



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia**

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

**EQUIPO AUTOMATIZADO PARA
OBTENCIÓN DE ARQUEO Y PALEO
INTENSIDADES GEOMAGNÉTICAS
MEDIANTE EL MÉTODO DE
MULTIESPECIMENES**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOCIENCIAS**

P R E S E N T A

Marco Anyelo Cazarez Barboza

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Juan Julio Morales Contreras

CO-DIRECTOR: Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano

MORELIA, MICHOACÁN

Marzo 2019



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

EQUIPO AUTOMATIZADO PARA
OBTENCIÓN DE ARQUEO Y PALEO
INTENSIDADES GEOMAGNÉTICAS
MEDIANTE EL MÉTODO DE
MULTIESPECIMENES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

Marco Anyelo Cazarez Barboza

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Juan Julio Morales Contreras

CO-DIRECTOR: Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano

MORELIA, MICHOACÁN

Marzo 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE
DIRECTORA
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE


Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 07** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **20 de junio del 2018**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **Marco Anyelo Cazarez Barboza** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **413085519**, con la tesis titulada: "Equipo automatizado para la obtención de arqueo y paleo intensidades geomagnéticas mediante el método de multiespecímenes", bajo la dirección como **tutor** del Dr. Juan Julio Morales Contreras y como **Co-tutor** del Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Dr. Avtandil Gogichaishvili
Vocal: Dr. Gabriel Vázquez Castro
Secretario: Dr. Juan Julio Morales Contreras
Suplente: Dr. Sinhué Amos Refugio Haro Corzo
Suplente: Dra. María Rodríguez Ceja

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 01 de marzo del 2019.


DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

CAMPUS MORELIA
Apartado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guadalupe), 58090, Morelia, Michoacán
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3502 y (55)56.23.73.02, Extensión Red UNAM: 80503
www.enesmorelia.unam.mx

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la UNAM, a la licenciatura en geociencias y a todas las personas que son parte de ella que hicieron posible la realización de mis estudios de licenciatura.

Al programa de becas PRONABES por haberme otorgado una beca durante mi licenciatura.

Al proyecto UNAM PAPIIT IN101717, por haber financiado y otorgado una beca para que se pudiera llevar a cabo este proyecto.

Gracias al Dr. Avtandil Gogichaishvili, al Dr. Gabriel Vázquez Castro, al, Dr. Juan Julio Morales Contreras, al Dr. Sinhue Amos Refugio Haro Corzo, y a la Dra. María Rodríguez Ceja, quienes amablemente aceptaron ser parte de mi jurado de examen.

Al Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano por haber sido mi Co-tutor en este proyecto, gracias.

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Este trabajo lo dedico a mis padres, Mario Cazarez Juarez y Clementina Barboza Olvera ya que gracias a sus grandes esfuerzos y dedicación fue que pude realizar mis estudios universitarios, gracias a sus consejos y ejemplo he llegado a concluir esta etapa y es por ello que este logro lo comparto con ellos.

A mis hermanitas Itzia y Miriam por brindarme su apoyo incondicional, por estar acompañándome incondicionalmente.

A mi amada esposa Anahí Aguilera, tu eres mi motivación diaria para seguir adelante, gracias por ayudarme a seguir en esos momentos difíciles, y por ser parte muy importante también de este proyecto que es tan tuyo como mío. Agradezco tus consejos y paciencia.

Dedico este proyecto a toda mi familia quienes en algún momento también me dieron consejo o apoyo.

Agradezco de manera particular al Dr. Juan Julio Morales quien me permitió realizar mi tesis con él y al mismo compartir su tiempo y conocimientos conmigo, gracias.

A mis compañeros de la licenciatura, Roberto, Omero, Liz, Erik, Andrés, Eva, Alfonso, Jorge Iván, Vanesa, Dani, Lucy, Lupe, Daesy, Karla, Yectli, con quienes durante la licenciatura compartimos clases, compartimos practicas de campo y con muchos de ellos pudimos hacer amistades que nunca se olvidarán.

A todos mis profesores de la licenciatura, que sin ellos mi proyecto no habría sido posible.

Agradezco de manera muy particular al Dr. Armando Carrillo quien amablemente me facilitó muchas de sus herramientas durante el tiempo que estuve realizando este proyecto pero que también compartió un poco de su basto conocimiento conmigo para realizar este proyecto.

A Osiris Sandoval con quien también compartió conmigo muchas de sus habilidades en el campo de la instrumentación, quien muy amablemente me brindo consejo y apoyo durante este proyecto.

ÍNDICE

1	Resumen	6
2	Introducción	8
2.1	Planteamiento del problema.....	9
2.2	Objetivos	9
2.2.1	Objetivo general.....	9
2.2.2	<i>Objetivos particulares</i>	9
3	Marco Teórico.....	10
3.1	Origen del campo magnético terrestre	10
3.2	El campo magnético terrestre y su registro en materiales.....	12
3.3	Técnicas para caracterizar el campo registrado en rocas y cerámicas	15
3.3.1	Descripción de la técnica múltiples especímenes.....	20
4	Metodología.....	22
4.1	Descripción del equipo.....	23
4.1.1	Diseño y construcción de bobinas tipo Merritt.	23
4.1.2	Diseño y construcción de las fuentes de corriente.....	27
4.1.3	Diseño y construcción del horno.....	29
4.1.4	Diseño y construcción de un magnetómetro triaxial	32
3.1.6	Diseño y programación de Software	36
5	Resultados.....	40
5.1	Evaluación del magnetómetro triaxial	40
5.2	Evaluación del sistema de bobinas.....	42
5.3	Evaluación del horno	46
5.4	Resultados de determinación de paleo y arqueo intensidades geomagnéticas de muestras conocidas.....	47
6	Discusión	49
7	Conclusiones	53
8	Anexos.....	54
9	Bibliografía.....	59

1 Resumen

Para quien se dedica a la investigación científica es bien sabida la fuerte dependencia tecnológica que tenemos con las naciones desarrolladas. Por otro lado, una gran parte del presupuesto solicitado por medio de proyectos de investigación es destinada a la compra de equipos/instrumentos comerciales de importación para poder desarrollar su trabajo. Además de ser excesivamente costosos, no siempre cubren éstos todas nuestras necesidades analíticas y se requiere de la compra de equipo complementario. Por si no fuera ya desventajosa esta situación, el mantenimiento, y especialmente la reparación del mismo es, en la mayoría de los casos, prohibitivo por sus altos costos. La alternativa natural a tal problemática es, sin lugar a dudas, el diseño y construcción de nuestro propio instrumental, con características específicas para cubrir nuestras necesidades, de mucho menor costo y susceptible de ser reparado in situ.

En este proyecto se diseñó y construyó un equipo que permite estimar la intensidad del campo magnético antiguo (paleointensidad geomagnética) empleando la metodología de múltiples especímenes de una forma automatizada. El dispositivo consta de varios módulos: 1) sistema de bobinas tipo Merritt, 2) fuentes de corriente controlada, 3) horno eléctrico no inductivo, 4) magnetómetro triaxial (elaborado con tres sensores de efecto Hall) y etapa de acondicionamiento de señal, y 5) programa de control, el cual consta de dos partes; la parte de control para Arduino UNO (desarrollada en C++) y la interfaz gráfica de usuario, implementada en Visual Studio 2010. Cada uno de estos módulos se describe por separado en este trabajo y se presentan sus respectivas caracterizaciones y evaluaciones.

Se realizó la evaluación global del equipo estimando la intensidad de campo registrada por muestras “sintéticas”, a las cuales se les indujo una magnetización termo-remanente aplicando campos de laboratorio conocidos, obteniendo resultados satisfactorios.

Abstract

For those dedicated to scientific research it is well known the strong technological dependence with developed nations. On the other hand, a great amount of funds requested through research projects is used to the acquisition of commercial equipment/instruments in order to carry out their research work. In addition to being excessively expensive, they do not always cover all the analytical needs and the acquisition of complementary equipment is required. As if this this situation were not already disadvantageous, maintenance –and especially its reparation– is, in most cases, unaffordable due to its high cost. The natural alternative to such a problem is, without a doubt, the design and construction of our own instruments, with specific characteristics to fulfill our needs, of much lower cost and susceptible of being repaired in situ.

In this project, it was designed and built an equipment which enables the estimation of the ancient geomagnetic field intensity (paleointensity) by means of the *multispecimen method* in an automated way. The device consists of several modules: 1) Merritt type coil system, 2) controlled-current sources, 3) non-inductive oven, 4) a triaxial magnetometer –encompassing three Hall effect sensors and its signal-conditioning module–, and 5) control software, which consists of two parts; the control-part for *Arduino UNO* (written in C++) and the graphical user interface in *Visual Studio 2010*.

The global evaluation of equipment was carried out estimating the field strength recorded by "synthetic" samples, which were induced a thermoremanent magnetization by applying known laboratory fields, obtaining satisfactory results.

2 Introducción

En nuestra vida diaria muchas veces utilizamos objetos para realizar diferentes actividades, o simplemente como objetos de ornato, pero no imaginamos la información y la historia que contienen. Tal es el caso de las rocas; son objetos que muchos hemos utilizado sin considerar su historia. Sin embargo, las rocas son complejas en cuanto a la información que nos proporcionan (historia, composición química, etc) y nos permiten, con las herramientas adecuadas, discernir la historia de nuestro planeta sobre cómo se formó, su edad y sobre muchos otros fenómenos con los que día a día estamos en contacto y de los cuales quizá no somos conscientes.

Un ejemplo de estos fenómenos es el Campo Magnético Terrestre (CTM), que varía en escalas de tiempo desde pequeñas (horas, días, etc.) hasta de miles de años. Algunos tipos de roca (principalmente de origen volcánico) nos permiten conocer estos cambios de gran escala mediante algunos registros que estas mismas son capaces de guardar. Aunque esto pueda parecernos extraño, las rocas son objetos que, gozan de una memoria de largo plazo, mucho más eficiente de lo que muchos pudiésemos llegar a creer; los óxidos de hierro –la magnetita y la hematita- entre otros les dan esta característica a las rocas.

Las cerámicas, a pesar de que no son materiales de origen natural sino antrópico, también nos permiten conocer las variaciones del campo magnético terrestre, e incluso nos permiten fechar actividades humanas de nuestros antepasados, ya que no solo existe el registro magnético en la muestra; también existen registros históricos con respecto a las muestras de origen arqueológico.

Existen diferentes técnicas que nos permiten conocer los registros del campo magnético grabado en las rocas; difieren entre sí unos de otros por el objetivo que cada uno tiene. Algunas técnicas son para conocer las direcciones (declinación e inclinación) y otras para conocer la intensidad (H) del CMT. En este trabajo nos enfocaremos solo al método de **múltiples especímenes** (Dekkers & Böhnell, 2006a), el cual es empleado para conocer la intensidad y en esta tesis hemos

diseñado un sistema electrónico que permite llevar a cabo el método de una forma automatizada.

2.1 Planteamiento del problema

El planeta se ha descrito a lo largo del tiempo como un sistema en cambio constante, un sistema dinámico en diferentes ámbitos; uno de ellos, y en el que se pondrá especial atención en este estudio, es el CMT. Se han estudiado durante mucho tiempo las variaciones que el CMT ha experimentado a lo largo de su historia. Sin embargo, los resultados de las investigaciones enfocadas al estudio del campo magnético antiguo (previos a las determinaciones instrumentales) presentan, en algunos casos, variaciones significativas entre sí. Con el fin de resolver este problema se han diseñado varias técnicas (ver tabla 1) que nos permitan conocer la intensidad del campo magnético en el pasado (paleointensidad geomagnética).

Una de estas técnicas es el método de múltiples especímenes (ME), y los equipos que se utilizan en la actualidad para llevar a cabo dicho método, tanto en cerámicas como en rocas, no están orientados solo para este método y requieren, en gran medida, de la intervención humana para la obtención de paleo intensidades. Debido a esto, los resultados podrían estar afectados por errores causados por el usuario al momento de manipular las muestras, ya que por más preciso que se desee ser, es casi imposible no tener errores al posicionar una y otra vez las muestras en los equipos.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Automatizar la técnica de Múltiples Especímenes (ME) de tal manera que permita reducir el tiempo empleado en las mediciones, y a la par reducir el error en los datos de medición.

2.2.2 *Objetivos particulares*

- a) Diseñar y construir un sistema de bobinas tipo Merritt (Adame, 2010) para generar campos entre 5 y 100 μT .

- b) Diseño y construcción de un horno no inductivo que permita calentar las muestras hasta 600°C.
- c) Acoplar las bobinas y el horno para que funcionen como un solo sistema.
- d) Implementar un software que permita tener el control del sistema completo utilizando la placa Arduino UNO, que cuenta con el microcontrolador ATMEGA328P-PU.
- e) Llevar a cabo mediciones de muestras de las que ya se conozca su paleo-intensidad, o en su caso arqueo-intensidad, y comparar los resultados obtenidos en ambos casos.

3 Marco Teórico

3.1 Origen del campo magnético terrestre

Un campo magnético es originado por cargas eléctricas en movimiento; es decir, a un nivel más elemental (atómico), el movimiento de un electrón alrededor del núcleo y de su mismo eje crea un campo magnético. Pero si nos quedamos hasta aquí podríamos decir que todos los materiales existentes, incluso los líquidos, son considerados como magnéticos (Morales, 1993).

El origen del campo magnético terrestre es algo que aún la ciencia no ha podido explicar completamente; sin embargo, se han hecho muchos intentos por lograrlo.

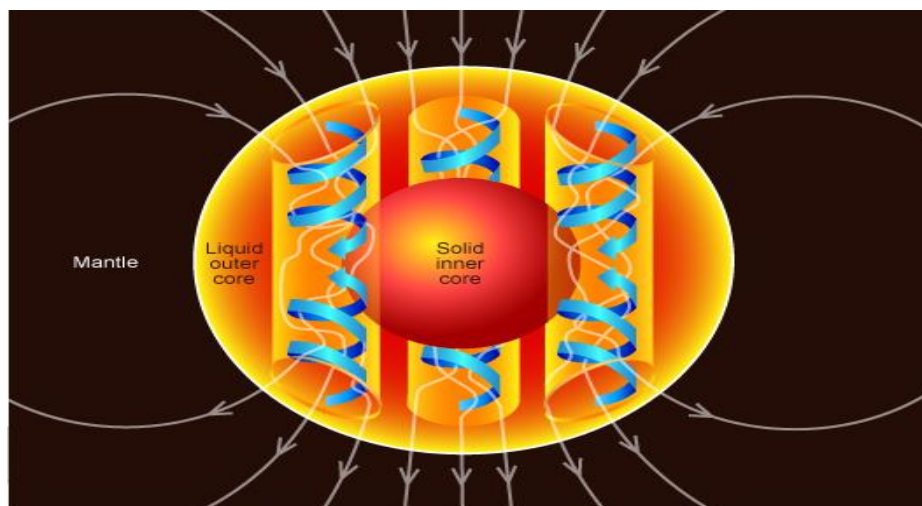


Figura 1. Ilustración de la teoría del geodinamo auto sustentado. Se muestran las corrientes convectivas interactuando con el núcleo interno, y como resultado generan un flujo de campo magnético.

Existen varias teorías al respecto; entre ellas, la teoría del **Dinamo auto sustentado** es la que hasta hoy en día ha tenido mayor aceptación, sin dejar de lado que, aunque sea la más aceptada, todavía no ha podido explicar algunos fenómenos que conocemos, tales como el cambio de polaridad, las excursiones o la variación secular. Dicha teoría nos dice que el origen del CMT se remonta hasta la formación de nuestro planeta y es generado por el movimiento convectivo del material del manto terrestre por diferencias de presión, densidad y temperatura (Tauxe, 2010), ver Figura 1 la cual fue tomada de (Hitchman, 2011).

Sin embargo, existe una clasificación para los materiales con respecto a sus características magnéticas, ver Figura 2:

- A. Ferromagnéticos: en estos materiales los espines se encuentran todos alineados en la misma dirección, y por sí mismos presentan una magnetización de manera espontánea, un ejemplo son los imanes y el hierro.
- B. Paramagnéticos: estos materiales se caracterizan por generar un campo magnético sólo cuando están expuestos a uno; el campo que generan tiene las mismas características que el campo al que se encuentran expuestos, pero una vez retirado el campo externo el campo que se es producido por el material también desaparece. Materiales de este tipo son: el aluminio, el platino y el titanio.
- C. Diamagnéticos: las capas electrónicas de los átomos que componen estos materiales se encuentran completas y cuando estos materiales se exponen a un campo magnético externo, generan un campo magnético en una dirección opuesta a la del campo aplicado, ejemplos de éste pueden ser el cloruro de sodio, la plata y el cobre.

En general, el CMT puede medirse en cualquier momento y punto de nuestro planeta. Esa medición se puede ver como la contribución de varios factores, es decir, el CMT se compone principalmente del campo generado por el efecto convectivo en el núcleo externo y además por la contribución de la

magnetización que tienen por si mismas las rocas (ver figura 2 inciso a) y el campo que generan por si mismos los materiales de tipo paramagnético.

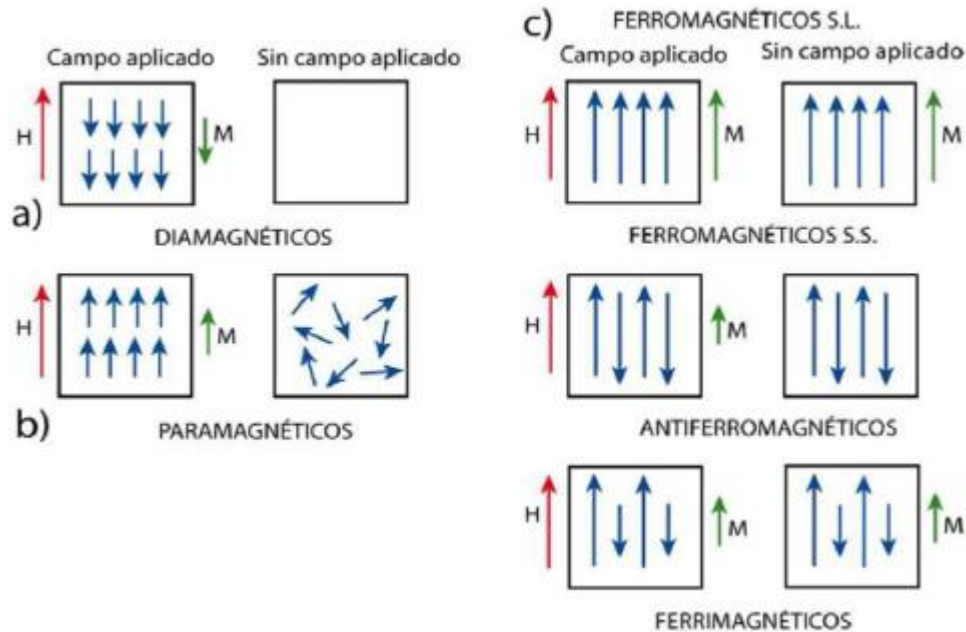


Figura 2. Se ilustran las propiedades y comportamiento magnético de los materiales en presencia y ausencia de un campo magnético. Tomada de Fragozo Maldonado, 2015.

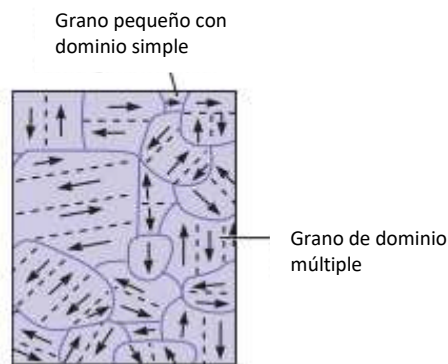
En la actualidad se cuenta con datos de la variación del CMT que se han tomado de registros en rocas y materiales cerámicos. Gracias a estos se puede confirmar la variación secular, las excursiones y cambios de polaridad que ha experimentado el campo CMT a lo largo del tiempo.

3.2 El campo magnético terrestre y su registro en materiales

La forma en que las rocas guardan esta información se describe a continuación, pensemos en un recipiente con agua y que a éste le vertemos una cantidad considerable de agujas pequeñas y estas se quedan suspendidas y distribuidas sobre todo el líquido que ocupa el interior del recipiente sin llegar al fondo. Entonces colocaremos esta mezcla dentro de un refrigerador con el objetivo de que el agua se congele, pero al mismo tiempo aplicaremos un campo magnético externo a

nuestro experimento, con la premisa de que el campo deberá ser variable tanto en dirección como en intensidad a lo largo de nuestro experimento. Las agujas idealmente seguirán la dirección del campo presente. Otro fenómeno que ocurrirá es que el agua no se congela toda a la vez, sino que ira por partes, generalmente de las superficies del contenedor hacia el centro. Lo que veremos es que, conforme pasa el tiempo y el agua se congela, dejará estáticas las agujas que se encuentran en el agua sin posibilidad de moverse, y como el campo sigue variando, las agujas que se encuentren más al centro del líquido no tendrán la misma dirección de las agujas que se quedaron casi en las paredes del recipiente. Veremos que el orden de las agujas es aleatorio.

Lo anterior es lo mismo que pasa en las rocas al momento de su formación, sólo que en estas no hay agujas, lo que les da tal característica a estas rocas son los minerales que las conforman, los que propiamente se llaman minerales ferromagnéticos. Estos graban las características del campo magnético existente



en el planeta al momento de la formación de una roca gracias a la alineación de los spines de los electrones que conforman dichos minerales. El mismo proceso de enfriarse por etapas permite que la roca tenga variaciones internas de las características del campo, a esto se le llama remanencia magnética natural (NRM). ver figura 3.

Figura 3. Representación de los dominios magnéticos dentro de los granos magnéticos, tomada de (Herráz, 2016)

Las características que describen al campo, y que las rocas son capaces de grabar, son: la declinación (D), que es la distancia en grados entre el norte magnético y norte geográfico, la inclinación (I), es la diferencia en grados del vector del campo en el eje z con respecto a un plano idealizado en la superficie terrestre; y por último la intensidad o paleo intensidad (H), vectorialmente, es la resultante entre las dos direcciones (D e I). Las rocas pueden grabar los cambios del campo magnético a lo

largo del tiempo, dependiendo la temperatura a la que se expongan, a este fenómeno se le llama remanencia magnética viscosa. Algo que cabe mencionar es que, no es necesario que el material llegue a un punto de fusión solo es necesario llevarlas a una temperatura a la que se le denomina temperatura de Curie (entre 560°C y 600°C). Es la temperatura necesaria para cambiar las propiedades magnéticas del material, en otras palabras, a esta temperatura los spines de los minerales magnéticos que componen la muestra se desorientan permitiendo así que la muestra no tenga una firma magnética a esa temperatura. Este fenómeno ocurre cuando calentamos algunos objetos, un ejemplo de esto es cuando se construyen piezas de cerámica, una vez que se moldeó el objeto es sometido a altas temperaturas para que adopte la forma que se le dio indefinidamente.

Las piezas cerámicas también son materiales que nos permiten conocer las características del campo magnético presente al momento en que son elaboradas, ver figura 4. Este se debe a que dentro de la composición de las cerámicas se encuentran presentes minerales ferromagnéticos y cuando son llevados a temperaturas altas son capaces de perder su remanencia magnética y volver a orientarse con el campo geomagnético presente en el momento y lugar donde se elaboran dichos objetos. Las estructuras quemadas (como los fogones y pisos

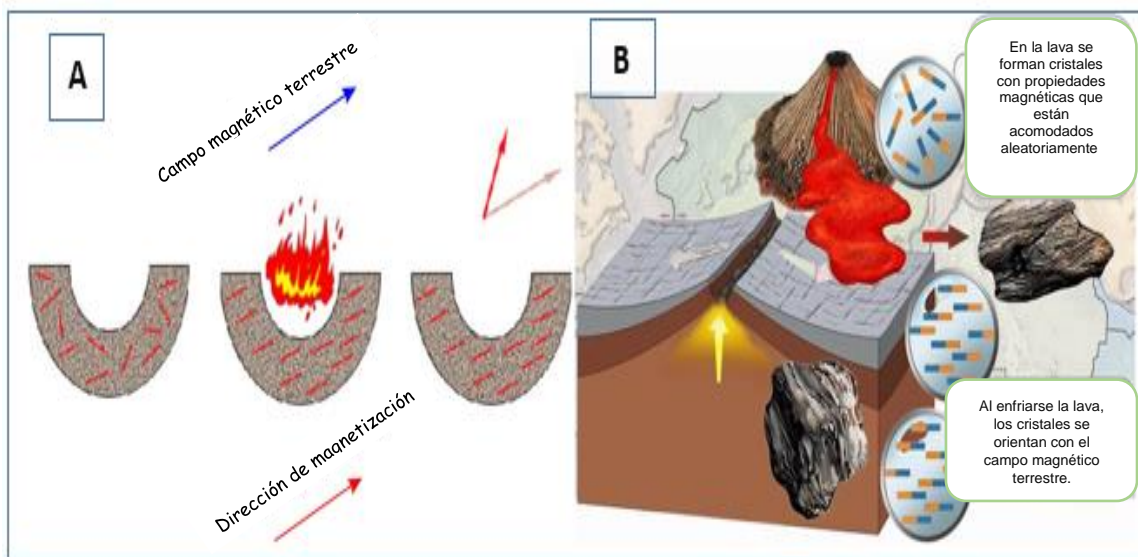


Figura 4. En esta imagen se muestran de manera gráfica lo que sucede con los minerales ferromagnéticos cuando se encuentran en presencia de un campo magnético, A) es un ejemplo para las piezas cerámicas tanto de su cocción o bien usos posteriores de estos objetos. B) el mismo principio se aplica a las rocas al momento de su formación. Tomada de García, 2009.

quemados) permiten obtener entonces propiedades del campo magnético como: declinación, inclinación e intensidad magnética.

Los registros de las variaciones del CMT se encuentran en las rocas que se generan por fenómenos relacionados a vulcanismo de diferentes tipos. Se puede conocer este registro especialmente en este tipo de roca debido a la presencia de minerales magnéticos que de manera natural se encuentran en ellas. Otro tipo de materiales que registran el CMT son de origen antrópico, que por sus características químicas pueden adquirir una remanencia magnética. Este material es la arcilla, que se ha utilizado a lo largo de los años por el hombre para construir objetos con diferentes fines, dado que en este material se encuentran minerales ferromagnéticos y por otro lado el tratamiento que se le da para que permanezca con cierta forma, hacen de este un material apropiado para poder obtener registros de la variación del CMT reciente.

Los parámetros del campo permiten conocer diferentes procesos del CMT; en este caso estudiaremos la intensidad, la cual nos permite realizar dataciones de los materiales en los cuales se lleve a cabo el método de ME.

3.3 Técnicas para caracterizar el campo registrado en rocas y cerámicas

Hasta hoy en día se han utilizado varios métodos con el fin de determinar la intensidad del campo antiguo registrada en cada uno de los tipos de materiales que se han venido mencionado, los principales se mencionan en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla de métodos que se han usado para la determinación de paleo y arqueo intensidades geomagnéticas basada en Morales, 1995 y 2003

Metodología	Año	Descripción
Método de Könisberger	1938	Könisberger intentó conocer las paleointensidades mediante la razón NRM (Magnetización Natural Remanente) / TRM (Magnetización Térmica Remanente).

Método de Thellier & Thellier	1959	<p>En este método las muestras son calentadas dos veces a una misma temperatura, pero en presencia de un campo magnético de laboratorio y la posición de las muestras durante el segundo calentamiento es opuesta a la que ocupó durante el primero, es decir, las direcciones de los campos aplicados son antiparalelos. Para la obtención de resultados se aplica una semi suma o semi resta de los vectores medidos. Por lo anterior, un mal alineamiento causado por imperfecciones de los especímenes puede causar un aumento en la magnitud de los errores experimentales.</p>
Método de Wilson	1961	<p>Wilson empleó una desmagnetización térmica continua y para estimar la paleointensidad compara el valor restante de la NRM obtenida de la desmagnetización continua contra aquellos valores obtenidos de la desmagnetización térmica continua de la termo-remanencia inducida en laboratorio en campos y temperaturas diferentes. La desventaja de dicho método es que las muestras deben ser calentadas hasta la temperatura de Curie en campo nulo para enseguida efectuar la comparación contra la TRM inducida artificialmente en laboratorio. Aunado a lo anterior carece de control para detectar posibles alteraciones químicas en las muestras por el calentamiento al que se someten.</p>
Método de Van Zijl	1962	<p>Este método sostiene que, para campos de baja intensidad, la MTR adquirida por una roca enfriada a partir de la temperatura de Curie de sus componentes magnéticos varía linealmente con la intensidad del campo aplicado. El método supone también que los efectos de componentes suaves (todas aquellas con</p>

temperaturas de bloqueo coercitividads bajas) han sido eliminadas una vez expuestos los especímenes a campos alternos con valor pico de 219 Oe.

Método de Thellier & Thellier modificado por Coe	1967	Este método consta también de un doble calentamiento con la diferencia que uno de los calentamientos es en ausencia de campo de laboratorio y el otro en presencia de este, sin embargo, en este procedimiento, el doble calentamiento permite seleccionar aquel intervalo de temperaturas para el cual el grado de alteración inducido es el más bajo.
Método de Thellier modificado por Kono y Ueno	1977	Propone la realización de método de Thellier y Thellier únicamente con un solo calentamiento en cada paso de temperatura. La modificación se fundamenta en que, si la dirección de la magnetización permanece casi constante durante la desmagnetización por campos alternos, también permanecerá constante durante la desmagnetización térmica. Con el objetivo de reducir los posibles efectos por el mal alineamiento de las muestras y las alteraciones mineralógicas recomienda la aplicación de un campo de laboratorio ortogonal. El inconveniente de este método radica en que requiere muestras excepcionalmente estables y que los errores experimentales son grandes.
Método de Shaw	1974	En este método solo se requiere de un solo calentamiento (Hasta la temperatura de Curie). Se comparan dos magnetizaciones remanentes anhisteréticas ARM1, aplicadas antes (ARM1) y después (ARM2) del calentamiento requerido, esta comparación permite seleccionar la región de fuerza

		coercitiva (Hc) en la cual el calentamiento no ha modificado significativamente las propiedades magnéticas de la roca en estudio.
Método de Shaw modificado por Kono	1978	Debido a que el método de Shaw tiene un criterio de aceptación-rechazo es rígido con los resultados obtenidos. Por lo tanto, este método sugiere una modificación que puede considerar como confiable aquellas que el método de Shaw no considera. Kono asumiendo que el espectro de coercitividades de la TRM cambia de la misma manera que aquel de la NRM propuso una corrección de la pendiente de la recta (NRM-TRM) obtenida por el método de Shaw original. $F = Flab * (NRM-TRM) / (ARM1 - ARM2)$
Método de Rolph y Shaw	1985	Esta propuesta consiste en una corrección a los valores de la TRM por los cambios propiciados por el calentamiento en la capacidad de adquisición de la TRM en cada paso de desmagnetización. A diferencia de la propuesta anterior que compara NRM vs TRM, en esta propuesta se comparan la NRM_i vs $(ARM_1 / ARM_2)_i * TRM_i$, donde TRM_i es la intensidad del campo de desmagnetización. Esta corrección a diferencia de la propuesta por Kono (1978) puede ser usada aun cuando la curva NRM-TRM es curva.
Método de microondas	1993	Mediante la técnica de microondas es posible excitar directamente los portadores de la magnetización presentes en la muestra sin elevar significativamente la temperatura de la muestra y como resultado se reducen las alteraciones químicas debidas al corto tiempo de calentamiento/enfriamiento.

<p>Método de Tsunakawa y Shaw</p> <p>1994</p>	<p>Es una extensión simple de la metodología de Shaw en el cual se realizan calentamientos dobles de las muestras por encima de la temperatura de Curie. A partir de este método de Shaw, las muestras son calentadas nuevamente por arriba de la temperatura de Curie y se induce en ellas una TRM (TRM2) y una tercera ARM (ARM3) con las mismas condiciones que las primeras. Con esta metodología se propone que la TRM1 se toma como la NRM original a la cual se le aplica la corrección de Rolh & Shaw u otra corrección. Si la corrección aplicada es válida, entonces se debe obtener un valor correcto para la intensidad del campo de laboratorio. Para esto se hace necesaria una comparación entre TRM1 vs TRM2 (TRM1 - TRM2) y que su respuesta tenga una pendiente unitaria. Por lo tanto, si la diferencia es mayor al valor del error experimental asume que la corrección por ARM no es aplicable y entonces la muestra es rechazada.</p>
<p><u>Múltiples especímenes</u></p> <p>2006</p>	<p>Se trata de una metodología en la cual se toman varios especímenes de una sola muestra, a cada uno de los especímenes se le induce una TRM de laboratorio distinta, al final se comparan todos los especímenes de una misma muestra. Se grafica la intensidad del campo aplicado a la muestra vs el porcentaje de magnetización adquirida por la muestra.</p>

Para este trabajo se decidió trabajar con el *método de múltiples especímenes* debido a que es una técnica que permite llevar a cabo fechamientos por intensidad magnética en menor tiempo que otras técnicas. También se propuso automatizar esta técnica ya que aún no hay un dispositivo comercial que permita llevarla a cabo.

Asimismo, se pretendió disminuir aún más el tiempo y los errores comunes al realizar fechamientos por esta técnica.

3.3.1 Descripción de la técnica múltiples especímenes

El método de múltiples especímenes (ME) es uno de los métodos más recientes y cuyo objetivo particular es determinar la paleointensidad. Ya que se ha observado que, tanto en las rocas como en las cerámicas, la intensidad es proporcional a la del CMT en el momento en que el material adquiere su registro.

A diferencia de la determinación de la dirección, determinar la intensidad es más complicado debido a que los materiales a usar para determinar paleointensidades deben satisfacer ciertos criterios rigurosos, por ejemplo: se debe tomar en cuenta el tamaño de grano. A pesar de esto, los siguientes dos requerimientos son de mayor importancia:

- a) El material debe conservar su remanencia magnética natural (NRM), y en los casos de cerámicas su termo remanencia natural (TRM).
- b) Se debe evitar, en la mayoría de lo posible, la alteración mineralógica de la muestra durante el procedimiento.

A diferencia del método de radiocarbono, el cual requiere de materia orgánica (carbón) asociada certeramente al material por fechar, el método paleomagnético permite fechar directamente el objeto o material mediante la comparación de su registro magnético contra curvas de variación secular (curvas con datos históricos de la variación del CMT) para una región o bien, contra modelos de variación del CMT para la ubicación del área de estudio.

La técnica de ME tiene algunas variantes debido a algunas modificaciones a lo largo de su uso. La técnica tradicional (Dekkers & Böhnell, 2006) (ver tabla 1) consiste en lo siguiente:

- 1) los diferentes especímenes son orientados de tal forma que su magnetización sea paralela a la dirección del campo de laboratorio. Durante el procedimiento,

todos los especímenes se calientan solo una vez a una misma temperatura, pero variando la intensidad del campo de laboratorio para cada uno de ellos.

- 2) La temperatura es seleccionada a partir de varias pruebas previas con especímenes de la misma muestra a estudiar. Para poder elegir la temperatura a la que se trabajarán las muestras se realiza una evaluación que consiste en llevar a cabo una medición del comportamiento de la susceptibilidad magnética contra temperatura (curvas de tipo $k-T$), este procedimiento se lleva a cabo en una balanza de Curie. A partir de estas curvas se pueden determinar la mineralogía magnética de la muestra y estimar la temperatura adecuada a la cual no tenga lugar una alteración mineralógica significativa.

Una vez estimada la temperatura adecuada se siguen los pasos siguientes:

- I) Determinar mediante un magnetómetro de giro la declinación e inclinación de la NRM del espécimen.
- II) Calentar la muestra hasta la temperatura que se encontró mediante el proceso de obtención de las curvas $k-T$. Una vez que se llegue a la temperatura deseada, esperar un tiempo mediante el cual permita que toda la muestra se homogeneice a dicha temperatura y se tenga el efecto deseado en toda la muestra. Durante todo el procedimiento de ME (calentamiento y enfriamiento) se aplica el campo. Este procedimiento se repetirá para cada intensidad de campo que se le aplicará a la muestra.

Con los datos individuales de los diferentes especímenes se calculan los cocientes $Q_{DB} = \frac{m_1 - m_0}{m_0}$, donde m_0 es la intensidad de la NRM y m_1 es la magnetización adquirida en un campo magnético paralelo. Enseguida se grafican contra el campo aplicado y la intersección del mejor ajuste (hecho por mínimos cuadrados) con el eje horizontal indica la intensidad del campo antiguo bajo el cual se enfrió la muestra de roca o bajo el cual se enfrió la pieza cerámica durante su cocimiento o última exposición al fuego.

Una de las ventajas del método ME es la posibilidad de utilizar una temperatura suficientemente baja para evitar la alteración mineralógica debido al calentamiento, permitiendo con esto aumentar la tasa de éxito en los estudios para obtención de paleo-intensidad.

4 Metodología

La metodología que se siguió para la construcción del equipo que proponemos en este trabajo consiste en los siguientes puntos y en el diagrama de bloques de la figura 5:

- Diseño, construcción y caracterización de sistema de bobinas Merritt para generar campos magnéticos homogéneos entre 5 y 100 μT .
- Diseño, construcción y caracterización de horno no inductivo para temperaturas hasta 600°C.
- Diseño y construcción de sensor de campo magnético triaxial con base en sensores de efecto Hall.
- Caracterización y evaluación del acoplamiento de las bobinas, horno y sensor de campo magnético.
- Determinación de paleo y arqueointensidades geomagnéticas de muestras conocidas.

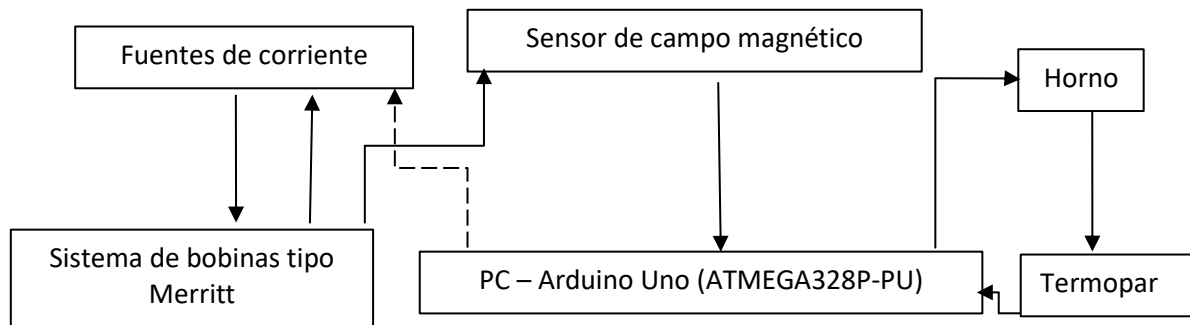


Figura 5. Diagrama de bloques del equipo construido. Nota: la diferencia en las líneas solo pretende señalar que no hay nodos entre ellas.

4.1 Descripción del equipo

4.1.1 Diseño y construcción de Bobinas tipo Merritt.

Las bobinas son una parte fundamental del equipo que se construyó en este trabajo, debido a que generarán el campo magnético necesario para llevar a cabo la técnica múltiples especímenes (por medio de una fuente de corriente, ver siguiente apartado).

Un factor muy importante en el sistema de bobinas es la homogeneidad del campo magnético al interior de las mismas, por lo tanto, la precisión en los cálculos y armado de las bobinas se hace necesaria ya que el error en los resultados va directamente relacionado con la precisión del campo al que se exponen las muestras.

Los sistemas de bobinas de tipo Merritt son mayormente usadas para generar campos magnéticos en grandes volúmenes, a la vez el campo generado en el centro es más uniforme en comparación con otros sistemas de bobinas. Este sistema se compone de tres o cuatro bobinas cuadradas (Adame et al., 2010), ver figura 6.

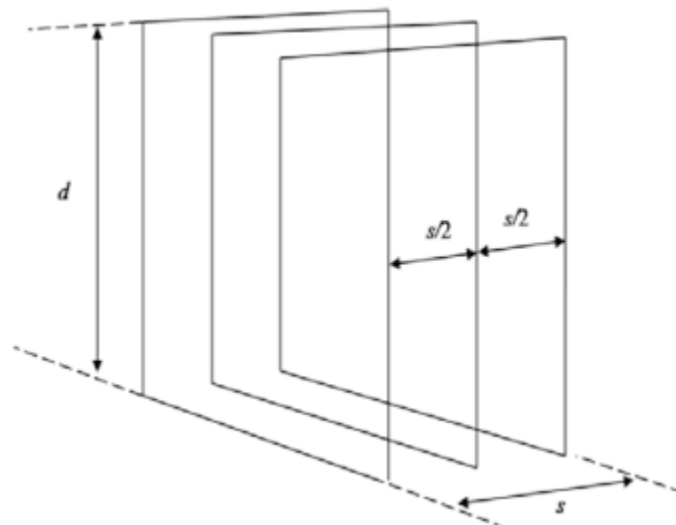


Figura 6. Diagrama del diseño de las bobinas de tipo Merritt que se eligieron para construir. Figura tomada de (Adame et al., 2010).

La distancia entre cada bobina en el sistema es (d) y la separación de las tres bobinas es $d/2$. La longitud (s), es la separación que hay entre las bobinas de los extremos. La relación que hay entre la distancia entre la longitud de s y la longitud de d está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{s}{d} = 0.821116$$

La relación entre las vueltas de cable en las bobinas (N) y la corriente (I) está dada por:

$$\frac{N'I'}{NI} = 0.512797$$

Para este sistema la ecuación que describe la densidad del flujo magnético (B) en Teslas es:

$$B = \frac{1.749 \times 10^{-6} NI}{d}$$

Para la construcción de los marcos de las bobinas se eligieron sólo materiales paramagnéticos y que fuera fáciles de encontrar en el mercado, pero a su vez que fuera de fácil manipulación. De acuerdo con esas características, el aluminio fue el material que más se ajustó a las exigencias para que pudiera ser usado en la construcción del equipo. Se construyeron tres sistemas de bobinas tipo Merritt de diferentes tamaños con el fin de que unas pudieran caber dentro de otras, todo esto con el objetivo de generar campos magnéticos en los tres ejes ortogonales (X, Y y Z).

Se utilizó canaleta de aluminio de 1.8 cm de ancho por 1.5 cm de profundidad. Las longitudes (d) en las que se cortaron para cada uno de los embobinados son las que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Características de cada una de las bobinas

BOBINA	DIMENSIONES (Ancho x Alto x largo)	Impedancia
X	15.5 cm x 15.5 cm x 15.5 cm	6.2 Ω
Y	20.5 cm x 20.5 cm x 20.5 cm	9.9 Ω
Z	24.5 cm x 24.5 cm x 24.5 cm	14.5 Ω

La canaleta se cortó de tal manera que pudiera embonar una pieza con la otra formando un ángulo recto. Al formar ese ángulo las canaletas se unieron mediante escuadras de aluminio con remaches de aluminio, ver Figura 7.

La corriente que se utilizó no supera los 400mA, por lo cual se utilizó alambre magneto de calibre 22, que es uno de los alambres comerciales más pequeños y soporta hasta 5A a 70V. Con base en la información anterior se realizaron los embobinados correspondientes; con un número de vueltas de alambre diferente para cada uno de ellos con el objetivo de generar campos con intensidad máxima de 200 μ T. Para el sistema X fueron necesarias 58 vueltas por cada bobina, 74 vueltas por cada bobina del sistema Y, mientras que para las bobinas del sistema Z fueron necesarias 89 vueltas para cada bobina.

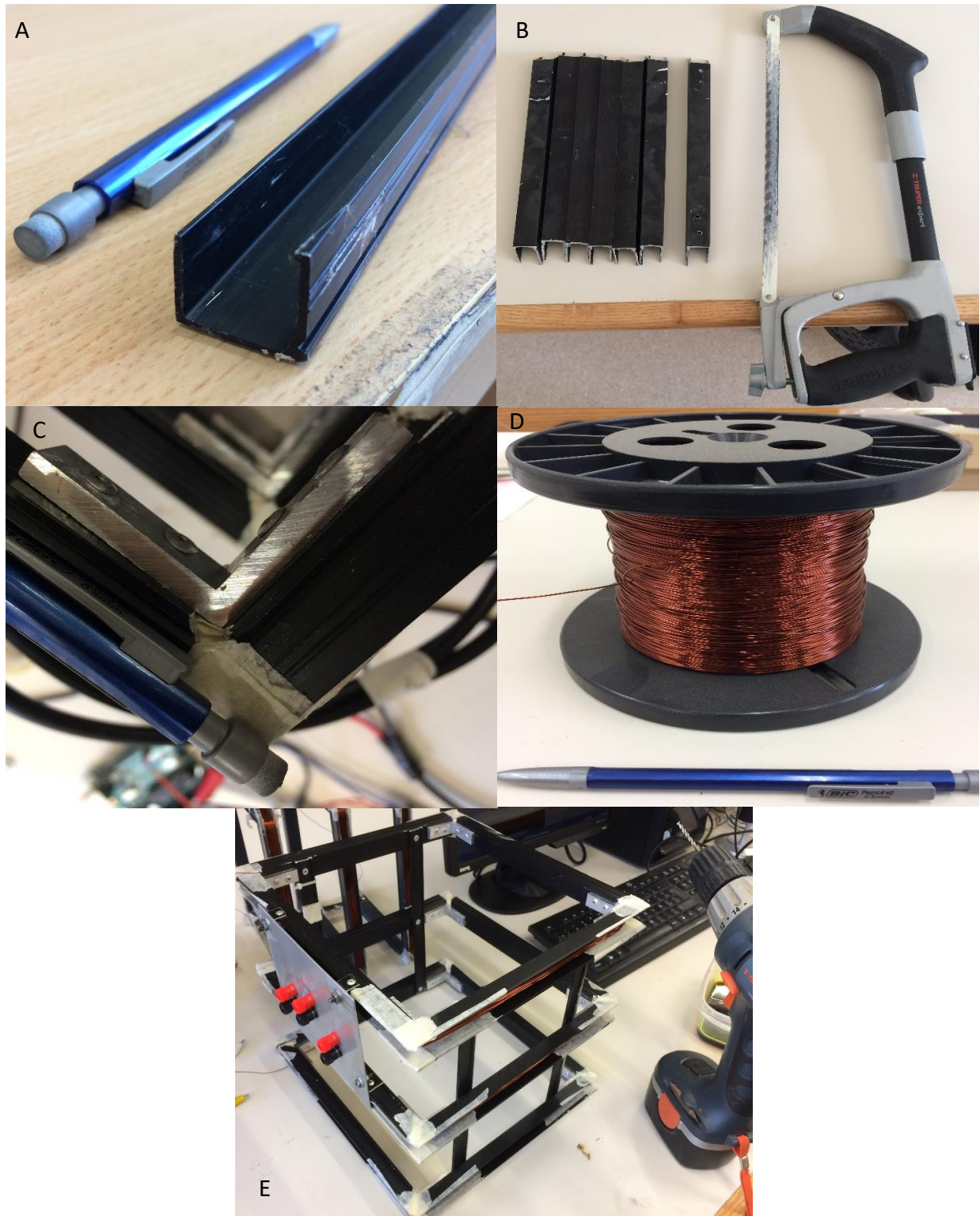


Figura 7. Conjunto de fotografías que muestran los pasos realizados para el armado de los sistemas de embobinados A) Canaleta de aluminio que se utilizó para la estructura de las bobinas, B) tramos cortados de longitud adecuada para armado de las bobinas, C) muestra la unión de los tramos de canaleta, se hizo mediante una escuadra de aluminio y remaches de aluminio, D) muestra el cable calibre 22 que se utilizó para realizar los embobinados, cada sistema con un número distinto de vueltas, E) muestra uno de los sistemas de bobinas ya terminados.

4.1.2 Diseño y construcción de las fuentes de corriente

La construcción de fuentes de corriente estables y confiables se hizo necesaria para este proyecto ya que nuestro propósito depende en gran medida de la precisión al generar los campos magnéticos dentro de los sistemas de embobinados. Se construyó una fuente de corriente para cada uno de los sistemas de embobinados. Para construir la fuente de corriente se siguió el esquema de la figura 8.

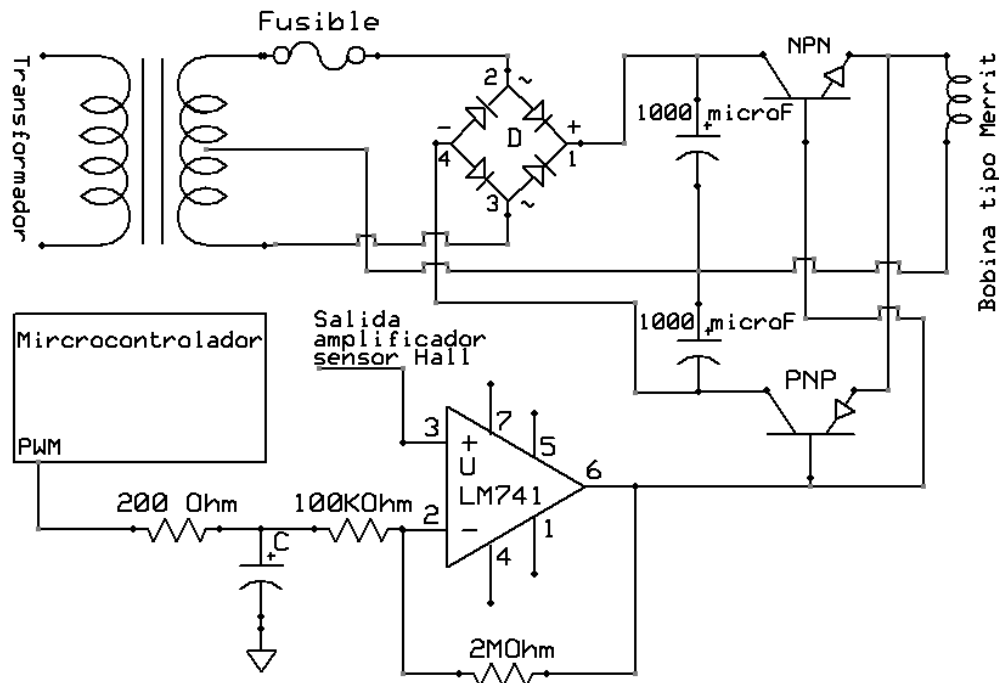


Figura 8. Diagrama electrónico de las fuentes de corriente que se construyeron, basada en (Agilent Technologies, 2000).

Las fuentes se basan en un arreglo de transistores PNP y NPN, los cuales permiten convertir una fuente de voltaje en una fuente de corriente mediante la variación del voltaje en las bases de dichos transistores. La corriente a la salida del emisor de cada transistor es proporcional al voltaje aplicado en la base de cada uno por la

fuente de voltaje regulable generada por el microcontrolador y un filtro pasa bajos a la salida PWM del microcontrolador. Mediante el acoplamiento de estas fuentes de corriente con la tarjeta de control y a su vez con los embobinados permite tener el control en del campo generado por los embobinados en todo momento.

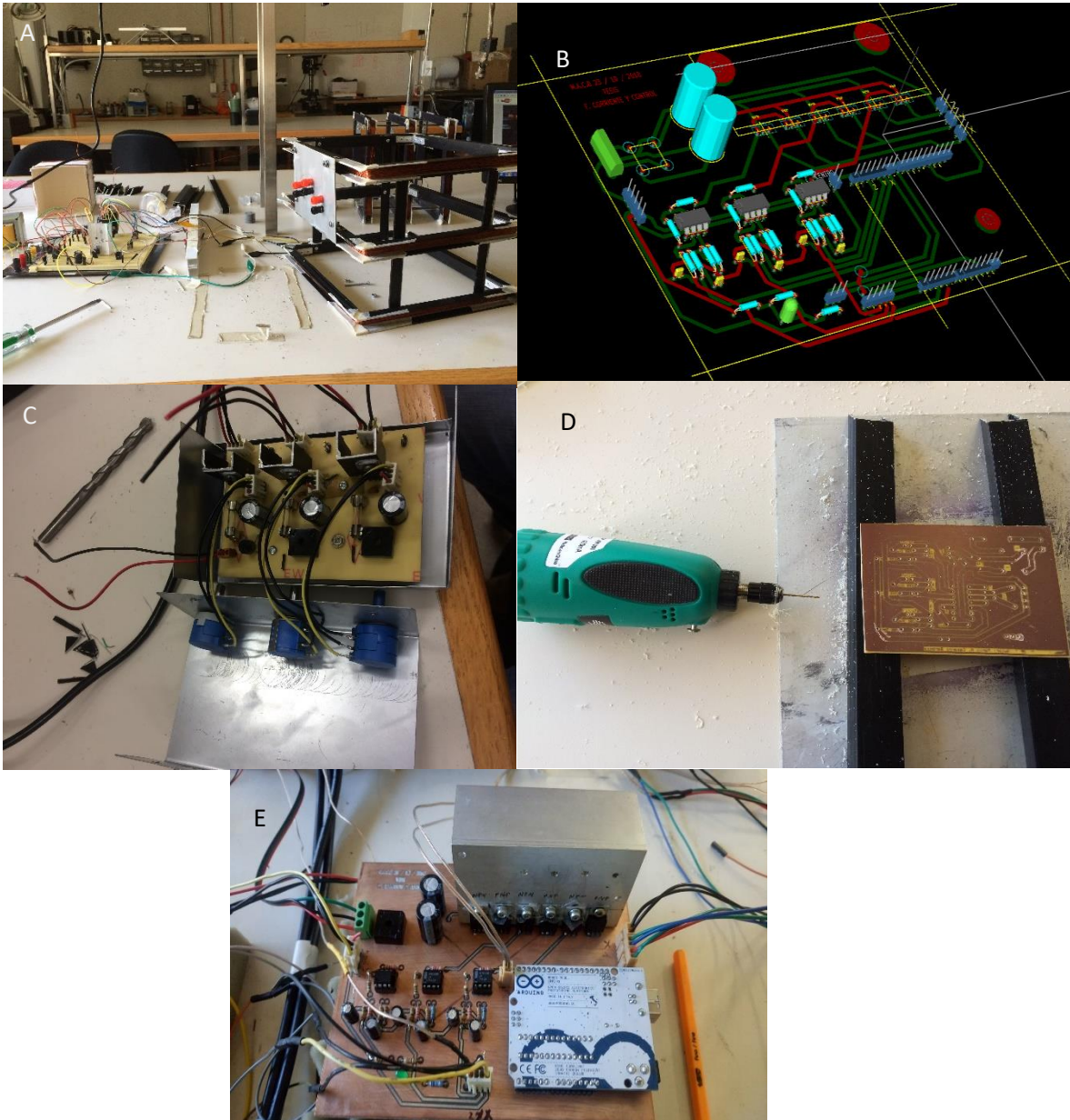


Figura 9. Presenta el procedimiento de armado de las fuentes de corriente. A) Armado del esquema electrónico en protoboard, B) Diseño del diagrama en PCB en el programa KiCad, C) Se imprime en baquelita y se perfora para posteriormente acomodar los componentes electrónicos, D) Acomodo y soldado de los componentes a la baquelita y E) fotografía de la baquelita completa y funcional.

A cada una de las fuentes de corriente se les hicieron pruebas que permitieron caracterizarlas; se tomaron datos para ver sus respuestas características a la salida (ver Figura 10), su estabilidad y temperatura. Es decir, que después de determinado tiempo no haya sobrepasado los límites de temperatura a la cual los componentes trabajan normalmente y sobre todo que la respuesta en corriente a la salida sea la adecuada.

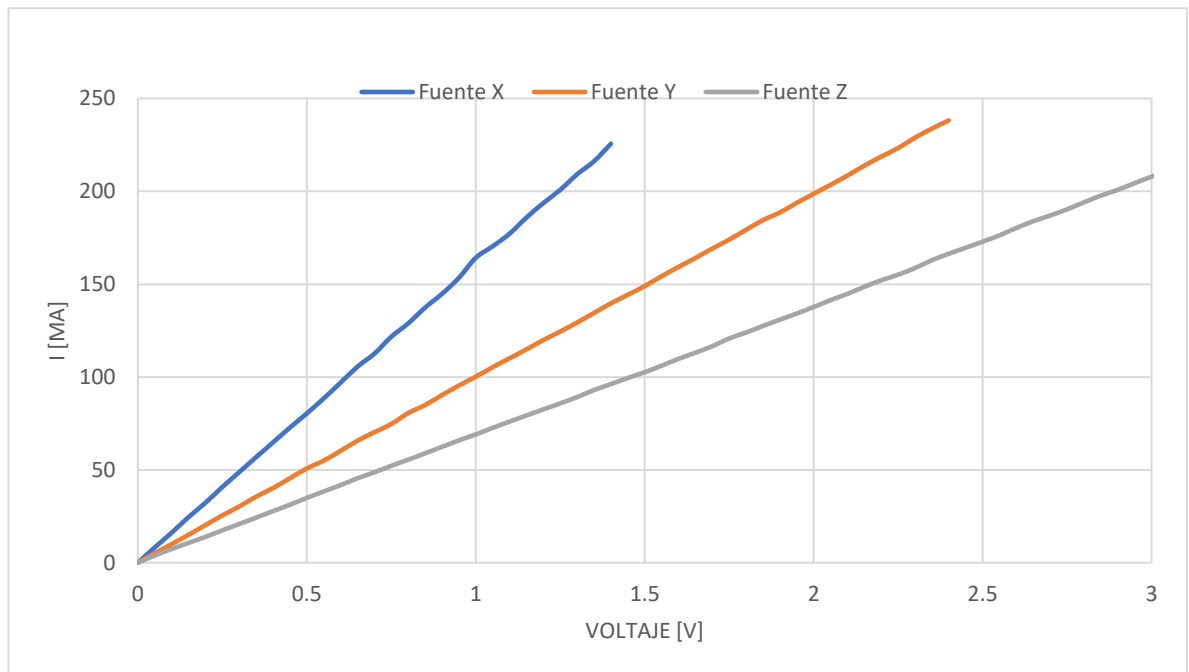


Figura 10. Gráfico de caracterización de las fuentes, el voltaje que presenta es el que se hizo llegar a la base del transistor y la corriente en el gráfico es la que se obtiene a la salida (emisor) del transistor, con esto se muestra la relación de la corriente con respecto al voltaje al momento de convertir una fuente de voltaje en una de corriente.

4.1.3 Diseño y construcción del horno

Dada la necesidad de calentamiento de los especímenes durante el proceso para obtener las paleo intensidades (en el caso de las rocas) o arqueo intensidades (en el caso de las cerámicas), se diseñó y construyó un horno que nos permitiera calentar las muestras a temperaturas por arriba de la temperatura de Curie (T_c) de la magnetita ($580\text{ }^{\circ}\text{C}$) mineral que ha sido referencia por sus características magnéticas.

El horno consta de una fuente de corriente (ver figura 11) que funciona a partir de corriente alterna (CA); mediante el recorte de la fase en la corriente alterna permite regular la potencia suministrada.

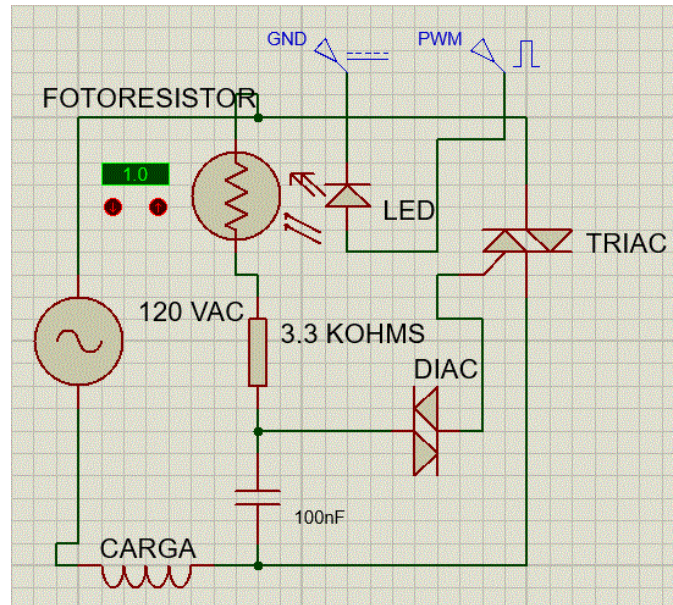


Figura 11. Diagrama eléctrico de la fuente para el control de potencia por recorte de fase que se utilizó para acoplarla con el horno con la tarjeta de control.

El horno también se utiliza como porta muestras y consta de un tubo de cuarzo de una longitud de 12 cm por 2.5 cm de diámetro, suficientes para que las muestras arqueológicas o rocas puedan entrar sin problema. Alrededor del tubo, por fuera de este, se le colocó una espiral de alambre no magnético (platino) que puede resistir altas temperaturas. El espiral se enrolló de forma anti-paralela, de tal forma que el campo que pueda generarse, por la corriente que circula a través de él para lograr un calentamiento, no genere ningún tipo de inducción magnética.

El alambre se pegó al tubo con un pegamento a base de SiO_2 que soporta temperaturas de hasta $1650\text{ }^\circ\text{C}$, este mismo requirió de un curado especial de varios calentamientos previos a diferentes temperaturas antes de utilizarlo como horno

para el propósito de este proyecto, ver figura 12. El termopar utilizado para monitorear la temperatura es tipo E.

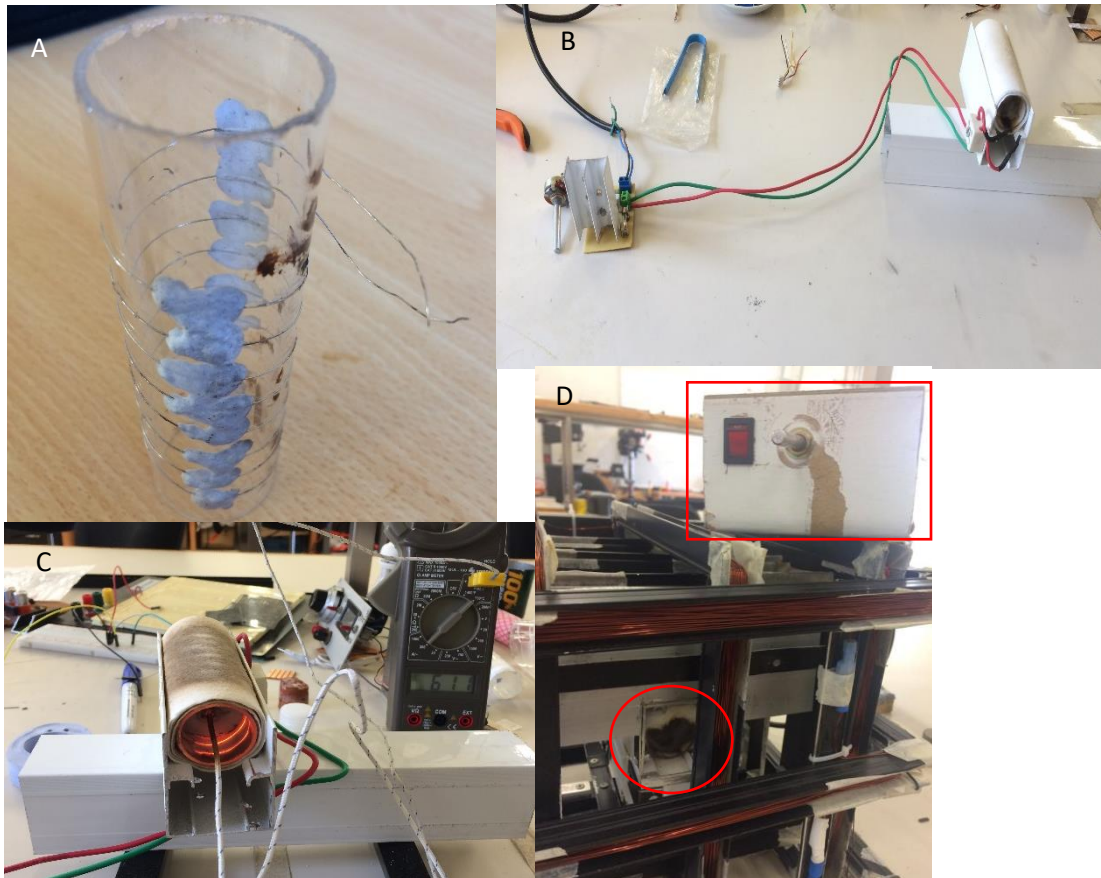


Figura 12. Fotografías tomadas durante la construcción del horno A) Muestra el tubo de cuarzo con el espiral en ida y vuelta que se le pego al tubo. Ese alambre es el responsable de calentar y su temperatura es proporcional a la corriente que se hace pasar a través de él, B) Muestra el tubo montado sobre su base de aluminio envuelto de una fibra de cuarzo también capaz de soportar altas temperaturas, C) muestra el horno encendido y calentando como parte de las pruebas realizadas y D) muestra el horno ya instalado en el sistema de bobinas (círculo de color rojo), y la fuente para alimentarlo (rectángulo rojo).

Los materiales utilizados para la construcción del horno se eligieron también con la premisa de que no fuesen magnéticos. Para la base del horno se utilizó canaleta de aluminio y remaches del mismo material, un tubo de cuarzo y como aislante, fibra

de cuarzo debido a que el cuarzo soporta altas temperaturas y a la vez es diamagnético.

Para el horno también se hicieron caracterizaciones a diferentes valores de voltaje, con el objetivo de ver su respuesta ante el calentamiento (taza de calentamiento) y su enfriamiento (taza de enfriamiento) y con esta respuesta evaluarlo y decidir si nos era útil para el objetivo de este proyecto. Una de las caracterizaciones se muestra en la figura 13.

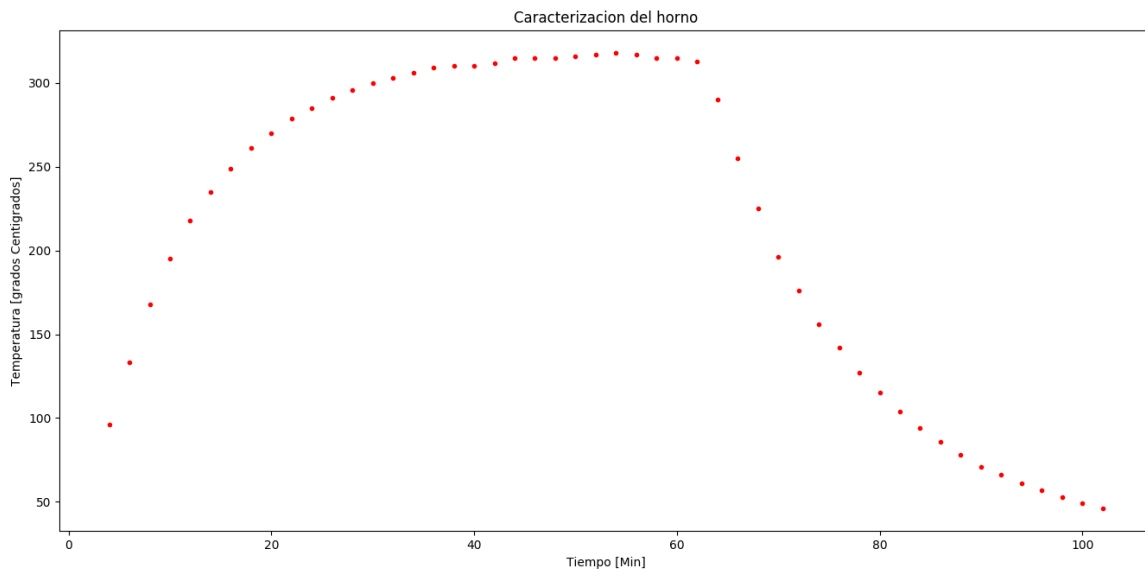


Figura 13. Curva característica del horno a un voltaje de 14V y retirado después de 63 minutos

4.1.4 Diseño y construcción de un magnetómetro triaxial

El magnetómetro triaxial que se construyó para el equipo es una parte importante ya que se debe monitorear en todo momento el campo aplicado a la muestra por los sistemas de embobinados. Esta es una de las características principales del equipo, que proponemos en este trabajo y que permiten que los errores humanos disminuyan al momento de posicionar las muestras.

El magnetómetro que se construyó está basado en 3 sensores de efecto Hall analógicos, es decir, que la respuesta del sensor es proporcional a la intensidad del

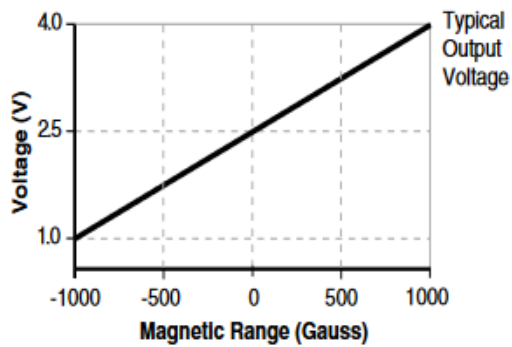


Figura 14. Respuesta de los sensores Hall a un campo magnético de intensidad ascendente, obtenida de (Honeywell International Inc., 2015).

campo magnético aplicado (lineal). Se usaron 3 sensores debido a que se monitorea el campo en los tres ejes cartesianos (X, Y y Z). Con respecto a los sensores, encontrar sensores comerciales que permitieran relacionar la intensidad del campo aplicado con un valor de voltaje en todo momento no fue sencillo, ya que, en su mayoría, los sensores sólo son sensibles a la presencia de un campo magnético, pero no es posible medir su

intensidad, es decir, funcionan como interruptores.

Los sensores utilizados para construir el magnetómetro son modelo SS49E y la respuesta de estos a la presencia de un campo magnético se muestra en la figura 14. La sensibilidad de los sensores es de 1.8 mV/G a una temperatura estable de 25°C. Sin embargo, el objetivo de este proyecto es medir intensidades del orden de μ Teslas (10^{-6} T). Por tal motivo se diseñó y construyó un sistema electrónico que permita amplificar y acoplar la señal obtenida de los sensores para poder medir campos magnéticos del orden de μ T para, posteriormente poder ser leídas en una tarjeta Arduino UNO.

El acoplamiento y amplificación de la señal consta de tres amplificadores operacionales; dos de estos son amplificadores de propósito general que vienen encapsulados en un solo circuito integrado (amplificador dual LM747). El tercer amplificador es un INA114; es un amplificador de instrumentación de bajo ruido. El primer amplificador funciona como un comparador. Por un lado, el objetivo de éste es poder generar una señal de 2.5 V en una de sus entradas para realizar un ajuste o resta a la señal (offset) y se parta de que 0V corresponda a cero Gauss. La salida lineal del sensor Hall está conectada a la entrada no inversora del amplificador y la señal de aproximadamente 2.5V es generada por un diodo Zener LM336 con un voltaje Zener de 2.5V y acoplada a un arreglo de diodos IN457 junto con un

potenciómetro de 10 k Ω para minimizar los cambios que los componentes tengan en las señales debidas a las variaciones de la temperatura ambiente. Ésta a su vez está conectada a la entrada inversora del amplificador. Una vez que las dos señales a las entradas del amplificador son iguales, la salida de este será cero.

Una vez que las diferencias son mínimas entre las señales a la entrada del primer amplificador, a la salida de este es casi cero; la única diferencia que habrá a en las señales a las entradas será la señal generada a través de los sensores de efecto Hall, proporcional al campo magnético externo. El paso siguiente es amplificar esa diferencia con el amplificador de instrumentación, la señal se amplifica 1000 veces (ver figura 15), lo que nos permite estar midiendo en el rango de los μT a una sensibilidad de $17\text{mV}/\mu\text{T}$. La decisión de amplificar por ese factor se tomó con base en la comparación de la resolución del microcontrolador usado, comparado con la señal que se genera por los sensores.

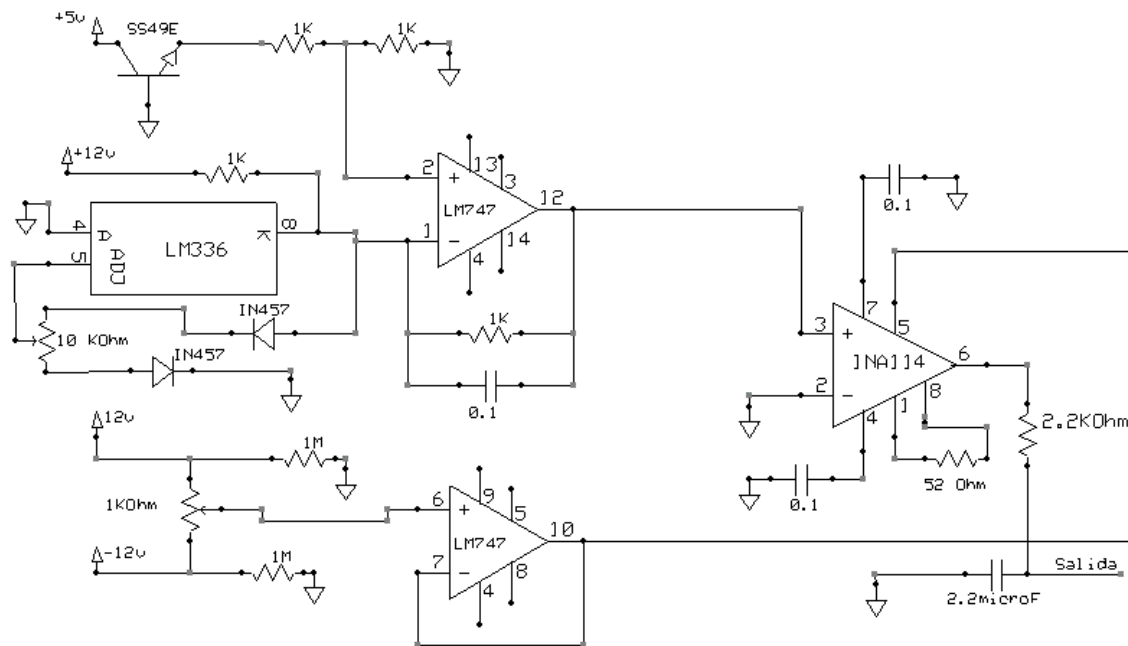


Figura 15. Diagrama eléctrico para el tratamiento y amplificación de las señales de los sensores de efecto Hall (SS49E). Los dos amplificadores LM747 que se muestran son un solo encapsulado.

Se tuvieron problemas al momento de acoplar la tarjeta Arduino UNO con el diseño realizado debido a que no se pudieron igualar las tierras de la computadora con la del sistema, para resolverlo tuvimos que alimentar el Arduino con la computadora y el sistema construido con otra fuente bipolar que también se construyó con el objetivo de alimentar los amplificadores que se necesitarían para el acoplamiento de la señal. El acoplamiento de estas dos fuentes generaba ruido de baja frecuencia en la señal que se obtenía, por tal motivo se decidió hacer la conexión PC-Arduino mediante una tarjeta bluetooth Ht-05 prediseñada para Arduino.

Entre otros problemas que se fueron presentando al momento de hacer las primeras pruebas fue la variación de temperatura en el ambiente. Dado que los sensores trabajan a su máxima sensibilidad, cualquier cambio en la temperatura directamente en el sensor u otros componentes es perceptible, generando una variación en la señal de salida ya que por construcción todos los circuitos integrados de estado sólido son sensibles a cambios en la temperatura. Por lo cual, los circuitos integrados se aislaron de la intemperie lo mejor posible.

Uno de los requerimientos en el armado de equipo fue que los sensores de campo magnético estuviesen ubicados lo más cerca posible del lugar que ocupa la muestra. Ese sitio es a un costado del horno, ya que como se mencionó anteriormente, el horno también cumple con la función de porta muestras, y como los sensores generan cambios en la señal de salida, debido a cambios en la temperatura del medio, fue necesario aislarlos de los cambios de temperatura propiciados por el horno sin tener que alejarlos. Para ello se construyó un aislante térmico que funciona dentro de un tubo de acrílico de 5 cm de diámetro que se ventila de manera automática, dentro de este tubo se encuentran los sensores de efecto Hall. La ventilación es controlada mediante el Arduino UNO, éste decide la activación o desactivación de un ventilador de 6V y 100mA según la temperatura a la que se encuentren los sensores.

La temperatura de los sensores dentro del tubo es monitoreada también por el Arduino UNO mediante un sensor LM335 (sensor de temperatura analógico con rango de -40 a 125°C).

3.1.6 Diseño y programación de Software

Para el control del equipo se diseñó un software que lleva por título MultiplesSpecimenes el cual es capaz de recibir datos del equipo “MultiplesSpecimen (hardware)” en tiempo real, así como mantener el control del hardware en todo momento (ver figura 16).

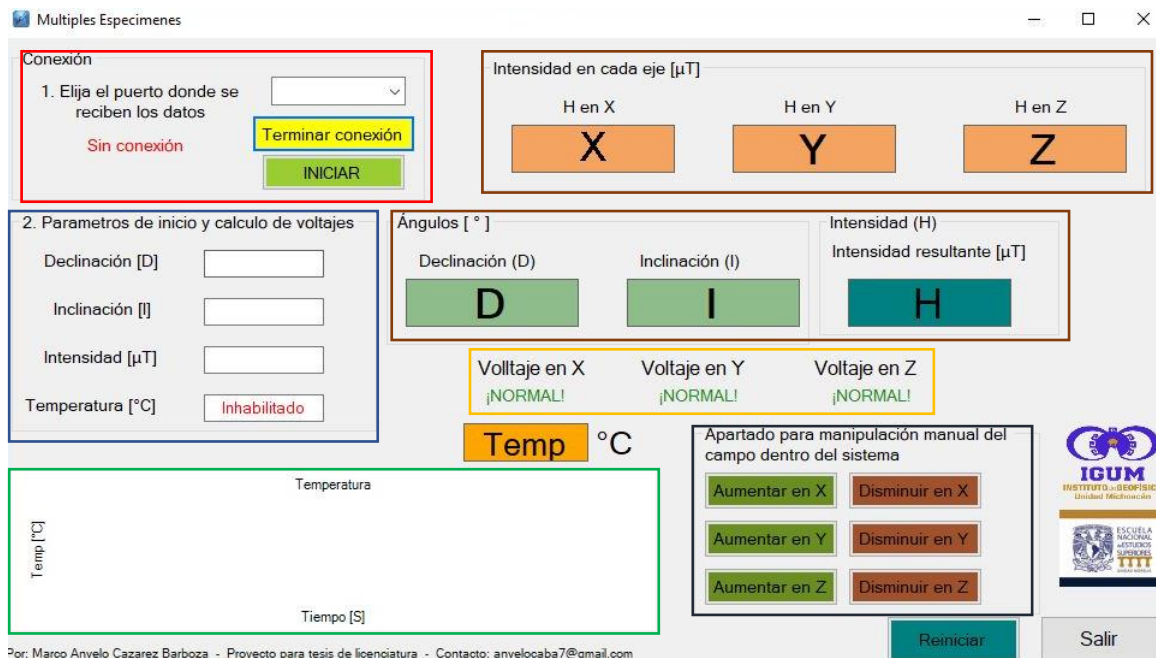


Figura 16. Fotografía del software, el primer apartado rodeado por el recuadro de color rojo está dedicado a la conexión con el Arduino, es decir se selecciona el puerto COM en el cual se vincularán. El siguiente apartado está rodeado por el recuadro de color azul y está dedicado a la recepción de los datos por parte del usuario que servirán para el cálculo de los valores de corriente en los embobinados y que son los datos característicos de la NRM en la muestra en proceso. Los apartados rodeados por los recuadros de color marrón están destinados al despliegue de la información adquirida, los valores de declinación, inclinación e Intensidad son calculados en tiempo real a partir de los valores de intensidad magnética en cada uno de los ejes. El apartado rodeado por el recuadro de color verde está dedicado a la visualización gráfica de los datos de temperatura, el apartado rodeado por el recuadro de color naranja muestra el estado o dirección de la corriente en los embobinados, cada uno por separado. Por último, el apartado rodeado por el recuadro negro se destina para la manipulación manual del campo magnético dentro del sistema.

Cabe mencionar que para la programación de la interfaz gráfica (figura 16) se utilizó Visual Studio 2017. Para la adquisición de datos y la manipulación del hardware se utilizó la plataforma Arduino mediante una placa Arduino UNO, que está basada en lenguaje C++.

El Arduino monitorea los sensores de campo magnético (sensor triaxial) y de temperatura secuencialmente, con intervalos de 0.6 segundos entre un sensor y otro. El Arduino también se encarga de recibir las órdenes del software implementado en Visual Studio 2017. Este último envía caracteres automáticamente a partir de los cálculos y comparaciones que realiza (modo automático). También mediante la manipulación de botones en la misma interfaz (en modo manual) y los envía a través del puerto COM.

Tabla 3. Resumen de las actividades que se realizan durante la comunicación entre el Arduino y el software MultiplesSpecimenes.

Carácter que imprime el Software	Momento o acción en que lo lleva a cabo	Acción que realiza el Arduino
<i>P</i>	Solo se realiza si se presiona el botón "INICIAR"	Inicia las lecturas de todos los sensores y envía esa información al software
<i>M</i>	Mediante el clic en botón "TERMINAR CONEXIÓN" y botón "Reiniciar"	Reinicia el Arduino y todo el software que manipula el Arduino, es decir todo queda listo para iniciar nuevamente
<i>A</i>	El software da la orden automáticamente o al presionar el botón "Aumentar en X".	Aumenta la intensidad magnética en la componente X
<i>B</i>	El software da la orden automáticamente o al	Disminuye la intensidad magnética en la componente X

	presionar el botón “Disminuir en X”.	
<i>C</i>	El software da la orden automáticamente o al presionar el botón “Aumentar en Y”.	Aumenta la intensidad magnética en la componente Y
<i>D</i>	El software da la orden automáticamente o al presionar el botón “Disminuir en Y”.	Disminuye la intensidad magnética en la componente Y
<i>E</i>	El software da la orden automáticamente o al presionar el botón “Aumentar en Z”.	Aumenta la intensidad magnética en la componente Z
<i>F</i>	El software da la orden automáticamente o al presionar el botón “Disminuir en Z”.	Disminuye la intensidad magnética en la componente Y

Durante la adquisición de los datos el Arduino UNO se encarga de enviar los datos de intensidad magnética de cada componente (HX, HY y HZ) provenientes del sensor triaxial y temperatura a la interfaz gráfica. Ésta, a su vez, se encarga de realizar los cálculos de la declinación, la inclinación y la intensidad resultante a partir de las intensidades en cada una de las componentes.

Ya que el objetivo del software MultiplesSpecimenes es procesar dichos datos para realizar el cálculo de la intensidad resultante (Hr), la declinación (Dec), la inclinación (Inc) y una vez que el usuario proporciona los valores anteriormente mencionados apropiados para la muestra según su NRM se hace el cálculo inverso, es decir, a partir de la declinación, inclinación e intensidad se calcula el flujo de corriente necesario en los sistemas de embobinados para genera un campo como el que la muestra necesita y se lleve a cabo el procedimiento.

Las ecuaciones con las que trabaja el software son las siguientes, sin mencionar también aquellas que se usaron para convertir los valores de voltaje o corriente en intensidad de campo y que se obtuvieron a partir del proceso de calibración del equipo:

1.- Para el cálculo de las componentes del campo a partir de los valores de campo generados por las bobinas:

$$Hr = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$$

$$Dec = \tan^{-1} \left[\frac{H_x}{H_y} \right]$$

$$Inc = \sin^{-1} \left[\frac{H_z}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}} \right]$$

2.- Para el cálculo de los valores de voltaje a partir de los datos proporcionados por el usuario, el programa utiliza las siguientes ecuaciones:

Para comenzar es necesario tener los valores de declinación, inclinación e intensidad. A partir de eso aplicamos las siguientes ecuaciones:

$H = Hr \cos(Inc)$Donde H es la intensidad resultante en el plano horizontal

$H_z = H \cos(Inc)$Donde H_z es intensidad magnética en el eje Z

$H_x = H \cos(Dec)$Donde H_x es intensidad magnética en el eje X

$H_y = H \sin(Dec)$Donde H_y es intensidad magnética en el eje Y

5 Resultados

5.1 Evaluación del magnetómetro triaxial

Parte fundamental del dispositivo creado es el buen funcionamiento del magnetómetro triaxial, ya que una de las tareas principales del dispositivo es monitorear el campo magnético dentro de los sistemas de bobinas y la evaluación de este en tiempo real para poder manipularlo en las direcciones e intensidad necesarias para cada uno de los especímenes a tratar.

Como primer paso para la evaluación del magnetómetro se evaluaron las respuestas de cada uno de los sensores por separado, ver figuras 17, 18 y 19.

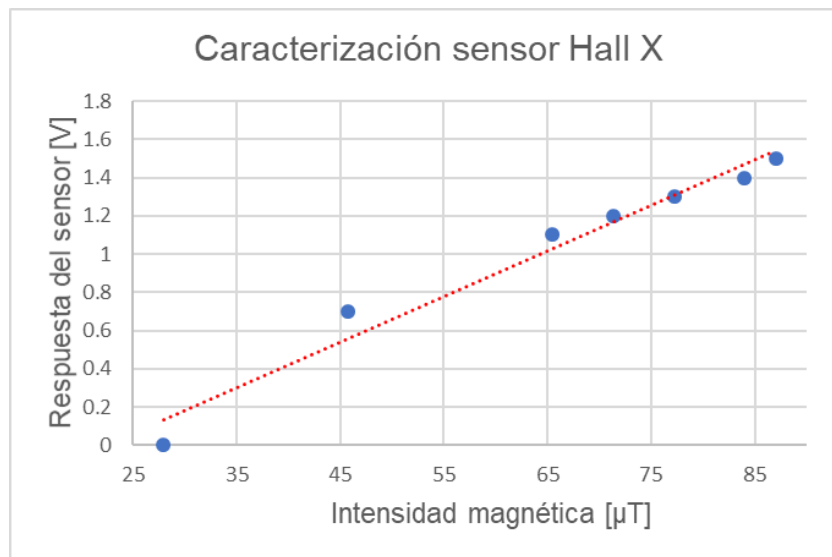


Figura 17. Gráfico que muestra la respuesta del sensor Hall predispuesto para la medición del campo magnético en la componente X.

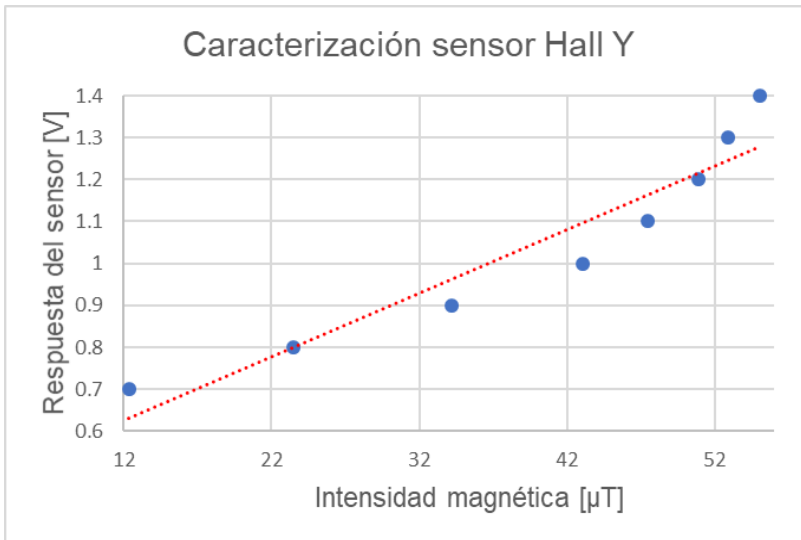


Figura 19. Gráfico que muestra la respuesta del sensor Hall predispuesto para la medición del campo magnético en la componente X.

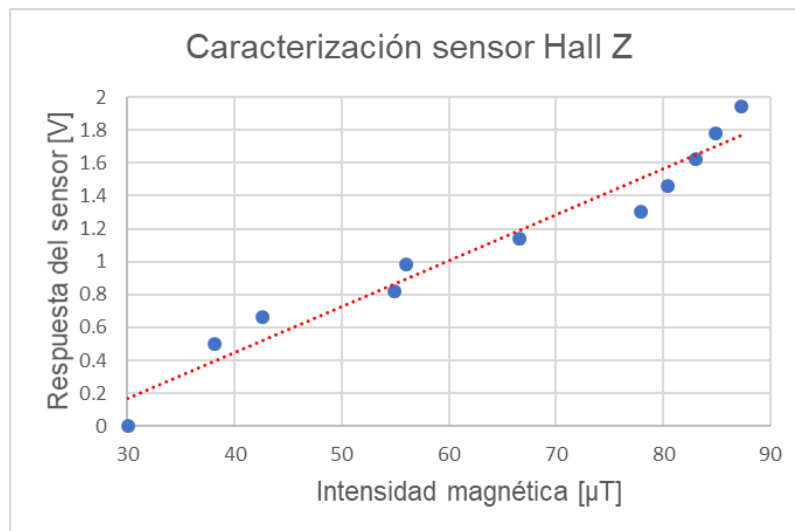


Figura 18. Gráfico que muestra la respuesta del sensor Hall predispuesto para la medición del campo magnético en la componente X.

Posteriormente, se dejaron funcionando los sensores por periodos de tiempo prolongados (días), observándose que el comportamiento de los sensores es muy estable. No obstante, es recomendable mantener el sistema electrónico en un lugar donde no haya variaciones bruscas de temperatura.

5.2 Evaluación del sistema de bobinas

En el apartado 3.1.1 se habló del diseño y la forma de construcción del sistema de bobinas implementado en el dispositivo. Vale la pena mencionar que el armado de todas las partes que componen este equipo fue a mano y en ningún momento se adquirieron piezas prefabricadas lo que proporciona a este equipo facilidad de mantenimiento y en su caso de reemplazar o re fabricar alguna pieza sin tener que depender de terceros.

El funcionamiento y la respuesta de las bobinas resultó ser muy buena para las condiciones y características del campo al que normalmente se exponen especímenes de tipo cerámico y de roca. El comportamiento de estas bobinas por separado se muestra en la figura 20.

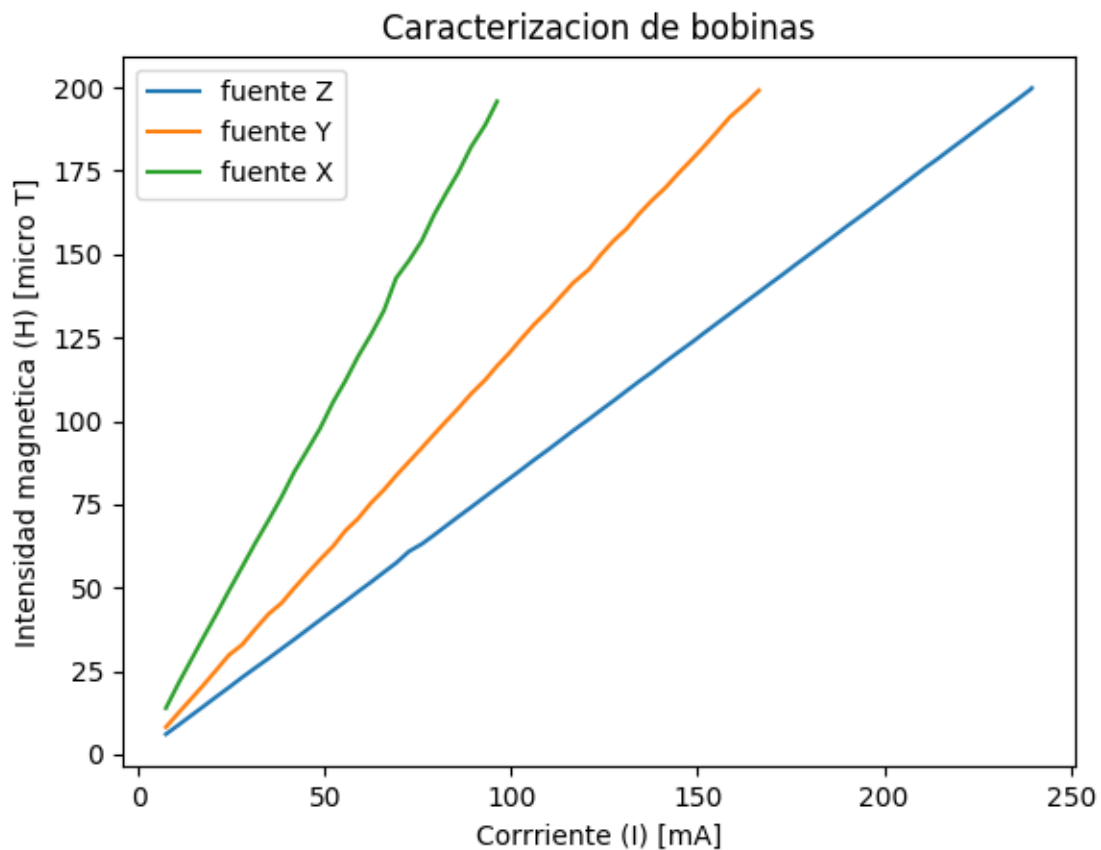


Figura 20. Se muestra la respuesta del campo dentro de cada una de las bobinas como respuesta a la variación de la corriente que circula por ellas.

Por separado cada una de las bobinas tuvo una buena respuesta, los coeficientes de correlación r^2 para cada bobina son 0.999, 1 y 1, para las bobinas X, Y y Z, respectivamente.

Fue necesaria otra prueba para la evaluación de la respuesta de las bobinas como un solo sistema. Se varió la corriente en las bobinas de manera ascendente para ver la respuesta en intensidad (H) de los embobinados en conjunto, ver figura 21.

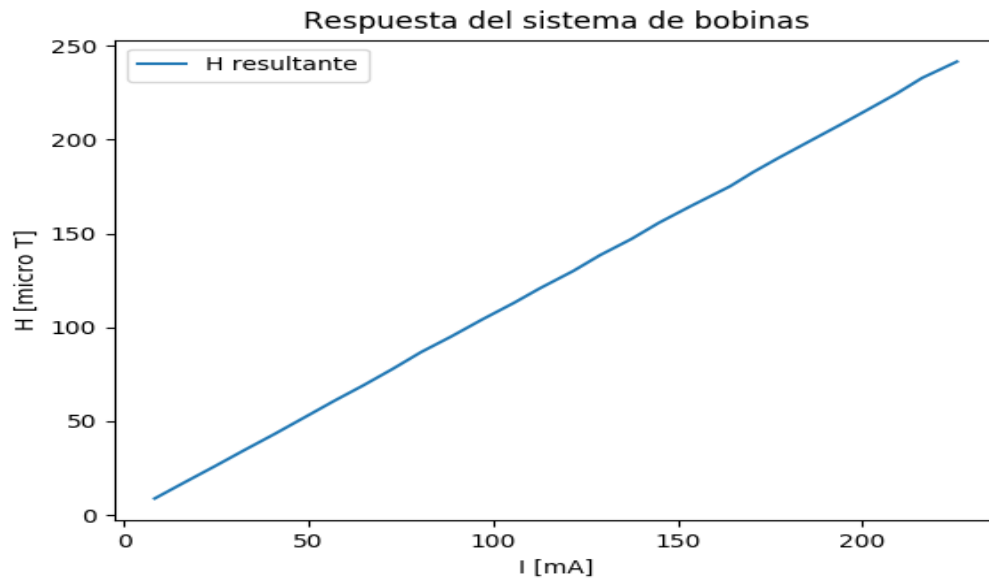


Figura 21. Se muestra la respuesta de las bobinas en conjunto. Se realizó una prueba de variación de intensidad de campo magnético, obteniendo la respuesta se muestra en este gráfico.

Durante la prueba fue posible obtener valores de intensidad magnética como evaluación de las bobinas tipo Merritt, lográndose una regresión con un $r^2 = 1$. Con este último dato, y comparando contra los datos de cada una de las bobinas por separado, podemos decir que el comportamiento en cualquiera de sus configuraciones es muy bueno, proporcionándonos así una buena estabilidad del campo internamente, lo cual brinda también mayor confianza al momento de llevar a cabo el método en diferentes tipos de especímenes. Una prueba más consistió en hacer variar la intensidad magnética en un solo embobinado y se dejó una intensidad magnética fija en los otros dos embobinados, para esto se hicieron tres

combinaciones de funcionamiento de las bobinas, el resultado de estas pruebas se presenta en las figuras 22, 23 y 24 y tablas 3 - 5 en anexos.

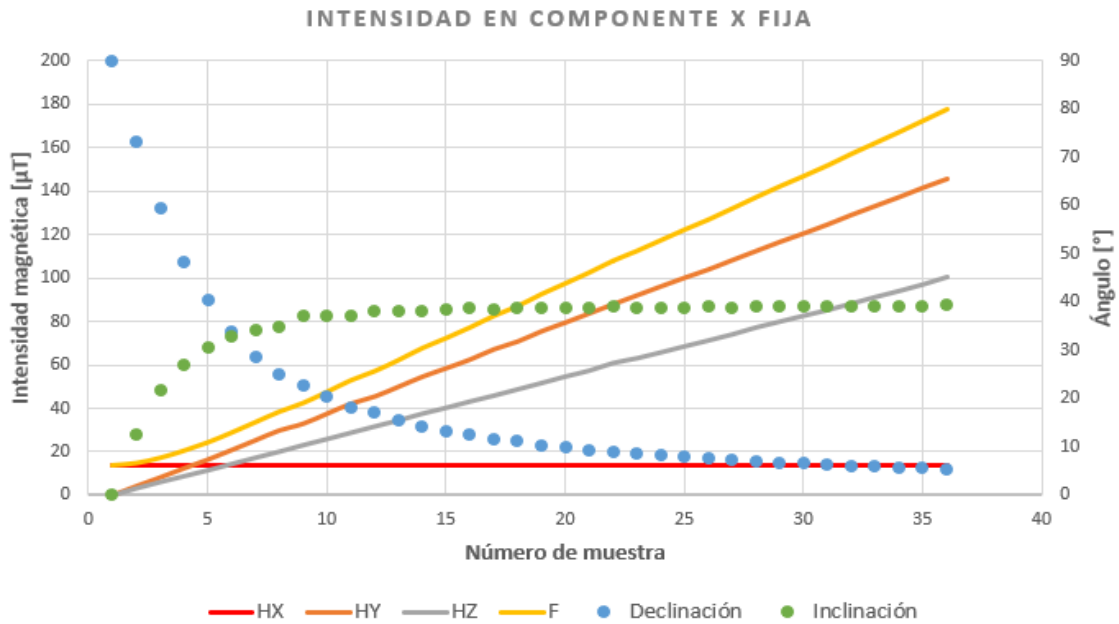


Figura 22. Gráfico para mostrar (a manera de prueba) el comportamiento de las diferentes componentes del campo magnético dentro de los embobinados; se deja una componente fija, en este caso la X (línea continua de color rojo) y se varían Y y Z para ver las variaciones en la Declinación e Inclinación. HX: intensidad magnética en la componente X, HY: intensidad magnética en la componente Y, HZ: Intensidad magnética en la componente Z y F es la intensidad magnética resultante a partir del cálculo correspondiente.

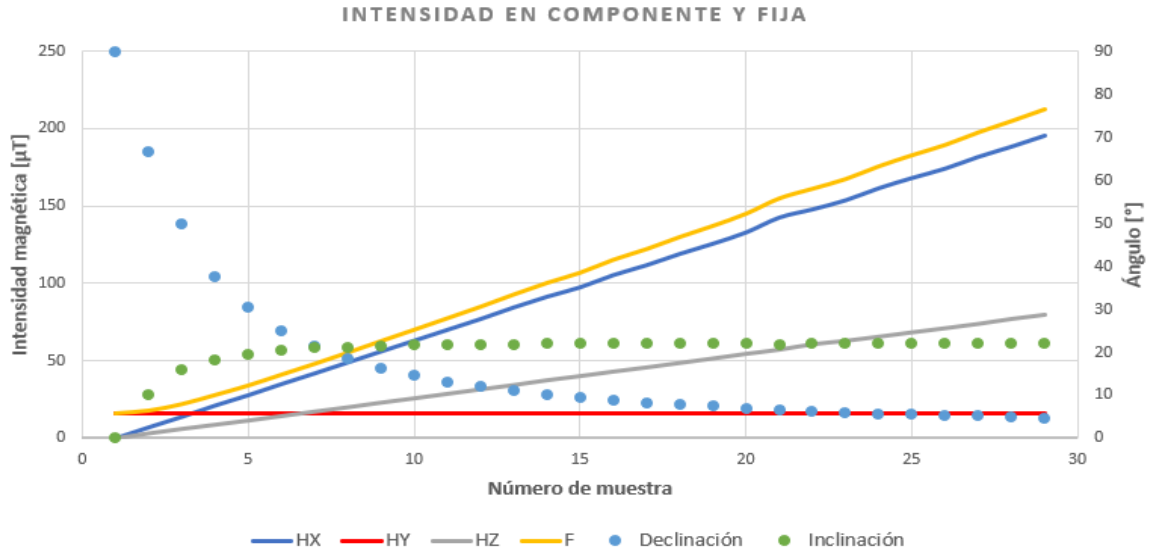


Figura 23. Gráfico para mostrar (a manera de prueba) el comportamiento de las diferentes componentes del campo magnético dentro de los embobinados; se deja una componente fija, en este caso la Y (línea continua de color rojo) y se varían Y y Z para ver las variaciones en la Declinación e Inclinación. HX: intensidad magnética en la componente X, HY: intensidad magnética en la componente Y, HZ: Intensidad magnética en la componente Z y F es la intensidad magnética resultante a partir del cálculo correspondiente.

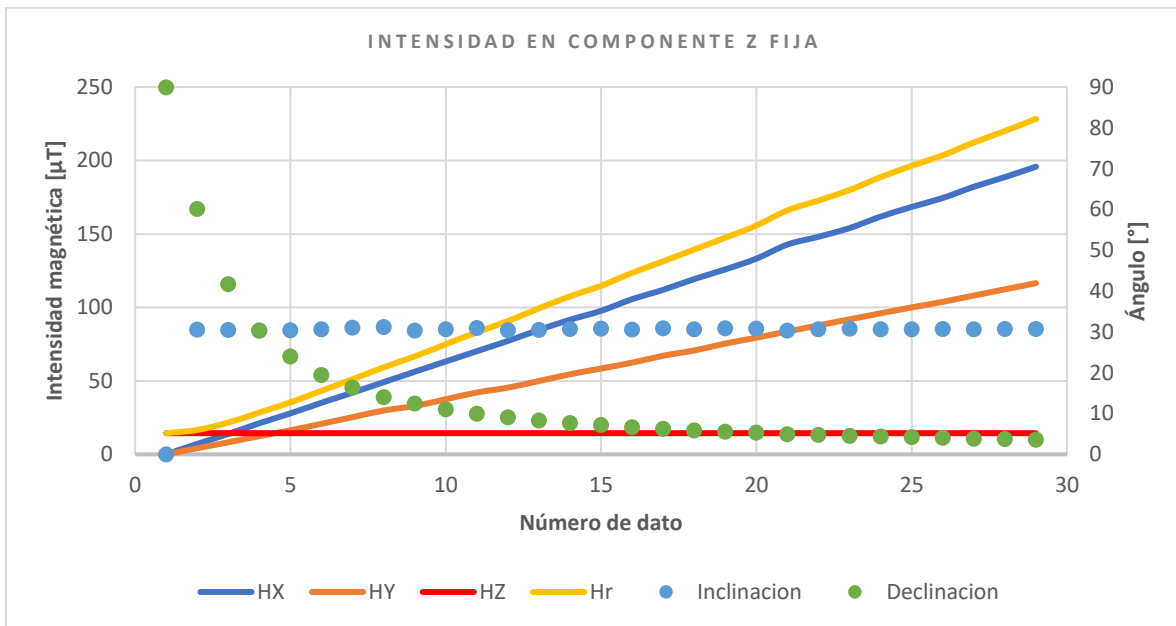


Figura 24. Gráfico para mostrar (a manera de prueba) el comportamiento de las diferentes componentes del campo magnético dentro de los embobinados; se deja una componente fija, en este caso la Z (línea continua de color rojo) y se varían Y y Z para ver las variaciones en la Declinación e Inclinación. HX: intensidad magnética en la componente X, HY: intensidad magnética en la componente Y, HZ: Intensidad magnética en la componente Z y F es la intensidad magnética resultante a partir del cálculo correspondiente.

Sin lugar a duda se pueden seguir mejorando estos embobinados, principalmente en el tema de la estética, ya que estas bobinas se elaboraron a mano; si hubiese algún experto en armado de bobinas o un equipo para embobinar, la calidad de las bobinas aumentaría sustancialmente.

Otra de las mejoras que se proponen es aumentar un embobinado más a cada juego de bobinas, es decir, para cada una de las direcciones, según Adame 2010, la homogeneidad del campo podría mejorar en gran medida si se le agrega una o dos bobinas, lo cual cambiaría también la configuración de estas por cada eje.

5.3 Evaluación del horno

Las mediciones de temperatura se realizaron con un termopar de tipo E, que tiene una composición que no modifica la NRM de estos al estar cerca de los especímenes. Se recomienda no llevar el horno a temperaturas mayores a los 800°C debido a que el alambre por el cual circula la corriente, y que permite el calentamiento, podría romperse y el horno dejaría de funcionar.

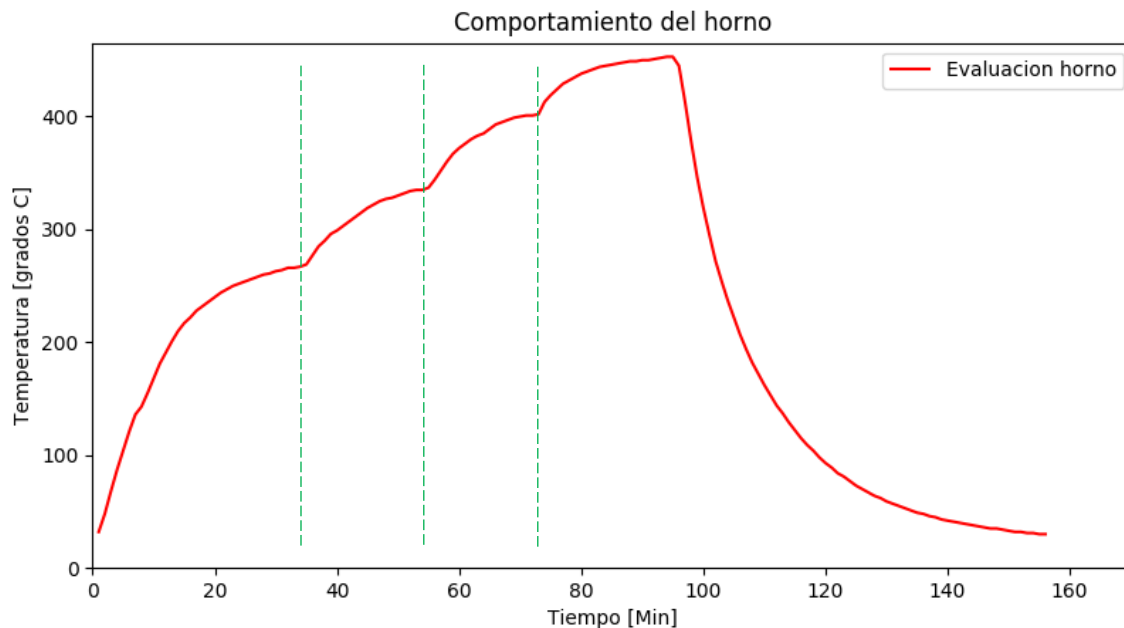


Figura 25. Este gráfico muestra el comportamiento del horno durante su caracterización en diferentes temperaturas, los puntos de inflexión (marcados por las líneas punteadas en color verde) son los cambios de corriente en el controlador; se puede ver la respuesta a ese cambio y el tiempo que le toma estabilizar dicha temperatura.

El horno funciona también como un porta muestras para una única muestra cilíndrica de un diámetro máximo de 2.5 cm, donde la muestra debe ser ubicada siempre lo más centrada posible. El horno está ubicado equidistante a los embobinados de cada una de las bobinas con la intención de que la muestra esté en el centro del sistema y podamos así garantizar que el campo al que se desea exponer el espécimen cumple con las componentes adecuadas.

Observando los resultados obtenidos durante su caracterización (ver figura 25), nos damos cuenta de que la respuesta del horno es adecuada, la sensibilidad a la corriente es alta, por lo que le toma poco tiempo llegar a la temperatura deseada y llega a la estabilización de manera rápida (ver líneas verdes en la figura 23). El tiempo que le toma llegar a la temperatura deseada y estabilizarse en ella es de aproximadamente 30 minutos, permitiendo así que la aumente la temperatura en las muestras de forma gradual sin llegar a afectarlas químicamente.

5.4 Resultados de determinación de paleo y arqueo intensidades geomagnéticas de muestras conocidas.

Una vez construido el equipo fue necesario llevar a cabo una valoración de su funcionamiento y determinar si los objetivos del proyecto se alcanzaron. Se prepararon entonces nueve especímenes de tres muestras diferentes (tres de cada una) para enseguida ser tratados con la intención de obtener las intensidades magnéticas registradas por cada muestra después de haber sido tratados en el laboratorio, aplicándoles una intensidad de campo magnético conocida a cada una de las muestras por separado. Se expusieron a campos con intensidades diferentes: 40, 50 y 60 μT respectivamente.

A las muestras se les llamo *muestra 1*, *muestra 2* y *muestra 3* respectivamente. La prueba entonces consistió en aplicar diferentes intensidades magnéticas por debajo y por arriba de la intensidad de campo magnético aplicada en las muestras previamente en el laboratorio (véanse figuras 26, 27 y 28).

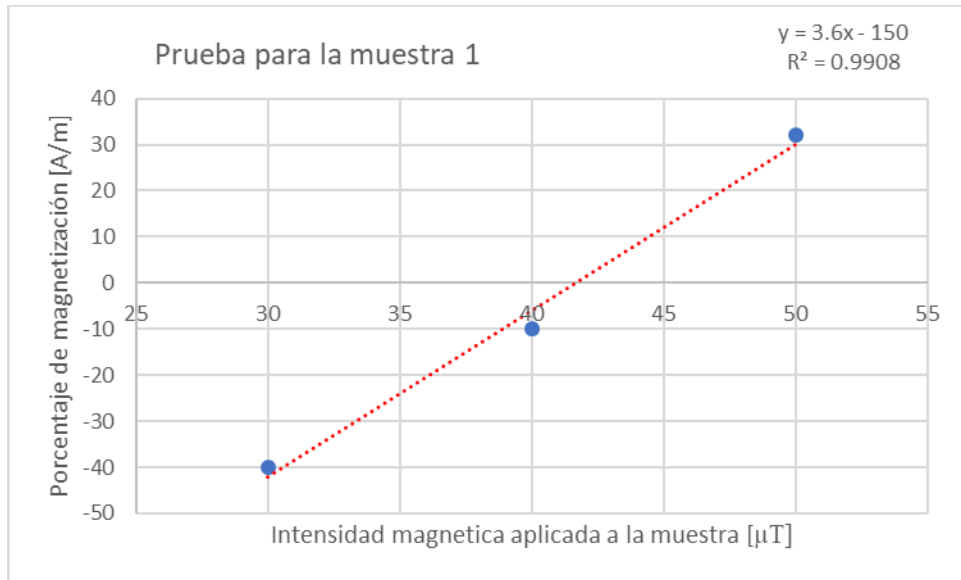


Figura 26. Gráfico correspondiente a los resultados obtenidos para la muestra 1, a la cual se le aplicó una intensidad de campo de $40 \mu T$; la intensidad estimada resultó ser de $41.7 \mu T$.

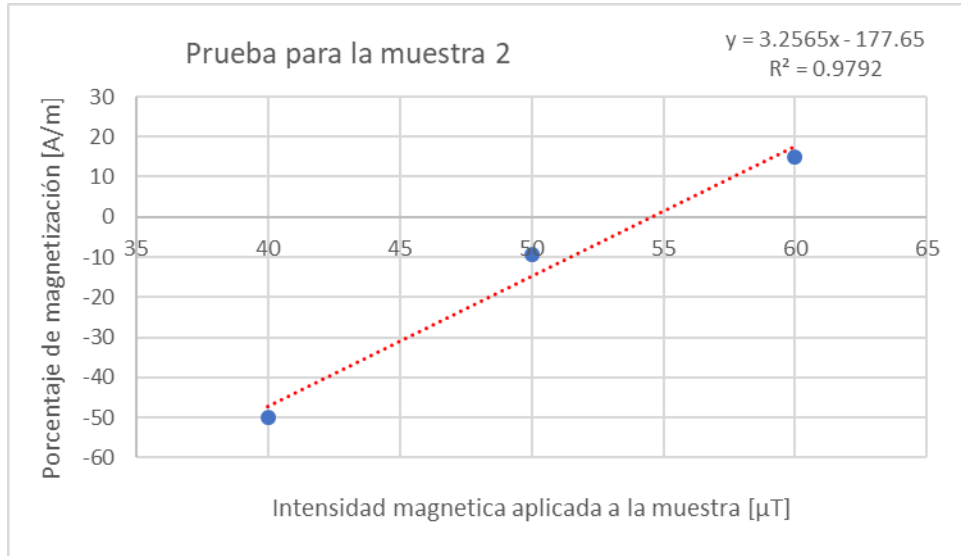


Figura 27. Gráfico correspondiente a los resultados obtenidos para la muestra 2, a la cual se le aplicó una intensidad de campo de $50 \mu T$; la intensidad estimada resultó ser de $54.5 \mu T$.

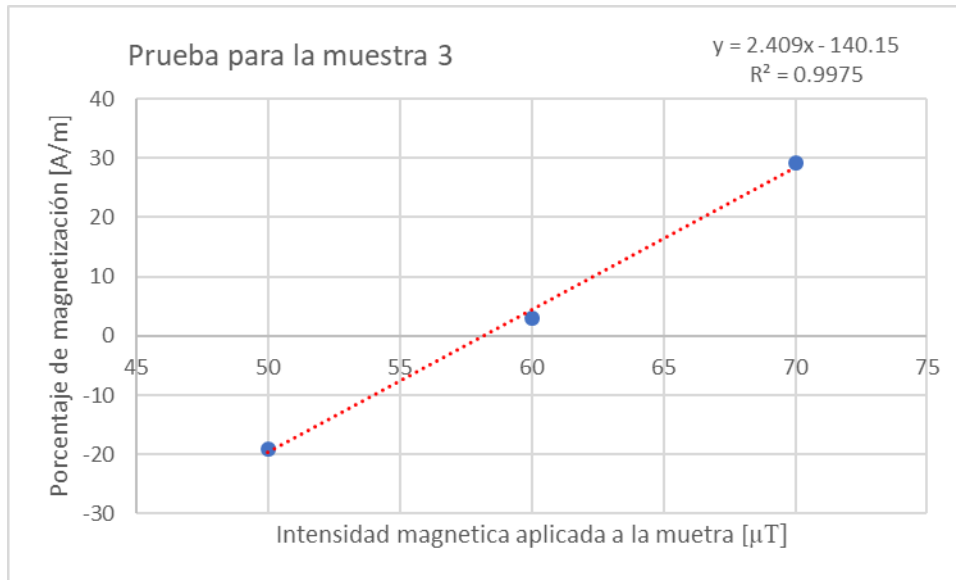


Figura 28. Gráfico correspondiente a los resultados obtenidos para la muestra 3, a la cual se le aplicó una intensidad de campo de $60 \mu T$; la intensidad estimada resultó ser de $58.2 \mu T$.

A modo de resumen de los resultados obtenidos se presenta la tabla 3.

Tabla 3. Resumen de resultados

Muestra	$H_{lab} [\mu T]$	Intensidad de campo estimada [μT]
Muestra 1	40	41.7
Muestra 2	50	54.5
Muestra 3	60	58.2

6 Discusión

El diseño y construcción de bobinas capaces de generar campos magnéticos con intensidades comparables a las presentadas por el campo magnético terrestre durante su historia geológica (entre 0 y $100 \mu T$) se llevó con éxito. Incluso, las bobinas pueden generar campos mucho mayores. Esto puede verse en la figura 21, donde se observa que la intensidad magnética llegó a $200 \mu T$. No obstante, se decidió caracterizarlas solamente hasta los $100 \mu T$, ya que para el propósito de este proyecto las capacidades de las bobinas superaron los requerimientos.

Para el diseño y armado de las fuentes de corriente se inició con la construcción de una fuente de voltaje (ajustable manualmente) acoplada a la base de un transistor, para que la corriente a la salida de este fuera proporcional al voltaje generado por la fuente. Este no fue muy útil debido a que era necesario generar un campo magnético estable en sus tres componentes y que, a su vez, en conjunto las fuentes de corriente y sistemas de bobinas fueran capaces de anular variaciones en el campo magnético que se produjeran al exterior del dispositivo. Por lo anterior, se decidió utilizar finalmente el circuito de la figura 8, el cual permite generar un campo magnético estable y que las variaciones inducidas por cambios en el campo magnético de origen externo se anulen, evitando entonces alteraciones inapropiadas en las muestras.

El calentamiento homogéneo y estable en las muestras es de vital importancia para poder llevar a cabo la datación de una muestra por la técnica de múltiples especímenes. Así, fue necesario construir un horno y su sensor de temperatura. Se tuvo que pensar en materiales que soportaran altas temperaturas y que al mismo tiempo fueran diamagnéticos. Una vez construido la respuesta del horno fue exitosa, logrando llegar a la temperatura requerida en tiempos cortos, siendo su estabilidad y fiabilidad muy buenas; esto se puede comprobar en la gráfica de la figura 23.

Los materiales para la construcción del horno fueron los más costosos y un poco más difíciles de conseguir ya que consta de un tubo de cuarzo, para el cual se deben tener herramientas específicas para su manipulación. En conjunto, el horno y su termopar permiten un buen control de la temperatura, a la cual se calientan las muestras.

El magnetómetro triaxial consta de un sensor de efecto Hall por eje. Dichos sensores son de respuesta analógica. La resolución de los sensores es de mG (ver figura 14), mientras que para este proyecto era necesaria una resolución de μT , por lo que se hizo imprescindible una etapa de amplificación de las señales a la salida de los sensores Hall. Su diagrama electrónico se observa en la figura 15. Esta etapa tiene como tarea la de amplificar la señal del sensor Hall 455x.

En esta etapa de amplificación se vieron involucrados otros factores a los que los componentes electrónicos son sensibles. Uno de estos factores es la temperatura. Si el dispositivo se expone a cambios abruptos de temperatura puede verse afectada de manera adversa su respuesta. Para atenuar este problema se agregaron al diseño diodos Zener a las señales de referencia, pero no se pudo inhibir por completo. Sin embargo, la mejora directa a este punto es diseñar un chasis que pueda albergar tal módulo de electrónica y lo aíse de variaciones térmicas abruptas.

Por último, pero no menos importante, es hablar del software de control. Para la parte de la interfaz gráfica se escribió en Visual Studio C## 2010 (ver figura 16), y para la parte de lectura de los datos y envío por puerto serie se escribió en C++, lenguaje con el cual trabaja la plataforma Arduino.

La interfaz gráfica tiene como tarea el monitoreo de todos los sensores de campo magnético y el termopar. La interfaz gráfica recibe las características del campo magnético y temperatura a generar a partir de unas cajas de texto y transforma todos esos valores en bits (mediante las ecuaciones características de cada uno de los sensores) para que el microcontrolador los entienda y realice las acciones pertinentes.

Mediante el uso y la aplicación de las capacidades del equipo construido (MultiplesSpecimenes) se pretende que los usuarios puedan tener mejor control y, específicamente, que el tratamiento de los especímenes se lleve a cabo sin adicionar variaciones en la remanencia magnética natural de los especímenes que pueden ser debidos al mal posicionamiento de éstos dentro de los equipos tradicionales con los que se lleva a cabo el método de múltiples especímenes.

El equipo construido permite llevar a cabo una determinación de paleointensidades, o en su caso arqueointensidades, en aproximadamente 4 horas, lo que le permite al usuario realizar determinaciones en menor cantidad de tiempo. Baste mencionar que, mediante los métodos tradicionales, una determinación de paleo/arqueointensidad puede extenderse hasta 30 días. A su vez, este sistema ayudará a que las personas interesadas en dataciones de muestras con las

características adecuadas para realizar el método de múltiples especímenes tengan resultados de manera rápida y confiable.

Con respecto a los resultados que se obtuvieron durante las pruebas del equipo se puede ver que funciona para el propósito que se requería en este proyecto, pero no se puede dejar de mencionar que los resultados tienen un margen de error y que es debido, principalmente, a la limitada resolución que tiene el microcontrolador utilizado (8 bits). Una de las mejoras para el dispositivo en el futuro sería acoplar un microcontrolador de mayor resolución.

Si bien las mediciones se hacen de manera rápida y confiable, el propósito del dispositivo es el tratamiento de los especímenes a partir de los datos adquiridos con otros equipos auxiliares que se deben usar para llevar a cabo el tratamiento.

Algo para mencionar, y que no se debe dejar de lado, es el costo del proyecto. Este proyecto se realizó con un presupuesto no mayor a \$10,000 pesos M.N.

Por otro lado, con este proyecto se pretende impulsar el desarrollo tecnológico en México, principalmente en nuestra universidad, dado que los proyectos de construcción de equipo geofísico desarrollados en nuestro país se podrían seguir desarrollando y, si fuese el caso, repararlos en nuestro país con componentes y herramientas disponibles; con esto también se reducen los costos de mantenimiento.

7 Conclusiones

El método de múltiples especímenes permite realizar determinaciones de paleointensidad en menor tiempo que otras metodologías. Más aun, ya automatizada dicha metodología, el procedimiento se puede llevar a cabo con menor cantidad de tiempo invertido y con mayor fiabilidad de los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas al equipo con muestras de las cuales se conocía su intensidad magnética registrada fueron satisfactorios, por lo que podemos concluir que el dispositivo construido cumple con los objetivos planteados para este proyecto.

El dispositivo funciona de manera estable y cumple con el propósito de reducir el tiempo para adquirir la paleo o arqueo intensidad. Al mismo tiempo el software hace muy sencilla la tarea de orientar el campo magnético a las necesidades de cada muestra y, al mismo tiempo, calentarlas y en todo momento monitorear dichas variables.

El equipo construido se compone de materiales que son de fácil adquisición. Todos los componentes electrónicos se consiguen con facilidad ya que son componentes comerciales.

El campo de la instrumentación geofísica en nuestro país aún no ha sido muy explotado, por lo que aún importamos equipos del exterior que al corto plazo necesitan de mantenimientos, e incluso reparaciones que al ser de manufacturas extranjera elevan de manera significativa los costos. Por otro lado, la tecnología que se desarrolla en nuestro país es más barata y con capacidades similares, y los costos de mantenimiento o reparaciones se pueden hacer con menores erogaciones.

8 Anexos

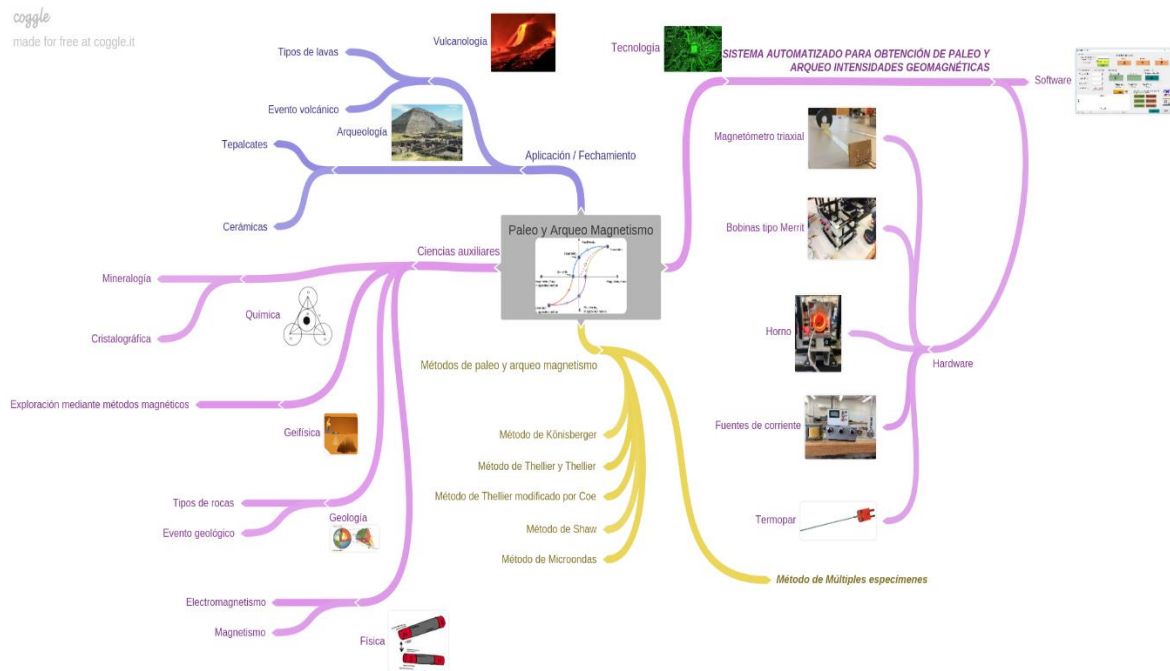


Figura 29. Mapa mental que resume las partes de este proyecto y ver su relación con otras ramas de a ciencia.

Tabla 4 Se muestran los datos para mostrar las variaciones del campo que se generan dentro del sistema de bobinas manteniendo la intensidad en el eje X.

HX fija						
HX	HY	HZ	Hr	Dec	Inc	
13.9	0	0	13.9	90.00	0.00	
13.9	4.2	3.2	14.9	73.18	12.63	
13.9	8.2	6.1	17.3	59.46	21.66	
13.9	12.4	8.8	20.6	48.26	27.07	
13.9	16.4	11.5	24.4	40.28	30.65	
13.9	20.8	14.4	28.9	33.75	32.98	
13.9	25.3	17.3	33.7	28.78	34.34	
13.9	29.8	20.1	38.5	25.00	35.02	
13.9	32.9	23.1	42.5	22.90	37.06	
13.9	37.5	25.9	47.6	20.33	37.11	
13.9	42.1	28.8	52.9	18.27	37.22	
13.9	45.4	31.7	57.1	17.02	38.25	
13.9	49.9	34.5	62.2	15.56	38.16	

13.9	54.5	37.6	67.7	14.30	38.30
13.9	58.4	40.3	72.3	13.38	38.46
13.9	62.4	43.2	77.2	12.55	38.72
13.9	67.1	45.9	82.5	11.70	38.38
13.9	70.7	48.8	87.0	11.12	38.80
13.9	75.4	51.7	92.5	10.44	38.64
13.9	79.4	54.7	97.4	9.93	38.88
13.9	83.6	57.4	102.4	9.44	38.81
13.9	87.8	60.9	107.8	8.99	39.25
13.9	91.9	63.1	112.3	8.60	38.90
13.9	96	65.8	117.2	8.23	38.87
13.9	100	68.6	122.1	7.91	38.93
13.9	103.8	71.3	126.7	7.62	39.01
13.9	108.1	74.1	131.8	7.32	38.95
13.9	112.3	77.3	137.0	7.05	39.14
13.9	116.5	80	142.0	6.80	39.07
13.9	120.4	82.7	146.7	6.58	39.10
13.9	124.5	85.3	151.6	6.37	39.01
13.9	128.9	88.3	156.9	6.15	39.02
13.9	133	91.3	161.9	5.96	39.12
13.9	137.1	94.1	166.9	5.78	39.12
13.9	141.4	97.1	172.1	5.61	39.16
13.9	145.4	100.5	177.3	5.46	39.42

Tabla 5. Se muestra una tabla para mostrar las variaciones del campo que se generan dentro del sistema de bobinas manteniendo la intensidad en el eje Y.

HY fija					
HX	HY	HZ	Hr	Dec	Inc
0.005	16.4	0	16.40	89.98	0.00
7.1	16.4	3.2	18.16	66.59	10.15
13.9	16.4	6.1	22.35	49.72	15.84
21.2	16.4	8.8	28.21	37.72	18.18
27.9	16.4	11.5	34.35	30.45	19.56
35.1	16.4	14.4	41.33	25.04	20.39
42	16.4	17.3	48.29	21.33	20.99
49.1	16.4	20.1	55.53	18.47	21.22
56.2	16.4	23.1	62.94	16.27	21.53
63.2	16.4	25.9	70.24	14.55	21.64
70.2	16.4	28.8	77.63	13.15	21.78
77.2	16.4	31.7	85.05	11.99	21.88
84.7	16.4	34.5	92.92	10.96	21.80

91.6	16.4	37.6	100.37	10.15	22.00
97.7	16.4	40.3	106.95	9.53	22.14
105.6	16.4	43.2	115.27	8.83	22.01
112	16.4	45.9	122.15	8.33	22.07
119.3	16.4	48.8	129.93	7.83	22.06
125.9	16.4	51.7	137.09	7.42	22.16
133.2	16.4	54.7	144.93	7.02	22.17
142.8	16.4	57.4	154.78	6.55	21.77
148.1	16.4	60.9	160.97	6.32	22.23
154	16.4	63.1	167.23	6.08	22.17
161.8	16.4	65.8	175.44	5.79	22.03
168.4	16.4	68.6	182.57	5.56	22.07
174.5	16.4	71.3	189.22	5.37	22.14
182.1	16.4	74.1	197.28	5.15	22.06
188.7	16.4	77.3	204.58	4.97	22.20
195.8	16.4	80	212.15	4.79	22.15

Tabla 6. Se muestra una tabla para mostrar las variaciones del campo que se generan dentro del sistema de bobinas manteniendo la intensidad en el eje Z.

HZ fija					
HX	HY	HZ	Hr	Dec	Inc
0.005	0	14.4	14.40	0.00	89.98
7.1	4.2	14.4	16.60	30.61	60.19
13.9	8.2	14.4	21.63	30.54	41.74
21.2	12.4	14.4	28.47	30.33	30.38
27.9	16.4	14.4	35.42	30.45	23.99
35.1	20.8	14.4	43.27	30.65	19.44
42	25.3	14.4	51.10	31.07	16.37
49.1	29.8	14.4	59.21	31.26	14.07
56.2	32.9	14.4	66.69	30.35	12.47
63.2	37.5	14.4	74.89	30.68	11.09
70.2	42.1	14.4	83.11	30.95	9.98
77.2	45.4	14.4	90.71	30.46	9.13
84.7	49.9	14.4	99.36	30.51	8.33
91.6	54.5	14.4	107.56	30.75	7.69
97.7	58.4	14.4	114.73	30.87	7.21
105.6	62.4	14.4	123.50	30.58	6.70
112	67.1	14.4	131.35	30.93	6.29
119.3	70.7	14.4	139.42	30.65	5.93
125.9	75.4	14.4	147.46	30.92	5.60
133.2	79.4	14.4	155.74	30.80	5.31

142.8	83.6	14.4	166.10	30.35	4.97
148.1	87.8	14.4	172.77	30.66	4.78
154	91.9	14.4	179.91	30.83	4.59
161.8	96	14.4	188.69	30.68	4.38
168.4	100	14.4	196.38	30.70	4.21
174.5	103.8	14.4	203.55	30.75	4.06
182.1	108.1	14.4	212.26	30.70	3.89
188.7	112.3	14.4	220.06	30.76	3.75
195.8	116.5	14.4	228.29	30.75	3.62

En las figuras 30, 31 y 32 se muestra fotografías del dispositivo construido para la aplicación del método de múltiples especímenes, se puede observar todo el cableado y circuitos electrónicos, pero se pretende que el dispositivo se acomode en un chasis acorde para que sea más ergonómico y fácil de trasladar o mover de lugar.

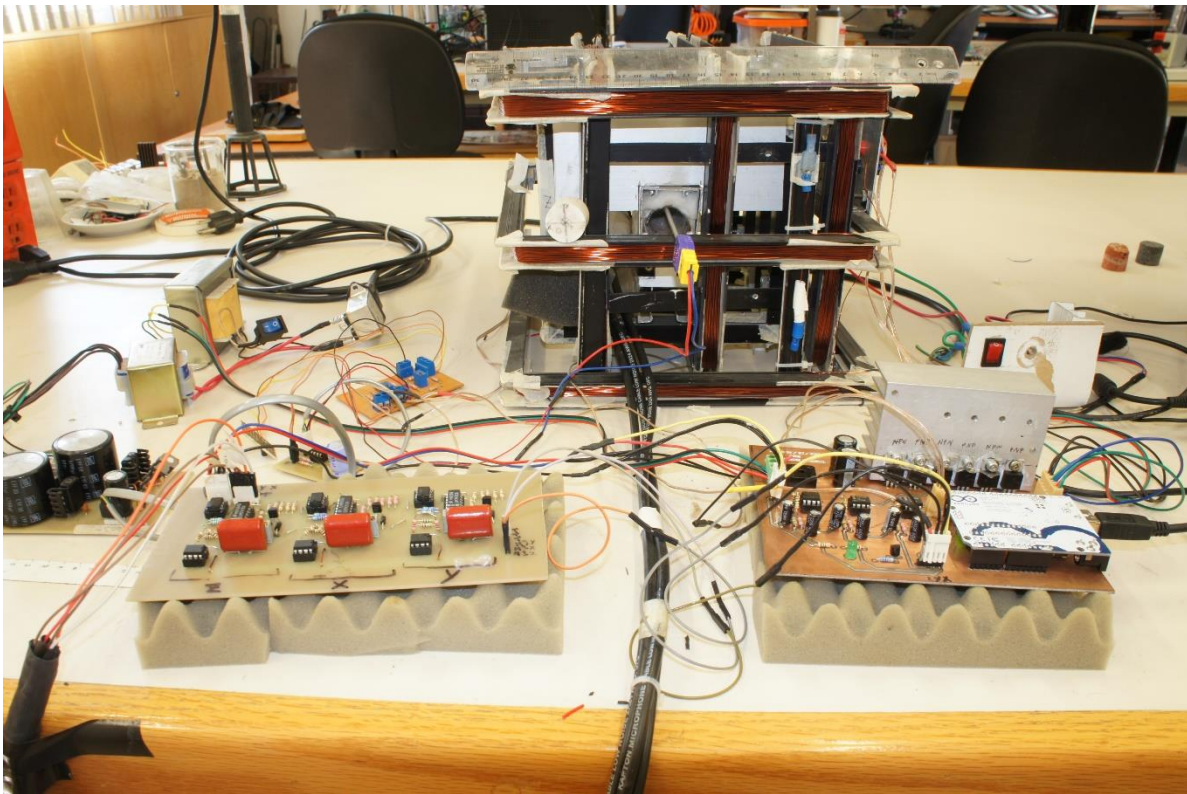


Figura 30. Fotografía del sistema MultiplesEspecimenes (Hardware) que se diseñó e implementó



Figura 31. Fotografía del software *MúltiplesEspecímenes* implementado para el control del equipo diseñado.

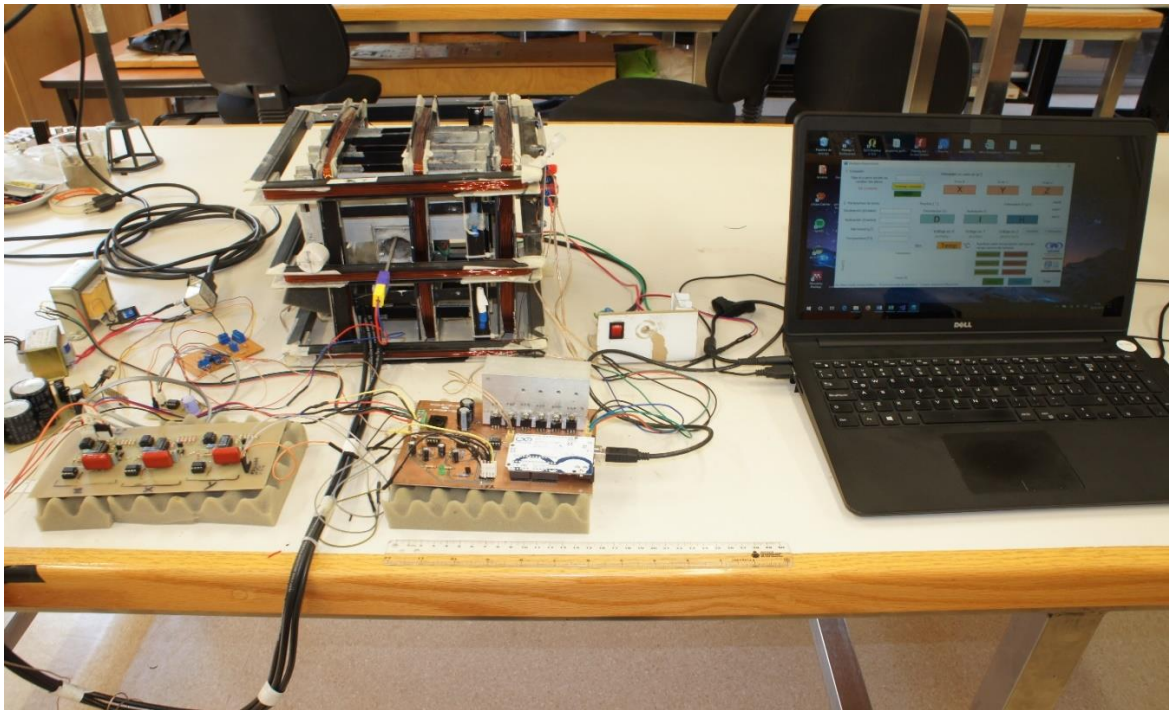


Figura 32. Fotografía del equipo implementado completo.

9 Bibliografía

- Adame, S. M. et al. (2010). Coil Systems to Generate Uniform Magnetic Field Volumes. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Boston*, (88), 8.
- Agilent Technologies. (2000). DC Power Supply handbook. *Application Note 90B*. Tomado de <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5952-4020.pdf>
- Cervantes Solano, M. A. (2002). *REGISTRO DE LA VARIACION SECULAR DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE DURANTE EL MIOCENO TARDIO: AREA DE TEPIC (NAYARIT, MEXICO)*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dekkers, M. J., & Böhnell, H. N. (2006). Reliable absolute palaeointensities independent of magnetic domain state. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1–2), 507–516. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.040>
- Fragozo Maldonado, M. (2015). *DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS Y SU RELACIÓN CON EL CONTENIDO DE METALES PESADOS EN LAS ZONAS URBANA Y COSTERA DE LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN*, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- García, M. Á. (2009). Magnetismo Terrestre. Tomado de http://iespoetaclaudio.centros.educa.jcyl.es/sitio/index.cgi?wid_item=1719&wid_seccion=19
- Herráz, M. J. R. (2016). *Master's Degree final project , " Nanohilos Magnéticos con Geometría Modulada : Simulaciones Micromagneticas*. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.32525.54244>
- Hitchman, A. (2011). ABC Science. Tomado de <http://www.abc.net.au/science/articles/2011/11/09/3359365.htm>
- Honeywell International Inc. (2015). *SS39ET/SS49E/SS59ET Linear Hall-Effect Sensor ICs*. Retrieved from https://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=50359
- Morales, J. J. (1993). *SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA DETERMINACION DE PROPIEDADES MAGNETICAS EN FUNCION DE LA TEMPERATURA*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales, J. J. (1995). Determinación de paleointensidades del campo Geomagnético para el Cuaternario en la Sierra Chichinautzin, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morales, J. J. (2003). *DETERMINACIÓN DE LA PALEOINTENSIDAD ABSOLUTA SOBRE LAS ROCAS MEXICANAS Y SUDAMERICANAS: ASPECTOS METODOLÓGICOS E IMPLICACIONES GEOMAGNÉTICAS*, Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tauxe, L. (2010). *Essentials of Paleomagnetism. Lectures in Paleomagnetism* (4th Editio, Vol. 4). Tomado de http://escholarship.org/uc/item/9f2298q7/lecture1_1_1.pdf