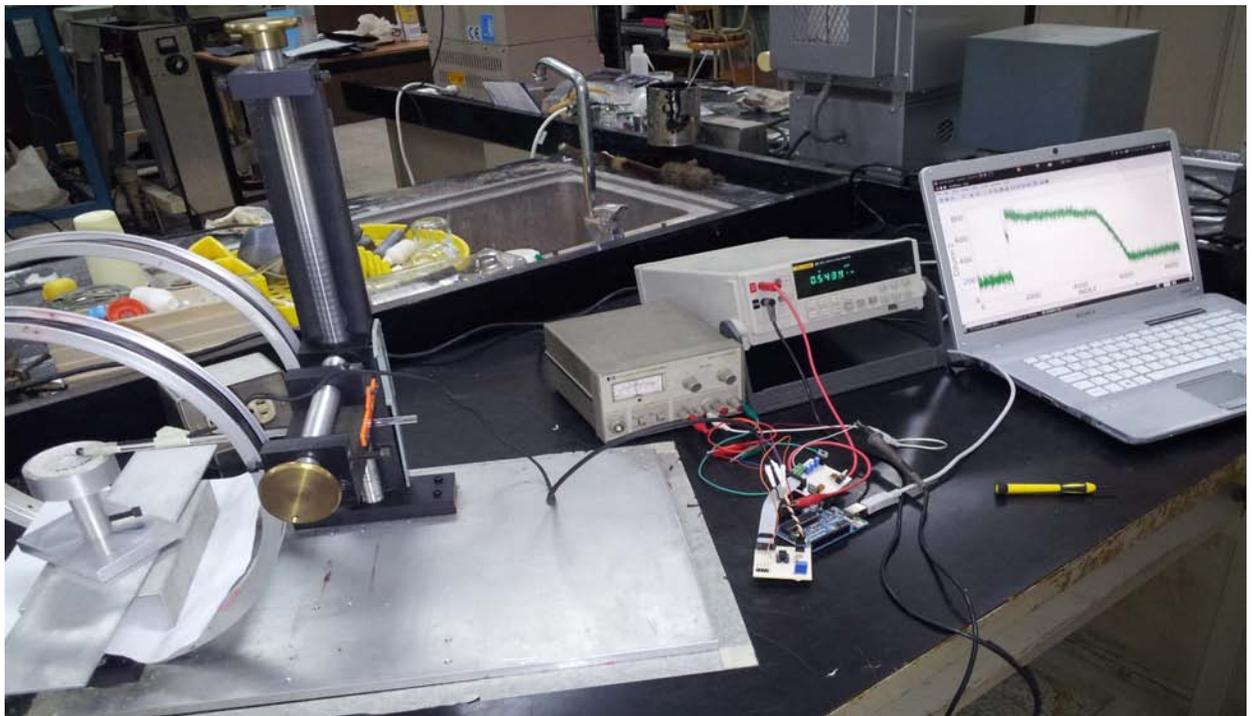
(a)

```

huaccra@ollin:/dev$ tail -f ttyUSB0 > /home/huaccra/Escritorio/experiemnto-1.dat

```

(b)



(c)

Figura 3.3.5: a) Al usar el comando “tail -f” aplicado al puerto USB se desplegaron los datos experimentales en tres columnas (contador, campo magnético y temperatura). b) Tráfico de datos del puerto USB redireccionado a un archivo con terminación “.dat”, se usó “>” para concatenar. c) Diseño experimental completo, primeras visualizaciones del campo magnético del arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ en tiempo real.

El archivo con terminación “.dat” se graficó en tiempo real usando el software libre para análisis de datos KST^{VIII}. Este programa lee el archivo de datos y los grafica al mismo tiempo que está colectándose. En la figura 3.3.6 se muestra un ejemplo. En ambas gráficas el tiempo de muestreo está en el eje horizontal. El eje vertical de la primera gráfica cuantifica el número de pasos del microcontrolador correlacionado a los valores del campo magnético generado por el superconductor mientras que la segunda gráfica muestra el comportamiento de la temperatura. Se usó un filtro paso bajas del programa KST para suavizar los datos.

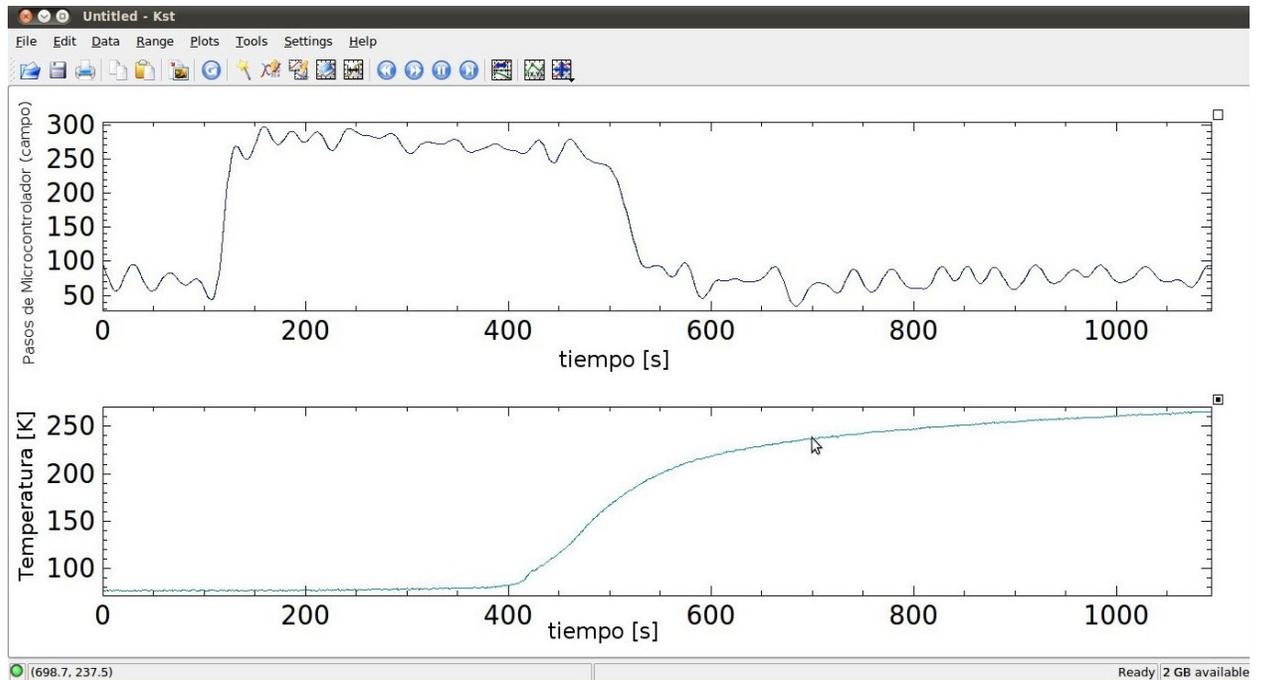


Figura 3.3.6: Gráfica a tiempo real de los sensores de campo magnético y temperatura. Elaborado en el programa KST.

^{VIII}<https://kst-plot.kde.org/>

Capítulo 4

Experimentación y análisis de resultados

Este capítulo se explica la aplicación del aparato que se creó, en diversos experimentos para comprobar su óptimo funcionamiento. El dispositivo se usó para visualizar el comportamiento del campo magnético generado por una supercorriente inducida en el arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ con un imán de neodimio ($25kG$).

Las variaciones de la magnitud de campo magnético se determinaron al medir los valores a lo largo de las direcciones diametrales sobre el plano paralelo a la superficie del arillo y así como a lo largo del eje de simetría perpendicular a su plano (eje principal). Mediante la aplicación de la ley de Biot-Savart para un toroide se obtuvo el valor de la supercorriente atrapada.

4.1. Pruebas iniciales

Para comprobar el funcionamiento del aparato de medición que se diseñó se hizo un muestreo experimental. Se verificó el funcionamiento de los sistemas que lo comprenden (posicionadores, amplificación y recolección de datos).

En forma manual (se giró el tornillo sin fin) se movió horizontalmente el sensor Hall. Se hizo el mapeo de campo magnético a una altura constante de 8.2 mm sobre la superficie del arillo superconductor; se recolectaron los valores del campo magnético durante el recorrido del sensor. Con las mediciones se elaboró una gráfica del perfil (curva de nivel) del campo magnético generado

por la supercorriente.

4.1.1. Experimentación

Sistema experimental de posicionamiento.

Se encendieron los sistemas electrónicos (circuitos amplificadores y sensores) y de adquisición de datos (Arduino y computadora) una hora de antes, porque el sensor Hall debe estabilizar sus mediciones respecto a la temperatura ambiente. El dispositivo experimental se alineó de tal forma que al encender las bobinas de Helmholtz, éstas anularon la componente de campo magnético terrestre en la región de experimentación. A continuación se movieron los posicionadores usando los tornillos sin fin, ubicando la punta Hall en el centro geométrico del arreglo, para su calibración.

El sensor de campo magnético tiene un área de sensibilidad donde se genera el efecto Hall; esta área se orientó paralela a la superficie del arillo. En esta posición el sensor Hall no midió las componentes de campo generado por la bobina y solamente tomó las lecturas que provienen del campo magnético que expone el arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Los valores captados por el sensor Hall en el centro del arreglo antes de introducir el arillo en estado superconductor, se calibraron a cero usando el restador del circuito amplificador. En este experimento se modificó el programa creado en el capítulo 3 para recolectar datos, la modificación consistió en cambiar el tiempo de recolecta; el programa anterior recolectó los datos cada cien milisegundos (diez datos por segundo) en cambio, en este experimento fueron registrados cada diez milisegundos (cien datos por segundo).

Inducción de corriente al superconductor.

Se colocó el arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ al interior del porta muestra, se vertió nitrógeno líquido al interior llevando la muestra a estado superconductor. El porta muestra se mantuvo con nitrógeno líquido constantemente, para no perder el estado superconductor del arillo durante las mediciones.

Con un imán de neodimio se indujo una corriente superconductora al arillo $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (el imán solo se acercó momentáneamente) esta corriente genera un campo magnético en las vecindades del arillo. El porta muestra se colocó al centro de las bobinas de Helmholtz y bajo el sensor Hall.

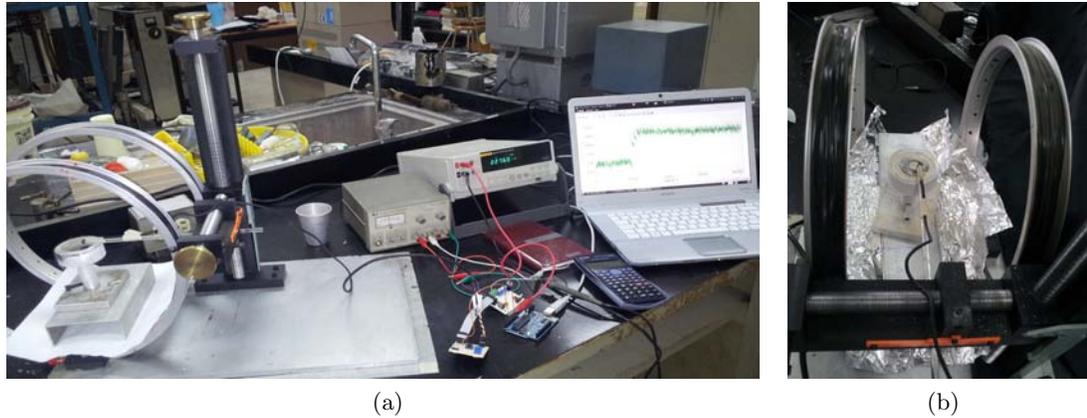


Figura 4.1.1: a) *Aparato experimental que contiene al sistema de posicionamiento y de registro de datos.* b) *Porta muestra en el centro geométrico del sistema de bobinas, contiene al arillo en estado superconductor con corriente inducida.*

Medición de campo magnético y recolecta de datos

Con los tornillos sin fin se trasladó la punta Hall a un extremo del eje horizontal del riel del posicionador, se mantuvo el eje vertical sin variar la altura (8.2 mm de la muestra). El tornillo sin fin del eje horizontal se movió continuamente llevando el sensor Hall de un extremo a otro, cruzando diametralmente al arillo superconductor y midiendo a su paso los valores de campo magnético. Los datos se guardaron automáticamente en un archivo en la computadora.



Figura 4.1.2: *Barrido horizontal del sensor Hall para mapear el campo magnético generado por el arillo superconductor.*

4.1.2. Análisis

Los datos se analizaron y graficaron usando el software libre R¹. El gráfico obtenido al hacer el barrido horizontal sobre el arillo superconductor se muestra en la figura 4.1.3.

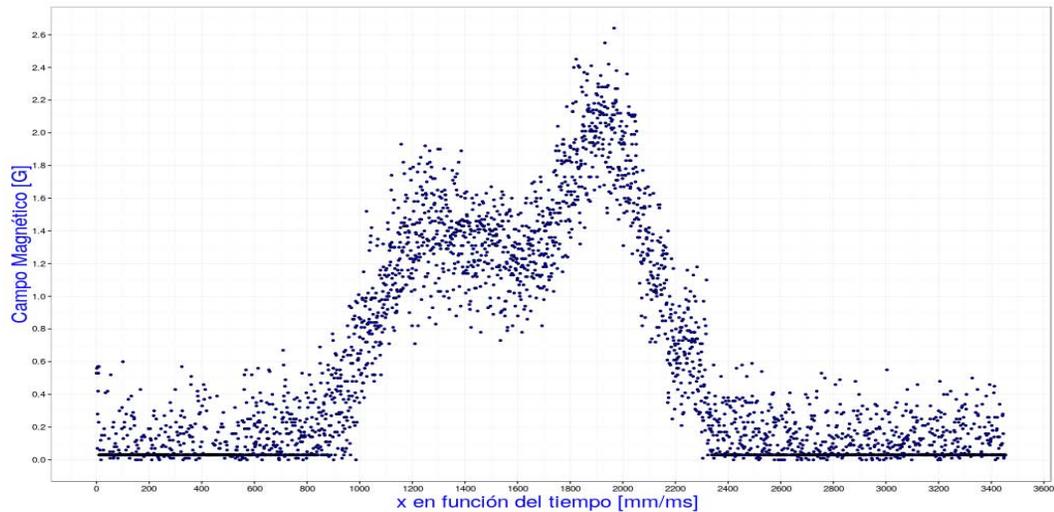


Figura 4.1.3: Gráfica del campo magnético, se observa la variación del campo magnético del superconductor.

4.1.3. Resultados

En este experimento se observó el perfil del campo magnético emanado por el arillo. El perfil exhibe máximos y un mínimo, los máximos de la gráfica se ubican en el disco de material superconductor del arillo por el que pasa el sensor Hall, el mínimo se ubicó en la región sin material al interior del arillo (hueco del centro). Se observó que los valores de campo magnético en las regiones con material del arillo superconductor, no tienen la misma magnitud (los máximos de la gráfica son diferentes).

Los datos del perfilograma mostraron un campo magnético inhomogéneo. La no homogeneidad del campo magnético probablemente se deba a heterogeneidades en la muestra en la que se producen regiones de vorticidad en el arillo, alterando la simetría esperada del campo magnético.

¹Un lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico
<https://www.r-project.org/>

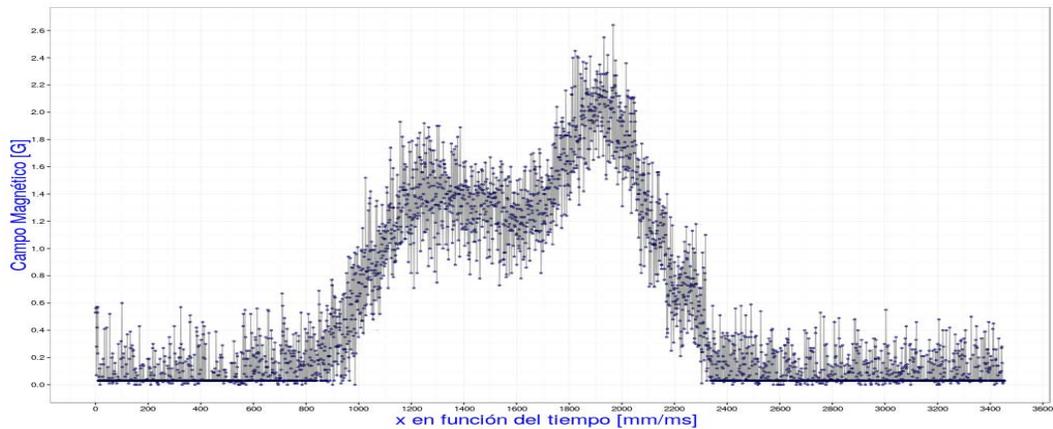


Figura 4.1.4: *En esta gráfica se observa el error de la señal.*

4.2. Mapeo del campo magnético respecto a la posición

Con el objeto de determinar con precisión el valor promedio de campo magnético en diferentes posiciones, se hizo un muestreo cada 2 mm recorriendo horizontalmente la superficie del arillo superconductor con el sensor Hall, con lo cual se obtuvieron veinte valores del campo magnético producido por la muestra superconductora. El recorrido del sensor se hizo a una altura constante de 8.2 mm respecto a la superficie de la muestra.

4.2.1. Experimentación

Se repitieron los dos primeros pasos experimentales de la sección 4.1.1 que fueron encender la computadora, el circuito y el sensor Hall (sistema experimental de posicionamiento), seguidamente se le indujo corriente al arillo superconductor y se alineó el posicionador con el sensor (inducción de una supercorriente en el superconductor). Se reprogramó el microcontrolador cambiando el tiempo de recolecta de datos a un dato cada cien milisegundos (diez datos por segundo).

Medición de campo magnético y recolecta de datos

El sensor se situó en uno de los extremos del eje horizontal y se movió cada dos milímetros (en cada punto se detuvo para registrar los datos) hasta completar el barrido del arillo. A diferencia del experimento anterior donde la recolecta de datos se hizo de manera continua (sin detener el sensor y guardar los registros en un solo archivo), en este experimento cada vez que el sensor Hall se

detuvo se generó un archivo con cuatrocientas mediciones; el sensor se mantuvo encendido durante todo el proceso.

Cuando el barrido finalizó se rotó el portamuestra 60° ; en esta posición se realizó un nuevo barrido horizontal, obteniendo diecinueve puntos de medición (cada 2 mm), con el objetivo de obtener el perfil de campo magnético de otra región del arillo superconductor y compararlo con el anterior.

4.2.2. Análisis

Se analizó cada archivo de datos y por cada uno se calculó el promedio estadístico y el error asociado de las cuatrocientas mediciones de campo magnético. Estos valores están en función de la posición de recorrido en el eje horizontal, se graficó el valor de campo magnético del arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ respecto a la distancia de recorrido del sensor. Se agregó una línea de tendencia y con esto se observó la distribución del campo magnético.

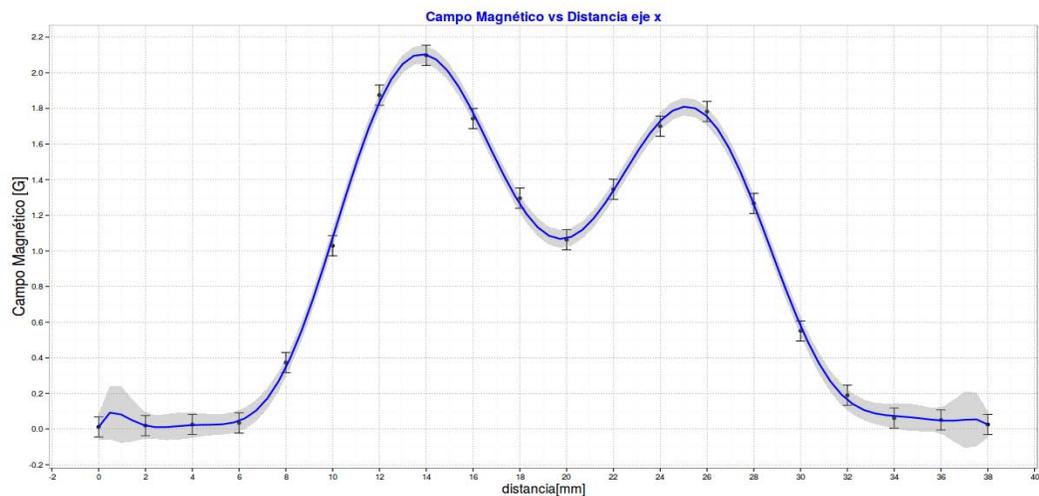


Figura 4.2.1: *Censado de campo magnético cada 2 mm; se efectuó un barrido diametral del arillo superconductor. Para bosquejar el campo magnético del superconductor, se incluyó una línea de tendencia (azul).*

La figura 4.2.1 representa el primer barrido, después volvió a colocarse el sensor a su punto de partida inicial y se rotó 60° sobre su eje el portamuestra en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Se censó en diecinueve puntos del arillo superconductor (cada 2 mm) al igual que en el primer barrido, se hizo el mismo tratamiento a los datos. Por último se graficó el campo magnético respecto

a la distancia de barrido. La figura 4.2.2 muestra los puntos graficados así como la línea de tendencia de los datos.

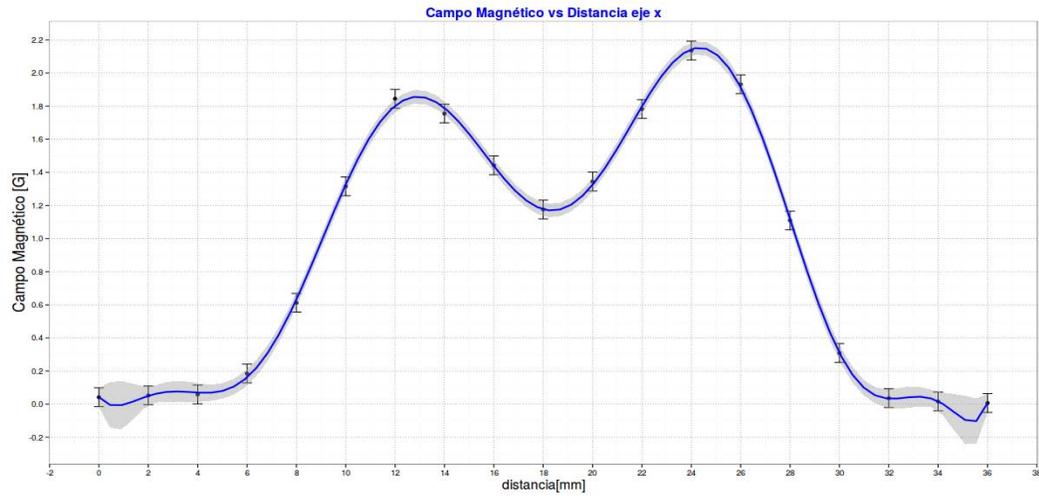


Figura 4.2.2: *Barrido diametral del arillo superconductor posterior a rotar la muestra 60°.* En azul la línea de tendencia de los datos.

4.2.3. Resultados

Con este experimento se comprobó que el aparato diseñado tiene la capacidad de mapear a diferentes perfiles el campo magnético del arillo superconductor en un plano (cada perfil tomado a un ángulo distinto), de tal forma que se podría construir series de planos fase para diferentes alturas (al mover el eje vertical del posicionador).

Al comparar las gráficas en las figuras 4.1.3 y 4.2.2 se confirma que en las regiones en las que hay muestra y por donde atravesó el sensor Hall se tiene un máximo en los valores de campo magnético, contrario al centro del anillo superconductor (región sin muestra) donde se observa un mínimo. Los dos máximos son diferentes, uno es de mayor magnitud, lo que confirma que el arillo no es homogéneo, es decir presenta regiones de mayor vorticidad [46]. La segunda gráfica se obtuvo mediante una rotación de 60° a la muestra sobre su eje, aquí también se reproduce el patrón de dos máximos y un mínimo en los valores de campo magnético, pero los valores son diferentes respecto al primer barrido.

4.3. Determinación de la corriente inducida en un arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

Para determinar el valor de la supercorriente inducida se midió la magnitud del campo magnético a una distancia de 8.2 mm de la superficie de la muestra sobre el eje de simetría principal del arillo. El valor aproximado de la supercorriente se obtuvo aplicando la ley de Biot-Savart para un toroide.

4.3.1. Experimentación

A continuación se repitieron los pasos experimentales de la sección 4.1.1 para tener el arillo en estado superconductor y con supercorriente inducida. Se calibró el sensor Hall con el circuito amplificador. Al igual que el experimento de la sección 4.2.1, el registro de datos se hizo cada cien milisegundos, para tener diez datos por segundo.

A diferencia de los experimentos anteriores en donde el sensor se llevó a un extremo del riel horizontal, en este caso el sensor Hall se colocó en el centro geométrico del arreglo a una distancia de 8 mm de la superficie y durante toda la toma de datos el sensor se quedó en la misma posición (distancia constante).

Se tomaron datos en un periodo de 15 minutos, tiempo necesario para recolectar un equivalente a nueve mil registros de campo magnético en un solo punto (eje central del arillo); estos datos se guardaron en un archivo para su análisis.

4.3.2. Análisis

Los datos se analizaron de manera estadística, se obtuvo el valor promedio del campo magnético en el eje central del arillo a una distancia de 8.2 mm de la superficie (9.75 mm del centro geométrico del arillo):

| |
|--------------------------|
| Campo magnético promedio |
| $(1.666 \pm 0.217)G$ |

Tabla 4.3.1: *Valor de campo magnético promedio al centro del arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.*

Se aplicó la ley de Biot-Savart para un toroide [20]:

$$B = \frac{\mu_0 i}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{\sqrt{(2R)^2 + h^2}} \quad (4.3.1)$$

donde R_1 es el radio menor del toroide, R_2 el radio mayor, h la altura respecto al centro del toroide, i la corriente y μ_0 la constante de permeabilidad magnética. Al integrar la expresión 4.3.1 (apéndice B) se obtuvo la ecuación teórica para el campo magnético de un toroide respecto a una corriente que circula en él:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2(R_2 - R_1)} \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right) \quad (4.3.2)$$

de la ecuación 4.3.2 se despejó la corriente i :

$$i = \frac{2B(R_2 - R_1)}{\mu_0 \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right)} \quad (4.3.3)$$

Se sustituyó el valor del campo magnético de la tabla 4.3.1 en la ecuación 4.3.3 y se aproximó el valor de corriente circulante por el arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (apéndice B).

| |
|------------------------|
| Corriente en el arillo |
| $(3.179 \pm 0.414) A$ |

Tabla 4.3.2: *Valor de la corriente en el arillo aplicando la ley de Biot-Savart en un toroide*

4.3.3. Resultados

Con la magnitud de campo magnético que se determinó a una distancia de 9.75 mm (se sumó la mitad del espesor del arillo) del centro geométrico del arillo superconductor, se calculó la magnitud de la supercorriente a partir de la ley de Biot-Savart para un toroide, se obtuvo un valor aproximado de 3.179 A (apéndice B). Este valor se puede comparar con el obtenido en el estudio “Current Inducting Techniques for Superconducting Rings” que fue de 11.36 A en un arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ usando la ley de Biot-Savart [20], este resultado lo obtuvieron en un arillo con dimensiones diferentes y técnica experimental diferente a la usada en este trabajo.

4.4. Atenuación del campo magnético generado por la supercorriente a lo largo del eje de simetría principal del arillo

Posteriormente se determinó la atenuación del campo magnético del superconductor respecto a la distancia, al alejar el sensor Hall del centro del arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$.

4.4.1. Experimentación

Se repitieron los primeros pasos experimentales de la sección 4.3.1, hasta centrar al sensor Hall sobre la superficie del arillo de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, la muestra se llevó a estado superconductor con corriente inducida. Se modificó el tiempo de registro de datos del programa, igual que la sección 4.2.1 (diez datos cada segundo).

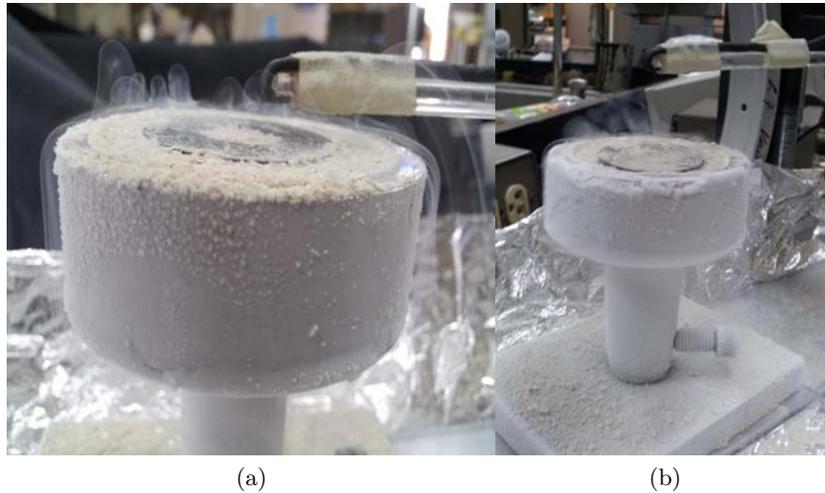


Figura 4.4.1: *Barrido vertical en el centro del arillo superconductor. a) Ubicación del sensor Hall en el centro del arillo a 9.75 mm del centro geométrico. b) Desplazamiento vertical del sensor Hall.*

Con el tornillo vertical se movió el sensor alejándolo del centro del arillo. En el trayecto vertical se realizaron 16 mediciones de campo magnético, cada medición constó de 400 datos y los archivos se guardaron en la computadora.

4.4.2. Análisis

Los datos se analizaron estadísticamente, se obtuvo el promedio de campo magnético (400 medidas) para cada altura. Se graficaron los valores promedio de campo magnético

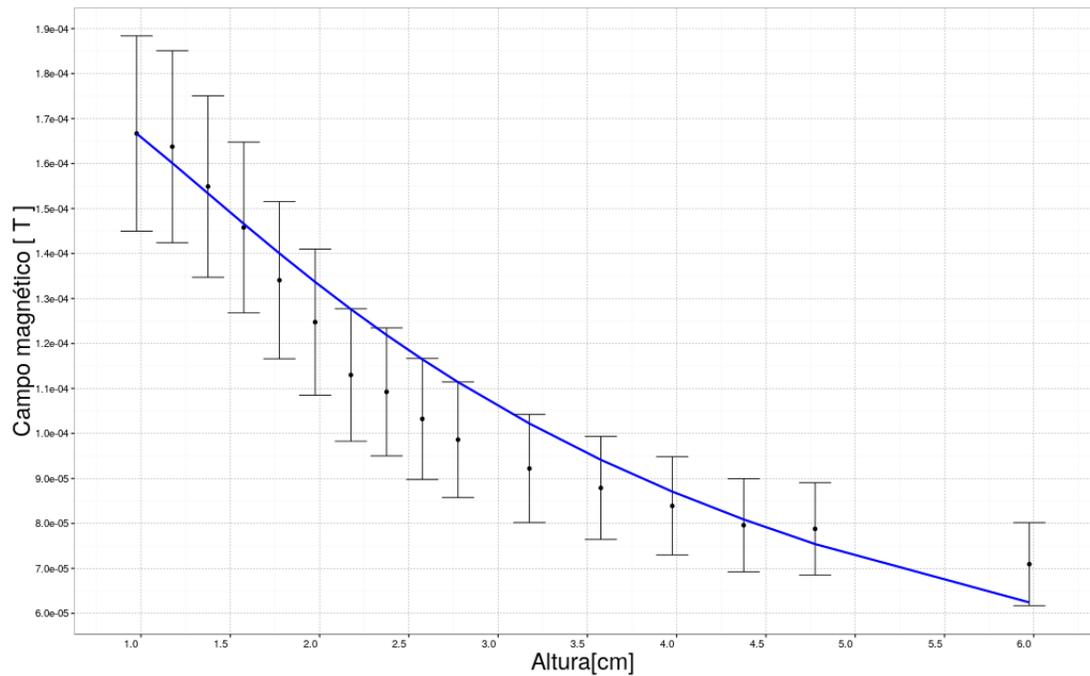


Figura 4.4.2: Gráfica de los datos experimentales; campo magnético del superconductor respecto a la elevación, se comparó con la curva teórica de la ley de Biot-Savart para un toroide por donde circula una corriente de 3.179 A (línea azul).

4.4.3. Resultados

Como el arillo superconductor no es un toroide, utilizar la ley de Biot-Savart debe conducir, en el mejor de los casos, a un valor aproximado de la magnitud de la supercorriente inducida. Una forma de saber qué tanto difiere el comportamiento del arillo con respecto al del toroide, es determinando la atenuación del campo magnético generado conforme el sensor Hall se aleja del arillo a lo largo de su eje de simetría principal. En la gráfica 4.4.2 se muestran los datos experimentales obtenidos (puntos) así como la curva teórica de la ecuación 4.3.2 de Biot-Savart (línea continua azul), calculada a una corriente de 3.179 A (sección 4.3.2). Se puede inferir que el efecto producido por el hecho de que la sección transversal (rectangular) del arillo no sea circular es pequeño a la distancia.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se logró sintetizar con éxito un arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, el cual se utilizó para mapear el campo magnético generado por una corriente inducida en él. Para cumplir con estos propósitos se diseñaron y armaron diferentes elementos que se enuncian a continuación:

- a) Un dispositivo para soportar a la muestra superconductora con la posibilidad de anular la componente horizontal del campo magnético terrestre; el dispositivo incluye un soporte móvil bidimensional que soporta a un sensor Hall.
- b) Se diseñó y armó el circuito requerido para amplificar las señales del sensor Hall comercial de bajo costo y registrarlas en una computadora.
- c) Se diseñó y armó el circuito requerido para medir y registrar la temperatura de la muestra utilizando un diodo semiconductor de silicio.

Los resultados obtenidos muestran que:

- a) El campo magnético generado no es simétrico respecto al eje principal del arillo. Una causa probable de este comportamiento puede ser que, debido a una falta de homogeneidad del superconductor como un todo, es posible que en las inhomogeneidades quede atrapado flujo magnético que rompa la simetría.
- b) El comportamiento de la magnitud del campo magnético para el arillo superconductor de $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ sigue esencialmente la ley de Biot-Savart para un toroide.

Apéndice A

Bobina de Helmholtz

Una bobina de Helmholtz es un sistema de dos bobinas circulares de radio R que se encuentran separadas a una distancia igual a su radio, donde el centro geométrico dentro del acomodo dista $\frac{R}{2}$ de cada bobina como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 5.0.1: Bobinas de Helmholtz

Para anular la componente horizontal del campo magnético terrestre, dependemos del número de vueltas de alambre en cada bobina (N) y la corriente circulante (i) para generar un campo magnético que la anule.

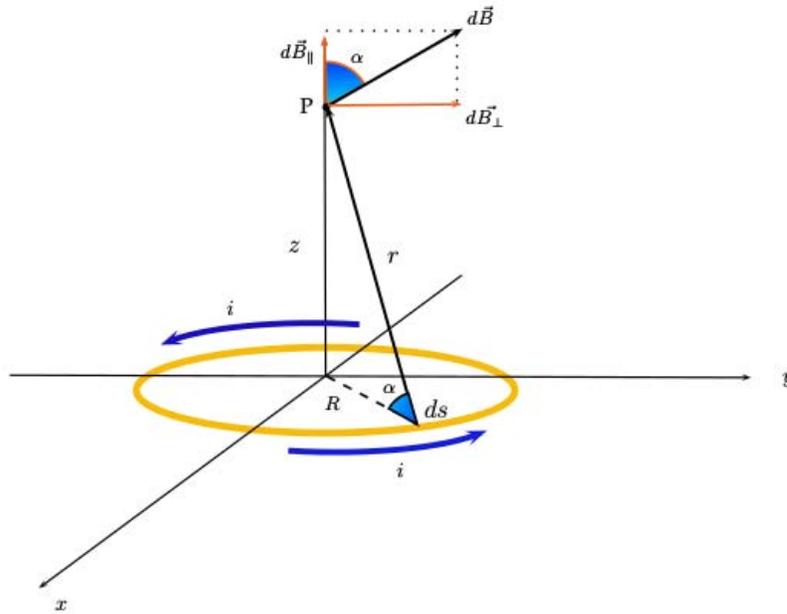


Figura 5.0.2: diagrama de una espira

Comenzaremos calculando el campo magnético generado por una corriente que circula en una espira circular de alambre por lo cual sabemos que:

$$\vec{B} = \int d\vec{B}_{||} \quad (5.0.1)$$

también por la ley de Biot-Savart tenemos la siguiente expresión:

$$d\vec{B} = d\vec{s} \frac{\mu_0 i \text{sen}(90^\circ)}{4\pi r^2} \quad (5.0.2)$$

del diagrama vectorial tenemos:

$$d\vec{B}_{||} = d\vec{B} \cos(\alpha) \quad (5.0.3)$$

combinando las ecuaciones 5.0.2 y 5.0.3 obtenemos:

$$\frac{1}{\cos(\alpha)} d\vec{B}_{||} = \frac{\mu_0 i \text{sen}(90^\circ)}{4\pi r^2} d\vec{s} \quad (5.0.4)$$

Despejando $d\vec{B}_{||}$ de la ecuación y sustituyendo $\cos(\alpha) = \frac{R}{r}$, se obtiene una relación para la diferencial de campo magnético en una sola espira:

$$d\vec{B}_{||} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{R}{r^3} d\vec{s} \quad (5.0.5)$$

si tenemos una bobina con N espiras modificaremos la expresión:

$$d\vec{B}_{||} = \frac{\mu_0 i R}{4\pi r^3} N d\vec{s} \quad (5.0.6)$$

sabemos que $r = \sqrt{R^2 + z^2}$, lo sustituimos en la expresión, integramos de ambos lados para obtener la magnitud de campo:

$$\int dB = \frac{\mu_0 i R N}{4\pi (R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \int ds \quad (5.0.7)$$

$$\int dB = \frac{\mu_0 i R N}{4\pi (R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} (2\pi R)$$

la expresión para la magnitud del campo magnético de una bobina a una distancia z queda como:

$$dB = \frac{\mu_0 i R^2 N}{2(R^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5.0.8)$$

si nos vamos acercando al centro de la espira ($z \rightarrow 0$) es decir $z = 0$ la expresión para una bobina de N espiras es:

$$B = \frac{\mu_0 N i}{2R} \quad (5.0.9)$$

El arreglo de bobinas de Helmholtz consta de dos bobinas idénticas a una distancia R entre ellas:

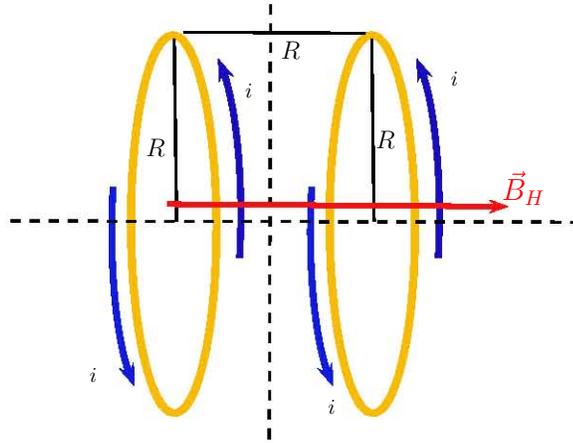


Figura 5.0.3: Diagrama de bobinas de Helmholtz

el centro del arreglo queda determinado como $z = \frac{R}{2}$:sustituyendo en la ecuación 5.0.9 y multiplicando por dos:

$$B_H = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 N i}{R} \quad (5.0.10)$$

con esta expresión construimos las bobinas para el experimento.

Apéndice B

Determinación del campo magnético (toroide)

Para determinar el campo magnético de un toroide por el que circula una corriente, esta dado por:

$$B = \frac{\mu_0 i}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{\sqrt{(2R)^2 + h^2}} \quad (5.0.11)$$

integrando la ecuación:

sea $x = 2R \Rightarrow dx = 2dR$ entonces $dR = \frac{1}{2}dx$

$$B = \frac{\mu_0 i}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{\sqrt{x^2 + h^2}} \quad (5.0.12)$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{R_2 - R_1} \ln(x + \sqrt{x^2 + h^2}) \Big|_{R_1}^{R_2} \quad (5.0.13)$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{R_2 - R_1} [\ln(x + \sqrt{4R_2^2 + h^2}) - \ln(x + \sqrt{4R_1^2 + h^2})] \quad (5.0.14)$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2(R_2 - R_1)} \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right) \quad (5.0.15)$$

de esta última expresión despejamos la corriente i :

$$i = \frac{2B(R_2 - R_1)}{\mu_0 \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right)} \quad (5.0.16)$$

Al conocer los valores de las variables que forman la expresión 5.0.16, se programó en R la expresión y se obtuvo el cálculo de la corriente i . Seguidamente se muestra el programa para la obtención del valor de la corriente.

```
#####
#####calculo de corriente de campo magnético####
#####
mu <- 1.26e-6
#Valores de campo magnético
B <- 0.00016666795367
dB <- 0.21688944980024e-4
porc_dB <- (dB*100)/B
porc_dB

## [1] 13.01327

####dimensiones del arillo superconductor
# Radio mayor
R <- 1.6264e-2
dR <- 1.27e-6
# Radio menor
r <- 6.724e-3
dr <- 1.27e-6
#espesor del arillo
h <- 0.009754
dh <- 1.27e-6

dif <- (R - r)
raiz_1 <- sqrt((4 * R^2) + h^2 )
raiz_2 <- sqrt((4 * r^2) + h^2)
RAD <- 2 * R + raiz_1
rad <- 2 * r + raiz_2
```

```

ln <- log(RAD / rad)

denominador <- mu * ln
numerador <- (2*B) * dif
corriente <- numerador / denominador
corriente

## [1] 3.179508

```

Se obtiene $i = 3.179 A$

Para calcular del error asociado a la corriente sabemos que i es una función de varias variables de la forma:

$$i(B, R_1, R_2, h) \quad (5.0.17)$$

un error de este tipo de funciones se calcula usando:

$$\delta i = \frac{\partial i}{\partial B} \delta B + \frac{\partial i}{\partial R_1} \delta R_1 + \frac{\partial i}{\partial R_2} \delta R_2 + \frac{\partial i}{\partial h} \delta h \quad (5.0.18)$$

derivando parcialmente la función i obtenemos las expresiones:

$$\frac{\partial i}{\partial B} = \frac{2(R_2 - R_1)}{\mu_0 \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right)} \quad (5.0.19)$$

$$\frac{\partial i}{\partial R_1} = \frac{2B}{\mu_0 \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right)} \left[\frac{2(R_2 - R_1)}{\sqrt{4R_1^2 + h^2} \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right)} - 1 \right] \quad (5.0.20)$$

$$\frac{\partial i}{\partial R_2} = \frac{2B}{\mu_0 \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right)} \left[1 - \frac{2(R_2 - R_1)}{\sqrt{4R_2^2 + h^2} \ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right)} \right] \quad (5.0.21)$$

$$\frac{\partial i}{\partial h} = \frac{2(R_2 - R_1)}{\mu_0 \left[\ln\left(\frac{2R_2 + \sqrt{4R_2^2 + h^2}}{2R_1 + \sqrt{4R_1^2 + h^2}}\right) \right]^2} \left[\frac{1}{2R_1 \sqrt{4R_1^2 + h^2} + 4R_1^2 + h^2} - \frac{1}{2R_2 \sqrt{4R_2^2 + h^2} + 4R_2^2 + h^2} \right] \quad (5.0.22)$$

Con las parciales calculadas y sustituyendo estas expresiones en la ecuación 5.0.18 se calculó el error asociado a la corriente.

Se usó los valores del arillo (radios y espesor) así como la medida del campo magnético en su centro.

| | | | | | |
|------------------|--------------------------|------------------------------|------------------|--------------------------|-------------------------|
| $B \pm \delta B$ | Campo | error | $h \pm \delta h$ | Altura | error |
| | $1.666 \times 10^{-4} T$ | $\pm 0.217 \times 10^{-4} T$ | | $9.754 \times 10^{-3} m$ | $1.27 \times 10^{-6} m$ |

| | | | | | |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|
| $R_1 \pm \delta R_1$ | Radio mayor | error | $R_2 \pm \delta R_2$ | Radio menor | error |
| | $6.724 \times 10^{-3} m$ | $1.27 \times 10^{-6} m$ | | $1.6264 \times 10^{-2} m$ | $1.27 \times 10^{-6} m$ |

Se hizo un programa en el lenguaje R para obtener el error asociado a la corriente.

```
#####
##### error de corriente #####
#####
### error por el campo magnético #####
deltaB <- ((2 * dif) / denominador) * dB
deltaB

## [1] 0.4137578

#### error por el radio mayor del arillo #####
deltaR <- (((2 * B) / (mu * ln)) * (1 - ((2 * dif) / (raiz_1 * ln)))) * dR
deltaR

## [1] 0.0002344951

#### error por el radio menor del arillo #####
deltar <- (((2 * B) / (mu * ln)) * (((2 * dif) / (raiz_2 * ln)) - 1)) * dr
deltar

## [1] 0.0001891496

#### error por la altura #####
deltah <- ((2 * B * dif * h) / mu) *
  ((1 / ((2 * r * raiz_2) + (4 * r^2 + h^2)))
  - (1 / ((2 * R * raiz_1) + (4 * R^2 + h^2)))) * dh
deltah

## [1] 4.875642e-05

##### error de corriente #####
delta_I <- deltaB + deltaR + deltar + deltah
delta_I

## [1] 0.4142302
```

```
porcentaje <- (delta_I * 100) / corriente
porcentaje
## [1] 13.02812
```

el error asociado a la corriente es $\delta i = \pm 0.414 A$

Apéndice C

Diseño y planos de posicionador para las piezas de Nylomaq

Los planos de cada pieza del posicionador se diseñaron usando el software SketchUp, el cual usa el lenguaje de programación RUBY. Este software permite modelar objetos de manera tridimensional, los modelos que se diseñan en este programa tienen gran precisión y son compatibles con otros formatos de software de diseño 3D.

El posicionador diseñado tiene varios componentes:

- Guía vertical.
- Base de la guía vertical.
- Cubierta de la guía vertical.
- Guía horizontal.
- Cubierta de la guía horizontal.

Guía vertical

Es una pieza de 30 centímetros de longitud con un canal barrenado que lo atraviesa por el centro longitudinal. Su diseño permite deslizar mediante colas de milano una segunda pieza (**guía horizontal**) por el riel central. Para mover una pieza respecto a otra se rota un tornillo sin fin sujeto a la guía vertical.

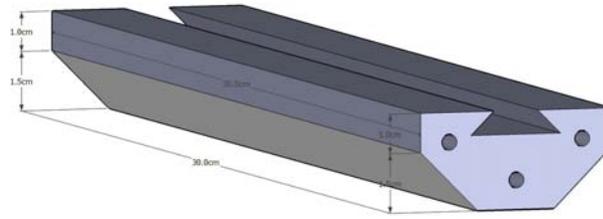


Figura 5.0.4: Eje vertical (riel vertical)

La guía vertical se unió por sus extremos a dos piezas (**base** y **cubierta**) simétricas, estas las piezas se fijaron a la estructura con tornillos allen de $\frac{1}{4}$ de pulgadas.

La base y cubierta cuentan con barrenos de $\frac{5}{8}$ de pulgada al centro y son simétricos entre si. La función de estas dos piezas es el fijar y actuar como eje de rotación para el tornillo sin fin.

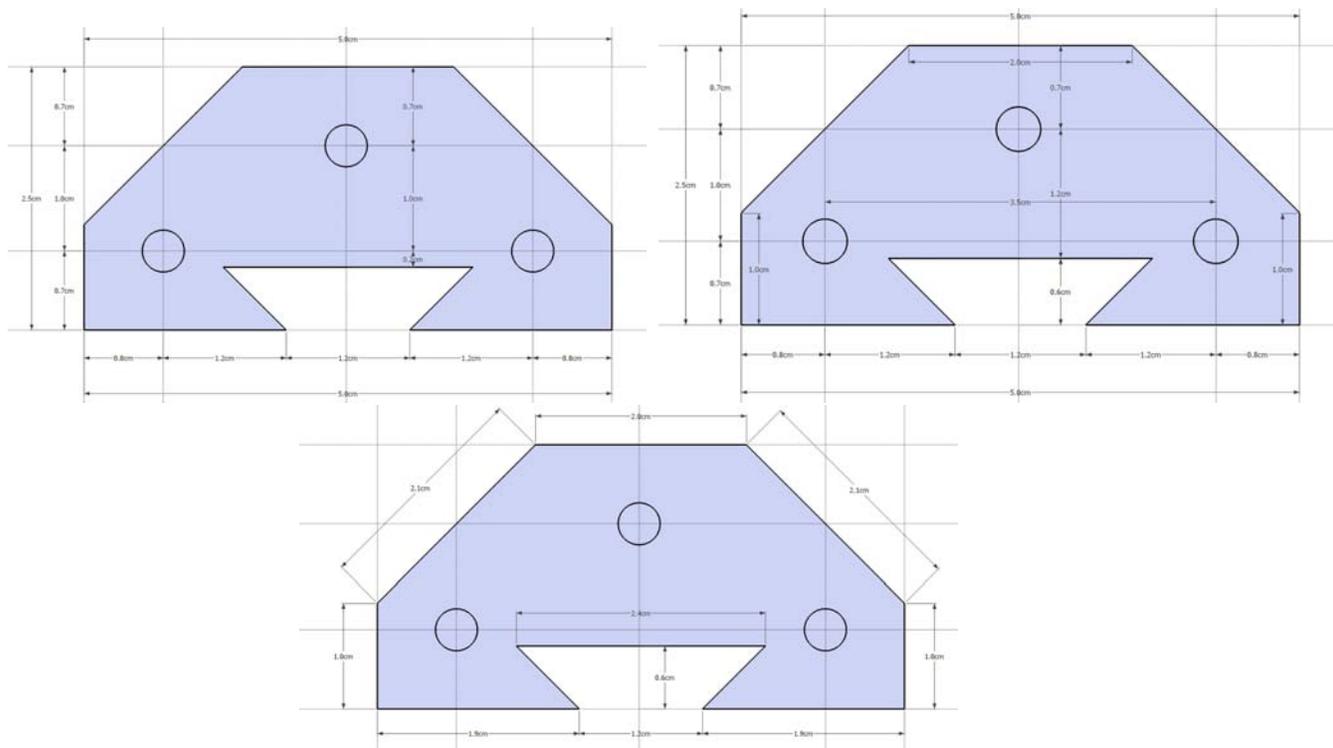


Figura 5.0.5: Medidas de la cara superior e inferior de la guía vertical

Toda esta estructura armada, se fijó a una base (placa de aluminio) con tornillos allen de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

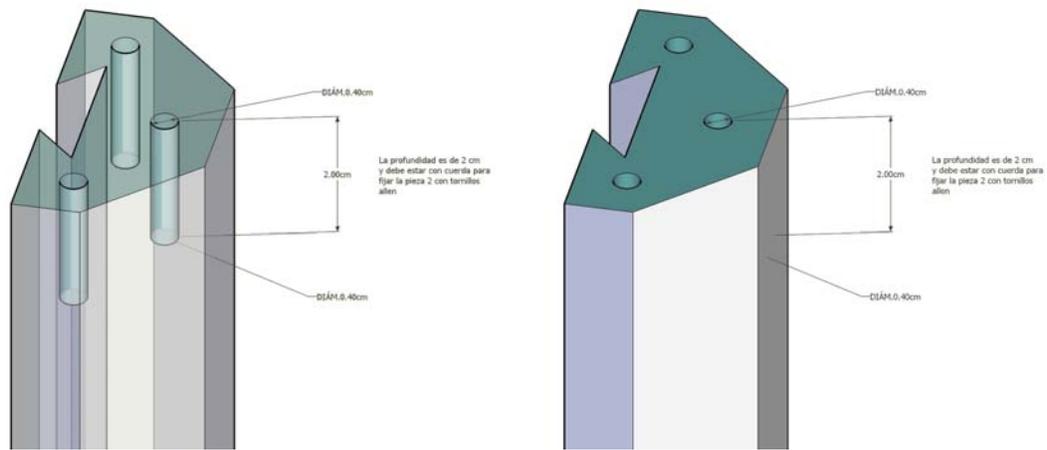


Figura 5.0.6: Diámetro y profundidad de orificios para tornillos Allen

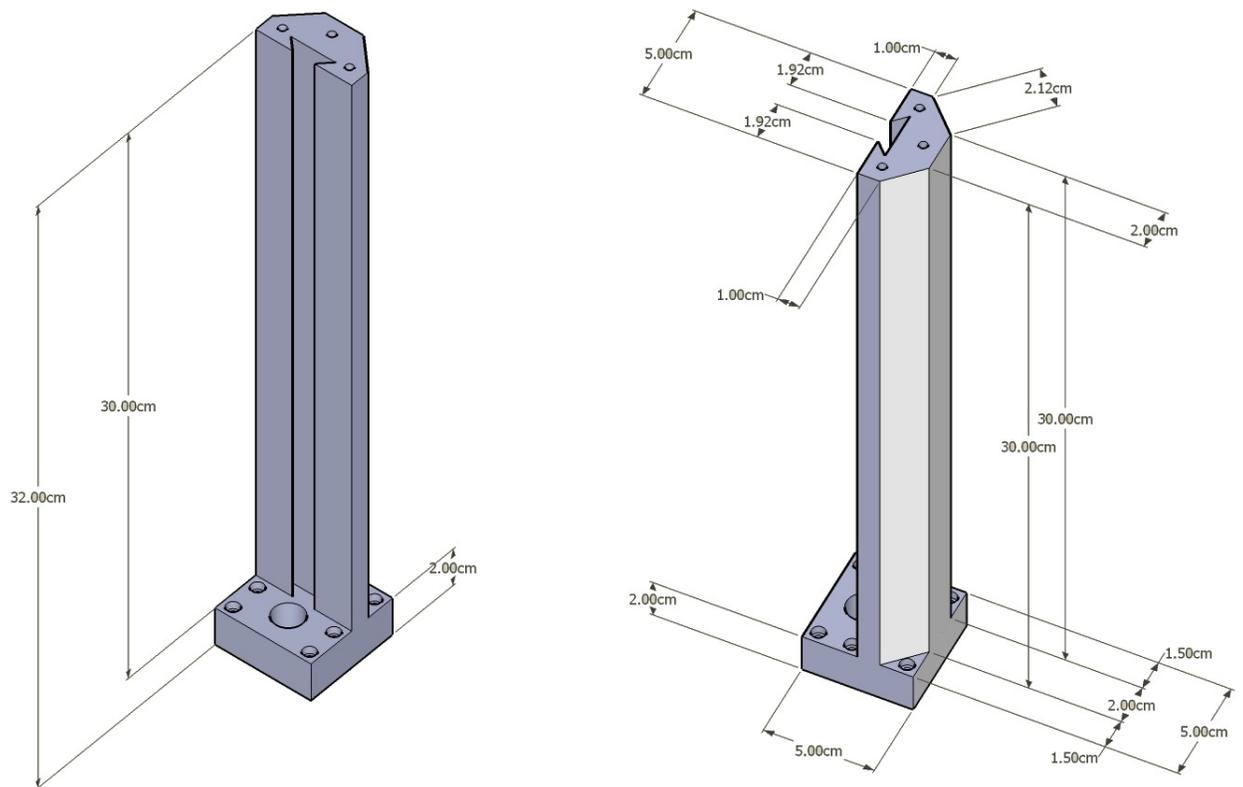


Figura 5.0.7: Base acomplada al riel

Base del riel vertical

Se diseñó una base con un barreno de $\frac{5}{8}$ de pulgadas la que se engrasó para minimizar la fricción del tornillo sin fin que rota en su interior. Con la cubierta del riel vertical se cierra la estructura de tal manera que sirven de eje de rotación al tornillo sin fin.

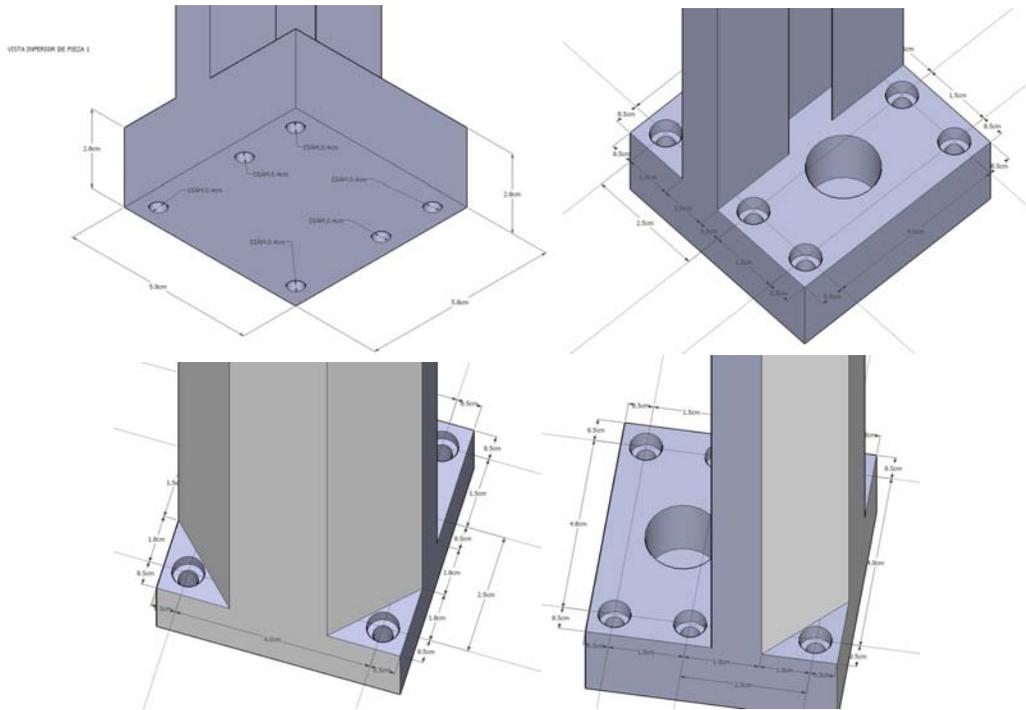


Figura 5.0.8: Dimensiones de la base con orificios para tornillos Allen

El barreno central de $\frac{5}{8}$ de pulgadas no atravesó el material y tiene una profundidad de 1.8 cm.

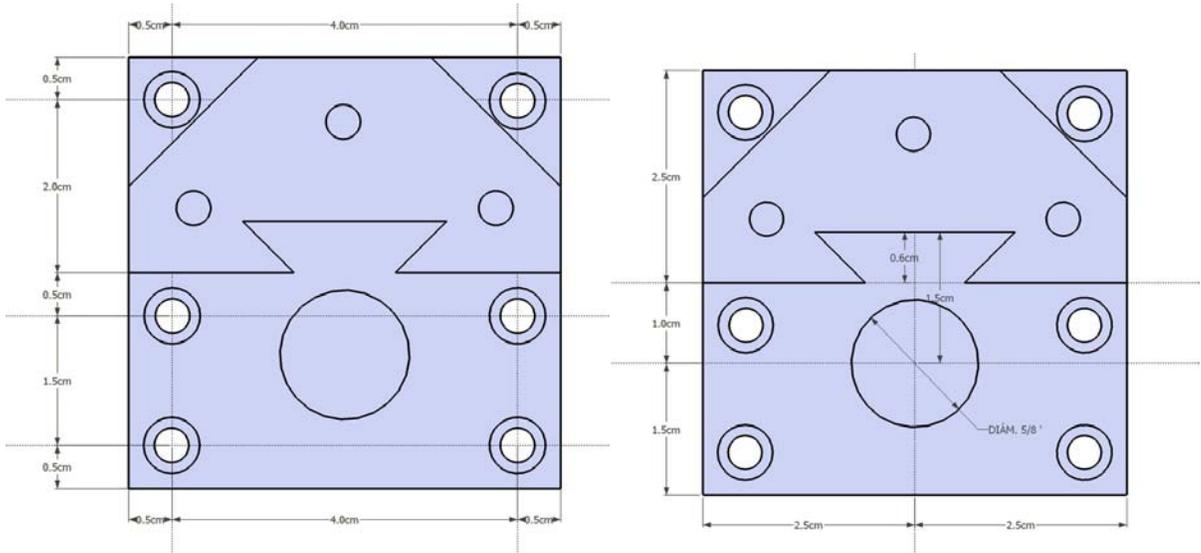


Figura 5.0.9: Vista de la base.

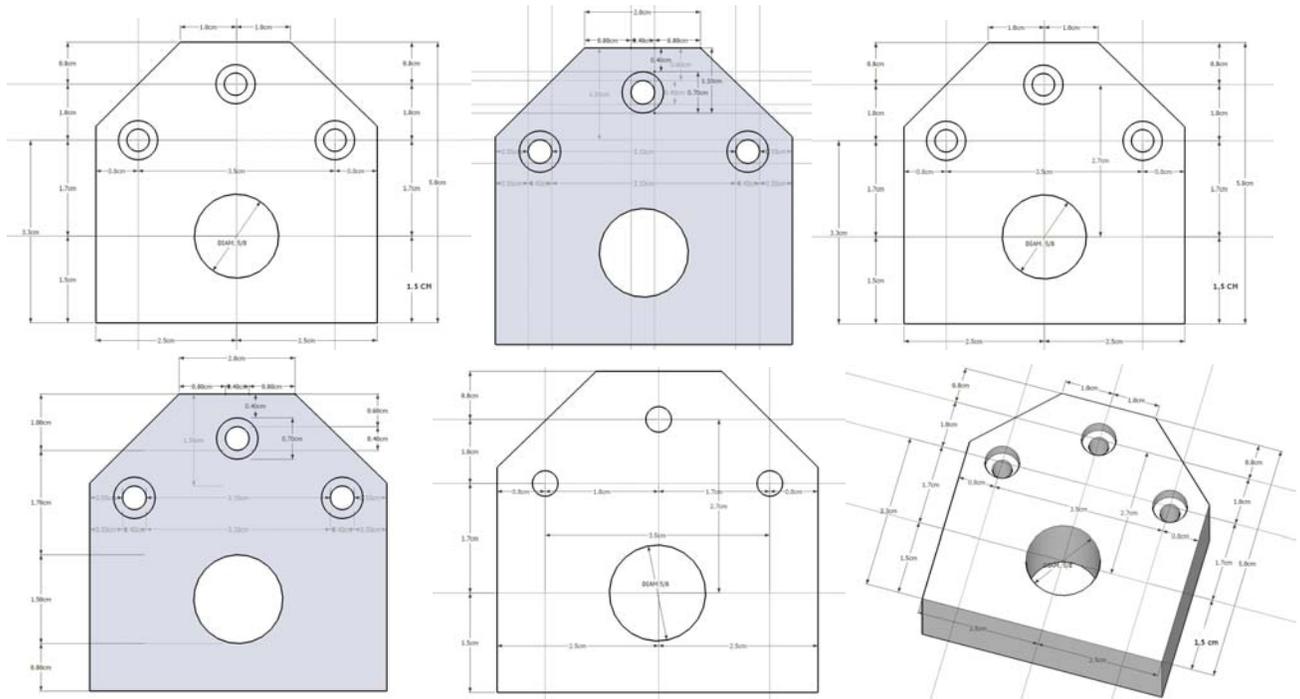


Figura 5.0.12: Cubierta vista superior

Las piezas al unirse con tornillos allen de $\frac{1}{4}$ de pulgada, forman lo que denominamos la guía vertical.

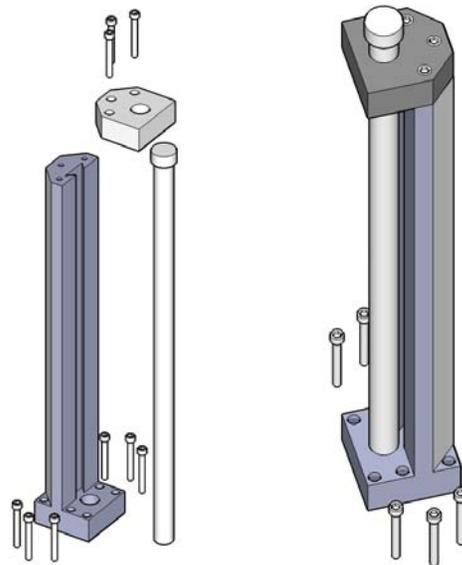


Figura 5.0.13: Montaje de la guía vertical.

Guía horizontal

Sobre la guía horizontal se movió el sensor Hall usando un tornillo sin fin. Toda la guía horizontal se mueve a través del riel vertical, su movimiento se transmite por el tornillo sin fin de la sección anterior. La guía horizontal y vertical son ortogonales entre si, al usar las dos guías el sensor Hall barre un plano.

Esta estructura tiene un riel con ángulo de 45° en las paredes que atraviesa por el centro y sirve para que se deslice la estructura que soporta al sensor Hall por medio de colas de milano. La guía horizontal tiene en unos de sus extremos una cola de milano que se inserta al riel vertical, lo que permitió moverla verticalmente. En la cara opuesta a la cola de milano tiene un barreno de $\frac{5}{8}$ de pulgada donde se colocó el tornillo sin fin que le da movimiento al sensor. Por la cara superior a la cola de milano se hizo un barreno de $\frac{5}{8}$ de pulgada que atravesó a la pieza, a este orificio se le hizo cuerda para mover a toda la estructura con el tornillo sin fin de la guía vertical.

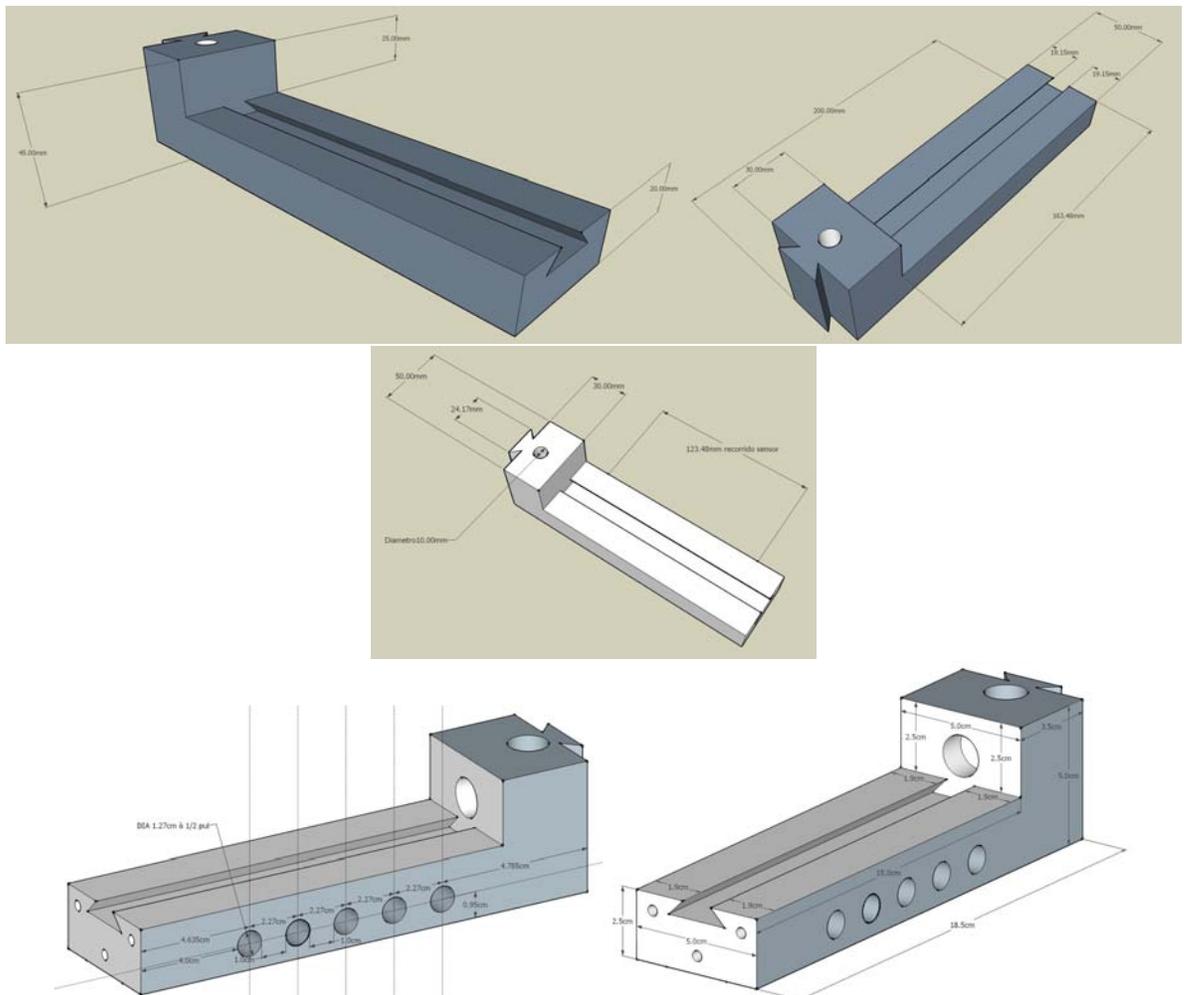


Figura 5.0.14: Guía horizontal, riel para colas de milano.

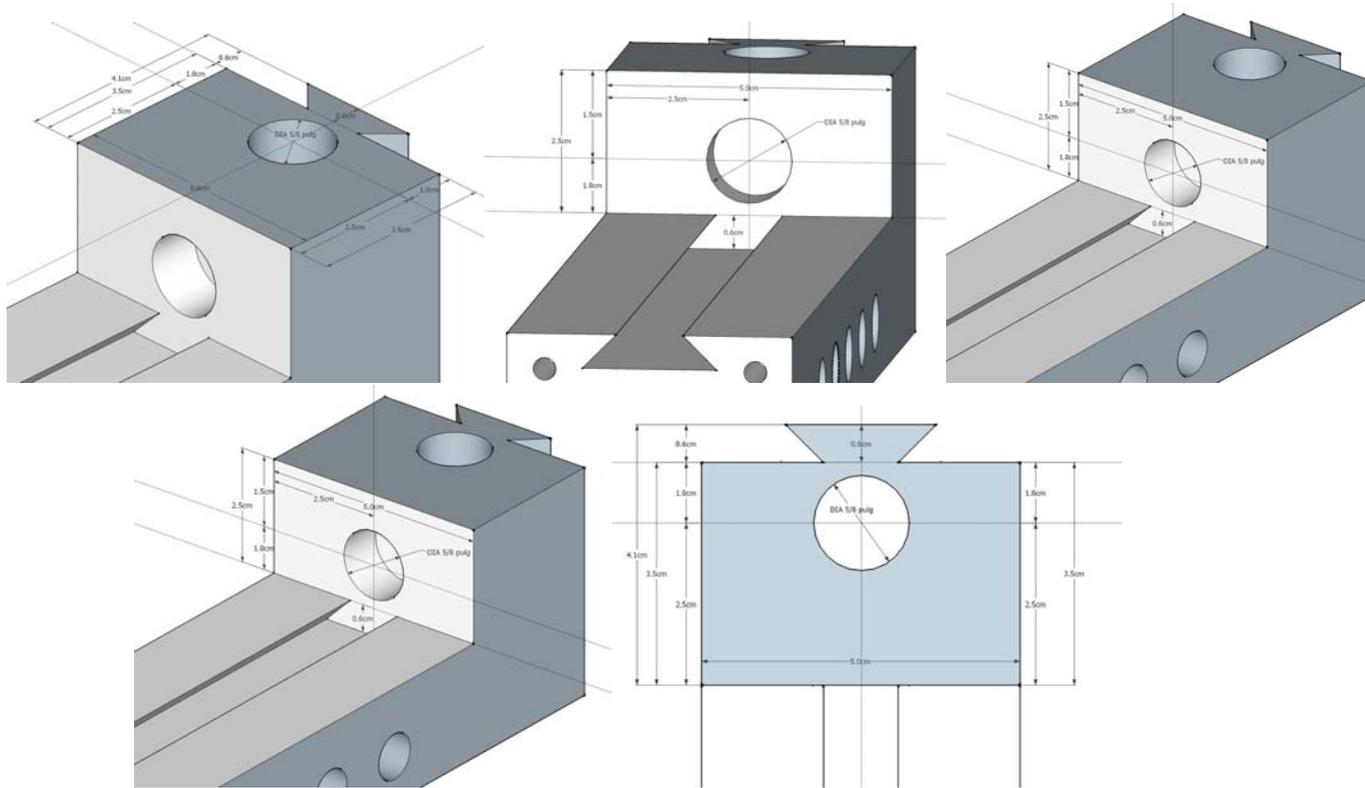


Figura 5.0.15: Barrenos para tornillos sin fin (sólo el superior tiene cuerda) y cola de milano

Cubierta guía horizontal

Es la pieza que cierra a la guía horizontal en su centro tiene un barreno de $\frac{5}{8}$ de pulgada que atravesó el material. El agujero de la cubierta horizontal tiene simetría al barreno de la cara frontal (opuesto a la cola de milano), estos agujeros sostienen al tornillo sin fin que da movimiento a la pieza que movió horizontalmente al sensor Hall.

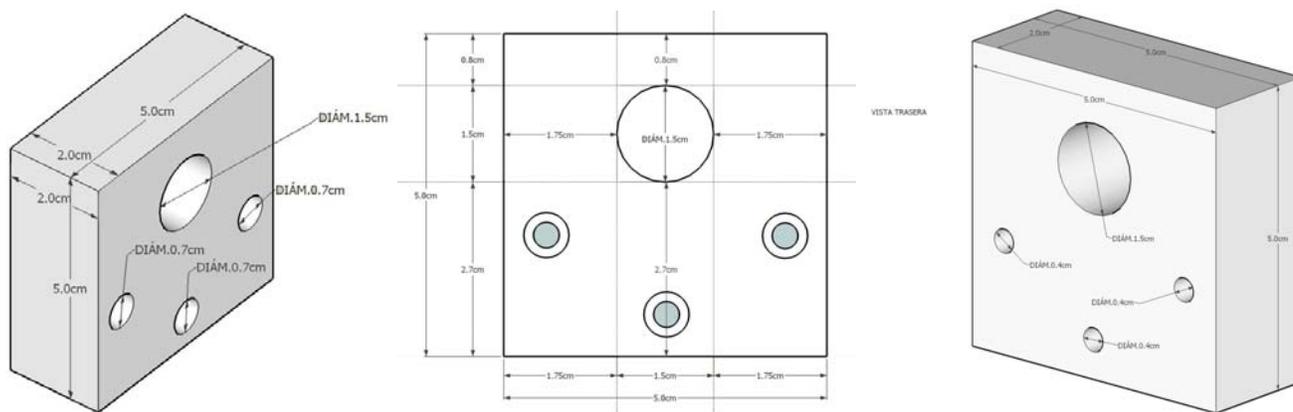


Figura 5.0.16: Cubierta horizontal con barreno de $\frac{5}{8}$ de pulgada

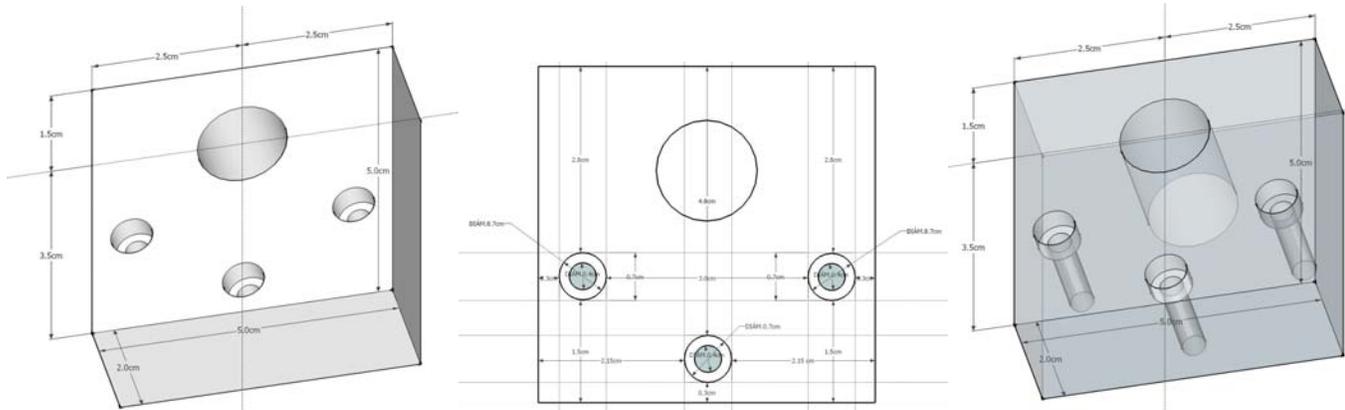


Figura 5.0.17: Vista frontal de las dimensiones de la cubierta

Apéndice D

Gráficas

Las gráficas se programaron usando el lenguaje R, a continuación se lista orden de aparición en el código de cada gráfica.

Gaussmetro Bell-5080

```
library(ggplot2)
library(scales)
calibracion <- read.csv("/home/huaccra/Dropbox/TESIS-LIC/graficas/calibracion-sensor
...../calibracion-sensor-hall.csv")
regresion_li <- calibracion$corriente
regresion <- function(y0, m, x){
  y <- y0 + m*x
  return(y)
}
yy <- regresion(1.967930029154522e-02, 1.432218300854176e+00, regresion_li)
yy1 <- regresion(1.967930029154522e-02, 1.432218300854176e+00, regresion_li)+0.0547187466556
yy2 <- regresion(1.967930029154522e-02, 1.432218300854176e+00, regresion_li)-0.0547187466556
ggplot(calibracion, aes(x=corriente, y=campo))+
  geom_point(size=2, shape=21, fill="black")+
  scale_x_continuous(breaks=pretty_breaks(n=15))+
  scale_y_continuous(breaks=pretty_breaks(n=15))+
  ggtitle("Gaussmetro_Bell-5080") +
  xlab("Corriente [A]")+ ylab("Campo_Magnético_[G]")+
  theme_bw()+
  theme(panel.grid.major = element_line(colour = "black", linetype = "dotted"))+
  theme(plot.title = element_text(size= rel(2), angle=00, color="blue", face="bold"))+
  theme(axis.title.y = element_text(size = rel(1.5), angle = 90, color="black"))+
  theme(axis.title.x = element_text(size = rel(1.3), angle = 00, color="black"))+
  layer (
    data= calibracion,
    mapping=aes(x=regresion_li, y=yy),
```

```

geom="line" ,
geom_params=list(size=0.8, color="blue" )
)

```

sensor Hall 3515

```

library(ggplot2)
library(scales)
calibracion <- read.csv("/home/huacra/Dropbox/TESIS-LIC/graficas/calibracion-sensor
...../calibracion-sensor-hall.csv")
regresion_li<-calibracion$corriente
regresion <- function(y0, m, x){
  y <- y0 + m*x
  return(y)
}
yy1<-regresion( -1.459737609329446e-02, 8.346550560073653e-01 , regresion_li)
yy2<-regresion(-1.459737609329446e-02, 8.346550560073653e-01 , regresion_li)+0.0171871729802065
yy3<-regresion(-1.459737609329446e-02, 8.346550560073653e-01 , regresion_li)-0.0171871729802065
ggplot(calibracion , aes(x=corriente , y=voltaje))+
  geom_point(size=2, shape=21, fill="black")+
  scale_x_continuous(breaks=pretty_breaks(n=15))+
  scale_y_continuous(breaks=pretty_breaks(n=15))+
  ggtitle("Sensor_Hall_3515") +
  xlab("Corriente [A]") + ylab("Voltaje_Hall_[V]") +
  theme_bw()+
  theme(panel.grid.major = element_line(colour = "black", linetype = "dotted"))+
  theme(plot.title = element_text(size= rel(2) , angle=00, color="blue", face="bold"))+
  theme(axis.title.y = element_text(size = rel(1.5), angle = 90, color="black"))+
  theme(axis.title.x = element_text(size = rel(1.3), angle = 00, color="black"))+
  layer (
    data= calibracion ,
    mapping=aes(x=regresion_li ,y=yy),
    geom="line" ,
    geom_params=list(size=0.8, color="blue" )
  )
)

```

Campo magnético vs x en función del tiempo

```

library("ggplot2")
library("scales")
calibracion <- read.csv("/home/huacra/Dropbox/TESIS-LIC/graficas/barrido_en_x
...../datos-barrido-completo.csv")

sm <- glm(campo~poly(tiempo,21), data=calibracion)
summary(sm)

ggplot(calibracion , aes(x=tiempo , y=campo))+
  geom_point(size=1, shape=21, fill="black",

```

```

#alpha=I(1/4)
)+
scale_x_continuous(breaks=pretty_breaks(n=19))+
scale_y_continuous(breaks=pretty_breaks(n=15))+
ggtitle("Campo_Magnético_vs_x_en_función_del_tiempo") +
xlab("x_en_función_del_tiempo_[mm/ms]") + ylab("Campo_Magnético_[G]") +
theme_bw()+
theme(panel.grid.major = element_line(colour = "black", linetype = "dotted"))+
theme(plot.title = element_text(size= rel(1.2) , angle=00, color="blue", face="bold"))+
theme(axis.title.y = element_text(size = rel(1.5), angle = 90, color="black"))+
theme(axis.title.x = element_text(size = rel(1.3), angle = 00, color="black"))+
layer (
  data=calibracion ,
  mapping = aes(x=tiempo , y=campo),
  stat="smooth",
  stat_params=list(method="glm" , formula=y~poly(x,16)),
  geom="smooth",
  geom_params=list(size=1, color=("blue"))
)

```

Campo magnético vs distancia eje x

```

library("ggplot2")
library("scales")
calibracion <- read.csv("/home/huacra/Dropbox/TESIS-LIC/graficas/barrido_en_x
...../muestra2/barrido-2.csv")

sm <- glm(Campo~poly(barrido,14), data=calibracion)
summary(sm)

ggplot(calibracion , aes(x=barrido , y=Campo))+
  geom_errorbar(aes(ymin=Campo-0.0566482232649801, ymax=Campo+0.0566482232649801),
               colour="black", width=0.4, size=0.5)+
  geom_point(size=2, shape=21, fill="black")+
  scale_x_continuous(breaks=pretty_breaks(n=25))+
  scale_y_continuous(breaks=pretty_breaks(n=15))+
  ggtitle("Campo_Magnético_vs_Distancia_eje_x") +
  xlab("distancia [mm]") + ylab("Campo_Magnético_[G]") +
  theme_bw()+
  theme(panel.grid.major = element_line(colour = "black", linetype = "dotted"))+
  theme(plot.title = element_text(size= rel(1.3) , angle=00, color="blue", face="bold"))+
  theme(axis.title.y = element_text(size = rel(1.5), angle = 90, color="black"))+
  theme(axis.title.x = element_text(size = rel(1.3), angle = 00, color="black"))+
  layer (
    data=calibracion ,
    mapping = aes(x=barrido , y=Campo),
    stat="smooth",
    stat_params=list(method="glm" , formula=y~poly(x,12)),

```

```
geom="smooth",
geom_params=list(size=1, color="blue"))
```

Campo magnético vs distancia eje x (60° de rotación en la muestra)

```
library("ggplot2")
library("scales")
calibracion <- read.csv("/home/huaccra/Dropbox/TESIS-LIC/graficas/barrido_en_x
...../muestra2/barrido-3.csv")

sm <- glm(Campo~poly(barrido,14), data=calibracion)
summary(sm)

ggplot(calibracion, aes(x=barrido, y=Campo))+
  geom_errorbar(aes(ymin=Campo-0.0566482232649801, ymax=Campo+0.0566482232649801),
               colour="black", width=0.4, size=0.5)+
  geom_point(size=2, shape=21, fill="black")+
  scale_x_continuous(breaks=pretty_breaks(n=25))+
  scale_y_continuous(breaks=pretty_breaks(n=15))+
  ggtitle("Campo Magnético vs Distancia eje x") +
  xlab("distancia [mm]") + ylab("Campo Magnético [G]") +
  theme_bw()+
  theme(panel.grid.major = element_line(colour = "black", linetype = "dotted"))+
  theme(plot.title = element_text(size=rel(1.3), angle=00, color="blue", face="bold"))+
  theme(axis.title.y = element_text(size = rel(1.5), angle = 90, color="black"))+
  theme(axis.title.x = element_text(size = rel(1.3), angle = 00, color="black"))+
  layer (
    data=calibracion,
    mapping = aes(x=barrido, y=Campo),
    stat="smooth",
    stat_params=list(method="glm", formula=y~poly(x,12)),
    geom="smooth",
    geom_params=list(size=1, color="blue"))
)
```

Campo magnético vs distancia

```
library(ggplot2)
library(scales)
caida<-read.csv("/home/huaccra/Dropbox/TESIS-LIC/graficas/elevacion/elevacion3-centro.csv")
exponencial<-caida$altura
ajuste3 <- function(y0, A, t, x){
  y <- y0 + A * exp(-x/t)
  return(y)
}
yy<-ajuste3(2.578443433979000e-01, 3.205934582224086e+00, 1.026353522332036e+01, exponencial)
ggplot(caida, aes(x=altura, y=Campo))+
  geom_errorbar(aes(ymin=Campo-0.0497938444497307, ymax=Campo+0.0497938444497307),
```

```

      colour="black", width=0.8, size=0.4)+
geom_errorbarh(aes(xmin=altura-deltah, xmax=altura+deltah), colour="black", width=.9, size=1)+
geom_point(size=1.2, shape=21, fill="black")+
scale_x_continuous(breaks=pretty_breaks(n=22))+
scale_y_continuous(breaks=pretty_breaks(n=15))+
ggtitle("Campo_Magnético_VS_Distancia") +
xlab("Distancia [mm]") + ylab("Campo_Magnético_[G]") +
theme_bw()+
theme(panel.grid.major = element_line(colour = "black", linetype = "dotted"))+
theme(plot.title = element_text(size= rel(1.3) , angle=00, color="blue", face="bold"))+
theme(axis.title.y = element_text(size = rel(1.5), angle = 90, color="black"))+
theme(axis.title.x = element_text(size = rel(1.3), angle = 00, color="black"))+
layer (
  data= caida ,
  mapping=aes(x=exponencial ,y=yy),
  geom="line",
  geom_params=list(size=0.8, color=("blue") )
)

```

Bibliografía

- [1] Adarsh P., Moriah T. (2010). Fabrication and characterization of a High-Tc $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ceramic superconductor. United States of America: Reed College, Portland.
- [2] Alexandrov A. S. (2003). Theory of Superconductivity: from weak to strong coupling. UK: Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.
- [3] Alasdair A. (2011). iOS Sensor Apps with Arduino. United States of America: O'Reilly Media, Inc.
- [4] AlegroMicroSystems. 3515 AND 3516 Ratiometric, linear Hall-effect sensors for high-temperature operation. DATA SHEET. AlegroMicroSystems INC. USA (2003)
- [5] Annett J. F. (2003). Superconductivity, Superfluids and Condensates. UK: Oxford University Press.
- [6] A.P. Drozdov, M. I. Erements, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, S. I. Shylin. (3 september 2015). Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system. Nature. Nature, 525, 73-76.
- [7] Arredondo L. Y. (2002). Introducción a los superconductores. México: Coordinación de Servicios Editoriales. Facultad de Ciencias. UNAM.
- [8] Atmel corporation. ATmega48PA/88PA/168PA/328P. DATA SHEET. Atmel corporation. (2009).
- [9] Banzi M. (2011). Getting Started with Arduino. United States of America: O'Reilly Media, Inc.
- [10] Benneman K. H., Ketterson J. B. (2008). Superconductivity: conventional and unconventional

superconductors. Vol. 1. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlang.

- [11] Buckel W., Kleiner R. (2004). Superconductivity: Fundamentals and Applications. Federal Republic of Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- [12] Blundell S. (2009). Superconductivity A Very Short Introduction. UK: Oxford University Press.
- [13] Callister W. D. (2003). Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. España: Editorial Reverté, S. A.
- [14] Diodes Incorporated. 1N4001-1N4007, 1.0 A rectifier. DATA SHEET. Diodes Incorporated. USA (2002).
- [15] E. M. Purcell. (1980). Berkley physics course: Electricidad y Magnetismo. Vol. 2. México: Reverté S.A.
- [16] E. Brian. (2011). Beginning Arduino Programming. United States of America: Apress.
- [17] Fossheim K., Sudbo A. (2004). Superconductivity Physics and Applications. UK: John Wiley & Sons Ltd.Ginzburg.
- [18] Ginzburg V. L. , Andryushin E.A. (2004). Superconductivity. Singapore: World Scientific Publishing Co.
- [19] Ginzburg V. L. (2009). On Superconductivity and Superfluidity. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlang.
- [20] Gonzalez-Jorge H. ; E. Carballo ; J. Peleteiro ; G. Domarco . (2005). Current inducting techniques for superconducting rings. Journal of superconductivity , vol. 18, no4, 541-544.
- [21] Gómez González R. W. (2003). ¿Qué es la superconductividad?. Boletín de la Sociedad Mexicana de Física, 17, 97-103.
- [22] GSL-1500X-40 Compact Furnace, Instructions and Operation Manual.E.
- [23] H. Hall. (1978). Física del estado sólido. México: Limusa.
- [24] J. G. Bednorz, K. A. Müller. (1986). Possible high Tc superconductivity in the $Ba-La-Cu-O$ system. Zeitschrift für Physik B Condensed Matter, Volume 64, Issue 2, pp 189-193.
- [25] Kostas Gavroglu. (1995). Fritz London: a scientific biography. UK: Cambridge University Press.

- [26] Ketterson J. B., Song S. N. (1999). Superconductivity. UK: Cambridge University Press.
- [27] Langone J. (1989). Superconductivity: The new alchemy. Chicago, Illinois: Contemporary books.
- [28] L. M. León-Rossano. (October 1997). An inexpensive and easy experiment to measure the electrical resistance of high-T_c superconductors as a function of temperature. American Journal of Physics, Vol. 65, No. 10, 1024-1026.
- [29] L. Kirkup and C Tonthat. (1998). A direct reading thermometer based on a silicon diode. Phys. Educ., 33(5), 302-305.
- [30] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P.H. Hor, R.L. Meng, L. Gao, Z.J. Huang. Y.Q. Wang, C.W. Chu. (1987). Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O compound System at Ambient Pressure. PHYSICAL REVIEW LETTERS. Vol 58, No 9, 908-910.
- [31] Mariscal Becerra, L. (2005). Superconductores: dos ejemplos actuales. Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.
- [32] Magaña Solís L.F. (1998). Los superconductores. México: La ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica.
- [33] Marouchkine A. (2004). Room-Temperature superconductivity. UK: Cambridge International Science Publishing.
- [34] McRoberts Michael. (2010). Beginning Arduino. United States of America: Apress.
- [35] Mesut koç. (1997). The characteristics of the temperature sense diodes. Stanford University, W.W. Hansen Experimental Physics Laboratory, 4-25.
- [36] N. R. Waltham, G. F. Clark and B. K. Tanner. (1981). Low temperature thermometry using inexpensive silicon diodes. Phys. Educ., 16, 104-107.
- [37] Noble Joshua. (2009). Programming Interactivity: A Designer's Guide to Processing, Arduino, and openFrameworks. United States of America: O'Reilly Media, Inc.
- [38] Odendahl M., Finn J., Wenger A. (2010). Arduino – Physical Computing für Bastler, Designer und Geeks. Deutschland: O'Reilly Verlag.
- [39] P.C. McDonald. (1995). Silicon diode temperature sensor for process systems. Cryogenics, 35,

199-201.

- [40] Poole C. P. jr., Farach H. A., Creswick R. J., Prozorov R. (2007). Superconductivity. UK: Academic Press, Elsevier.
- [41] P. V. Pavplov. (1987). Física del estado sólido. URSS: Mir Moscú.
- [42] Reas Casey ; Fry Ben. (2010). Getting Started with Processing. United States of America: O'Reilly Media, Inc.
- [43] Roskes B. (2014). Modeling with SketchUp for 3D Printing. SketchUp Specialties Series. 3DVinci.
- [44] Sheahen T. P. (2002). Introduction to High-Temperature superconductivity. United States of America: Kluwer Academic Publishers.
- [45] Shingeji Fujita, Salvador Godoy. (2002). Quantum Statistical Theory of Superconductivity. United States of America: Kluwer Academic Publishers.
- [46] S. Ilescu, S. Sena, X. Granados, E. Bartolomé, T. Puig, X. Obradors, M. Carrera, J. Amorós, S. Krakunovska, and T. Habisreuther. (2003). In-Field Hall Probe Mapping System for Characterization of YBCO Welds. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13, NO. 2, 3136-3139.
- [47] STMicroelectronics. L7800 SERIES, Positive voltage regulators. DATA SHEET. STMicroelectronics. Italy (2003).
- [48] STMicroelectronics. L7900 SERIES, Negative voltage regulators. DATA SHEET. STMicroelectronics. Italy (2003).
- [49] STMicroelectronics. TL081 TL081A - TL081B, General purpose J-FET single operational amplifiers. DATA SHEET. STMicroelectronics. Italy (2003).
- [50] Tinkham M. , Mckay G. (1996). Introduction to superconductivity. United States of America: McGraw-Hill.
- [51] Tsuneto T. (2005). Superconductivity and superfluidity. UK: Cambridge University Press.
- [52] Pacific Scientific. Gauss/Tesla meter, Model 5080, Instruction Manual. Pacific Scientific, F.W. BELL

- [53] X. Granados, S. Sena, E. Bartolomé, A. Palau, T. Puig, X. Obradors, M. Carrera, J. Amorós, and H. Claus. (JUNE 2003). Characterization of Superconducting Rings Using an In-Field Hall Probe Magnetic Mapping System. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 13, NO. 2, 3667-3670.