

Implementación de un prototipo de medida de magnitudes eléctricas usando sensores magnéticos

Angie Shirley Apolinar Velásquez y Lisbeth Yurany Soler Duarte

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Eléctrica

Director

Efrén Darío Acevedo Cárdenas

MSC

Codirector

Carlos Rodrigo Correa Cely

PHD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicomecánicas

Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones

Ingeniería eléctrica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Como finalización de este largo camino y trabajo de grado quiero dedicar a Dios, creador de todo lo existente, por haberme dado a mis padres, quienes con su ejemplo y esfuerzo me han permitido llegar al cumplimiento de esta meta, también dedicar a mis hermanos y mi familia, como fuente de inspiración para escoger esta hermosa ingeniería; a toda aquella persona que creyó en mí y aportó un granito de arena para la ilusión de la culminación de esta bella carrera universitaria.

#### **-Angie Apolinar-**

Dedico este proyecto a Dios por ser el inspirador para cada uno de mis pasos dados en mi diario vivir por haberme permitido llegar a este momento tan especial en mi vida, a mi mami Luz Marina Duarte que sin ella no lo habría logrado, tu bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por un buen camino, por tu paciencia y amor, a mis hijas que son el motor para seguir adelante que siempre me regalan su amor sin importar la distancia a mi director el Ingeniero Efrén Darío Acevedo por entregarme sus conocimientos para realizar los propósitos.

#### **-Lisbeth Soler-**

### **Agradecimientos**

Me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer la ayuda, colaboración, cada momento compartido el cual que me beneficié de ello de alguna manera; a todas aquellas personas y colegas, que se me han presentado a lo largo de este proceso de investigación y redacción de este proyecto.

A todos mis amigos, como mi mejor amiga Michell Ávila, mi compañera de vida que compartió mi desarrollo y motivó a dar forma a toda esta investigación, que me ayudaron de manera desinteresada les doy infinitas gracias por toda la ayuda, buena voluntad y valor que aportaron para mí en lo personal. Por último, doy gracias a la Universidad Industrial de Santander por ser la sede de todo el conocimiento que he adquirido en los años de formación para crecer hasta ser profesional.

#### **-Angie Apolinar-**

Dar infinitas gracias a Dios, por haberme dado la vida, y por guiarnos a lo largo de nuestra existencia para superar obstáculos y poder culminar esta etapa de mi vida. A mis padres Luz Marina y Fausto por ser los promotores de mis sueños quien, con su amor, paciencia, esfuerzo, valentía y ejemplo especial de mi madre me ha enseñado a no caer ni detenerme ante nada, repitiéndome todos los días que por más que sea largo el camino siempre hay una salida, gracias por confiar y creer en mis expectativas, por sus oraciones los amo. A mis hijas Danna y Zaira que desde que llegaron a mi vida han sido mi motor para seguir adelante su amor incondicional, que aun siendo tan pequeñas han sabido comprenderme y han sido parte fundamental de este proceso. A mi hermana Luz y a Wilson Fabián por su apoyo incondicional sin importar las circunstancias, por su amor incondicional y demostrarme que siempre puedo contar con ellos.

#### **-Lisbeth Soler-**

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	11
1. Generalidades de los sensores magnéticos .....	13
1.1. Teoría Electromagnética .....	13
1.2. Magnetismo .....	14
1.3. Lazos Magnéticos .....	14
1.4. EFECTO HALL en Sensores Magnéticos .....	14
1.5. Tarjetas de Adquisición .....	14
1.6. Mediciones Eléctricas .....	15
1.7. Herramientas de Software Usadas .....	15
1.7.1. PYTHON .....	15
1.7.2. ANSYS STUDENT R2.....	15
2. Estructuración y descripción experimental del artículo.....	16
2.1. Aspectos Específicos .....	17
2.2. Técnicas Usadas en el Artículo.....	17
2.3. Simulación del Núcleo vacío y de Lámina de Hierro .....	18
2.4. Conexión del Núcleo de Hierro .....	20
2.5. Arduino Mega .....	20
2.6. Bus de Datos .....	21
2.7. Tarjeta pcb Electrónica .....	22
2.1. Sensores .....	23
2.2. Dimensiones del Sensor Utilizados .....	24
2.3. Sensor Triaxial.....	25
2.4. Sensores de EFECTO HALL.....	25
2.5. Transformador de Corriente Tipo Ventana de 300/5.....	26
2.6. Dimensiones del Núcleo .....	26
2.7. Banco de Trabajo.....	27
2.7.1. Carga del Banco de Trabajo.....	28
2.8. Procedimiento Experimental.....	29
3. Simulaciones del Campo Magnético .....	32

3.1. Simulaciones del Campo Magnético en Diferentes Calibres por medio del Programa ANSYS STUDEN R2 .....	32
3.2. Descripción del paso a paso para la Implementación del Campo Magnético en el Programa ANSYS STUDENT R2 .....	32
3.3. Simulaciones .....	33
4. Realización de las simulaciones experimentales .....	36
4.1. Descripción del Modo de Operación para la Realización del Laboratorio Correspondiente por medio de ANSYS STUDENT R2 .....	36
5. Obtención y Análisis de Resultados .....	38
6. Análisis .....	44
7. Conclusiones .....	45
Referencias.....	46

### Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema del sensor y el sensor experimental .....	16
<b>Figura 2.</b> Implementación de los núcleos de vacío y de lámina de hierro con 100 vueltas.....	18
<b>Figura 3.</b> Núcleo de vacío y de lámina de hierro con los sensores simétricamente posicionados en un embobinado de 100 vueltas.....	19
<b>Figura 4.</b> Experimentación del núcleo de vacío y los sensores con el embobinado de 100 vueltas .....	19
<b>Figura 5.</b> Implementación del núcleo de hierro y los sensores con el embobinado de 100 vueltas .....	20
<b>Figura 6.</b> Tarjeta de adquisición Arduino Mega .....	21
<b>Figura 7.</b> Bus de datos.....	22
<b>Figura 8.</b> Tarjeta de adquisición de PCB .....	23
<b>Figura 9.</b> Parte superior izquierda "largo" .....	24
<b>Figura 10.</b> Parte superior frontal "ancho" .....	24
<b>Figura 11.</b> Sensor triaxial.....	25
<b>Figura 12.</b> Transformador de corriente tipo ventana .....	26
<b>Figura 13.</b> Dimensiones de los núcleos utilizados.....	27
<b>Figura 14.</b> Banco de trabajo.....	28
<b>Figura 15.</b> Carga del banco de trabajo .....	28
<b>Figura 16.</b> Diagrama del sistema en configuración experimental .....	30
<b>Figura 17.</b> Simulación de campo magnético en un cable 12 AWG al lado izquierdo 2 [A] y al lado derecho 18 [A] .....	33
<b>Figura 18.</b> Corriente vs Campo magnético con los datos arrojados por el programa de ANSYS STUDENT R2 para el cable con calibre 12 AWG. ....	35
<b>Figura 19.</b> Simulación del núcleo de lámina de hierro excitado a 7[A] con 10 vueltas .....	37
<b>Figura 20.</b> Simulación del núcleo de vacío excitado a 7[A] con 10 vueltas.....	37
<b>Figura 21.</b> Carga del banco de trabajo [ $\Omega$ ] vs Campo magnético [mT] obtenidos de los resultados arrojados por lo hecho experimentalmente, para el toroide de Hierro.....	40
<b>Figura 22.</b> Carga del banco de trabajo [ $\Omega$ ] vs Campo magnético [mT] obtenidos de los resultados arrojados por lo hecho experimentalmente, para el toroide de vacío .....	42

**Figura 23.** Comparativo de los análisis experimentales para los núcleos de lámina de hierro y vacío ..... 43

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> valores establecidos para la carga de trabajo según su posición.....	29
<b>Tabla 2.</b> Experimentación de tensión con 100 vueltas.....	31
<b>Tabla 3.</b> Datos arrojados por el programa de ANSYS STUDENT R2 para el cable de calibre 12 AWG.....	34
<b>Tabla 4.</b> Datos del sensor 1 del núcleo de lámina de Hierro.....	38
<b>Tabla 5.</b> Datos del sensor 4 del núcleo de Hierro .....	39
<b>Tabla 6.</b> Datos del sensor 1 del núcleo de Vacío .....	40
<b>Tabla 7.</b> Datos del sensor 4 del núcleo de Vacío .....	41

## Resumen

**Título:** Implementación de un prototipo de medida de magnitudes eléctricas usando sensores magnéticos. <sup>1</sup>

**Autor:** Angie Shirley Apolinar Velásquez, Lisbeth Yurany Soler Duarte.<sup>2</sup>

**Palabras clave:** Sensores magnéticos, teoría electromagnética, lazos magnéticos, tarjetas de adquisición, calidad de la energía.

### Descripción:

En este proyecto se desarrollan escenarios de medida indirecta mediante el programa ANSYS, según estas medidas se realizaron una serie de pruebas en laboratorio con el objetivo de validar y certeza de estos mismos. Para la realización de estos laboratorios, se tiene en cuenta una metodología de trabajo, guiada y referenciada por normas y estándares nacionales e internacionales. Para las mediciones de laboratorio se necesitaron instrumentos de medición como el amperímetro, multímetro, banco de trabajo, los diferentes núcleos de estudio y tarjetas de desarrollo de adquisición de datos donde se encuentran los diferentes sensores receptores de la toma de medidas, que por medio de Python se establecieron óptimos resultados.

En general se puede concluir que sin mediciones eléctricas se es imposible garantizar el adecuado funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado.

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: Efred Dario Acevedo Cardenas. MSC. Codirector: Carlos Rodrigo Correa Cely. PHD.

### Abstract

**Title:** Implementation of a prototype for measuring electrical magnitudes using magnetic sensors.<sup>3</sup>

**Author:** Angie Shirley Apolinar Velásquez, Lisbeth Yurany Soler Duarte.<sup>4</sup>

**key words:** Magnetic sensors, electromagnetic theory, magnetic loops, acquisition cards, power quality.

**Description:**

In this project, indirect measurement scenarios are developed using the ANSYS program. According to these measurements, a series of laboratory tests were carried out with the objective of validating and certifying them. To carry out these laboratories, a work methodology is taken into account, guided and referenced by national and international norms and standards. For the laboratory measurements, measuring instruments were needed such as the ammeter, multimeter, workbench, the different study cores and data acquisition development cards where the different receiving sensors for taking measurements are located, which through Python is recommended for optimal results.

In general, it can be concluded that without electrical measurements it is impossible to guarantee the proper functioning of electrical energy systems.

---

<sup>3</sup> Degree work.

<sup>4</sup> Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Engineering Electrical.

Director: Efren Dario Acevedo Cardenas. MSC. Codirector: Carlos Rodrigo Correa Cely. PHD.

## Introducción

En la vida cotidiana y en diferentes ámbitos profesionales, el desarrollo e inicio de nuevas tecnologías, nos han sido de gran provecho para el avance en lo físico y diferentes planos de la alta tecnología en donde se usa el electromagnetismo.

El magnetismo se dio a conocer con la teoría de la electricidad de James Clerk Maxwell a mediados del siglo XIX. Gracias a este científico y matemático se dio a conocer la teoría electromagnética clásica. Después de intensos estudios, teorías y puestas en práctica por diversos científicos, queda evidenciada la relación directa del campo magnético y el campo eléctrico que se percibe en las ecuaciones de Maxwell, éstas mismas tienen como estudio del campo magnético; del modo que al comprobar que hay existencia de campo magnético y este si es posible medirlo, esto es llamado el método de EFECTO HALL.

Todo lo que enmarca al magnetismo en sus avances se ha hecho epicentro en nuestra tecnología, tanto que se han permitido que los campos magnéticos se logren evidenciar en diferentes áreas como en la industria se ha puesto en práctica en el tratamiento del agua con magnetizadores.

Existen múltiples variantes eléctricas que afectan en la toma de mediciones; por eso mismo se volvió un requisito principal en los procesos, estudios, y mantenimientos de sistemas eléctricos; para que al final se pueda impartir un dictamen seguro del estado de una instalación eléctrica se deben hacer estos y diversos tipos de mediciones cambiantes en el ámbito eléctrico como de otro tipo.

## Objetivos

### Objetivo General

Desarrollar un dispositivo de medida de corrientes eléctricas de 2 a 7 amperios en AC usando un conjunto de sensores magnéticos.

### Objetivos Específicos

Simular por medio de una herramienta computacional el comportamiento del campo magnético inducido por un conductor eléctrico sobre una espira de alambre circular que permite emular el escenario planteado en el artículo: “a novel closed loop current sensor based on a circular array of magnetic field sensors<sup>5</sup>”.

Implementar un prototipo de medida usando sensores magnéticos adheridos a núcleos transformadores de corriente usados en mediciones eléctricas comerciales.

Implementar un prototipo de medida usando el modelo de un array de sensores magnéticos dentro de una espira sobre un núcleo vacío.

Validar los resultados de medición con instrumentos estandarizados.

---

<sup>5</sup> R. Weiss, A. Itzke, J. Reitenspieß, I. Hoffmann and R. Weigel, "A Novel Closed Loop Current Sensor Based on a Circular Array of Magnetic Field Sensors," in IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 7, pp. 2517-2524, 1 April1, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2018.2887302.

## 1. Generalidades de los sensores magnéticos

El reconocido científico y matemático James Clerk Maxwell unificó las leyes de la electricidad y el magnetismo en un solo concepto, cambiando la perspectiva que se tenía de estos fenómenos. Sin embargo, se han hecho estudios de sensores magnéticos como se evidencia en el artículo principal de este proyecto titulado *A Novel Closed Loop Current Sensor Based on a Circular Array of Magnetic Field Sensors* por Weiss Ronald *et al* en el año 2018.

Una forma sencilla de comprobar la presencia de un campo magnético y medirlo, es el EFECTO HALL, el cual forma un circuito eléctrico, que a través de un campo magnético varía dependiendo de un valor absoluto de la densidad del flujo.

### 1.1. Teoría Electromagnética

Es una teoría física que explica la interacción entre la electricidad y el magnetismo. Esta teoría es fundamental para el funcionamiento de diversos dispositivos y ha tenido un impacto significativo en el avance de la ciencia y la tecnología. La teoría electromagnética se sustenta en cuatro ecuaciones fundamentales: la ley de Gauss, la ley de Faraday-Lenz y las ecuaciones de Maxwell (Feynman et al. 1998).

## **1.2. Magnetismo**

Es una propiedad de la materia que se manifiesta por la fuerza de atracción o repulsión que se ejerce entre dos objetos magnéticos (Walker,2007).

## **1.3. Lazos Magnéticos**

Los lazos magnéticos o lazos electromagnéticos son una fuerza de atracción que tiene variedad de aplicaciones prácticas. Se encuentran en todo el mundo, desde los imanes que usamos en nuestra vida cotidiana hasta los dispositivos médicos que utilizan los médicos para diagnosticar y tratar enfermedades; algunos ejemplos comunes: corrientes eléctricas, electroimanes, e imanes y resonancias magnéticas (Fundación Endesa, 2024)

## **1.4. EFECTO HALL en Sensores Magnéticos**

Los sensores magnéticos transforman señales magnéticas en señales eléctricas, permitiendo que sean procesadas por circuitos electrónicos. En particular, los sensores de EFECTO HALL utilizan este efecto para generar una diferencia de potencial directamente proporcional al campo magnético que activa el sensor o a la corriente que lo atraviesa. Este fenómeno genera una diferencia de potencial perpendicular tanto al campo magnético como a la corriente eléctrica. Los sensores magnéticos basados en el EFECTO HALL son dispositivos electrónicos que emplean este principio para medir campos magnéticos (Atorino,2009).

## **1.5. Tarjetas de Adquisición**

Son dispositivos que permiten la entrada de señales analógicas o digitales a un ordenador. Se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como la medición, el control, la automatización

y el entretenimiento. Estas se pueden clasificar en función del tipo de señal que admiten: tarjetas de adquisición analógica o de adquisición digital (Enríquez et al. 2019).

## **1.6. Mediciones Eléctricas**

Estas se pueden definir como la determinación numérica de valores eléctricos instantáneos (en un instante dado) o en un período de tiempo prefijado (valor medio). Dichas mediciones eléctricas son realizadas por medio de diversos medidores, instrumentos, circuitos y dispositivos especiales (Rodríguez, 2001).

## **1.7. Herramientas de Software Usadas**

### ***1.7.1. PYTHON***

El lenguaje de programación Python ofrece facilidades para la programación orientada a objetos, imperativa y funcional, lo que lo clasifica como un lenguaje multi-paradigma. Se basa en el lenguaje ABC y, según su autor, ha sido influenciado por otros lenguajes como C, Algol 60, Modula-3 e Icon (Challenger y Becerra, 2014).

### ***1.7.2. ANSYS STUDENT R2***

ANSYS STUDENT R2 es una versión gratuita del software de análisis de ingeniería ANSYS, que está disponible para estudiantes y profesores de educación superior. Esta versión incluye todas las características básicas de ANSYS, lo que permite a los usuarios realizar una amplia gama de simulaciones, incluyendo: análisis estructural, análisis de fluidos, análisis de electromagnetismo, análisis de materiales (Lokhande, 2018).

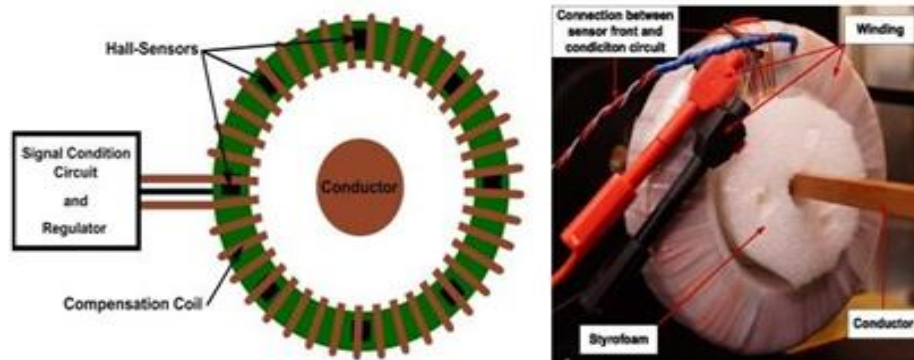
## 2. Estructuración y descripción experimental del artículo

Los sensores han sido objeto de estudio en los últimos años. Este novedoso concepto de sensor de corriente de bucle cerrado, que se basa en una matriz circular de sensores de campo magnético, tiene como objetivo optimizar el modo de funcionamiento de CC y CA para lograr el mayor ancho de banda y precisión posibles en comparación con otras tecnologías de sensores de corriente CC.

En la Figura 1 se presenta en lado izquierdo el esquema del sensor con un conductor y al lado derecho como se posiciona en el extremo frontal del sensor enrollado con poliestireno y sin condición de señal.

### Figura 1.

*Esquema del sensor y el sensor experimental*



*Nota.* Reproducida de Principio de funcionamiento del motor Schrage, Roland et al.2018, (<https://www.electronicafacil.top/motor/motor-induccion-basico/principio-de-funcionamiento-de-schrage-motor-y-caracteristicas-de-schrage-motor/>)

Este documento proporciona una comparación de matrices circulares generadas por ambos sensores magnéticos (hall y fluxgate) por medio de lazo cerrado y lazo abierto. Si se utiliza un sensor fluxgate la configuración de circuito cerrado, en lugar del sensor hall, es incorrecta debía a que la escala se puede reducir por un factor de dos porque características intrínsecas. Si se usa un sensor fluxgate, se observa una disminución significativa de la no linealidad, como la histéresis, y una disminución significativa de la sensibilidad a la variación de temperatura.

### **2.1. Aspectos Específicos**

Dichos sensores no necesitan un núcleo ferromagnético, por lo tanto, no sufren saturación magnética, histéresis ni otras no linealidades magnéticas. Debido a la ausencia de un núcleo ferromagnético en el diseño, las pérdidas magnéticas y por corrientes de Foucault ya no deberían afectar la respuesta de frecuencia al sensor de corriente de bucle cerrado.

Este sensor de corriente de bucle cerrado, que se basa en una matriz circular de sensores de campo magnético, tiene como objetivo optimizar el modo de funcionamiento de CC y CA para lograr el mayor ancho de banda y precisión posibles en comparación con otras tecnologías de sensores de corriente CC.

### **2.2. Técnicas Usadas en el Artículo**

Por la ley de Amperes (Teorema de Kelvin-Stokes) mediante una matriz circular de sensores de campo magnético y los modos de funcionamientos diferentes de CA y CC, decidieron utilizar una bobina de compensación circular devanada homogéneamente que envuelve el conjunto de sensores para evitar los efectos de posición y diafonía en los modos de funcionamiento de CC y CA.

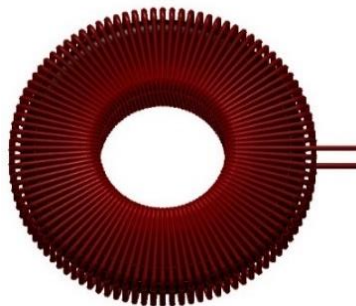
Para los experimentos se utilizaron dos tipos diferentes de sensores de campo magnético, sensores Hall y sensores Fluxgate, en disposiciones geométricas idénticas. Operación en lazo abierto y cerrado se montaron en una barra de cobre con una sección transversal cuadrada con dimensiones de 10 mm × 10 mm.

### 2.3. Simulación del Núcleo vacío y de Lámina de Hierro

En la figura 2 Se realizó la implementación del núcleo vacío y de lámina de hierro, con sus 100 vueltas, por medio del programa ANSYS STUDENT R2.

#### Figura 2.

*Implementación de los núcleos de vacío y de lámina de hierro con 100 vueltas*

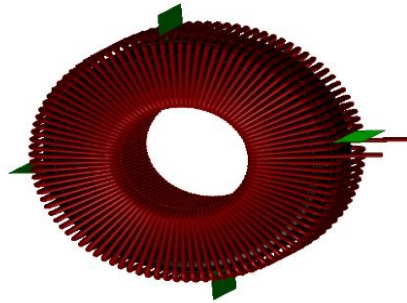


*Nota.* Elaboración propia por medio del programa ANSYS STUDENT R2.

Según la simulación que se muestra en la figura 3 del toroide vacío y de lámina de hierro en la que los sensores quedan simétricamente alrededor del núcleo, se estableció que estarán a 90°.

**Figura 3.**

*Implementación de los núcleos de vacío y de lámina de hierro con los sensores simétricamente posicionados en un embobinado de 100 vueltas*



*Nota.* Elaboración propia por medio del programa ANSYS STUDENT R2.

En la figura 4 se presenta la conexión utilizada para la toma de datos por medio de los sensores magnéticos:

**Figura 4.**

*Implementación del núcleo de vacío y los sensores con el embobinado de 100 vueltas*



*Nota.* Elaboración propia de los equipos utilizados.

#### 2.4. Conexión del Núcleo de Hierro

En la figura 5 se presenta la conexión utilizada para la toma de datos por medio de los sensores magnéticos.

#### Figura 5.

*Implementación del núcleo de lámina de hierro y los sensores con el embobinado de 100 vueltas*



*Nota.* Elaboración propia de los equipos utilizados.

#### 2.5. Arduino Mega

Hablar de Arduino es hablar de un concepto que ha roto con la lejanía de la electrónica programable, convirtiendo dispositivos que tenían un acceso limitado a Ingenieros y algunas personas ligadas al mundo de la ingeniería, en electrónica de consumo. En la figura 6 se presenta la tarjeta de adquisición para el reclutamiento de datos (. Lastra Lamarca, 2015).

**Figura 6.**

*Tarjeta de adquisición Arduino Mega*



*Nota. Reproducido de Placa de Arduino, Paraarduino, 2024, (<https://paraarduino.net/>).*

**2.6. Bus de Datos**

En la figura 7 se ilustra el bus de datos utilizado. Los cables o el bus de datos funcionan como un canal de comunicación, permitiendo una conexión entre el sensor y el Arduino Mega. El término "bus de datos" se refiere a un canal de comunicación entre dos componentes, como pueden ser dos memorias, una memoria y un procesador, o dos procesadores entre sí (Miranda & Ronquillo, 2008).

**Figura 7.***Bus de datos*

*Nota.* Reproducida de Cable Bus, Area Tecnologia, 2014,

(<https://www.areatecnologia.com/informática/tipos-de-buses.html>)

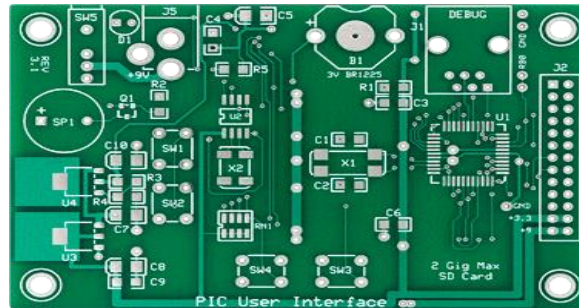
**2.7. Tarjeta pcb Electrónica**

En la figura 8 se presenta la tarjeta PCB utilizada para el desarrollo del presente proyecto el cual soportan mecánicamente y conectan eléctricamente componentes conductores, buses de

datos entre otras siendo este como la columna vertebral de los dispositivos eléctricos (Rodríguez, 2013)

**Figura 8.**

*Tarjeta de adquisición de PCB*



*Nota.* Reproducida de Ejemplo de un PCB de FR4, Benjamín Flores, 2018,

(<https://agelectronica.blog/2019/11/08/introduccion-a-las-tarjetas-de-circuito-impreso/>)

## 2.1. Sensores

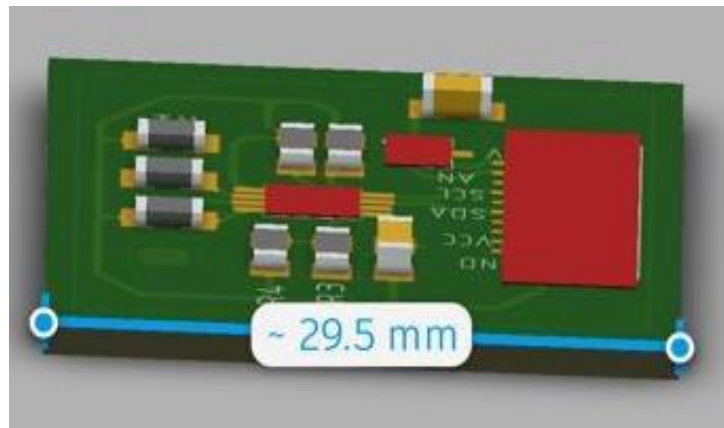
Se puede explicar un sensor como todo aquello que tiene una propiedad sensible a una magnitud del medio, y al variar esta magnitud también varía con cierta intensidad la propiedad. Las magnitudes del medio pueden ser la temperatura, humedad, presión barométrica o aceleración, es decir, un sensor manifiesta la presencia de una magnitud, y también su medida (Areny. 2004).

## 2.2. Dimensiones del Sensor Utilizados

Dimensión del largo del sensor utilizado en la figura 9 para la toma de datos

**Figura 9.**

Parte superior izquierda "largo"

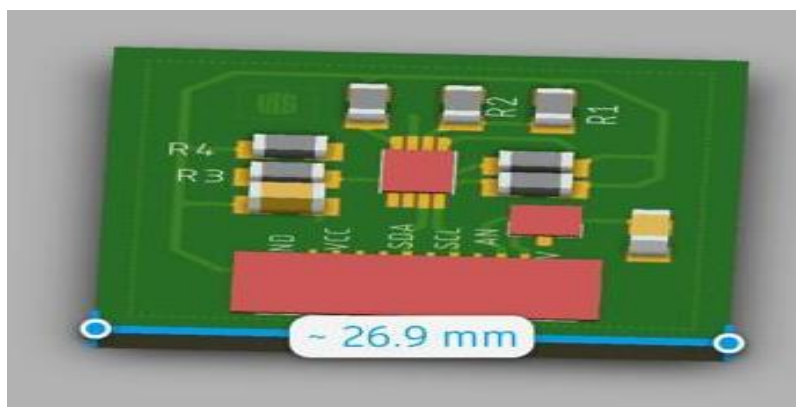


*Nota.* Elaboración propia del largo del sensor

Dimensión del ancho del sensor utilizado en la figura 10 para la toma de datos

**Figura 10.**

Parte superior frontal "ancho"



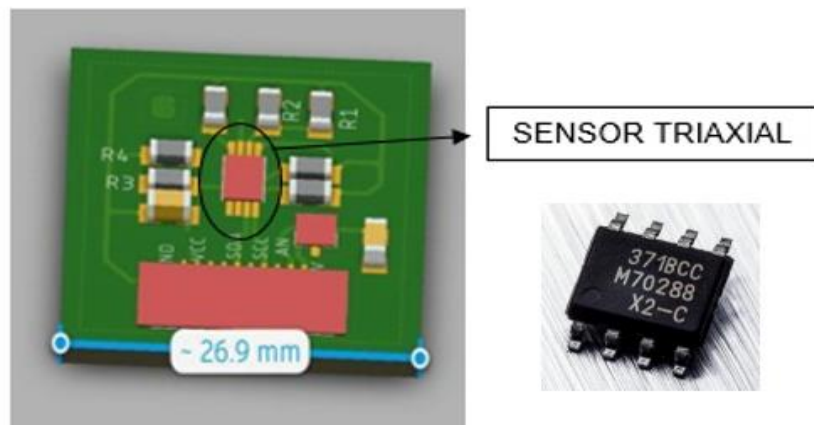
*Nota.* Elaboración propia del ancho del sensor

### 2.3. Sensor Triaxial

Está compuesto por una etapa de entrada magnética Triaxis con tecnología Hall, un acondicionador de señal analógica a digital, un DSP para el procesamiento avanzado de señales y un controlador para la etapa de salida. Gracias al concentrador magnético integrado (Integrated Magneto Concentrator, IMC), es capaz de detectar el flujo magnético en tres planos (x, y, z), lo que permite decodificar la posición absoluta rotativa o lineal de cualquier imán en movimiento. Esto es ideal para el diseño de sensores de posición sin contacto (Takahashi et al, 2013), como se muestra en la figura 11.

#### Figura 11.

*Sensor triaxial*



*Nota.* Sensor triaxial utilizado para la toma de datos

### 2.4. Sensores de EFECTO HALL

Un sensor de EFECTO HALL aprovecha, como su nombre indica, el EFECTO HALL, que puede producirse en un metal o en un semiconductor, este efecto se basa en la interacción básica entre un electrón y un campo magnético. Los sensores de EFECTO HALL pueden ser una herramienta poderosa para un diseño de PCB (Antorino, 2009).

## 2.5. Transformador de Corriente Tipo Ventana de 300/5

Se utiliza transformador para la extracción del núcleo dado que una de sus características es ser un conductor de flujo magnético variable (Rivera,2014); el cual es el que se muestra en la figura 12. (<https://ineldec.com/producto/transformador-de-corriente-blox-300-5a/>)

### Figura 12.

*Transformador de corriente tipo ventana*



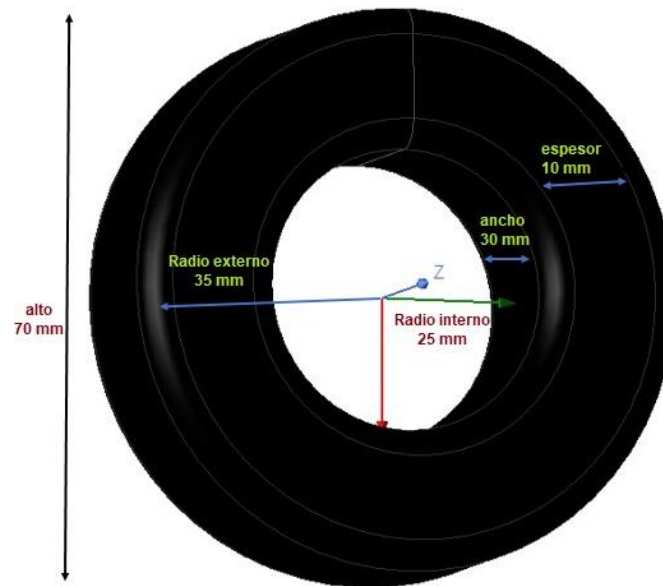
*Nota.* Reproducida de Transformador De Corriente Bt 1000/5A Blox, Inedelc, 2024, (<https://ineldec.com/producto/transformador-de-corriente-baja-tension-1000-5a/>)

## 2.6. Dimensiones del Núcleo

Por medio de este transformador se consigue el núcleo donde se enrolló una bobina distribuida uniformemente con 100 vueltas. El núcleo tiene un radio interior de 25 mm, un radio exterior de 35 mm, una altura de 70 mm, ancho de 30 mm y su espesor de 10mm lo que garantiza que los sensores de campo magnético estén incrustados alrededor del núcleo como se muestra en la figura 13. El alambre de cobre esmaltado que se usó para el enrollamiento de la bobina tiene un diámetro de 21 AWG.

**Figura 13.**

*Dimensiones de los núcleos utilizados*



*Nota.* Elaboración propia por medio del programa ANSYS STUDENT R2.

## 2.7. Banco de Trabajo

El banco de trabajo que se muestra en la figura 14 nos suministra 220 V y su estructura cuenta con un sistema de fijación óptimo que garantiza un funcionamiento adecuado de los elementos y se encuentra ubicado en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander

**Figura 14.**

*Banco de trabajo*



*Nota.* Banco de trabajo suministrado por el laboratorio de máquinas 2 de la Universidad Industrial de Santander.

### **2.7.1. Carga del Banco de Trabajo**

La carga está construida con una robusta estructura, especial para circuitos mono-trifásicos. En su panel frontal se encuentran los bornes de conexión y portafusibles cada uno conectado a su respectiva carga monofásica lo podemos observar en la figura 15.

**Figura 15.**

*Carga del banco de trabajo*



*Nota.* Banco de trabajo suministrado por el laboratorio de máquinas 2 de la Universidad Industrial de Santander.

En la tabla 1 la tensión nominal de la carga es de 220V cuando se hace una conexión en paralelo.

**Tabla 1.**

*Valores establecidos para la carga de trabajo según su posición*

Posición	Resistencia	Potencia disipada por fase
1	840 $\Omega$	58 W
2	600 $\Omega$	80 W
3	350 $\Omega$	138 W
4	240 $\Omega$	200 W
5	150 $\Omega$	330 W
6	120 $\Omega$	410 W
7	97 $\Omega$	500 W

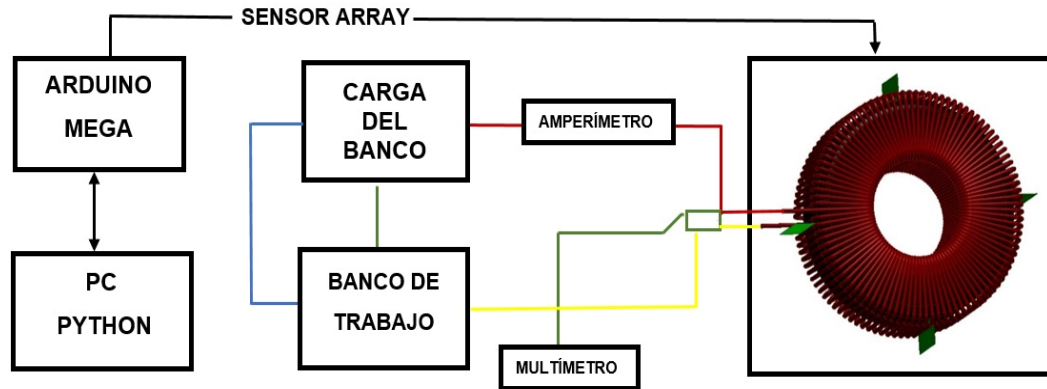
*Nota.* Información suministrada del laboratorio de máquinas eléctricas 2 de la Universidad Industrial de Santander

## 2.8. Procedimiento Experimental

A continuación, en la figura 16 está la esquematización grafica del montaje experimental utilizado, detallando los equipos usados en el procedimiento nos indicando su paso a paso.

**Figura 16.**

*Diagrama del sistema en configuración experimental*



**Nota.** *Elaboración propia del diagrama usado para la configuración experimental.*

En el transcurso de la evolución de la tecnología se ha generado una creciente demanda de sistemas de mediciones más preciso y eficientes, en este contexto la utilización de sensores magnéticos nos ayuda como una alternativa innovadora y eficaz.

Para la estimación experimental de este prototipo se realizan dos tipos de pruebas una con núcleo vacío y la otra con núcleo de lámina de hierro por lo tanto se basó en una programación por medio de PYTHON y un arduino mega que está conformado por integración de sensores magnéticos, estos se encuentran ubicados en una tarjeta pcb que miden 2.95 mm x 2.69 mm estos están estratégicamente incrustados uniformemente al núcleo, con una ranura horizontal onda de 13.4 milímetros. La bobina que rodea al toroide y por donde circula la corriente eléctrica a medir, tiene una capa de 100 vueltas calibre 21 AWG, generando un campo magnético que circula por el interior del toroide, dado que el toroide es una estructura cerrada y el campo magnético fuera de esta es nulo. Estos sensores se encuentran de esta manera para poder obtener las interferencias electromagnéticas que nos arroja el núcleo (Electricity, 2024).

Se realizó la conexión a la carga del banco, en diferentes posiciones para poder observar cómo se aumenta la corriente eléctrica y tensión, ya que todo el campo magnético generado por la corriente se concentra en el interior del toroide.

En la tabla 2 el escenario experimental con 100 vueltas en el cable de cobre calibre 21 AWG y cable calibre 12  $V_{\text{primario}}=220\text{ V}$

**Tabla 2.**

*Experimentación de tensión con 100 vueltas*

# Eprimario	#Esecundario	Vind2	Iprimario	Isecundario
5	100	0.38	6.86	0.43
6	100	0.45	6.92	0.47
7	100	0.51	6.65	0.49
8	100	0.58	6.89	0.56
9	100	0.64	6.90	0.64
10	100	0.71	6.91	0.73

*Nota.* Datos de experimentación de tensión con 100 vueltas en el núcleo con el cable de 12 AWG.

### **3. Simulaciones del Campo Magnético**

#### **3.1. Simulaciones del Campo Magnético en Diferentes Calibres por medio del Programa**

##### **ANSYS STUDEN R2**

Se desarrollaron distintas simulaciones de campos magnéticos emitidos por conductores sólidos, estos conductores son una buena opción para instalaciones eléctricas de baja tensión debido a su mayor y menor resistencia eléctrica para mayor seguridad. Son especialmente adecuados para su instalación en lugares donde están expuestos a fuerzas mecánicas o donde se requiere transportar una cantidad de corriente.

#### **3.2. Descripción del paso a paso para la Implementación del Campo Magnético en el**

##### **Programa ANSYS STUDENT R2**

Para el desarrollo de la simulación de estos cables, principalmente se diseñaron en el programa ANSYS STUDENT R2; se tuvo en cuenta las medidas estándar que tienen cada uno de los cables con los diferentes calibre seleccionados, principalmente se diseña un cilindro con sus dimensiones estipuladas, se prosigue a seleccionar el material, que para este caso se usó el cobre, procedemos a dar las dimensiones del campo magnético el cual debe de estar al 100% en los planos “X” y “Y” dejando el plano z en 0%, a continuación escogemos el amperaje que se le inyectará al cable y también corregimos como circulará esta corriente, guardamos esta información en el programa y a continuación dibujamos un círculo en la parte delante del cilindro, en todo el plano “Z” el cual colocamos como eje principal, ya para finalizar y que nos muestre las medidas del campo magnético de este conductor sólido (cilindro), se procede a la opción de campo magnético

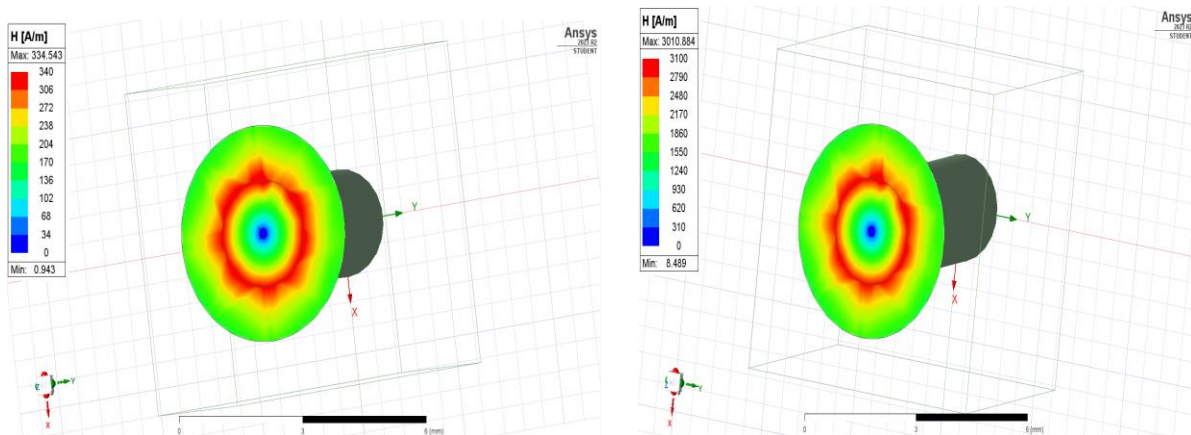
y el programa automáticamente procederá a darnos la corona de arcoíris con las medidas del campo magnético que este arroja.

### 3.3. Simulaciones

A continuación, se representa en la figura 17 las simulaciones por el programa mencionado anteriormente para el cable de 12 AWG con su menor y mayor amperaje para el que cada uno es permitido.

#### Figura 17.

*Simulación de campo magnético en un cable 12 AWG al lado izquierdo 2 [A] y al lado derecho 18 [A]*



**Nota.** Elaboración propia por medio del programa ANSYS STUDENT R2.

El conductor número 12 AWG de dimensiones: radio= 1.0265 [mm], h=3.2248 [mm], Área= 6.53 [ $m^2$ ]. De 2 y 18 [A].

Esta es una simulación como una corona en arcoíris; teniendo en cuenta sus 18 [A], a medida que nos acercamos a su intensidad de 3010.884 [mT] que tiene un radio de 1.2432 [mm].

La intensidad que se espera máxima es de 3010.884 [mT] y la mínima de 8.489 [mT] con una corriente que la atraviesa de 18 [A].

Igualmente, la intensidad máxima esperada de 0.42039 [mT] y la mínima de 0.00118 [mT] para la corriente de 2 [A].

En la tabla 3, podemos observar el campo magnético a diferentes corrientes para el cable de calibre 12AWG

**Tabla 3.**

*Datos arrojados por el programa de ANSYS STUDENT R2 para el cable de calibre 12 AWG.*

Corriente [A]	Campo magnético [mT]
18	3,7835
17	3.5915
16	3,3631
14	2,9427
12	2,5223
10	2,1019
8	1,6815
6	1,2611
4	0,8407
2	0,4203

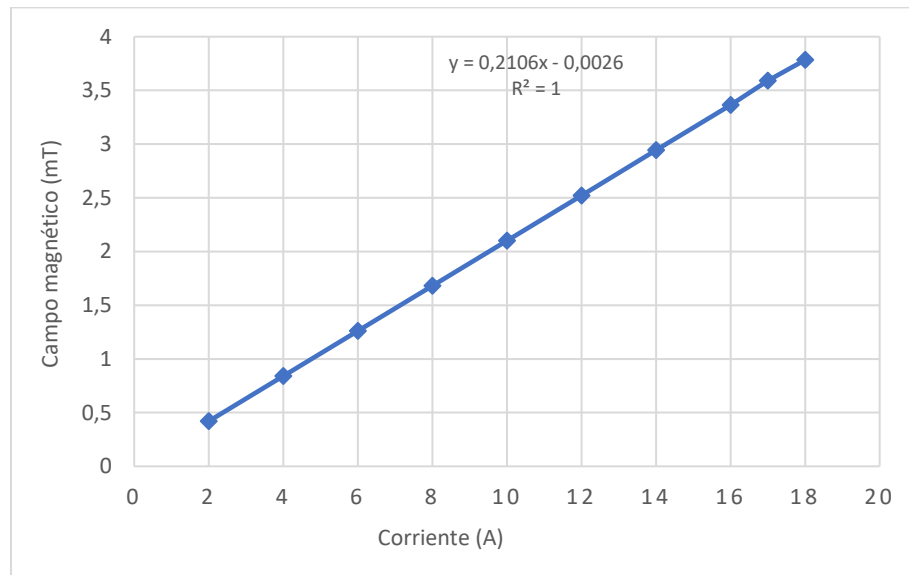
*Nota.* Elaboración propia, con base a los resultados dados en el programa ANSYS STUDENT R2.

Para la interpretación de los datos arrojados, se puede observar que la corriente es directamente proporcional al campo magnético sin ningún medio que lo perturbe.

Los campos magnéticos son linealmente dependientes de la intensidad de corriente, como se detalla en la figura 18.

**Figura 18.**

*Corriente vs Campo magnético con los datos arrojados por el programa de ANSYS STUDENT R2 para el cable con calibre 12 AWG.*



**Nota.** Elaboración propia, con base a los resultados dados en el programa ANSYS STUDENT R2.

#### **4. Realización de las simulaciones experimentales**

##### **4.1. Descripción del Modo de Operación para la Realización del Laboratorio**

###### **Correspondiente por medio de ANSYS STUDENT R2**

Dado que el programa solicita las dimensiones de cada elemento a utilizar, se tendrá en cuenta las medias del núcleo, para medir el campo magnético, se tendrán en cuenta la especificación de la ubicación de los sensores alrededor del núcleo que será a  $90^\circ$  ya que solo serán 4 sensores, para optimizar un buen campo magnético se decidió en dar 100 vueltas alrededor de este mismo teniendo en cuenta las simulaciones obtenidas por el programa, se pretende obtener los resultados esperado o no tan alejados de los mismos.

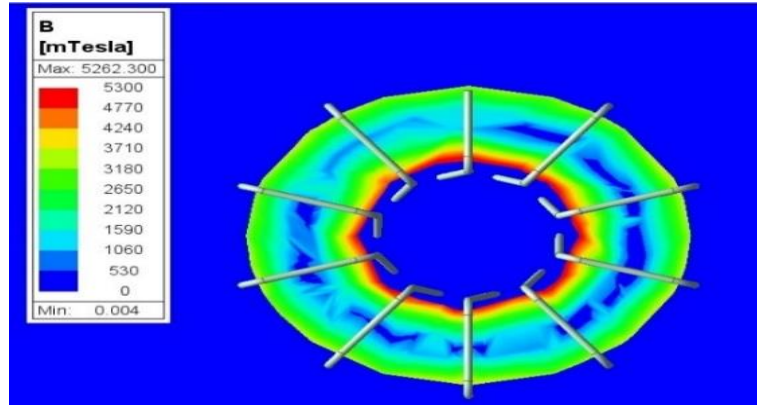
Teniendo en cuenta las dimensiones, dirección, posicionamiento de cada uno de los elementos que se tienen en cuenta para la elaboración de la bobina para la ejecución de este, después de haber realizado la bobina correctamente se continua con a la excitación y los límites para la obtención del campo magnético, damos a validar que todas las piezas estén correctamente y se hace la simulación para el núcleo de lámina de hierro.

En la obtención del campo magnético del núcleo de lámina de hierro que su punto central de concentración con más intensidad es en el borde interno del núcleo con un tono rojo que su medida máxima es de 5262.300[mT] y una medida media de en tono verde de 11.660 [mT].

En la obtención del campo magnético del núcleo de lámina de hierro como se observa en la figura 19 que su punto central de concentración con más intensidad es en el borde interno del núcleo con un tono rojo que su medida máxima es de 5262.300[mT] y una medida media de en tono verde de 11.660 [mT].

**Figura 19.**

*Simulación del núcleo de lámina de hierro excitado a 7[A] con 10 vueltas*

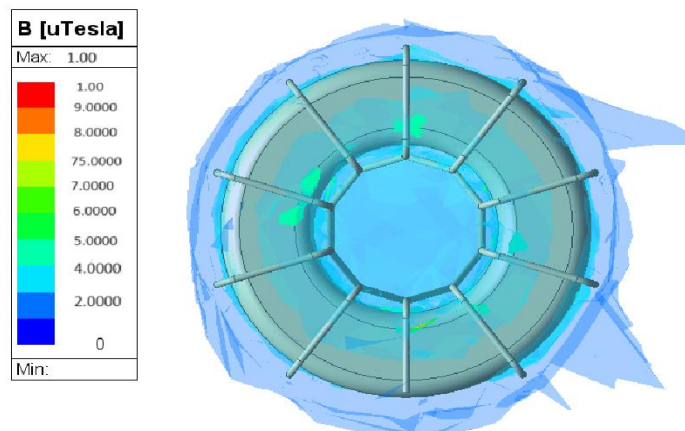


*Nota.* Elaboración propia por medio del programa ANSYS STUDENT R2

Para el **núcleo de vacío**, no se obtuvo una óptima simulación como se observa en la figura 20 dado que el material de vacío no es un buen conductor para el programa de ANSYS, por lo tanto, la simulación arrojó un valor muy mínimo lo que se interpreta como un campo totalmente homogéneo.

**Figura 20.**

*Simulación del núcleo de vacío excitado a 7[A] con 10 vueltas*



*Nota.* Elaboración propia por medio del programa ANSYS STUDENT R2

### 5. Obtención y Análisis de Resultados

Dado a la complejidad por el suministro de una fuente de gran potencial en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander en el laboratorio de máquinas eléctricas 2, se minimizó la misma para la ejecución de los laboratorios experimentales según lo establecido en el artículo de investigación; en donde se replanteó la manera de obtención de los datos arrojados, se reevalúan la manera de conexión y se reemplaza por la carga del banco de trabajo. En la tabla 4 respectivamente se presentan las muestras obtenidas, según posición, corriente, tensión y sensor por cada núcleo estudiado.

**Tabla 4.**

*Datos del sensor 1 del núcleo de lámina de Hierro*

Núcleo de hierro para el sensor 1					
Posición	Corriente teórica [A]	Corriente	Tensión medida [V]	Campo magnético [mT]	Magnitud del campo magnético medido [mT]
1	2	00,70	3,915		39,3700
2	4	01,03	4,374		57,4369
3	6	01,79	4,758		97,6576
4	8	02,85	5,538	5262.300	99,2270
5	10	03,93	5,484		100,334
6	12	5,680	3,183		133,240
7	14	06,72	2,952		151,911

*Nota.* Elaboración propia para concentrar las medidas dadas de manera teórica y experimental

En la tabla 5 los datos obtenidos por medio del código de PYTHON del sensor 4 del núcleo de hierro

**Tabla 5.**

*Datos del sensor 4 del núcleo de Hierro*

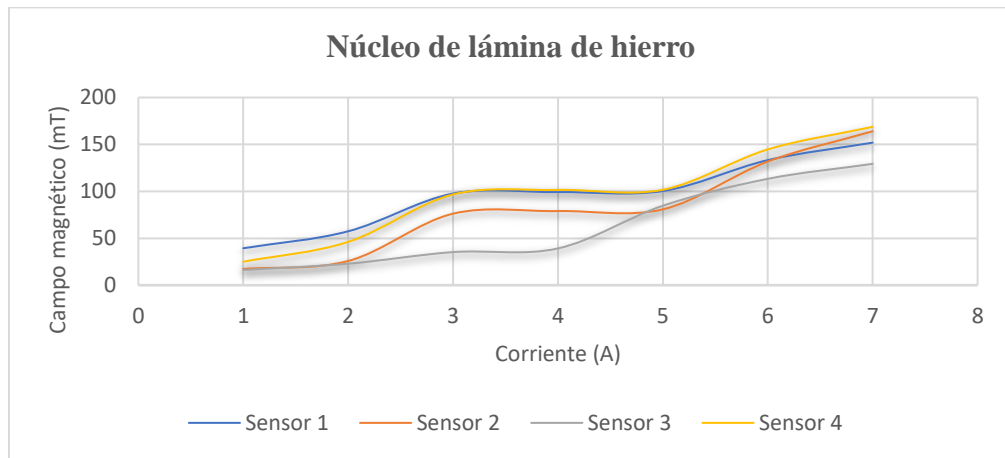
Núcleo de hierro para el sensor 4					
Posición	Corriente teórica [A]	Corriente medida [A]	Tensión medida [V]	Campo magnético teórico [mT]	Magnitud del campo magnético medido [mT]
1	2	00,70	3,915		25,0000
2	4	01,03	4,374		46,1303
3	6	01,79	4,758		96,7161
4	8	02,85	5,538	5262.300	101,499
5	10	03,93	5,484		101,686
6	12	5,680	3,183		144,648
7	14	06,72	2,952		168,728

**Nota.** Elaboración propia para concentrar las medidas dadas de manera teórica y experimental

Como se ve en la figura 21 podemos observar como el campo magnético es variable y se aumenta rápidamente cada vez que se le suministra corriente, lo que quiere decir que el campo magnético depende de la corriente que se le suministre y a su material de núcleo como se evidencia en la gráfica.

**Figura 21.**

*Carga del banco de trabajo [ $\Omega$ ] vs Campo magnético [mT] obtenidos de los resultados arrojados por lo hecho experimentalmente, para el toroide de hierro.*



**Nota.** Elaboración propia, con base a los resultados experimentales

En la tabla 6 los datos obtenidos por medio del código de PYTHON del sensor 1 del núcleo de vacío.

**Tabla 6.**

*Datos del sensor 1 del núcleo de Vacío*

Núcleo de vacío para el sensor 1					
Posición	Corriente teórica [A]	Corriente medida [A]	Tensión medida [V]	Campo magnético teórico [mT]	Magnitud del campo magnético medido [mT]
1	2	00,67	0,255		6,4031
2	4	01,01	0,376		5,8310
3	6	01,76	0,65		8,6023
4	8	02,83	1,042	1.00	14,248
5	10	03,92	1,464		16,432
6	12	05,68	2,18		21,977
7	14	06,76	2,636		25,239

**Nota.** Elaboración propia para concentrar las medidas dadas de manera teórica y experimental

En la tabla 7 los datos obtenidos por medio del código de PYTHON del sensor 4 del núcleo de vacío.

**Tabla 7.**

*Datos del sensor 4 del núcleo de vacío*

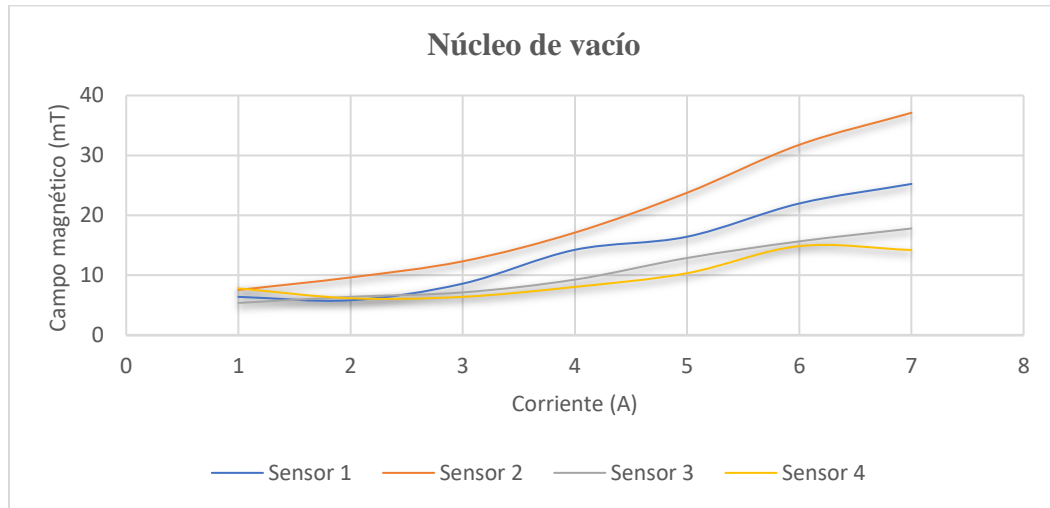
Núcleo de vacío para el sensor 4					
Posición	Corriente teórica [A]	Corriente medida [A]	Tensión medida [V]	Campo magnético teórico [mT]	Magnitud del campo magnético medido [mT]
1	2	0,067	0,255		7,8102
2	4	01,01	0,376		6,1644
3	6	01,76	0,65		6,4031
4	8	02,83	1,042	1.00	8,0623
5	10	03,92	1,464		10,344
6	12	05,68	2,18		14,866
7	14	06,76	2,636		14,213

**Nota.** Elaboración propia para concentrar las medidas dadas de manera teórica y experimental

En la figura 22 podemos observar como el campo magnético es variable y fluido cada vez que se le suministra corriente, lo que quiere decir que el campo magnético depende de la corriente que se le suministre como se evidencia en la gráfica y esto se debe también al material de su núcleo.

**Figura 22.**

*Carga del banco de trabajo [ $\Omega$ ] vs Campo magnético [mT] obtenidos de los resultados arrojados por lo hecho experimentalmente, para el toroide de vacío*

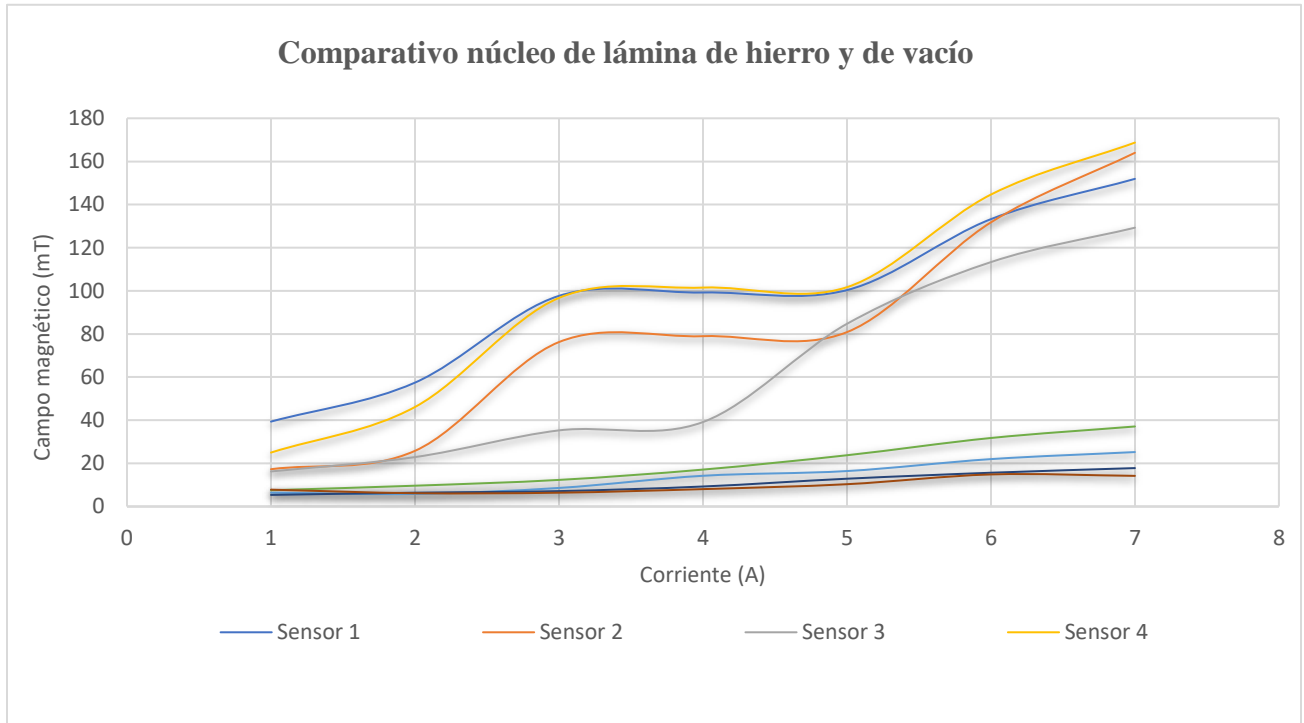


**Nota.** Elaboración propia, con base a los resultados experimentales

En la figura 23 observamos el comparativo de lo experimental de los dos núcleos usados en este proyecto, en donde podemos observar que en lo experimental el núcleo de lámina de hierro es mucho más fluido por su material que se evidencia una señal casi sinusoidal y la señal del núcleo vacío es lineal pero muy mínimo que lo podemos interpretar como un campo totalmente homogéneo.

**Figura 23.**

*Comparativo de los análisis experimentales para los núcleos de lámina de hierro y vacío.*



**Nota.** Elaboración propia con base a los resultados experimentales

## 6. Análisis

La implementación de un prototipo de medida de magnitudes eléctricas usando sensores magnéticos es una tarea relativamente sencilla. Los sensores magnéticos ofrecen una serie de ventajas para la medición de magnitudes eléctricas, como su fiabilidad, su precisión y su resistencia a la corrosión.

Se implementaron una serie de pruebas de laboratorio para confirmar los escenarios que han sido validados por simulaciones que incluyeron instrumentos de medición, y placas de desarrollo de adquisición de datos.

Luego de hacer un análisis en el laboratorio con el transformador al tener 2 devanados podemos deducir que a medida que un embobinado esta estático y que el segundo devanado que aumenta el número de espiras en el embobinado la corriente y el voltaje disminuye por ende es ineficaz a la hora de obtener el campo magnético necesario.

La versión CST para estudiantes es limitada, en este caso se procedió a realizar en Ansys Electronic Desktop Student versión estudiante que debido por ser versión estudiante contiene muchas limitantes.

Se analizó y se simuló mediante el programa de ANSYS STUDENT R2 la misma figura toroidal con el enrollamiento indicado para así obtener un valor teórico del campo magnético y poder comparar con el prototipo experimental.

Mediante el prototipo de medida usando sensores array realizamos muestras experimentales el campo magnético, la corriente y el voltaje nos disminuye ya que este es un toroide vacío.

## 7. Conclusiones

Luego de revisar y comprender el funcionamiento del campo magnético se implementa una serie de pruebas de laboratorio para confirmar los escenarios del programa de ANSYS STUDENT R2, se logra implementar un prototipo de medida de magnitudes eléctricas usando sensores magnéticos, se analiza y se simula mediante el programa la misma figura toroidal con el enrollamiento indicado para obtener el campo magnético teórico y poder comparar con el prototipo experimental, por ende estos sensores nos ofrecen una serie de ventajas junto a sistemas controlados por Arduino y PYTHON; la estrategia de realizar pruebas con diferentes núcleos (vacío y lámina de hierro) nos proporcionará información valiosa sobre cómo estos afectan las mediciones y cómo pueden ejecutar las interferencias electromagnéticas este prototipo tiene el potencial.

Se realizó con éxito las pruebas experimentales, el núcleo respondió de la forma esperada, se tuvo acceso al laboratorio de máquinas eléctricas 2 de la Universidad Industrial de Santander tras llevar a cabo pruebas con 2 tipos de materiales diferentes, se determina con el núcleo vacío su campo magnético es muy mínimo, Este comportamiento fue claramente visible gracias al material utilizado para construir el núcleo.

Para validar los resultados, específicamente solo se evidenció en el núcleo de vacío dado que sus dos escenarios reafirmaron el concepto ya especificado, en cambio para el escenario de lámina de hierro no se evidenció como se quería dada a las limitaciones que presentó el programa ANSYS STUDENT R2 para la satisfacción de este, por lo tanto, este quedó inconcluso por esta misma situación.

### Referencias

Atorino, J. I., Bortolín, L. P., Rodríguez, E., Farías, R. O., & Rodríguez, E. E. (2009).

Experimentos con un sensor de efecto Hall. *Latin-American journal of physics education*, 3(3), 17.

Areny, R. P. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo.

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Eevyk28\\_fVkc&oi=fnd&pg=PR11&dq=sensores+&ots=JZgM-0Cmbf&sig=\\_tZQdAgkfBr4EEsijEcrIW3xCQk#v=onepage&q=sensores&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Eevyk28_fVkc&oi=fnd&pg=PR11&dq=sensores+&ots=JZgM-0Cmbf&sig=_tZQdAgkfBr4EEsijEcrIW3xCQk#v=onepage&q=sensores&f=false)

Atorino, J. I., Bortolín, L. P., Rodríguez, E., Farías, R. O., & Rodríguez, E. E. (2009).

Experimentos con un sensor de efecto Hall. *Latin-American journal of physics education*, 3(3), 17. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3694136>

Electricity. (2024). ¿Cuál es el campo magnético dentro de un toroide?. <https://www.electricity-magnetism.org/es/cual-es-el-campo-magnetico-dentro-de-un-toroide/>

Enríquez, F. J., Sifuentes, E., Bravo, G., & Castro, A. (2016). Sistema Embebido para Validar el

Funcionamiento de la Tarjeta de Adquisición de Datos USB-6009 de National Instruments. *Información tecnológica*, 27(5), 191-200.

[https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642016000500021&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642016000500021&script=sci_arttext&tlng=pt)

Challenger-Pérez, I., Díaz-Ricardo, Y., & Becerra-García, R. A. (2014). El lenguaje de programación Python. *Ciencias Holguín*, 20(2), 1-13.

<https://www.redalyc.org/pdf/1815/181531232001.pdf>

Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. (1998). Elecciones de Física: Volumen II Electromagnetismo y Materia. Fondo de Cultura Económica.

Fundación Endesa. (2024). Electromagnetismo.

<https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/que-es-el-electromagnetismo>

Lastra Lamarca, D. (2015). Modelo analógico y digital en SystemC-AMS de la placa Arduino Mega 2560.

<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7348/378290.pdf?se>

Lokhande, S., Shende, T., Aher, S., & Indurkar, B. (2018). Project Report on Deep Beam Analysis using ANSYS. *International Journal of Science Technology & Engineering*,

4(12). <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57645492/IJSTEV4I12023->

[libre.pdf?1540636797=&response-content-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57645492/IJSTEV4I12023-libre.pdf?1540636797=&response-content-)

[disposition=inline%3B+filename%3DProject\\_Report\\_on\\_Deep\\_Beam\\_Analysis\\_usi.pdf](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57645492/IJSTEV4I12023-libre.pdf?1540636797=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DProject_Report_on_Deep_Beam_Analysis_usi.pdf)

[&Expires=1716209360&Signature=BHoHnLAJWUTPdYOz7yXNjiTt~nvgjmTRHrXfhg](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57645492/IJSTEV4I12023-libre.pdf?1540636797=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DProject_Report_on_Deep_Beam_Analysis_usi.pdf&Expires=1716209360&Signature=BHoHnLAJWUTPdYOz7yXNjiTt~nvgjmTRHrXfhg)

[sw6OGL2AoncysoA-cJTh~sHRDc~jBBriGiTDPur-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57645492/IJSTEV4I12023-libre.pdf?1540636797=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DProject_Report_on_Deep_Beam_Analysis_usi.pdf&Expires=1716209360&Signature=BHoHnLAJWUTPdYOz7yXNjiTt~nvgjmTRHrXfhgsw6OGL2AoncysoA-cJTh~sHRDc~jBBriGiTDPur-)

[hO7U1AbIU5jb701FnL2AOCaLLkjLOVGfAOblWO~mdq~WxbhI~MWHB52aq~u3Gy](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57645492/IJSTEV4I12023-libre.pdf?1540636797=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DProject_Report_on_Deep_Beam_Analysis_usi.pdf&Expires=1716209360&Signature=BHoHnLAJWUTPdYOz7yXNjiTt~nvgjmTRHrXfhgsw6OGL2AoncysoA-cJTh~sHRDc~jBBriGiTDPur-hO7U1AbIU5jb701FnL2AOCaLLkjLOVGfAOblWO~mdq~WxbhI~MWHB52aq~u3Gy)

[LS6WNI7j6lUvsnJG8LfYT4tJjiJbewfDWTd4eMNMcySSy50itDYW5upWEPF6o~GKc](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57645492/IJSTEV4I12023-libre.pdf?1540636797=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DProject_Report_on_Deep_Beam_Analysis_usi.pdf&Expires=1716209360&Signature=BHoHnLAJWUTPdYOz7yXNjiTt~nvgjmTRHrXfhgsw6OGL2AoncysoA-cJTh~sHRDc~jBBriGiTDPur-hO7U1AbIU5jb701FnL2AOCaLLkjLOVGfAOblWO~mdq~WxbhI~MWHB52aq~u3GyLS6WNI7j6lUvsnJG8LfYT4tJjiJbewfDWTd4eMNMcySSy50itDYW5upWEPF6o~GKc)

[Y90mvk34tkQ0G8f0m-91ABJtoCryxTBQMG4t~72qp~FjMsnYYI5em-r0xqkjk54p-pA3P9FEX4JFG6uh7sLMqW5BPsaid1mAvcAHFSSSxYzIFjLbN1LTt87XOmwAMnJD FK9UK83Q &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://doi.org/10.1111/1471-6543.12345)

Miranda Estepa, C., & Ronquillo Guerrero, J. (2008). Diseño y construcción de bus de datos y sensores para las prácticas de NACC. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/4679>

Rivera, W. O. (2014). Selección y especificación de transformadores de corriente y potencial en instalaciones eléctricas industriales. México DF.

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57250453/osornorivera-libre.pdf?1535329749=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUNIVERSIDAD\\_NACIONAL\\_AUTONOMA\\_DE\\_MEXICO.pdf&Expires=1716220023&Signature=Q8R6qz1DVMyesi8vdkJq5Y4TXRVv1kP6oO0ALzDj7EjjOvijhR5hdWqaCjyuGPNx6irM-GQaGy8rkfptmeinaC9PVdde3C1D5VIwHQ5XWC3M67ZfWBoYCCvVWnolwl8z685JyHh4cTEiGChCRsIkwsKkzZgCVS9~RxRe4qANsNQghMnTwtNro1KvQpvwaqiCEPci gEmk2RMk6owMWOout0ZVP9QZeWj~8y2gJVfrKT-QFcTB3cFimRmIRXAqvZav4XaM10I55zAllcnxtHgr63fzoD8xwscBwS3jTndBQo5pNSLlt4cEPFoQuXukMSGSOBGLefVIM7fjMyTvidYPXpQ &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57250453/osornorivera-libre.pdf?1535329749=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DUNIVERSIDAD_NACIONAL_AUTONOMA_DE_MEXICO.pdf&Expires=1716220023&Signature=Q8R6qz1DVMyesi8vdkJq5Y4TXRVv1kP6oO0ALzDj7EjjOvijhR5hdWqaCjyuGPNx6irM-GQaGy8rkfptmeinaC9PVdde3C1D5VIwHQ5XWC3M67ZfWBoYCCvVWnolwl8z685JyHh4cTEiGChCRsIkwsKkzZgCVS9~RxRe4qANsNQghMnTwtNro1KvQpvwaqiCEPci gEmk2RMk6owMWOout0ZVP9QZeWj~8y2gJVfrKT-QFcTB3cFimRmIRXAqvZav4XaM10I55zAllcnxtHgr63fzoD8xwscBwS3jTndBQo5pNSLlt4cEPFoQuXukMSGSOBGLefVIM7fjMyTvidYPXpQ &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)

Rodríguez, N. J. (2013). Implementación de una tarjeta de desarrollo electrónica para la enseñanza en el área de los microcontroladores. *TecnoESUFA: revista de tecnología aeronáutica*, 19.

Rodriguez, P. (2001). *Introducción a las mediciones eléctricas*. TECNIBOOK EDICIONES.

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=5SeXDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA6&dq=mediciones+el%C3%A9ctricas&ots=H3snPKAuDK&sig=SFe5FRT-TcedY5xYuWXSaSE-QCo#v=onepage&q=mediciones%20el%C3%A9ctricas&f=false>

Takahashi, H., Nakai, A., Thanh-Vinh, N., Matsumoto, K., & Shimoyama, I. (2013). A triaxial tactile sensor without crosstalk using pairs of piezoresistive beams with sidewall doping. *Sensors and Actuators A: Physical*, 199, 43-48.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424713002069>

Walker, S. M. (2007). *El magnetismo*. ediciones Lerner.

[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=xnY3C7v4mRQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=magnetismo+&ots=pl5N\\_sTtoc&sig=oaGAYCvsZzV2iKKYH5vmkKrum04#v=onepage&q=magnetismo&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=xnY3C7v4mRQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=magnetismo+&ots=pl5N_sTtoc&sig=oaGAYCvsZzV2iKKYH5vmkKrum04#v=onepage&q=magnetismo&f=false)

Weiss, R., Itzke, A., Reitenspieß, J., Hoffmann, I., & Weigel, R. (2018). A novel closed loop current sensor based on a circular array of magnetic field sensors. *IEEE Sensors Journal*, 19(7), 2517-2524. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8581469/>