

**Diseño y construcción de un generador de campo magnético con control de intensidad, dirección y frecuencia**

Una Tesis Presentada Para Obtener El Título De  
Ingeniero Electrónico  
Universidad Santo Tomas de Aquino, Bogotá

Juan David Aguilera Díaz & Alejandro Parra Pérez.  
Enero 2015.

Director  
Jairo Alejandro Rodríguez

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

FIRMA DIRECTOR

---

FIRMA JURADO

---

FIRMA JURADO

## **Resumen**

Este proyecto posee elementos de investigación y desarrollo, fundamentados en el conocimiento adquirido durante el transcurso de la carrera de Ingeniería Electrónica. Dichos elementos se han aplicado en el diseño y construcción de un sistema electromagnético que permite la experimentación, a nivel micro-escala y nano-escala. El diseño de este sistema electromagnético, consta a su vez de un subsistema de comunicación, el cual permite la interacción entre un circuito fuente y un computador, esto para facilitar el control de las características deseadas como, la densidad de flujo magnético, su dirección e intensidad de operación.

El uso de campos magnéticos para el análisis de materiales, sustancias y sus comportamientos en el ámbito experimental, se ve afectado por las mediciones, la movilidad de los instrumentos y los equipos requeridos para el análisis de los resultados. Al visualizar los problemas mencionados anteriormente y enfocarlos en el área de la ingeniería electrónica, se presenta como solución alternativa el proyecto de grado presentado a continuación.

Dicha solución consiste en la creación de una herramienta que permite manipular de manera eficaz, las distintas variables ya mencionadas, y que a su vez utiliza materiales de fácil acceso sin restricciones de licencias, todo con el fin de evitar incurrir en uno de los principales problemas en el área de la investigación- las licencias de software- de esta forma se da como valor agregado (en cuanto estructura y mantenimiento ) la posibilidad de simple reemplazo de las piezas funcionales del sistema.

Este proyecto será presentado iniciando por los conceptos teóricos básicos, los cuales son requeridos para la contextualización del proyecto en mención, su estructura y desarrollo.

## **Introducción**

Este Proyecto se diseñó y ejecutó, con el fin de plantear una propuesta de solución a un problema de relevante interés en áreas de investigación de física aplicada. Para el caso presente se aborda el área de la instrumentación electromagnética, enfocándose en dispositivos fundamentales, como los generadores de campo magnético. La instrumentación asociada a estos dispositivos cubre el control de las características y especificaciones que se plantean en este proyecto, los cuales son factibles de implementarse desde al ámbito de la Ingeniería Electrónica, con el objetivo de desarrollar un instrumento versátil y asequible, respecto a los existentes en el mercado.

Siendo fundamental en la experimentación enfocada al aprendizaje y a la investigación se hace pertinente abordar el tema, agregando el tipo de sistemas que se encuentran en el mercado que no permiten un acceso versátil y objetivo para demostraciones y pruebas de baja y media potencia tanto en campo magnético como en consumo así como su manejo y estudio de datos, que en muchos de los casos son complejos para su análisis o no son completos.

En el ámbito social nace la necesidad de dar un acceso a esta tecnología para la enseñanza y profundizar el conocimiento así como mejorar la practica tanto en laboratorios como en centros de estudio en el área del electromagnetismo.

Teniendo los puntos anteriores en cuenta se presenta este proyecto como respuesta y posible solución a la dinámica anterior, para apoyar el área del conocimiento desde la ingeniería electrónica.

## Tabla de Contenidos

Capítulo 1 Introducción e información general .....	1
Resumen .....	iv
Introducción .....	v
Descripción del problema.....	3
Formulación del problema.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Justificación.....	4
Capítulo 2 Marco Teorico.....	6
Introducción a Marco Teórico.....	6
Fundamentos de Electromagnetismo.....	6
Campos Magnetostáticos.....	10
Ley de Biot Savart.....	11
Densidad de Flujo Magnético.....	13
Ecuación de Maxwell para Campos Electromagneticos Estaticos.....	14
Potenciales Magneticos Escalares y Vectoriales.....	15
Capitulo 3 Generador Magnético.....	19
Introducción a Generador Magnético.....	19
Par - Torsión Momento Magnético.....	19
El Dipolo Magnético, espiras y solenoides.....	22
Magnetización de los materiales.....	28
Clasificación de los materiales Magnéticos y Magnetización.....	29
Ferromagnetismo.....	36
Circuitos Magnéticos.....	38
Comportamiento de un Material Ferromagnético como Función de una Corriente eléctrica variable.....	42
Curvas de Magnetización.....	46
Histéresis.....	48
Capítulo 4 Diseño Metodológico .....	51
Introducción Diseño Metodológico.....	51
Variables del sistema.....	51
Desarrollo del Sistema.....	52
Generador de Campo Magnético Bilateral Simétrico.....	53
Control del Generador de Campo Magnético Bilateral Simétrico.....	56
Telemetría y Control de Wireless del Sistema.....	58
Alimentación del Sistema.....	58
Etapa de Alimentación del Control del Sistema.....	59
Etapa de Potencia para Generar Campos Magnéticos.....	59

Etapa Mecánica (Orientación de las Bobinas).....	59
Capítulo 5 Desarrollo.....	61
Introducción al Desarrollo.....	61
Implementación del Sistema.....	61
Fuentes de Alimentación.....	62
Microcontrolador.....	63
Optoaisladores.....	67
Control de Orientación de Bobinas.....	67
Comunicación Serial (X-Bee).....	68
Sensor de Efecto Hall.....	70
Control de Campos Magnéticos.....	71
Instrumentación.....	71
Generación de Ancho de Pulso (PWM).....	71
Conversor Análogo Digital (ADC).....	72
Capítulo 6 Experimento.....	73
Introducción a Experimento.....	73
Diseño Metodológico de los Experimentos.....	73
Capítulo 7 Resultados.....	75
Capítulo 8 Conclusiones.....	77
Bibliografía.....	79

## Lista de figuras

- Figura 2.5.1. Ejemplo ilustrativo de la aplicación de la Ley de Faraday en el caso de una densidad de Flujo Magnético constante y una trayectoria variable.
- Figura 3.2.1. Espira en un campo Magnético.
- Figura 3.3.1. Campo Magnético producido por una corriente eléctrica que circula a través de un solenoide.
- Figura 3.9.1. Típica forma de la curva de Histéresis de un material ferromagnético.
- Figura 3.10.1. Curva de densidad de flujo magnético en función del campo magnético para un material ferromagnético.
- Figura 3.10.2. Típica forma de la curva de histéresis de un material ferromagnético.
- Figura 4.2.1.1. Geometría para la determinación de la densidad de flujo magnético debido a una espira de corriente.
- Figura 4.2.1.2. Modelo de dos espiras idénticas.
- Figura 4.2.2.1. Diagrama de bloques que representan el diseño del sistema propuesto.
- Figura 4.2.2.2. Diagrama de flujo de funcionamiento del microcontrolador.
- Figura 4.2.2.3. Diagrama de flujo de control y adquisición de datos.
- Figura 4.2.5.1. Configuración de conexión entre el modulo X-bee y el microcontrolador.

## **Capítulo 1**

### **Introducción e información general**

#### **Descripción de problema**

En el ámbito investigativo del electromagnetismo, podemos encontrarnos con variadas dificultades, dentro de las cuales cabe resaltar, las presentadas en el campo de análisis de resultados correspondientes a los campos electromagnéticos; a su vez, el análisis de los comportamientos de materiales, sustancias y elementos que son sometidos a la acción de estos campos, teniendo en cuenta que, los instrumentos de producción de los dichos campos electromagnéticos son limitados en ciertos aspectos tales como: resolución, producción dinámica y la intensidad.

En cuanto a factor económico podemos ver que, los precios de adquisición para la fabricación, mantenimiento y reparación de estos equipos e instrumentos son de alto costo, presentándose de esta manera un obstáculo para la educación, dados los gastos en los que se debe incurrir y los presupuestos o economías propias de cada plantel educativo, más al tratar temas como: tiempos de acción además de, el tiempo y los recursos necesarios para el desplazamiento del personal capacitado quienes, son responsables de realizar los procesos correspondientes, además de las dificultades que se presentan al tener que, movilizar un equipo de tales dimensiones de un espacio físico a otro.

Los instrumentos de laboratorio permiten el estudio de los fenómenos ya mencionados; esto como se explicaba anteriormente no facilita el muestreo y el posterior análisis de resultados teniendo en cuenta que son los equipos fijos y de difícil transporte, además con un bajo rango de campos electromagnéticos a los cuales, el acceso a datos y muestreo son realmente complejos y de difícil manejo. Esto llevando al investigador, a realizar cálculos adicionales o simplemente adicionar instrumentos para la realización de las mediciones, además de presentarse otros obstáculos Como por ejemplo, el relacionado con las Fuentes de alimentación externas ya que, en la mayoría de los casos, no son compatibles con todos los elementos de los equipos o dificultan su transporte.

Este corresponde al espacio que nos llama la atención y que, para nosotros es el eje del desarrollo y aplicación de los conocimientos adquiridos durante la carrera, además de cumplir con un papel de apoyo a la educación, teniendo siempre un enfoque social, el cual se presenta como una solución de fácil acceso / manejo para la comunidad educativa siendo posible su implementación y desarrollo como mediador en los procesos de aprendizaje efectivos de la comunidad, llevando de manera paralela y sistemática teoría y práctica.

## **Formulación de problema**

¿Cómo generar una densidad de flujo magnético con control de intensidad, dirección y frecuencia, para localizarse en una cierta región del espacio?

## **Objetivo General**

Diseñar y construir un generador de densidad de flujo magnético variable, en intensidad, dirección y frecuencia.

## **Objetivos Específicos**

1. Diseñar y construir dos bobinas, con núcleo, que permitan generar una densidad de flujo magnético en una región determinada del espacio.
2. Diseñar y construir una fuente de voltaje variable que permita energizar bobinas con núcleo.
3. Diseñar y construir un sistema con realimentación, que permita controlar la intensidad, dirección y frecuencia de un generador magnético, desde un computador.
4. Generar un sistema de alimentación que permita cumplir con los requerimientos de los módulos del sistema.
5. Diseñar e implementar el software de control que permita analizar y manipular las variables del sistema.

## **Justificación**

En el área de investigación y desarrollo de ciencia y tecnología de materiales; específicamente en su producción, caracterización y aplicación, es de suma importancia contar con un sistema generador de flujos magnéticos con control, en dirección intensidad y frecuencia, para regiones espaciales con acceso libre. Teniendo en cuenta el elevado costo que este tipo de herramientas tienen en el mercado, además de su limitada arquitectura y el tipo de aplicación tendiente a estar orientada a otras áreas ajenas a la de producción de materiales, se deduce la pertinencia del diseño y desarrollo de un sistema apto para cubrir las necesidades existentes en los procesos de producción y separación de materiales magnéticos. Al contar con un sistema con estas características se puede ampliar su campo de aplicación al desarrollo de investigación formativa en áreas afines.

En el campo de la medicina existen instrumentos que pueden llegar a funcionar de la misma forma que el instrumento propuesto en el proyecto, pero a diferencia de estos el campo generado está un rango que permite la manipulación de una forma más sencilla y como se mencionó anteriormente mejoraría el análisis del campo para pequeñas dimensiones. Al contar en la universidad con un enfoque humanista y católico se piensa en el proyecto con una inversión moderada y ajustable a los diferentes campos del área educativa siendo de gran importancia el fácil acceso a la herramienta y también un mantenimiento sencillo de la misma. Para esta área la herramienta a desarrollar una compatibilidad de software y un diseño y arquitectura modular para su mantenimiento y reparación.

La necesidad de experimentación científica a baja escala y con recursos limitados hace mucho más importante el desarrollo, ya que los modelos existentes requieren de una inversión alta un costo de mantenimiento igualmente alto y un uso específico moderado es decir que no se puede usar para todos los casos.

En la universidad encontramos un buen laboratorio de electromagnetismo cuyos instrumentos permiten una adquisición de datos manual ya que no guardan un histórico de las muestras para un posterior análisis, así mismo posee un sistema de alimentación externo el cual dificulta su movilidad hacia el exterior, ahora bien , el acceso es limitado ya que la disponibilidad del equipo se sujeta a pruebas en el mismo laboratorio con el tiempo de clase o los espacios disponibles lo cual perjudica los tiempos de toma de datos y de análisis de los mismos. Debido a esto se tomó la decisión de dar un acceso remoto o a distancia, para el uso del instrumento en cuestión.

Esta situación posibilita en nuestro ámbito una mejora en el área de investigación al dar un acceso a los datos y a la máquina de forma remota sin necesidad de tomar datos de forma manual, teniendo también la posibilidad de visualizar los datos en un tiempo más corto además de ciertos análisis se simplificarían como el valor del campo en un punto, la dirección entre otros.

## Capítulo 2

### Marco Teórico

Para comprender la fenomenología de los temas a tratar se describe de forma concreta los principios que ocurren en el mismo. Para esto se desarrollaran los temas respectivos analizando desde las definiciones de campo hasta su comportamiento, así como las respectivas teorías que nos permitirán un análisis del comportamiento del campo magnético su producción y las variables que se usaran en el proyecto a realizar.

#### 2.2 Fundamentos de electromagnetismo

El diseño y posterior desarrollo de un sistema que permita la producción de campos magnéticos exige un conocimiento detallado de diversos fenómenos asociados al movimiento de partículas, tales como los electrones. Así por ejemplo la cantidad de carga eléctrica  $Q$  que posee un cuerpo es múltiple entero de la carga eléctrica del electrón; es decir,  $Q=ne$ , donde  $n$  es un número entero positivo, y,  $e=1.6\times 10^{-19}$ , la carga del electrón en culombios. En consecuencia, el culombio, que es una medida de la cantidad de carga que contiene un cuerpo, equivale aproximadamente a  $6.3\times 10^{18}$  electrones. Cuando los electrones, como cualquier otra partícula, experimentan una fuerza, estos pueden desplazarse aceleradamente, según lo predice la ley del movimiento de Newton,  $F=m_0a$ , donde  $m_0$  representa la masa del electrón cuyo valor es  $9.11\times 10^{-31}$  kilogramos. La fuerza puede ser de origen eléctrico, magnético, o una combinación de ambas como lo establece la ley de Lorentz,

$$\vec{F} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.2.1)$$

En la expresión (2.2.1)  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  representan los vectores campo eléctrico y densidad de flujo magnético, respectivamente. A su vez el campo eléctrico, que es una medida de cómo un cuerpo cargado eléctricamente afecta el espacio que lo rodea, está relacionado con el potencial eléctrico  $V$  por medio de la ecuación,  $\mathbf{E} = -\nabla V$ , en la que el símbolo delta indica la variación espacial de  $V$ . El potencial eléctrico representa la energía potencial eléctrica  $U$  por unidad de carga; esto es,  $V = U/Q$ , cuya unidad, el voltio, indica la energía en julios necesaria para desplazar la carga  $Q$  a través del espacio.

De otra parte, el segundo término en la ecuación (2.2.1), indica que una carga eléctrica moviéndose en una región del espacio en la que existe una densidad de flujo magnético  $B$ , experimentará una fuerza perpendicular a este.

Ahora bien; sin importar las causas que originan el desplazamiento de un culomb de carga eléctrica, el movimiento de este enorme número de electrones dará origen a una corriente eléctrica dada por,  $I = dQ/dt$ , cuya unidad, el amperio (A), indica el movimiento de  $6.3 \times 10^{18}$  electrones por una región del espacio durante un segundo.

Un nuevo examen del segundo término en la ecuación (2.2.1) indica que si un electrón se desplazan con una velocidad promedio  $v$  perpendicular a la dirección del vector que representa la densidad de flujo magnético  $\mathbf{B}$ , se infiere que la magnitud de la fuerza magnética que obra sobre la partícula estará dada por  $F_m = evB$ , de donde se deduce que,

$$B = \frac{F_m}{ev} \quad (2.2.2)$$

Expresión que permite la definición de las unidades de la densidad de flujo magnético.

En efecto, en (2.2.2) se observa que la fuerza de un newton dividida entre el producto de la carga eléctrica fundamental y la rapidez de esta; es decir, newton por segundo/culombio por metro, o con base a la notación del sistema internacional de unidades, Ns/Cm, cuya combinación de unidades se define como el *Tesla* (T).

Ahora, suponiendo que una región del espacio existe una densidad de flujo magnético  $\mathbf{B}$ , y que allí se dispone de un cable de material conductor de longitud  $L$  por el que desliza con rapidez  $dv$  una porción infinitesimal de carga  $dQ$ , el segundo término de la ecuación (2.2.1) se transforma en  $d\mathbf{F}=dQd\mathbf{v}\times\mathbf{B}$ , o de igual manera como,  $d\mathbf{F}=dQdl/dt\times\mathbf{B}$ , de modo una porción del cable, también infinitesimal, experimentará una fuerza  $d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$ , y todo el cable, una fuerza neta dada por,

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B} \quad (2.2.3)$$

La expresión anterior, que permite calcular la magnitud de la fuerza magnética que obra sobre un cable, aglutina los conceptos de intensidad de corriente eléctrica que fluye a través de un conductor, de cierta longitud, en presencia de una densidad de flujo magnético.

Las fuentes de magnetismo pueden ser tanto los imanes como las corrientes eléctricas; esto último en virtud de los descubrimientos de Ampere, que condujeron al hallazgo de

una relación entre las corrientes eléctricas y el magnetismo que se resume en la siguiente ecuación deducida por Maxwell,

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (2.2.4)$$

En la que el vector  $\vec{H}$ , en A/m, hace referencia al campo magnético, también llamado intensidad de campo magnético o campo magnetizante,  $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$  Tm/A, es la permeabilidad magnética del vacío,  $I$  la intensidad de corriente eléctrica neta, mientras que el símbolo en la integral hace referencia al conductor cerrado de longitud  $L$  por el que fluye esa corriente.

Cercana a la ley de Ampere es la ley de Biot & Savart, la cual permite calcular el campo magnético en un punto,  $\vec{r}$ , debido a corrientes eléctricas fluyendo a través de un cable con forma arbitraria,

$$d\vec{H} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.2.5)$$

Si se dispone de un campo magnético  $\vec{H}$  en una región del espacio, entonces la cantidad de vectores del campo que atraviesan una superficie real o imaginaria, dará origen al concepto de flujo magnético dado por,

$$\Phi = \iint_S \mu \vec{H} \cdot d\vec{S} \quad (2.2.6)$$

Donde  $\mu$  representa la permeabilidad magnética del medio y  $dS$  un elemento infinitesimal de la eventual superficie, y la doble integral en referencia a que existe una superficie  $S$ . Si a continuación se divide el flujo, cuyas unidad es el weber (Wb), entre una cierta área de superficie  $S$ , se obtiene la densidad de flujo magnético  $\mathbf{B}$ ; es decir,

$$\mathbf{B} = \frac{\Phi}{S} = \mu \mathbf{H} \quad (2.2.7)$$

La ecuación (2.2.7) pone de manifiesto una relación explícita entre la densidad de flujo magnético  $\mathbf{B}$  y el campo magnético  $\mathbf{H}$ , que aunque a primera vista pareciera proporcional, en general no lo es, como se verá en el capítulo correspondiente a propiedades magnéticas de la materia.

### 2.3 Campos Magnetostáticos

Una carga que se mueve paralelamente a una corriente de otras cargas experimenta una fuerza perpendicular a su propia velocidad. Lo cual se interpreta y concuerda con la ley de coulomb con la invariancia de la carga y la relatividad restringida. Y hallamos una fuerza perpendicular a la velocidad de la partícula cargada también surge en el movimiento perpendicular a un hilo recorrido por una corriente. Para una corriente dada el valor de la fuerza es proporcional al producto de la carga  $q$  de la partícula y su celeridad en nuestra referencia. Podemos definir un campo  $\mathbf{B}$  por la parte dependiente de la velocidad de la fuerza que actúa sobre la carga en movimiento.

En cierto instante  $t$  una partícula de carga  $q$  pasa por el punto  $(x,y,z)$  de nuestra referencia, moviéndose con una velocidad  $v$ . En este instante la fuerza sobre la partícula es  $\mathbf{F}$ . El campo eléctrico en este instante se sabe que es  $\mathbf{E}$ . Luego el campo magnético en este instante y lugar se define como el vector que satisface la ecuación vectorial

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.3.1)$$

Por supuesto que el vector  $\mathbf{F}$  aquí solo incluye la dependencia de la carga y no por ejemplo del peso de la partícula. Dados los valores de  $\mathbf{E}$  y de  $\mathbf{B}$  en alguna región podemos predecir el valor de fuerza que experimenta otra partícula que se mueva en esta región con cualquier velocidad. (Purcell, 2001, pág. 202)

## 2.4 Ley de Biot Savart

La ley de Biot-Savart establece que en cualquier punto  $P$  la magnitud de la intensidad de campo magnético que produce el elemento diferencial es proporcional al producto de la corriente, la magnitud del diferencial de longitud y el seno del ángulo formado entre el filamento y la línea que lo conecta con el punto  $P$  en donde se busca el campo. La magnitud de la intensidad de campo magnético es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde el elemento diferencial al punto  $P$ . La dirección de la intensidad de campo magnético es normal al plano que contiene el filamento diferencial y a la línea dibujada desde el filamento hasta el punto  $P$ . De las dos normales posibles, se elige aquella que está en la dirección de avance de un tornillo derecho girado desde  $dL$  a través del ángulo más pequeño que forma con la línea desde el filamento hasta  $P$ .

Utilizando unidades internacionales racionalizadas la constante de proporcionalidad es  $1/4\pi\epsilon_0$ . La ley de Biot-Savart descrita anteriormente, puede escribirse en forma concisa con notación vectorial como,

$$d\mathbf{H} = \frac{Id\mathbf{L} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} = \frac{Id\mathbf{L} \times \mathbf{R}}{4\pi R^2} \quad (2.4.1)$$

Las unidades de la intensidad de campo magnético  $\mathbf{H}$  son, evidentemente, amperes por metro (A/m). (Hayt & A.Buck, 2006, pág. 211)<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> TEORIA ELECTROMAGNETICA, HAYT , 7 Edición, p.211

## 2.5 Densidad De Flujo Magnético

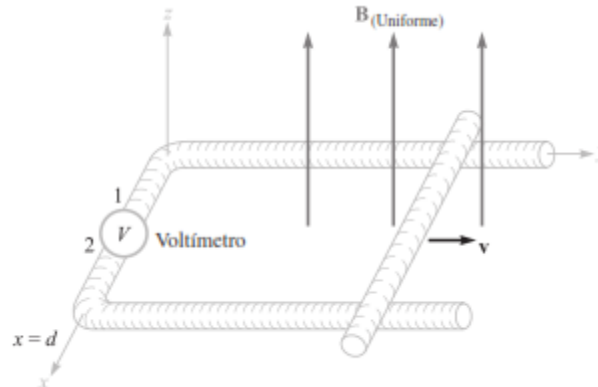


Fig 2.5.1. Un ejemplo ilustrativo de la aplicación de la ley de Faraday en el caso de una densidad de flujo magnético constante y una trayectoria variable. La barra transversal se mueve a la derecha con una velocidad  $v$  y el circuito se cierra a través de los dos rieles y un voltímetro muy pequeño con una alta resistencia interna. La lectura del voltímetro es

$V_{12} = -Bvd$  fuente: *Electricidad y magnetismo*, Segunda Edición, Volumen 2, Edward M Purcell.

Denominada como  $\mathbf{B}$ , la densidad de flujo magnético, se define como el flujo magnético por unidad de área en una sección perpendicular a la dirección del flujo magnético, e igual a la intensidad del campo magnético. ; En el Sistema Internacional de Unidades se define como unidad de la densidad de flujo magnético el Tesla.

El flujo magnético (representado por la letra griega  $\Phi$ ) y a su vez se representa por medio de las líneas de fuerza magnética. La unidad del flujo magnético se designa como *maxwell* y corresponde a una sola línea de fuerza magnética. En el sistema internacional

de unidades se utiliza una unidad con una magnitud mayor denominada *webber/cm<sup>2</sup>* el cual es equivalente a 10.000 gauss (1gauss=1maxwell/cm<sup>2</sup>).

## 2.6 Ecuación de Maxwell para campos electromagnéticos estáticos

La carga Q es la fuente de las líneas de flujo eléctrico y esas líneas comienzan y terminan en cargas positivas y negativas, respectivamente. Ninguna fuente así ha sido descubierta para las líneas de flujo magnético. Tomando en cuenta un filamento recto infinitamente largo que transporta una corriente *I*, el campo **H** forma círculos concéntricos alrededor del filamento. Dado que **B** = μ**H**, el campo **B** es de la misma forma. Las líneas de flujo magnético son cerradas y no terminan en una “carga magnética”. Por esta razón la ley de Gauss para el campo magnético es

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2.6.1)$$

Y la aplicación del teorema de divergencia muestra que:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.6.2)$$

No se ha probado la ecuación (2.6.1) o la ecuación (2.6.2), tan sólo se sugirió la veracidad de estas afirmaciones al considerar un único caso individual, el del campo de un filamento infinito. Es posible mostrar que la ecuación (2.6.1) o la ecuación (2.6.2) se obtienen de la ley de Biot-Savart y de la definición de **B**, **B** = μ**H**. La ecuación (2.6.1) es la última de las cuatro ecuaciones de Maxwell cuando se aplican a campos eléctricos

estáticos y a campos magnéticos estables. Entonces, al reunir estas ecuaciones para los campos eléctricos estáticos y campos magnéticos estables se tiene

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{\text{ext}}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mathbf{0}$$

A estas ecuaciones se les puede añadir la expresión que relaciona a  $\mathbf{B}$  con  $\mathbf{H}$  en el espacio libre.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (2.6.3)$$

(Hayt & A.Buck, 2006, pág. 238)

## 2.7 Potenciales magnéticos escalares y vectoriales

Suponiendo la existencia de un potencial magnético escalar, el cual se designa como  $V_m$ , de cuyo gradiente se obtenga la intensidad de campo magnético

$$\mathbf{H} = -\nabla \cdot V_m \quad (2.7.1)$$

La selección de un gradiente negativo proporcionará una analogía más cercana al potencial eléctrico. Esta definición se ajusta a los análisis realizados en temas anteriores para el campo magnético, y por lo tanto,

$$\mathbf{H} = -\nabla \cdot V_m (J = 0) \quad (2.7.2)$$

Dado que muchos problemas magnéticos involucran geometrías en las cuales los conductores portadores de corriente ocupan una fracción relativamente pequeña del área total de interés, es evidente que un potencial magnético escalar sería útil. El potencial magnético escalar también es aplicable en el caso de imanes permanentes. Obviamente, las dimensiones de  $V_m$  son amperes.

Este potencial escalar también satisface la ecuación de Laplace. En el espacio libre,

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \mu_0 \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (2.7.3)$$

y de aquí que

$$\mu_0 \nabla \cdot (-\nabla V_m) = 0 \quad (2.7.4)$$

La razón de esta multi-valencia (comportamiento del campo en un alambre con una cobertura) puede mostrarse en comparación con el caso electrostático. En él, se sabe que:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.7.5)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = 0 \quad (2.7.6)$$

El campo vectorial es uno de los más útiles en el estudio de la radiación de antenas, de aperturas y de dispersión de radiación en líneas de transmisión, guías de ondas y hornos

de microondas. El potencial magnético vectorial se utiliza en regiones donde la densidad de corriente sea cero o no, y también se extenderá posteriormente al caso de campos variantes con el tiempo. La elección de un potencial magnético vectorial es sugerida al notar que

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.7.7)$$

Luego, teniendo en cuenta que la divergencia del rotacional de cualquier campo vectorial es cero. Por lo tanto, se selecciona

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.7.8)$$

Donde  $\mathbf{A}$  es un *potencial magnético vectorial*, y automáticamente se satisface la condición de que la densidad de flujo magnético debe tener divergencia cero. El campo  $\mathbf{H}$  es

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.7.9)$$

Y

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (2.7.10)$$

El rotacional del rotacional de un campo vectorial no es cero y está dado por una expresión bastante complicada, la cual no es necesario conocer ahora en forma general. En casos específicos para los cuales la forma de  $\mathbf{A}$  es conocida, la operación rotacional puede aplicarse dos veces para determinar la densidad de corriente. (Hayt & A.Buck, 2006, pág. 243)

## Capítulo 3

### Generador magnético

Como se mencionó al comienzo del presente documento, el objetivo fundamental de la tesis, es el diseño y construcción de un sistema que permita la generación de campos magnéticos con ciertas características, es pertinente describir algunos aspectos técnicos que son básicos para su realización, los cuales con el acompañamiento de una conceptualización dan sustento al trabajo realizado y ejecutado en este texto.

#### 3.2 Par torsión momento magnético

El momento magnético de un imán es una cantidad que determina la fuerza que el imán puede ejercer sobre corrientes eléctricas y el par que un campo magnético va a ejercer en él. Un bucle de corriente eléctrica, un imán de barra, un electrón, una molécula, y un planeta tienen momentos magnéticos.

Tanto el momento magnético y el campo magnético pueden ser considerados como vectores que tienen una magnitud y dirección. La dirección de los polos de momento magnético del sur al polo norte de un imán. El campo magnético producido por un imán es proporcional a su momento magnético así. Más precisamente, el momento magnético se refiere normalmente al momento dipolar magnético de un sistema, que produce el primer término en el desarrollo multipolar de un campo magnético en general. El

componente de dipolo del campo magnético de un objeto es simétrico alrededor de la dirección de su momento dipolar magnético, y disminuye a medida que el cubo inverso de la distancia del objeto.

El momento magnético de una espira o  $\vec{\mu}$  que es independiente del campo magnético y que sólo tiene en cuenta las características del conductor (intensidad de corriente y área). El vector área  $\vec{A}$  tiene de módulo el área de la espira, dirección perpendicular al plano que la contiene y sentido el que da la regla de la mano derecha según el sentido de la corriente eléctrica:

$$\vec{\mu} = I\vec{A} \quad (3.2.1)$$

Donde sus unidades son amperio por metro al cuadrado ( $\text{Am}^2$ )

Tomando en cuenta el torque su ecuación general estará dada por

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (3.2.2)$$

El momento de las fuerzas, y por tanto, la aceleración angular dependerán del ángulo  $\theta$  entre  $\vec{\mu}$  y  $\vec{B}$ ; si la espira está colocada con su momento paralelo al campo, es decir, el plano de la espira es perpendicular al campo, el momento de las fuerzas es nulo y por tanto la espira no sufre ninguna rotación.

El concepto de torque de fuerza se aplica sobre una espira inmersa en un campo magnético donde este es el producto vectorial entre la fuerza y el brazo del momento aplicados sobre la misma.

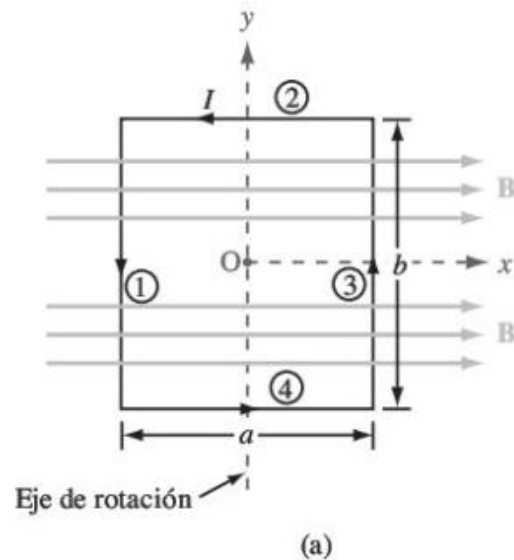


Fig 3.2.1 Espira en un campo magnético. fuente :fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo, Quinta edición p.211

De esta figura, en a) se puede notar que hay dos lados que son paralelos al campo magnético (1 y 3), por lo que el ángulo es cero entre la fuerza  $F$  (que va en dirección del campo  $B$ ) y el brazo considerado ( $b$ ), por tanto, sobre esos lados no se ejerce fuerza alguna.

En los lados perpendiculares al campo (2 y 4) si hay fuerza, la cual se puede determinar con la ecuación básica:

$$F = IL \times B \quad (3.2.3)$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene que el torque es:

$$T = blaB \cdot \text{sen}\theta \quad (3.2.4)$$

Teniendo que  $b \cdot a$  es el área ( $A$ ) de la espira, esta expresión se puede reescribir, así:

$$T = BIA \cdot \text{sen}\theta \quad (3.2.5)$$

De la cual  $M = A$ , es el momento magnético bipolar (en  $A \cdot m^2$ ) de la espira, cuya dirección se determina con la regla de la mano derecha, donde los dedos se orientan en la dirección de la corriente.

En forma resumida, el torque se puede expresar como:

$$T = m \times B \quad (3.2.6)$$

Esta expresión es aplicable en general a la determinación del torque sobre una espira plana de cualquier forma, la única limitante es que el campo debe ser uniforme. (Ullaby, 2007, pág. 212)

### 3.3 El dipolo magnético, espiras y solenoides

Una espira se define como un conductor cerrado plano. Para un elemento  $I d\vec{l}$  de una espira de corriente de radio  $R$  y el vector unitario  $\hat{r}$  dirigido desde el elemento al

centro de la espira. El campo magnético en el centro de la espira a este elemento está dirigido al o largo del eje de la misma y su módulo está dado por:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \cdot \text{sen}\theta}{R^2} \quad (3.3.1)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo que forman  $d\vec{l}$  y  $\hat{r}$  que vale  $90^\circ$  para cada elemento de corriente, de modo que  $\text{sen}\theta = 1$ . El campo magnético debido a la corriente total se obtiene integrando para todos los elementos de corriente de la espira. Como  $R$  es constante para todos los elementos, se obtiene:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \oint dl \quad (3.3.2)$$

La integral de  $dl$  alrededor de la espira completa es la longitud total  $2\pi R$  o circunferencia de la espira. El campo magnético causado por la espira completa es, por lo tanto,

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (3.3.3)$$

Ahora definimos el campo en un solenoide. “Un solenoide es un conductor enrollado en forma de hélice con espiras muy próximas entre sí. El solenoide se utiliza para generar un

campo intenso y uniforme en la región rodeada por sus espiras. El campo en un solenoide es esencialmente el de una serie de  $N$  espiras idénticas situadas unas junto a otras.

Si  $L$  es la longitud del solenoide y se asume que la corriente  $I$  es la misma para todas las espiras, la corriente del sistema de espiras será simplemente el producto del número de espiras por dicha corriente  $NI$ . La fracción elemental del solenoide puede ser escrita como:  $(NI/L) dx$ , expresión que permite el cálculo a lo largo de la variable  $x$ . (Tipler & Mosca, 2010, pág. 934)

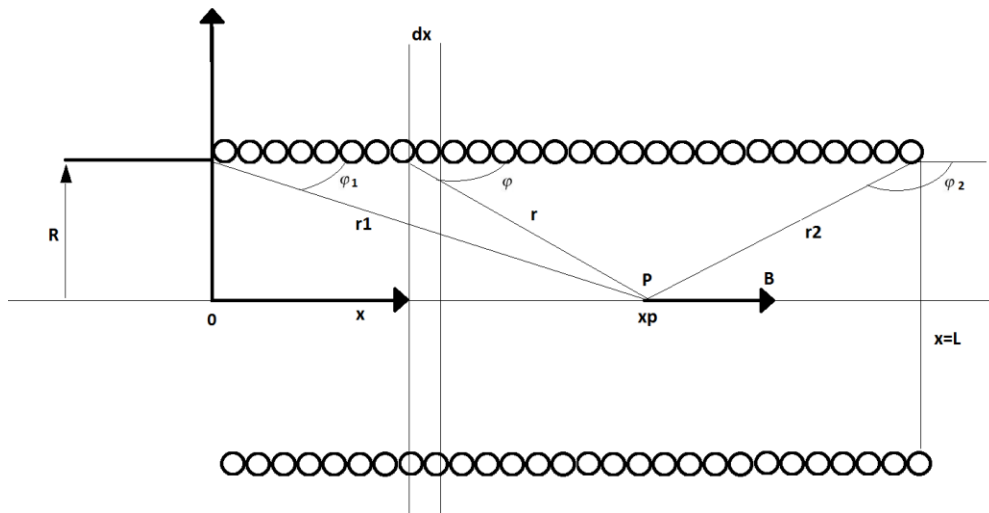


Figura 3.3.1. Campo magnético producido por una corriente eléctrica que circula a través de un solenoide. Fuente: los autores

De la primera ley de Laplace-Ampere:

$$H = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dc \cdot \text{sen}\theta}{r^2} \quad (3.3.4)$$

y con la proyección del campo a través del eje paralelo se obtiene :

$$H = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dc \cdot \text{sen}\theta}{r^2} \cdot \text{sen}\varphi \quad (3.3.5)$$

Si se multiplica por la fracción del solenoide obtendremos en elemento de corriente a través de las espiras:

$$d^2 H = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dc \cdot \text{sen}\theta}{r^2} \cdot \text{sen}\varphi \cdot \frac{N \cdot dx}{L} \quad (3.3.6)$$

De la integración para todo el solenoide se obtiene:

$$H = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{x=0}^{x=L} \int_c \frac{I \cdot dc \cdot \text{sen}\theta}{r^2} \cdot \text{sen}\varphi \cdot \frac{N \cdot dx}{L} \quad (3.3.7)$$

$$H = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot 2\pi R}{r^2} \cdot \text{sen}\varphi \cdot \frac{N \cdot dx}{L} \quad (3.3.8)$$

lo que permite derivar intensidad del campo total :

$$d^2 H = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{NI}{L} \cdot \int_0^L \frac{\text{sen}\varphi dx}{r^2} \quad (3.3.9)$$

Luego de esto se unifican las variables dentro de la integral teniendo en cuenta que

$$\operatorname{sen} \varphi = \frac{R}{r} \cdot r^2 = \frac{R^2}{\operatorname{sen}^2 \varphi} \quad (3.3.10)$$

$$xp - x = \frac{R}{\tan \varphi} = R \cdot \cot \varphi \quad (3.3.11)$$

Teniendo en cuenta lo anterior y derivando

$$dx = -R \cdot \operatorname{cosec}^2 \varphi \cdot d\varphi \Rightarrow dx = -\frac{R \cdot d\varphi}{\operatorname{sen}^2 \varphi} \quad (3.3.12)$$

Ahora que unificamos los valores hallamos los ángulos para  $x=0$  y para  $x=L$  para tener todo el solenoide y luego reemplazamos en la ecuación:

$$H = -\frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{NI}{L} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \operatorname{sen} \varphi d\varphi \quad (3.3.13)$$

Solucionando:

$$H = -\frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{NI}{L} \cdot (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) \quad (3.3.14)$$

Ahora de la figura 2.3.1 se halla la relación de los ángulos con las dimensiones del solenoide lo cual se halla por geometría teniendo,

$$\cos \varphi_1 = \frac{0 - xp}{\sqrt{R^2 + xp^2}} \quad \cos \varphi_2 = \frac{L - xp}{\sqrt{R^2 + (L - xp)^2}} \quad (3.3.15)$$

Reemplazando:

$$H = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{NI}{L} \cdot \frac{L - xp}{\sqrt{R^2 + (L - xp)^2}} - \frac{0 - xp}{\sqrt{R^2 + (L - xp)^2}} \quad (3.3.16)$$

Así se obtiene el campo para cualquier punto en el eje del solenoide tanto dentro como fuera del mismo.

### Dipolo Magnético

Una Espira por la que circula corriente con dimensiones mucho más pequeñas que la distancia entre la espira y el punto de observación se llama dipolo magnético. Esto es porque el patrón de su campo magnético es similar al de un imán permanente y al campo eléctrico.

### 3.4 Magnetización de los materiales

De acuerdo con el modelo atómico elemental de la materia, todos los materiales están compuestos por átomos cada uno de estos con un núcleo cargado positivamente y varios electrones de carga negativa en órbita alrededor. Los electrones orbitantes generan corrientes circulantes y forman dipolos magnéticos microscópicos. Así mismo tanto los electrones como el núcleo del átomo rotan sobre sus ejes con ciertos momentos dipolares magnéticos. El momento dipolar magnético de un núcleo giratorio por lo general es despreciable en comparación con el de un electrón orbitante o giratorio, debido a la masa mucho mayor y a la menor velocidad angular del núcleo.

En ausencia de un campo magnético externo, los dipolos magnéticos de los átomos de la mayoría de los materiales (excepto los imanes permanentes) tienen orientaciones aleatorias de manera que no hay momento magnético neto. La aplicación de un campo magnético externo ocasiona tanto la alineación de los momentos magnéticos de los electrones giratorios como un momento magnético inducido que se debe a un cambio en el movimiento orbital de los electrones.

Para obtener una fórmula que nos permita determinar el cambio cuantitativo en la densidad de flujo magnético ocasionado por la presencia de un material magnético, sea  $m_k$  el momento dipolar magnético de un átomo. Si hay  $n$  átomos por unidad de volumen, se define un vector de magnetización  $\mathbf{M}$  como:

$$M = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^{n\Delta v} m_k}{\Delta v} \left( \frac{A}{m} \right) \quad (3.4.17)$$

O

$$\frac{B_i}{\mu_0} = M \quad (3.4.18)$$

Donde  $B_i$  es la densidad de flujo interno producido por la magnetización. (Halliday, Resnick, & S.Krane, 1999, pág. 242)

### 3.5 Clasificación de los materiales magnéticos y magnetización

Con los conocimientos adquiridos anteriormente se está en posición de combinar el conocimiento de la acción de un campo magnético sobre la corriente de un circuito cerrado con un modelo sencillo de un átomo y vislumbrar la diferencia en comportamiento de varios tipos de materiales en campos magnéticos.

Aunque resultados cuantitativos exactos sólo se predicen mediante la teoría cuántica, el modelo atómico sencillo, que supone la presencia de un núcleo central positivo rodeado por electrones en varias órbitas circulares, produce resultados cuantitativos razonables y proporciona una teoría cualitativa satisfactoria.

Un electrón en una órbita es análogo al pequeño lazo de corriente (en el cual la corriente se dirige en dirección opuesta a la dirección de viaje del electrón), y como tal experimenta un par en un campo magnético externo. El par tiende a alinear el campo magnético que produce el electrón orbital con el campo magnético externo.

Si no hubiese otros momentos magnéticos se concluiría que todos los electrones orbitales en el material cambiarían de tal manera que sumarían su campo magnético al campo aplicado, y entonces el campo magnético resultante en cualquier punto del material sería mayor que el que se tendría si el material no estuviese presente. Un segundo momento, sin embargo, se atribuye al *espín del electrón*. Aunque para modelar este fenómeno resulta tentador considerar al electrón como girando alrededor de su propio eje y generando así un momento dipolar magnético, al hacerlo no se obtienen resultados cuantitativos satisfactorios de la teoría. En su lugar, es necesario digerir las matemáticas de la teoría cuántica relativista para demostrar que un electrón puede tener un momento de espín magnético cercano a  $\pm 9 \times 10^{-24} \text{A} \cdot \text{m}^2$ ; los signos más y menos indican que el alineamiento puede ser ayudando u oponiéndose al campo magnético externo. En un átomo, con muchos electrones presentes, sólo los espines de los electrones pertenecientes a capas no completamente llenas contribuirán al momento magnético del átomo. Una tercera contribución al momento de un átomo la causa el *espín nuclear*. Aunque este factor proporciona un efecto despreciable sobre el total de las propiedades magnéticas de los materiales, constituye la base del procedimiento de imágenes por resonancia magnética nuclear, servicio que proporcionan ahora algunos de los mayores hospitales. En resumen, cada átomo contiene muchas componentes diferentes de momento y su combinación determina las características magnéticas del material y suministra su clasificación magnética general. Se describirán en forma breve seis tipos diferentes de

materiales: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, anti ferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos.

Considerando primero aquellos átomos en los cuales los campos magnéticos pequeños que genera el movimiento de los electrones en sus órbitas y aquellos que produce el espín del electrón se combinan para producir un campo magnético neto cero. Nótese que se están considerando aquí los campos que produce el movimiento del electrón en sí mismo en ausencia de cualquier campo magnético externo; también se puede describir este material como uno en el cual el momento magnético permanente  $\mathbf{m}$  de cada átomo es cero. Tal material es llamado *diamagnético*. Parecería, entonces, que un campo magnético externo no produciría par sobre el átomo, ni el realineamiento de los campos dipolares y consecuentemente el campo magnético interno sería el mismo que el campo aplicado. Con un error de sólo una parte en cien mil, esto es correcto.

Seleccionando un electrón orbital cuyo momento  $\mathbf{m}$  está en la misma dirección que el campo aplicado  $\mathbf{B}$ . El campo magnético produce una fuerza hacia afuera sobre el electrón orbital. Puesto que el radio orbital está cuantificado y no se puede cambiar, la fuerza (de Coulomb) interior de atracción tampoco cambia. La fuerza desbalanceada producto de la fuerza magnética externa se debe, por lo tanto, compensar por una reducción de la velocidad orbital. Por lo tanto, el momento orbital decrece, lo que implica un campo interno menor.

Si se hubiera seleccionado un átomo para el cual  $\mathbf{m}$  y  $\mathbf{B}$  fueran opuestos, la fuerza magnética sería hacia adentro, la velocidad se iría incrementando, el momento orbital también se iría incrementando y una apreciable cancelación de  $\mathbf{B}$  ocurriría. De nuevo resultaría un campo magnético interno más pequeño. El bismuto metálico muestra un efecto diamagnético mayor que muchos otros materiales del mismo tipo, entre los cuales están el hidrógeno, helio y otros gases “inertes”, cloruro de sodio, cobre, oro, silicio, germanio, grafito y azufre. También se puede notar que el efecto diamagnético está presente en todos los materiales, puesto que proviene de una interacción del campo magnético externo con cada electrón orbital; sin embargo, lo enmascaran otros efectos en los materiales que se considerarán a continuación. Se estudiará ahora un átomo en el cual los efectos del espín del electrón y del movimiento orbital no se cancelan completamente. El átomo como un todo tiene un pequeño momento magnético, y debido a la orientación al azar de los átomos en una muestra grande produce un momento magnético *promedio* de cero. El material no muestra efectos magnéticos en ausencia de un campo exterior. Sin embargo, cuando se aplica un campo externo, existe un pequeño par en cada momento atómico, y estos momentos tienden a alinearse con el campo magnético externo. Este alineamiento conduce a un aumento del valor de  $\mathbf{B}$  dentro del material sobre el valor externo. Sin embargo, el efecto diamagnético sigue actuando sobre los electrones orbitantes y puede contrarrestar el incremento antes dicho. Si el resultado neto es una disminución en  $\mathbf{B}$ , el material sigue llamándose diamagnético. Sin embargo, si hay un incremento en  $\mathbf{B}$ , el material se denomina *paramagnético*. Entre las sustancias

paramagnéticas están las siguientes: potasio, oxígeno, tungsteno, tierras raras y muchas de sus sales, como cloruro de erbio, óxido de neodimio y óxido de itrio, uno de los materiales más usados en los máseres.

Las cuatro clases restantes de materiales, ferromagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos y superparamagnéticos, tienen intensos momentos atómicos. Además, la interacción de átomos adyacentes causa un alineamiento de los momentos magnéticos de los átomos, en ocasiones sumándose y en otras restándose exactamente. En los materiales *ferromagnéticos* cada átomo tiene un momento dipolar relativamente grande, causado sobre todo por los momentos de espín del electrón no equilibrados. Las fuerzas interatómicas causan que estos momentos se alineen en forma paralela por regiones que contienen un gran número de átomos. Estas regiones, llamadas *dominios*, pueden tener una variedad de formas y tamaños que fluctúan desde un micrómetro a varios centímetros, según el tamaño, la forma, el material y la historia magnética de la muestra. Materiales vírgenes ferromagnéticos tendrán dominios en que cada uno tiene un momento magnético intenso; los momentos de los dominios, sin embargo, varían en dirección, de dominio a dominio. El efecto completo es, por consiguiente, de cancelación, y el material como un todo no tiene momento magnético. Con la aplicación de un campo magnético externo, sin embargo, aquellos dominios, que tienen momentos en dirección del campo aplicado, aumentan su tamaño a expensas de sus vecinos; el campo magnético interno aumenta en forma considerable por encima del campo magnético externo. En general, cuando se retira el campo externo no se produce un alineamiento azaroso de

dominios, y un residuo, o remanente de campo dipolar, permanece en la estructura macroscópica. El hecho de que el momento magnético del material sea diferente después de que el campo se ha retirado, o que el estado magnético sea función de su historia magnética, se llama *histéresis*.

Los materiales ferromagnéticos no son isotrópicos en mono cristales y, por lo tanto, se limitará el estudio a materiales poli cristalinos, excepto para mencionar que una de las características de los materiales magnéticos anisotrópicos es la magneto estricción o el cambio en dimensiones del cristal cuando se le aplica un campo magnético.

Los únicos elementos ferromagnéticos a la temperatura ambiente son hierro, níquel y cobalto, y pierden todas sus características ferromagnéticas arriba de una temperatura llamada de Curie, la cual es 1043 K (770°C) para el hierro. Algunas aleaciones entre éstos y otros metales también son ferromagnéticas; por ejemplo, alnico, una aleación de aluminio níquel-cobalto con una pequeña cantidad de cobre. A bajas temperaturas, algunas tierras raras, como el gadolinio y el disprosio, son ferromagnéticas. También es interesante que algunas aleaciones de metales no ferromagnéticos son ferromagnéticas, como bismuto-manganeso y cobre-manganeso-estaño. En los materiales *antiferromagnéticos* las fuerzas entre átomos adyacentes provocan que los momentos atómicos magnéticos se alineen de manera antiparalela. El momento magnético es cero, y a los materiales antiferromagnéticos los afecta sólo levemente la presencia de un campo magnético externo.

El antiferromagnetismo sólo se presenta a temperaturas relativamente bajas, y a menudo muy por debajo de la temperatura ambiente. Las sustancias *ferrimagnéticas* también muestran un alineamiento antiparalelo de momentos atómicos adyacentes, pero los momentos no son iguales. Por lo tanto, se origina una respuesta grande al campo magnético externo, aunque no tan grande como en materiales ferromagnéticos. El grupo más importante de materiales ferrimagnéticos es el de las *ferritas*, en las cuales la conductividad es baja, varios órdenes de magnitud menores que la de los semiconductores. El hecho de que estas sustancias tengan una resistencia mayor que los materiales ferromagnéticos genera corrientes inducidas mucho menores en el material cuando se aplican campos alternantes, como en el caso de núcleos de transformadores que operan a altas frecuencias. Las corrientes inducidas (corrientes de Eddy) conducen a bajas pérdidas óhmicas en el núcleo del transformador. La magnetita de óxido de hierro ( $Fe_2$ ), la ferrita de níquel-zinc ( $Ni_{1/2}Zn_{1/2}Fe_2O_4$ ) y la ferrita de níquel ( $NiFe_2O$ ), son ejemplos de esta clase de materiales. El ferromagnetismo también desaparece a temperaturas mayores que la temperatura de Curie. Los materiales *superparamagnéticos* se componen de un montaje de partículas ferromagnéticas en una matriz no ferromagnética. Aunque existen dominios dentro de las partículas individuales, las paredes de dominio no pueden penetrar el material matriz intermedio a la partícula adyacente. Un ejemplo importante es la cinta magnética que se emplea en grabaciones de audio o video. (Hayt & A.Buck, 2006, pág. 273)

### 3.6 Ferromagnetismo

El ferromagnetismo se presenta en el hierro puro, cobalto y níquel y en aleaciones de estos metales entre sí. También tiene lugar en el galonio, disprosio y en unos pocos compuestos. El ferromagnetismo se debe a una interacción intensa entre los electrones de una banda parcialmente llena del metal o entre electrones localizados que forman momentos magnéticos en moléculas o átomos vecinos.

Esta interacción llamada interacción de intercambio (o canje) disminuye la energía de un par de electrones con espines paralelos. Los materiales ferromagnéticos valores positivos muy grandes de susceptibilidad magnética  $\chi_m$ . En estas sustancias un campo magnético externo pequeño puede producir un grado muy alto de alineación de los momentos dipolares magnéticos atómicos que, en algunos casos, puede persistir incluso aunque no exista campo imanante externo. Esto es así debido a que los momentos dipolares magnéticos de los átomos de estas sustancias ejercen fuerzas intensas sobre sus vecinos, de modo que en una pequeña región del espacio los momentos están alineados unos con otros aun cuando no existe un campo externo. Esta pequeña región se llama dominio magnético. El tamaño de un dominio es normalmente microscópico. Dentro del dominio, todos los momentos magnéticos están alineados, pero la dirección de alineación varía de un dominio a otro de modo que el momento magnético neto de un trozo macroscópico de material es cero en su estado normal. La mecánica cuántica predice la existencia de fuerzas dipolares en estas sustancias que no pueden ser explicadas mediante la física clásica. A temperaturas por encima de una temperatura crítica, denominada temperatura

de curie, la agitación térmica es suficiente para destruir esta alineación y los materiales ferromagnéticos se transforman en paramagnéticos.

Cuando se aplica un campo magnético externo, los límites de los dominios se desplazan y, al mismo tiempo, la dirección de alineación dentro de un dominio puede variar de modo que exista un momento magnético neto en dirección del campo aplicado. Puesto que el grado de alineación es grande incluso en el caso de un campo externo pequeño, el campo magnético producido en el material por los dipolos suele ser mucho mayor que el campo externo.

Considerando la imanación de una barra larga de hierro en el interior de un solenoide en el que se aumenta gradualmente la corriente que circula por los arrollamientos del solenoide. Se asume que la barra y el solenoide son suficientemente grandes como para poder despreciar los efectos de los extremos. Como los momentos magnéticos inducidos están en el mismo sentido que el campo aplicado,  $\vec{B}_{app}$  y  $\vec{M}$  tiene la misma dirección y el mismo sentido. Por lo tanto, el campo magnético en el centro de la barra es

$$B = B_{ap} + \mu_0 \cdot M = \mu_0 \cdot n \cdot I + \mu_0 \cdot M \quad (3.6.1)$$

Donde

$$B \cdot a \cdot p = H$$

En los materiales ferromagnéticos, el campo magnético  $\mu_0 M$  debido a los momentos magnéticos es con frecuencia superior al campo aplicado en un factor de varios miles.

Los materiales debido a sus ciclos de histéresis se dividen en materiales duros los cuales no se desmagnetizan fácilmente y se utilizan como imanes permanentes y los blandos que tiene un ciclo de histéresis corto y permiten una des magnetización y recuperación cercana a su estado inicial. (Tipler & Mosca, 2010, pág. 937)

### 3.7 Circuitos magnéticos

El nombre proviene de la gran similitud con el análisis de circuitos resistivos de cd (corriente directa). La única diferencia importante es la naturaleza no lineal de las porciones ferromagnéticas del circuito magnético; Los métodos que se deben adoptar son similares a aquellos que se requieren en circuitos eléctricos no lineales que contienen diodos, termistores, filamentos incandescentes y otros elementos no lineales.

Se identificarán aquellas ecuaciones de campo en las que se basa el análisis de circuitos resistivos. Al mismo tiempo se indicarán o derivarán las ecuaciones análogas para el circuito magnético. Se empezará con el potencial electrostático y su relación con la intensidad de campo eléctrico

$$E = -\nabla V \quad (3.7.1)$$

El potencial magnético escalar, y su relación análoga con la intensidad de campo magnético es

$$H = -\nabla V_m \quad (3.7.2)$$

Cuando se habla de circuitos es conveniente llamar a  $V$  la *fuerza magneto motriz*, o fmm, y se debe reconocer la analogía con la fuerza electromotriz o fem. Las unidades de la fmm (fuerza magneto motriz) son, desde luego, amperes, pero para reconocer que se emplean con mucha frecuencia las bobinas con muchas vueltas, se utiliza el término “ampere-vueltas”. Se debe tener en cuenta que no puede fluir ninguna corriente en ninguna región en la que  $V_{mm}$  esté definido. La diferencia de potencial eléctrico entre los puntos  $A$  y  $B$  (*definidos en un espacio*) puede escribirse como

$$V_{AB} = \int_B^A E \cdot dL \quad (3.7.3)$$

y la correspondiente relación entre la fmm (fuerza magneto motriz) y la intensidad de campo magnético,

$$V_{mAB} = \int_B^A H \cdot dL \quad (3.7.4)$$

Teniendo en cuenta que la trayectoria nunca debe cruzar la frontera de superficie elegida.

La ley de Ohm para circuitos eléctricos tiene la forma punto

$$J = \sigma E \quad (3.7.5)$$

y se establece que la densidad de flujo magnético será análoga a la densidad de corriente,

$$B = \mu H \quad (3.7.6)$$

Para encontrar la corriente total se requiere integrar:

$$I = \int_s J \cdot dS \quad (3.7.7)$$

Una operación correspondiente es necesaria para determinar el flujo total magnético que fluye a través de la sección transversal de un circuito magnético:

$$R = \frac{d}{\sigma S} \phi = \int_s B \cdot dS \quad (3.7.8)$$

Entonces, se define la resistencia como la relación de la diferencia de potencial y la corriente, o,

$$V = IR \quad (3.7.9)$$

ahora se define la *reluctancia* como la relación de la fuerza magneto motriz y el flujo total; Entonces

$$V_m = \phi R \quad (3.7.10)$$

donde la reluctancia se mide en ampere-vueltas por weber (A · t /Wb). En resistencias hechas de material lineal isotrópico y homogéneo de conductividad  $s$  y con sección transversal de área  $S$  y de longitud  $d$ , la resistencia total es

$$R = \frac{d}{\sigma S} \quad (3.7.11)$$

Cuando se tiene un material magnético lineal, isotrópico y homogéneo de longitud  $d$  y sección transversal uniforme  $S$ , entonces la reluctancia total es

$$\mathfrak{R} = \frac{d}{\sigma S} \quad (3.7.12)$$

El único material de este tipo para el cual se aplicará esta relación es el aire. Por último, considérese el análogo de la fuente de voltaje en un circuito eléctrico. Se sabe que la integral de línea cerrada de  $\mathbf{E}$  es cero,

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = 0 \quad (3.7.13)$$

En otras palabras, la ley de Kirchhoff de voltajes establece que la elevación de potencial a través de la fuente es exactamente igual a la caída de potencial a través de la carga. La expresión para el fenómeno magnético toma una forma ligeramente diferente,

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I_{total} \quad (3.7.14)$$

Puesto que la integral de línea cerrada no es cero. Dado que la corriente total unida por la trayectoria se obtiene, por lo general, permitiendo a una corriente  $I$  fluir a través de una bobina de  $N$  vueltas, se puede expresar el resultado como

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = NI \quad (3.7.15)$$

En un circuito eléctrico la fuente de voltaje es una parte de la trayectoria cerrada; en el circuito magnético la bobina portadora de corriente rodeará o unirá al circuito magnético. Al trazar un circuito magnético no se puede identificar un par de terminales en las cuales la fuerza magneto motriz esté aplicada. La analogía más cercana aquí consiste en un par de circuitos acoplados en los cuales existan voltajes inducidos (donde la integral de línea cerrada de  $\mathbf{E}$  es también distinta a cero). (Hayt & A.Buck, 2006, pág. 284)

### **3.8 Comportamiento de un material ferromagnético como función de una corriente eléctrica variable.**

En términos del campo, ahora se puede decir que un campo magnético que varía con el tiempo produce una fuerza electromotriz (fem (fuerza electromotriz)) capaz de producir una corriente en un circuito cerrado adecuado. Una fuerza electromotriz no es otra cosa que un voltaje procedente de los conductores que se mueven en un campo magnético o de campos magnéticos variantes. Se acostumbra expresar la ley de Faraday como,

$$fem = -\frac{d\Phi}{dt}V \quad (3.8.1)$$

La ecuación implica una trayectoria cerrada, aunque no necesariamente conductora; la trayectoria cerrada, por ejemplo, puede incluir un capacitor o ser solamente una línea imaginaria en el espacio. El flujo magnético es el flujo que cruza a través de cualquier superficie cuyo perímetro sea una trayectoria cerrada y  $\frac{d\Phi}{dt}$  es la razón de cambio de

dicho flujo con respecto al tiempo. Un valor diferente de cero de  $\frac{d\Phi}{dt}$  puede ser el resultado de cualquiera de las siguientes situaciones.

Un flujo que cambia con el tiempo circundando una trayectoria cerrada fija.

2. El movimiento relativo entre un flujo estable y una trayectoria cerrada.

3. Una combinación de las dos

El signo de menos indica que la fem (fuerza electromotriz) tiene una dirección tal que produce una corriente, cuyo flujo, si se suma al flujo original, reduciría la magnitud de la fem (fuerza electromotriz). Este enunciado que establece que el voltaje inducido actúa para producir un flujo opuesto se conoce como la ley de Lenz. Si la trayectoria cerrada es un filamento conductor enrollado de  $N$  vueltas, por lo general es suficientemente preciso considerar las vueltas como coincidentes y hacer

$$fem = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.8.2)$$

Donde  $\Phi$  se interpreta como el flujo que pasa a través de cualquiera de las  $N$  trayectorias coincidentes.

Se necesita definir la fem (Fuerza electromotriz) de acuerdo con su utilización en la ecuación y en la ecuación (3.8.2). Obviamente la fem (fuerza electromotriz) es un escalar

y un análisis dimensional muestra que se mide en volts. Se define la fem (fuerza electromotriz) como,

$$fem = \oint E \cdot dL \quad (3.8.3)$$

observamos que es el voltaje a lo largo de una trayectoria cerrada específica. Si se cambia cualquier parte de la trayectoria, la fem (fuerza electromotriz) por lo general cambia. La desviación con respecto a los resultados estáticos se observa claramente en (3.8.3), puesto que una intensidad de campo eléctrico resultado de una distribución de carga estática genera una diferencia de potencial cero a lo largo de una trayectoria cerrada. En electrostática, la integral de línea da lugar a una diferencia de potencial; con campos variantes con el tiempo, el resultado es una fem (fuerza electromotriz) o un voltaje. Al sustituir  $\Phi$  por la integral de superficie de  $B$ , se tiene

$$fem = \oint E \cdot dL = -\frac{d}{dt} \int_s B \cdot dS \quad (3.8.4)$$

en donde los dedos de la mano derecha indican la dirección de la trayectoria cerrada, y el pulgar, la dirección  $dS$ . Una densidad de flujo  $B$  en la dirección de  $dS$  que aumenta con el tiempo produce un valor promedio de  $E$  que es opuesto a la dirección positiva en que se recorre la trayectoria cerrada. La relación de mano derecha entre la integral de superficie y la integral de línea cerrada en (3.8.4) siempre debe tenerse en mente durante las integraciones de flujo y la determinación de la fem (fuerza electromotriz). La investigación se dividirá en dos partes, primero se encontrará la contribución total que

hace a la fem (fuerza electromotriz) un campo variable dentro de una trayectoria estacionaria (fem (fuerza electromotriz) de transformador), y después se considerará una trayectoria en movimiento dentro de un campo constante (fem (fuerza electromotriz) de generador). Considerando primero una trayectoria estacionaria. El flujo magnético es la única cantidad que varía con el tiempo en el lado derecho de (3.8.4), y la derivada parcial puede introducirse dentro de la integral,

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{S} = - \int_S \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.8.5)$$

Antes de aplicar este sencillo resultado a un ejemplo, se obtendrá la forma puntual de esta ecuación integral. Aplicando el teorema de Stokes a la integral de línea cerrada, se tiene

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{S} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.8.6)$$

en donde las integrales de superficie pueden evaluarse sobre superficies idénticas. Las superficies son generales y pueden escogerse como diferenciales,

$$(\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{S} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.8.7)$$

y por tanto

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.8.8)$$

(Halliday, Resnick, & S.Krane, 1999)

### 3.9 Curvas de magnetización

El comportamiento de magnetización de un material ferromagnético se describe en función de su curva de magnetización  $\mathbf{B}$ -  $\mathbf{H}$ , donde  $\mathbf{H}$  es la amplitud del campo magnético y  $B$  es la amplitud de densidad de flujo magnético total  $\mathbf{B}$  presente dentro del material de acuerdo con la ecuación:

$$B = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.9.1)$$

El flujo se compone de una contribución  $\mu_0 \mathbf{H}$  del campo externo y una contribución  $\mu_0 \mathbf{M}$  del campo de magnetización inducido en el material.

Para establecer una curva de magnetización se supondrá una muestra no magnetizada de hierro de la cual se puede medir tanto  $\mathbf{H}$  como  $\mathbf{B}$ . El estado no magnetizado se denota por el punto 0 de la figura

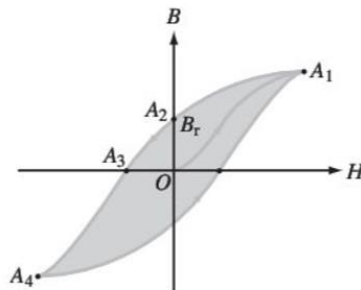


Fig 3.9.1 Típica forma de la curva de histéresis de un material ferromagnético fuente: *Electricidad y magnetismo*, Segunda Edición, Volumen 2, Edward M Purcell, pg.360

Como se ha incrementado  $\mathbf{H}$  de forma continua,  $\mathbf{B}$  también se incrementa y la respuesta sigue la curva del punto 0 al punto  $\mathbf{A}_1$ , donde casi todos los dominios se han alineado con  $\mathbf{H}$ . El punto  $\mathbf{A}_1$  representa una condición de saturación. Si en este punto disminuye  $\mathbf{H}$  desde el punto  $\mathbf{A}_1$  hasta cero, la curva de magnetización seguirá la trayectoria del punto  $\mathbf{A}_1$  hasta  $\mathbf{A}_2$ . El campo externo  $\mathbf{H}$  es cero, pero la densidad de flujo  $\mathbf{B}$  no lo es. Este valor de  $\mathbf{B}$  se llama densidad de flujo residual representado por  $B_r$ , ahora se magnetiza el material de hierro y puede servir de imán permanente gracias al hecho que gran parte de los dominios de magnetización ha permanecido alineada. El hecho de invertir la dirección de  $\mathbf{H}$  y de incrementar su intensidad hace que  $\mathbf{B}$  disminuya de  $B_r$  en el punto  $\mathbf{A}_2$  a cero en el punto  $\mathbf{A}_3$  y si la intensidad de  $\mathbf{H}$  se incrementa aún más (manteniendo su dirección negativa), la curva de magnetización se mueve a la condición de saturación en el punto  $\mathbf{A}_4$ . Por último conforme  $\mathbf{H}$  regresa a cero y luego se incrementa de nuevo en dirección positiva la curva seguirá la trayectoria de  $\mathbf{A}_4$  a  $\mathbf{A}_1$ .

Este proceso se conoce como Histéresis tema que se tratara a continuación. (Hayt & A.Buck, 2006, pág. 286)

### 3.10 Histéresis

Teniendo en cuenta un circuito magnético de acero silicio se determina como ejemplo la curva de histéresis del material por medio de la aplicación de una fmm y una serie de datos experimentales tanto de  $\mathbf{H}$  como de  $\mathbf{B}$ .

Se empezará considerando la relación de  $\mathbf{B}$  y  $\mathbf{H}$  en tal material. Se puede suponer que se está estableciendo una curva de  $\mathbf{B}$  en función de  $\mathbf{H}$  para una muestra de material ferromagnético que está completamente desmagnetizado; ambos,  $\mathbf{B}$  y  $\mathbf{H}$ , son cero. Al comenzar a aplicar una fmm, la densidad de flujo también aumenta, pero no linealmente se expresa en la figura número 2.9.1 Después de que  $\mathbf{H}$  alcanza un valor de alrededor de  $100 \text{ A} \cdot \text{t/m}$ , la densidad de flujo aumenta más lentamente y comienza a saturarse cuando  $\mathbf{H}$  está en varios cientos de  $\text{A} \cdot \text{t/m}$ . Después de alcanzar una saturación parcial, véase ahora la figura 2.9.2, donde se continúa el experimento en el punto  $x$  reduciendo  $\mathbf{H}$ . Los efectos de la histéresis comienzan a mostrarse y no se puede trazar de nuevo la curva original. Aun cuando  $\mathbf{H}$  sea cero,  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_r$ , la densidad de flujo remanente. A medida que  $\mathbf{H}$  se invierte y después regresa a cero y el ciclo completo se traza varias veces, se obtiene el círculo de histéresis de la figura La fmm que se requiere para reducir la densidad de flujo a cero se identifica como  $\mathbf{H}_c$ , la “fuerza” coercitiva. Para pequeños valores máximos de  $H$  se obtienen pequeños circuitos de histéresis

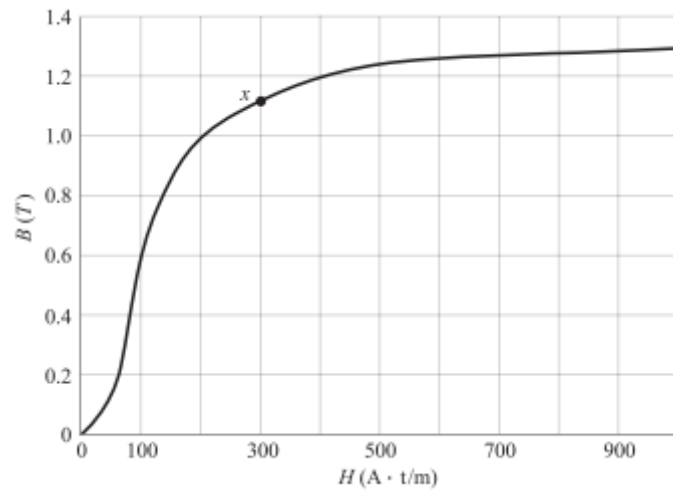


Fig.3.10.1 Curva de densidad de flujo magnético en función del campo magnético para un material ferromagnético fuente: Teoría electromagnética, Séptima Edición pg.287

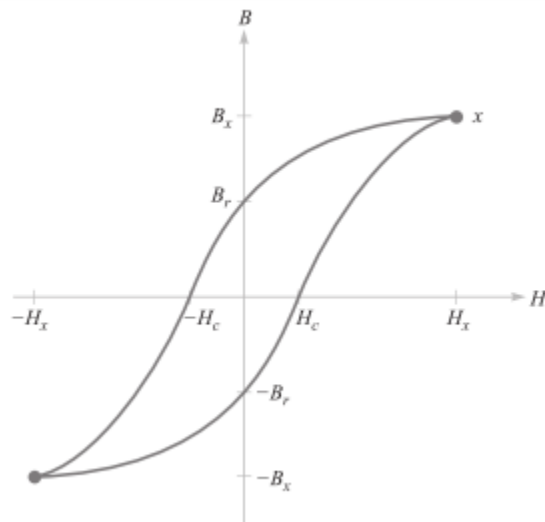


Fig.3.10.2 Típica forma de la curva de histéresis de un material ferromagnético, fuente: Teoría electromagnética, Séptima Edición pg. 288

Esta información adquirida por medio de la investigación en textos referenciados al final del trabajo así como en los apartes de esta capítulo, estos conceptos desarrollados son necesarios en el desarrollo ya que fundamentan el sistema tanto en partes a desarrollar, como la fenomenología establecida en la zona de trabajo y en la muestra que se encuentra en ella.

Teniendo en cuenta los textos anteriores podemos establecer ciertos patrones, materiales, y efectos esperados tanto de las muestras como de los elementos que se requieren para el diseño y la construcción del sistema en cuestión.

Se referenciaron en este caso los aspectos básicos teóricos dando introducción y conceptualización al proyecto desarrollado. En este proyecto el campo magnético generado de forma electromagnética y con características especiales como su uniformidad en el mismo, hacen necesario el estudio previo de los comportamientos, los cuales fueron fundamentados anteriormente, ahora el estudio anterior nos muestra las diferentes relaciones entre las variables que podemos manejar dentro del sistema y que son principales para el proyecto como lo son la intensidad eléctrica. En este punto y tomando las acotaciones y definiciones de los diferentes autores y estudios de temas a actuar en el proyecto se definen las diferentes posibilidades entre materiales y técnicas a usar en el sistema con el fin de cumplir con los objetivos del proyecto. (Hayt & A.Buck, 2006, pág. 287)

## **Capítulo 4**

### **Diseño Metodológico**

Para el respectivo diseño del sistema planteado en este proyecto, se han tenido en cuenta una serie de variables presentadas a continuación y fundamentadas teóricamente a lo largo del marco teórico que afectan al sistema, y se han considerado en cada una de las etapas que se han planteado y desarrollado con el fin de cumplir los requerimientos propuestos en los objetivos del trabajo. A continuación se presenta la metodología empleada para cada una de las etapas y los procesos tomados para llevar a cabo su desarrollo.

#### **Variables**

Variables directas:

Corriente eléctrica, voltaje, resistencia, inductancia, densidad de flujo magnético.

Variables indirectas:

Campo magnético, volumen del área de muestreo, frecuencia, constante de permeabilidad magnética.

Variables independientes:

Resistencia, inductancia, constante de permeabilidad magnética.

Variables dependientes:

Voltaje, corriente eléctrica, densidad de flujo magnético, campo magnético.

## 4.2 Desarrollo del sistema

El sistema propuesto está conformado por las siguientes etapas:

Etapas de hardware:

- 1- Generador de campo magnético bilateral simétrico.
- 2- Control del generador de campo magnético b/s.
- 3- Telemetría y control Wireless del sistema.
- 4- Alimentación del sistema.
- 5- Etapa mecánica (orientación de Las bobinas).

Software:

- Assembler.
- Visual C#.
- SQL Server 2008 Express.

Estas herramientas y Etapas de la totalidad del sistema son tomadas en cuenta como base debido al estudio del funcionamiento al tener un elemento que produce un campo magnético de un valor específico o un rango en especial se hace necesaria la manipulación de las variables mencionadas anteriormente, en específico las directas que atañen a los módulos principales para este fin.

Se utilizaron materiales ferromagnéticos de alta permeabilidad magnética ya que estos permiten una respuesta óptima a la acción de las corrientes eléctricas y al flujo magnético con lo cual se facilita la generación de los campos.

La necesidad de incluir un campo uniforme hace necesario el análisis de los diferentes modelos de toroides y bobinas con y sin núcleo como se evidencio en el marco teórico y de esta forma se realizaran las pruebas que se presentaran a continuación así como su análisis respectivo.

Teniendo en cuenta que los campos deben poseer a su vez un valor alto compensando las características de los materiales usados se aclara el uso de fuentes de voltaje y corriente reguladas tanto para la alimentación de la etapa de control como de la etapa de potencia, que deben estar separadas debido a las altas corrientes y a las corrientes parasitas que se generan en las diferentes partes de inducción electromagnética.

De esta forma se abordaran los temas mencionados al inicio de este capítulo en su orden respectivo profundizando en el funcionamiento de los mismos.

#### **4.2.1 Generador de campo magnético bilateral simétrico**

Compuesto por:

Dos bobinas cilíndricas con núcleo ferromagnético. Dichas bobinas fueron diseñadas con base a las ecuaciones de campo magnético. Para conocer el campo magnético presente entre dos bobinas, se parte de una única espira de radio  $R$ ; es decir:

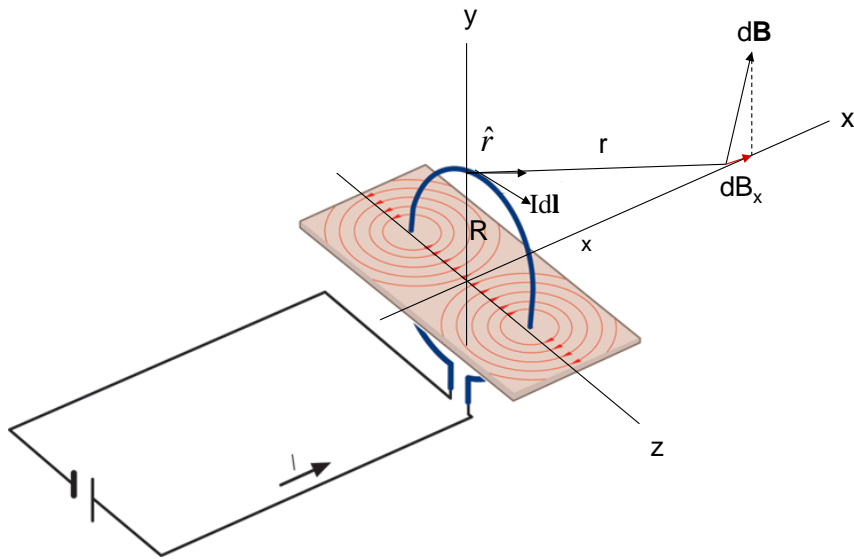


Figura. 4.2.1.1. Geometría para la determinación de la densidad del flujo magnético debido a una espira de corriente. Fuente: Autores

La ley de Biot & Savart,  $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$  aplicada a la figura, y teniendo en cuenta que  $\theta$

es el ángulo entre  $d\vec{B}$  y  $dB_x$  y que  $\theta$  es el que forma  $r$  con el eje  $x$ , conduce a que:

$$dB_x = dB \cos \theta = dB \cos(90 - \varphi) = \text{sen} \varphi = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{r^2} \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 I R dl}{4\pi (x^2 + R^2)^{3/2}}, \text{ de modo que al}$$

integrar a lo largo del perímetro de la espira se obtiene:

$$B_x = \frac{\mu_0 I R^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}} \quad (4.2.1.1)$$

Si a continuación se considera el sistema de dos espiras idénticas separadas una cierta distancia  $d$ , entonces se obtiene el resultado siguiente (Figura.4.2.1.2):

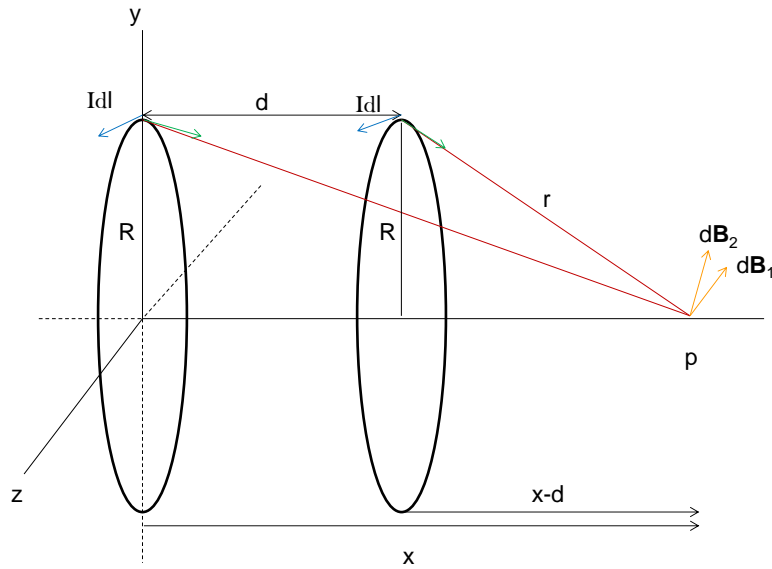


Figura.4.2.1.2 Modelo de dos espiras idénticas. Fuente: Los Autores

Y por consiguiente, siguiendo un procedimiento semejante al anterior, figura 4.2.1.1, y ecuación 4.2.1.1, se llega a que la densidad de flujo magnético en el centro de las espiras está dado por:

$$B_x = \frac{\mu_0 IR^2}{2(x^2 + R_2)^{3/2}} + \frac{\mu_0 IR^2}{2((x-d)^2 + R_2)^{3/2}} \quad (4.2.1.2)$$

Si ahora se considera  $N$  espiras en cada caso, se obtiene una relación que permite predecir la densidad de flujo magnético axial del sistema:

$$B_x = \frac{\mu_0 INR^2}{2(x^2 + R_2)^{3/2}} + \frac{\mu_0 INR^2}{2((x-d)^2 + R_2)^{3/2}} \quad (4.2.1.3)$$

El resultado que se debe obtener para cumplir con el diseño propuesto se obtiene de la siguiente ecuación:

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{L} \quad (4.2.1.4)$$

$$1200 = \frac{\mu * N * 4.5}{0.1}$$

$$N = 2346$$

Dicho resultado se divide en dos que será correspondiente al número de vueltas que debe tener cada bobina que es de 1173 para cada una.

#### 4.2.2 Control del generador de campo magnético bilateral simétrico

El mismo se representa en el siguiente diagrama de bloques:

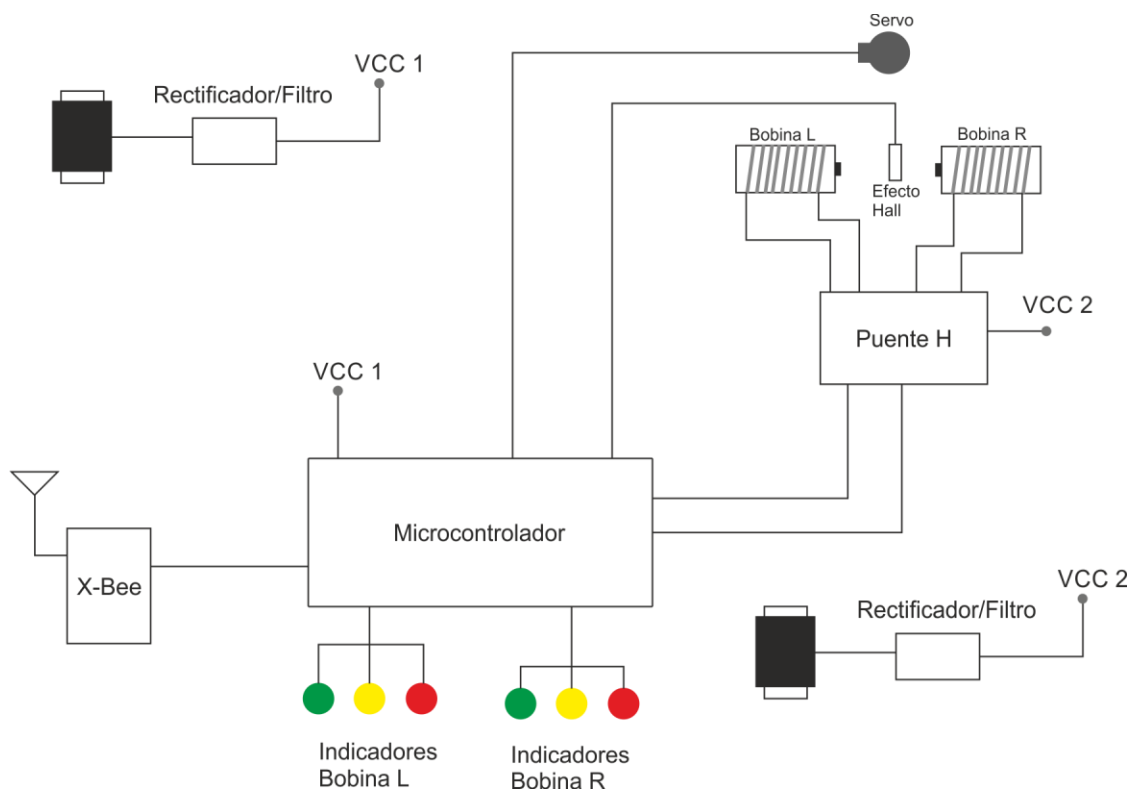


Fig.4.2.2.1 Diagrama de bloques que representan el diseño del sistema propuesto, fuente: autores

La generación del campo magnético bilateral simétrico se produce a través de modulación por ancho de pulso (PWM) generada por las salidas PWM del microcontrolador. Las mismas se varían de acuerdo a los parámetros recibidos del módulo X-Bee.

Dichas variaciones del campo magnético generado pueden ser invertidas de acuerdo a los comandos recibidos remotamente mediante módulos X-Bee (Micromodem Wireless 2.4 GHz, IEEE\_802.15.4.). Para identificar el sentido del campo magnético se utiliza los indicadores de bobinas LR (Left-Right).

Como se muestra en la figura 4.2.2.1 los indicadores verdes y rojos señalan los sentidos del campo, y los indicadores amarillos corresponden al sistema Standby.

El servo indicado en la figura 4.2.2.1 es utilizado para cambiar la orientación mecánica de las bobinas entre cero y noventa grados.

Para monitorear, controlar y regular los campos magnéticos generados simétricamente es utilizado un sensor de efecto Hall, cuya salida análoga es medida por el microcontrolador, el cual se encarga de mantener estable el campo magnético deseado.

Tal y como se muestra en la figura 4.2.2.1 existen dos etapas de alimentación: VCC 1, que corresponde a la alimentación de la etapa de baja potencia, y VCC2, que corresponde a la alimentación de las bobinas manteniendo un aislamiento eléctrico entre las etapas de generación de campo magnético y de control.

### **4.2.3 Telemetría y control wireless del sistema**

Para controlar y monitorear de manera remota el sistema se utiliza módulos X-Bee, los cuales permiten enlazar el sistema con el computador para realizar los cambios que se deseen en las bobinas, y por otra parte recibir a través de los mismos los resultados obtenidos en cada variación indicada desde el computador.

Este método de tratamiento de las variables se hizo necesario ya que los medios alámbricos presentan múltiples variaciones y limitaciones tanto de distancia como de transmisión a pesar de la velocidad no se cumple con los requerimientos establecidos del proyecto, por esto se implementa una solución inalámbrica que permite de igual forma el uso de las variables y el manejo de las mismas.

### **4.2.4 Alimentación del sistema**

Este módulo está constituido por dos partes las cuales actúan como base para el funcionamiento del sistema ya que es el encargado de distribuir y generar los niveles de voltaje y corriente eléctrica para suplir los diferentes módulos que conforman el sistema. Este se divide en varias partes debido a que los requerimientos del sistema se dividen a su vez en una parte de potencia y otra del sistema de control y comunicación que se explicaran a continuación.

#### **4.2.4.1 Etapa de alimentación del control del sistema**

Está compuesta por un transformador de doce voltios con reguladores de cinco voltios y 3.3 voltios, cuyas salidas se encuentran rectificadas y filtradas, a fin de garantizar que la corriente sea continúa.

#### **4.2.4.2 Etapa de potencia para generar campos magnéticos**

Está compuesta por un transformador con salida de 12 o 24 voltios a 3 amperios. Rectificada y filtrada la cual es inyectada a la etapa de control de las bobinas (Puente H. Nota: El funcionamiento de este circuito se explica en detalle en el capítulo de desarrollo).

#### **4.2.5 Etapa mecánica (orientación de las bobinas)**

Esta etapa está compuesta por una estructura mecánica móvil con un grado de libertad de cero o noventa grados, la cual se manipula por medio de un servo motor. Dicho servo motor está comandado a través del microcontrolador.

### **SOFTWARE**

Se utilizan estos lenguajes de programación debido a que se cuenta con las herramientas de desarrollo como emuladores de Hardware Assembler (Microcontrolador). Una interfaz para computador desde la cual se enlaza con el sistema (Visual C#). Y almacenamiento de los resultados obtenidos durante la operación del

sistema (SQL Server 2008 Express). La necesidad de dar acceso a los datos de forma sencilla y práctica para posteriores ensayos y análisis.

## **Capítulo 5**

### **Desarrollo**

Para desarrollar el sistema propuesto se realiza en base a la metodología propuesta siguiendo los parámetros expuestos con el fin de cumplir con la construcción y diseño final del sistema ya mencionado.

En este capítulo se muestra el funcionamiento del sistema solución su construcción y características que se encuentran acorde a las descripciones de las variables además de los elementos usados y sustentados en el marco teórico según sus diferentes relaciones.

#### **5.2 Implementación del sistema**

Teniendo en cuenta la metodología propuesta en el diagrama de bloques presentado en el capítulo anterior se procede a realizar el montaje del sistema.

A. Montaje prototipo de la etapa controladora del sistema; la cual incluye los siguientes elementos:

1. Fuentes de alimentación.
2. Microcontrolador.
3. Optoaisladores.
4. Control de Posicionamiento de las bobinas ( $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ).
5. Módulo de Comunicación wireless serial (X-Bee).
6. Sensor de efecto Hall.

7. Control de campo magnético bilateral.

8. Sistema de control Remoto (Computador)

B. Puente *H* correspondiente a la etapa de potencia para la alimentación de las bobinas y fuente de alimentación independiente.

C. Construcción del sistema mecánico de un grado de libertad de cero y noventa grados.

### **5.2.1 Fuentes de alimentación**

Está conformada por una fuente de alimentación la cual consiste de un transformador de corriente alterna, un puente rectificador de diodos, un filtro capacitivo, un regulador de voltaje de cinco voltios DC y otro de 3.3 voltios DC.

Para energizar la etapa de potencia se emplea un transformador de corriente alterna de 12 o 24 voltios AC a 3 amperios, un puente rectificador de diodos, un filtro capacitivo y optoaisladores.

## 5.2.2 Microcontrolador

El siguiente diagrama de flujo explica las operaciones realizadas por el microcontrolador

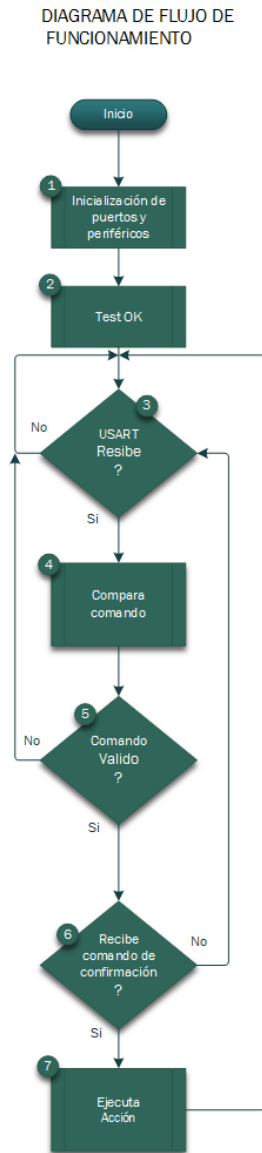


Fig. 4.2.2.2 Diagrama de flujo de funcionamiento del microcontrolador, fuente: autores

En el bloque 1 realiza la inicialización de los puertos de entrada y salida y configura los periféricos utilizados para este sistema como: USART (periférico de comunicación serial), conversor análogo digital AD, módulo PWM, frecuencia de trabajo del microcontrolador.

En el bloque 2 realiza la comprobación del buen funcionamiento del microcontrolador (TEST), indicando a través de testigos (LEDS).

Luego de realizar el test, como se indica en el bloque 2, el periférico correspondiente al hardware de comunicaciones (USART) Queda en espera para recibir un comando determinado como está señalado en el bloque 3.

Al recibir un comando a través del hardware de comunicaciones, en el bloque 4 dicho comando es comparado con una tabla de valores correspondientes a comandos para toma de decisiones de la operación a realizar. Como por ejemplo habilitar los PWM, su ancho de pulso, inversión de campo magnético (Puente H). Oscilación, etc.

El bloque 5 realiza la validación del comando recibido permitiendo ejecutar una acción (Comando preestablecido) siempre y cuando el mismo se encuentre en la tabla especificada dentro de los registros del microcontrolador. Si el comando no es validado se regresa a las acciones que cumple el bloque 3.

Al ser confirmado y validado el comando recibido, el bloque 6 realiza un Timeout en espera de una confirmación remota recibida por el periférico de comunicación serial a través del Micromodem (X-Bee).

Si durante el tiempo establecido (Timeout) no recibe la confirmación mencionada se regresará a ejecutar lo mencionado en el bloque 3. De haber recibido dicha confirmación se procede a ejecutar las operaciones del bloque 7.

El bloque 7 es el encargado de ejecutar una acción la cual es determinada por el comando recibido:

Una vez ejecutada la acción se regresa al bloque 3 donde se repite el proceso.

El siguiente diagrama de flujo explica el control y la adquisición de datos correspondientes al campo magnético generado.

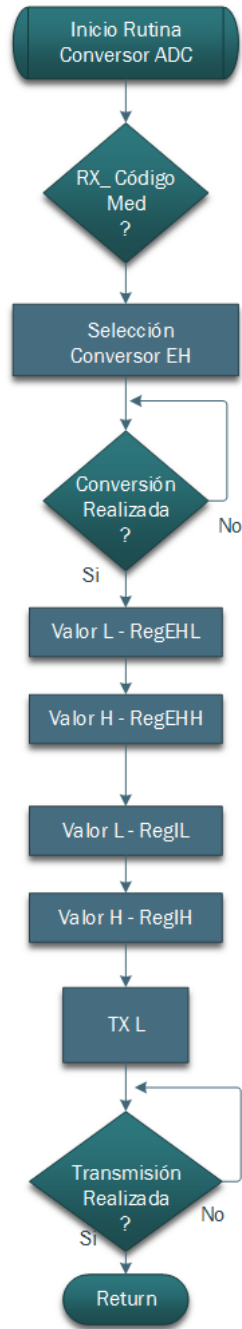


Fig. 4.2.2.3 Diagrama de flujo de control y adquisición de datos, fuente: autores

Esta rutina inicia al recibir el comando de solicitud de medición. Si el código no es válido regresa al punto de donde fue llamado (Call). En caso de ser válido este código se realiza la conversión al periférico de conversión ADC del microcontrolador, obteniendo así los valores de efecto Hall y de corriente consumida por las bobinas.

Los valores adquiridos son almacenados en registros temporales para ser transmitidos a través de la USART del microcontrolador, la cual está comunicada al módulo X-Bee. Una vez la transmisión ha sido realizada se regresa al punto donde fue llamado (Call).

Los datos recibidos a través del módulo X-Bee del computador son recibidos para ser procesados, logrando realizar cálculos y graficas que describen el comportamiento del sistema.

### **5.2.3 Optoaisladores**

La función de los mismos es independizar las alimentaciones del sistema, las cuales consisten en dos etapas: etapa de potencia y etapa de control. Dichos elementos son empleados con el fin de evitar que alguna FEM (FUERZA ELECTROMOTRIZ) (Fuerza Electromotriz Inducida) dañe la etapa de control del sistema.

### **5.2.4 Control de orientación de las bobinas**

Esta está compuesto por un servomotor, el cual se encarga de realizar un grado de libertad de cero o noventa grados el cual permite orientar la bobinas para producir sobre la zona de interés campos magnéticos tanto horizontales como verticales.

### **5.2.5 Comunicación serial (x-bee)**

Dicho componente presenta las siguientes características que son pertinentes para el sistema desarrollado:

Zigbee es un protocolo de comunicaciones inalámbrico basado en el estándar de comunicaciones para redes inalámbricas IEEE\_802.15.4, creado por Zigbee Alliance, una organización sin ánimo de lucro que aglutina más de 200 grandes empresas (destacan Mitsubishi, Honeywell, Philips, \_ ODEM\_ do, Invensys, entre otras) muchas de ellas fabricantes de semiconductores. Zigbee permite que dispositivos electrónicos de bajo consumo puedan realizar sus comunicaciones inalámbricas y es especialmente útil para redes de sensores en entornos industriales, médicos y, sobre todo, domóticos.

Las comunicaciones Zigbee se realizan en la banda libre de 2.4GHz. A diferencia de bluetooth, este protocolo no utiliza FHSS (Frequency hopping), sino que realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia, es decir, de un canal. Normalmente puede escogerse un canal de entre 16 posibles. El alcance depende de la potencia de transmisión del dispositivo así como también del tipo de antenas utilizadas (cerámicas, dipolos, etc). El alcance normal con antena dipolo en línea vista es de aproximadamente (tomando como ejemplo el caso de MaxStream, en la versión de 1mW de potencia) de 100m, y en interiores de unos 30m. La velocidad de transmisión de datos de una red Zigbee es de hasta 256kbps. Una red Zigbee la pueden formar, teóricamente, hasta 65535

equipos, es decir, el protocolo está preparado para poder controlar en la misma red esta cantidad enorme de dispositivos.

Entre las necesidades que satisface el módulo se encuentran:

- Bajo costo.
- Ultra-bajo consumo de potencia.
- Uso de bandas de radio libres y sin necesidad de licencias.
- Instalación barata y simple.
- Redes flexibles y extensibles.
- Confiabilidad.
- Uso en la Industria.

El uso del protocolo Zigbee va desde reemplazar un cable por una comunicación serial inalámbrica, hasta el desarrollo de configuraciones: multipunto, punto a punto (peer-to-peer), mesh (La comunicación entre un punto y otro se realiza de acuerdo a la mejor señal recibida entre ambos puntos a través de los dispositivos que se encuentren en la misma red) o redes complejas de dispositivos.

El Micromodem (Fig. 4.2.5.1) se ha configurado para operar en modo Full Duplex a una velocidad de comunicación serial entre 300 a 115000 baudios. Este dispositivo con la presente configuración está conectado en la entrada y salida de la USART del microcontrolador para lograr un enlace inalámbrico entre el target (el sistema) y el control remoto (el computador)

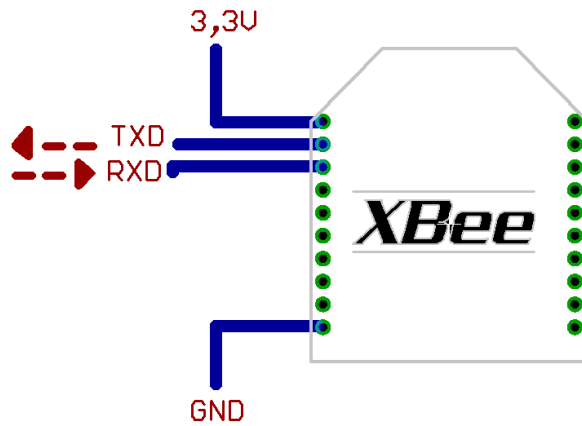


Fig. 4.2.5.1 Configuración de conexión entre el modulo X-Bee y el microcontrolador.

(fuente: Tomado de Guía de usuario X-Bee series 1 pág 12)

### 5.2.6 Sensor de efecto Hall

Dicho elemento se emplea para la medición de la densidad de flujo magnético, junto con su orientación. En la salida de este sensor dicha medición se representa como un voltaje de salida lineal  $V_{out}$  análogo (Dependiendo del campo magnético que lo ataca). Para calcular el campo magnético generado se realiza de la de la forma señalada ecuación 4.2.6.1:

$$B_G \approx \frac{V_{out} - C_{Calibración}}{0.0013} \quad (4.2.6.1)$$

Siendo  $C_{\text{Calibración}}$  una constante de calibración la cual es de aproximadamente de 1.65 voltios debido a que el conversor análogo digital captura valores entre 0 y 3.3 voltios. Este sensor se calibró utilizando un montaje compuesto por bobinas de Helmholtz.

### **5.2.7 Control de campos magnéticos**

Está compuesto por dos bobinas conectadas a un puente  $H$ , el cual es el encargado de alimentar a las bobinas. La variación deseada de campo magnético generado por las bobinas está dado por la señal recibida de la salida PWM (Modulación por ancho de pulso) del microcontrolador.

El puente  $H$  es un conmutador de flujo de corriente el cual permite invertir el sentido de la misma. Dicho puente  $H$  está conformado por cuatro semiconductores MOSFET (2 canal N y 2 canal P) acoplados a través de optoaisladores.

## **5.3 Instrumentación**

Se entiende por instrumentación todo dispositivo que permite obtener mediciones en un punto determinado de un circuito que corresponde al sistema desarrollado, o también elementos que generen resultados, por ejemplo, el sensor de efecto Hall, Encoder, etc.

### **5.3.1 Generación de ancho de pulso (pwm)**

Está compuesto por un periférico incorporado en el microcontrolador cuya generación se logra a través del Feedware (programa por default del microcontrolador). A

través de la programación que se realiza en la memoria de programa del microcontrolador, este puede ser variado tanto en amplitud como frecuencia.

### **5.3.2 Conversor análogo digital (ADC)**

Este módulo está conformado por un hardware periférico implícito en el microcontrolador, que al igual que el hardware generador PWM, es controlado por el feedware implícito en el microcontrolador cuya adquisición de medidas análogas es capturado por el mismo y convirtiéndolo a valores binarios comprendidos en este caso, entre 0 y 1024 mediciones, es decir, cuya resolución es de 10 bits.

Nota: la exactitud de la conversión análogo-digital, está dada por la frecuencia de funcionamiento del microcontrolador y principalmente por la configuración de las muestras por segundo dadas por la programación de dicho periférico del microcontrolador.

## **Capítulo 6**

### **Experimento**

Los experimentos que se explican en este capítulo están destinados a la comprobación de la funcionalidad del sistema y también observar el comportamiento de sustancias frente a los campos generados por el sistema.

Los diferentes materiales usados emulan el comportamiento macroscópico de partículas y dipolos empleados como muestras.

La finalidad del experimento se basa en establecer como se relaciona la dirección del campo magnético, su generación y la conmutación del mismo.

### **6.2 Diseño metodológico de los experimentos**

#### **6.2.1 Diseño Metodológico Experimento**

En este experimento el objetivo es visualizar el comportamiento de un modelo de dipolos magnéticos a macro escala frente al campo magnético generado por el sistema.

Materiales:

-.Generador de campo magnético

-.Brújula

Procedimiento:

Se aplica como muestra en este caso una brújula, a la cual se le aplica un campo magnético variable producido por el sistema, variable tanto en sentido como en

intensidad, con el fin de observar el comportamiento de la brújula. En la primera etapa se genera una intensidad de campo magnético constante en una dirección para observar el comportamiento de la brújula, teniendo como interés su norte magnético.

Luego se cambia la dirección de dicho campo manteniendo su intensidad y se observa el comportamiento de la brújula frente a dicho cambio.

Se realiza una variación de intensidad de campo magnético del valor mínimo al máximo del campo magnético generado por el sistema, observando el comportamiento de la muestra frente al campo.

Luego se invertirá la dirección del campo magnético llevando nuevamente del valor mínimo al máximo del sistema observando el comportamiento de la muestra frente al campo.

Se realiza una conmutación del sentido de campo magnético en intervalos programados, los cuales están dados por un determinado número de iteraciones por ejemplo, 50 conmutaciones por segundo.

## Capítulo 7

### Resultados

Al realizar la prueba con la brújula se observa la variación del campo y la dirección del mismo. Debido a la sensibilidad de la brújula al campo magnético, es apreciable sobre la brújula la alineación del campo y el flujo en la dirección paralela a las líneas de campo generadas.

- Al tener una variación de campo magnético respecto a la dirección se observó el mismo alineamiento, mostrando una respuesta inmediata al campo magnético ejercido, y también a la dirección del campo en cuestión.
- Al retirar el campo magnético se observa una variación de la alineación de la brújula con respecto al campo en el área generada, esto se aprecia debido al campo remanente que disminuye a través del tiempo sobre el núcleo de las bobinas. Dicho fenómeno se observa al acercar la brújula a la orilla de la bobina cerca al núcleo.
- Al utilizar campos variables sobre el dipolo, el dipolo cambia su dirección de acuerdo a la conmutación del campo generado por la bobinas, intentando alinearse con las líneas de campo. Las fluctuaciones de las líneas no permiten una alineación completa así que la brújula no logra completar una alineación perfecta con las líneas de campo.

- Al remover el dipolo, es decir la brújula empleada como muestra, su campo se estabiliza y se alinea con el norte magnético terrestre, nuevamente.

## **Capítulo 8**

### **Conclusiones**

El sistema desarrollado permite un desempeño óptimo de control y análisis de datos, así como la capacidad de realizar un muestreo en intervalos de tiempo, lo cual permite al usuario definir los tiempos de muestreo y observar los resultados para análisis posteriores.

El campo presente en el área de trabajo permite realizar experimentos con campos constantes o variables, dichas características cumplen con los objetivos del proyecto variando de acuerdo a las tres formas expuestas en los objetivos y en el problema propuesto.

Por medio del uso de modulación de ancho de pulso PWM se logra un control eficiente de la intensidad del campo. Este control permite una uniformidad de campo magnético de por lo menos un 65% a 85% y esto cumple con otro de los objetivos propuestos para este proyecto.

El manejo de la dirección y la orientación se controla óptimamente ya que el área de trabajo se mantiene estable junto con la muestra, ya que no hay que cambiarla de posición para establecer la orientación de los campos magnéticos tanto horizontales como verticales. Al implementar las funciones de control sobre el servomotor se implementaron dos posiciones para lograr modificar la dirección a partir de la inicialización del sistema, consiguiendo así posiciones del sistema tanto en horizontal como en vertical.

Se ha logrado la intensidad de campo magnético óptima lo cual cumple con los niveles que se deseaban para cumplir con los requisitos que permiten desarrollar los experimentos.

Para futuras mejoras del sistema se pueden implementar diversas variaciones de ángulo, lo cual permite diversas posiciones del sistema. Para lograr mayor intensidad de campo magnético se debe reemplazar el puente  $H$  para lograr otorgarle más potencia al sistema aumentando el campo magnético deseado.

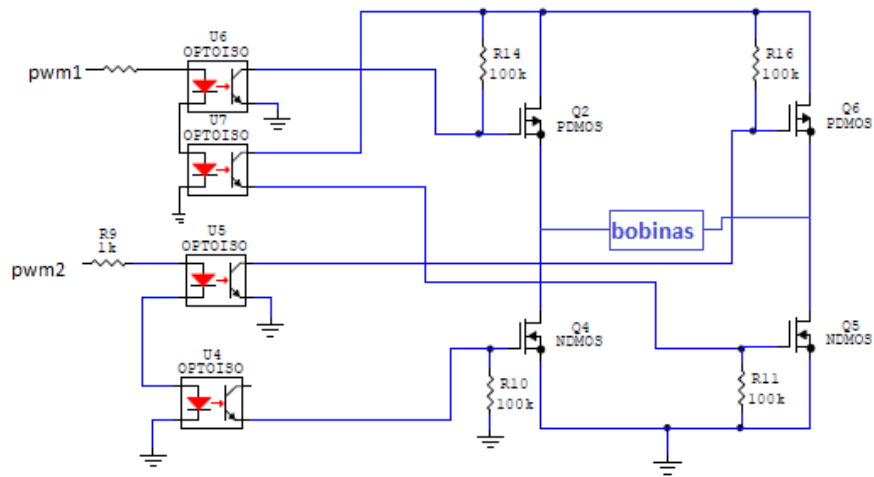
## Bibliografía

- Halliday, D., Resnick, R., & S.Krane, K. (1999). *Física Vol2*. Mexico: Compañía Editorial Continental.
- Hayt, W., & A.Buck, J. (2006). *Teoría Electromagnética*. Mexico D.C: Mc GrawHill.
- Purcell. (2001). *Electricidad y Magnetismo*. Barcelona: reverte.
- Tipler, P., & Mosca, G. (2010). *Física para la ciencia y la tecnología, Electricidad y magnetismo Volumen 2*. Barcelona: Reverte.
- Ullaby, F. T. (2007). *Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo*. Mexico : Prentice Hall.
- Cheng,D.K(2003).*Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*.Mexico : Addison Wesley Longman
- Reitz J.R & Millford F.J & Christy R.W. *Fundamentos de la teoría electromagnética*.Mexico: Addison Wesley Iberoamericana.



## ANEXO 2 Esquema Configuración Etapa Potencia

La configuración mostrada en el siguiente anexo corresponde a la configuración de la etapa de control de potencia conformada por los semiconductores optoaisladores y MOSFET el cual corresponde a la configuración denominada Puente H, el cual es controlado a través del microcontrolador por las salidas PWM del mismo.

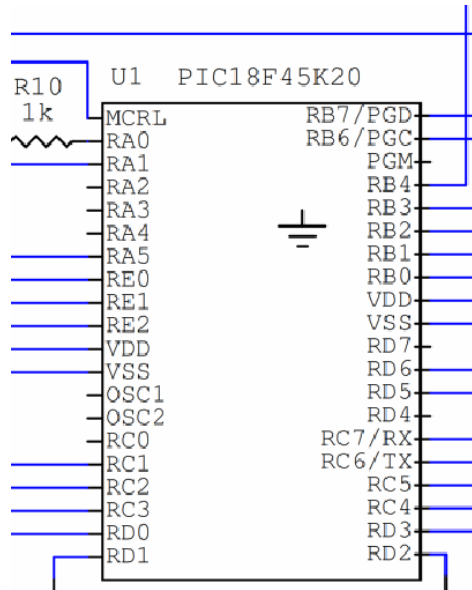


### ANEXO 3 Descripción Características Microcontrolador PIC18F45K20

El control inteligente del sistema está conformado por el microcontrolador PIC18F45K20. El cual integra todo el programa de software que controla dicho sistema.

#### Características Generales:

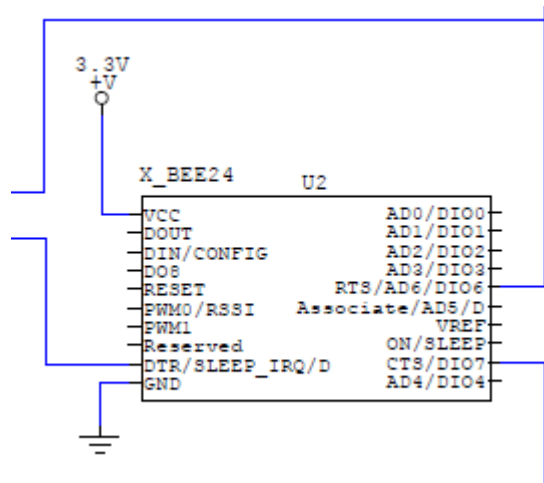
- Tecnología XLP(Oscilador controlado por software).
  - Extremadamente de bajo consumo (nano Watt).
  - Frecuencia Máxima de trabajo: 64 MHz.
  - Cuarenta líneas de entrada y salida
  - Conversores análogos de 10 bit
  
  - Periféricos:
    - a) PWM por hardware.
    - b) USART
    - c) Conversor análogo digital(A/D)
    - d) Interface I2C
    - e) Interrupción por hardware.
- Entre Otras.



#### ANEXO 4 Descripción características X-Bee

El control telemétrico y remoto del sistema está conformado por un micromodem (X-Bee) El cual posee las siguientes características generales.

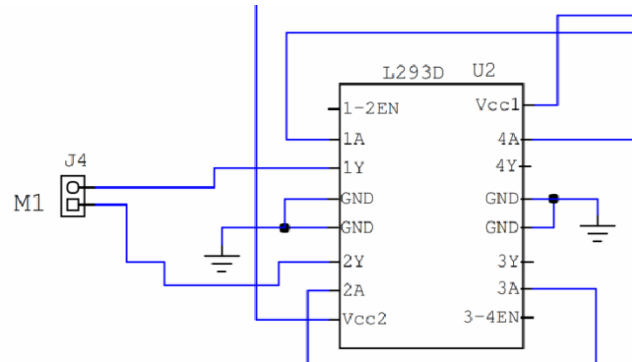
- Protocolo IEEE\_802.15.4.
- Alimentación de 3.3. voltios DC.
- Alcance línea de vista de hasta cien metros. Ó de hasta 1000 metros con X-Bee Pro.
- Comunicación serial USART al microcontrolador.
- Entradas y salidas digitales.
- Conversor análogo digital (A/D)
- Modo Sleep (Bajo consumo)



## ANEXO 5 Descripción cambio de dirección del sistema

A continuación se presentan alternativas que presenta el Hardware del sistema.

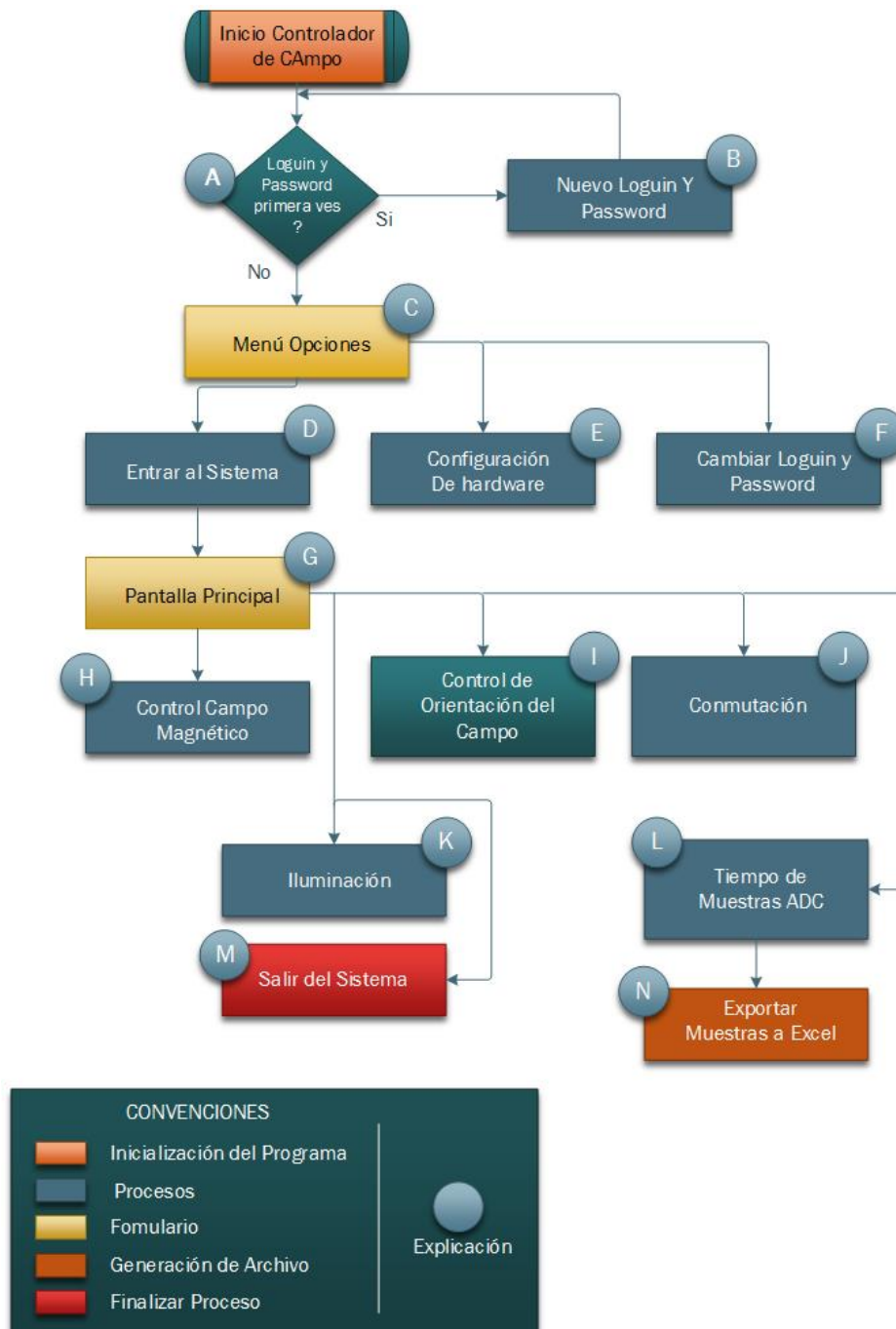
### 1) Control de servo



Para lograr el sentido entre 0 y 90 grados de las bobinas, lo cual varía la dirección del campo magnético, es utilizada una salida del microcontrolador. Dicha señal es recibida por el integrado L293D (Circuito integrado Puente H) que controla el sentido (Left-right) y la velocidad del servomotor es controlada por PWM.

ANEXO 6 Diagrama de flujo del software del sistema

A continuación se muestra el diagrama de flujo del software del sistema (Computador)



En el bloque A del sistema se realiza la autenticación del usuario que va a usar el sistema, esto garantiza que solo personal autorizado pueda hacer uso del mismo. Si es la primera vez que entra al sistema, al ingresar el usuario y contraseña por defecto (Usuario: Admin, Contraseña: 123456) se pasa al bloque B del sistema, si no es la primera vez, se pasa a la ventana de opciones (Bloque C).

En el bloque B se pide al usuario crear una identificación de usuario y contraseña diferente a la dada por defecto con el fin de garantizar que solo el personal autorizado pueda hacer uso del sistema.

En el bloque C Se carga el formulario de opciones donde se puede entrar a la pantalla principal del sistema (Bloque D), cambiar la configuración del Hardware (Bloque E), o cambiar la identificación de usuario y contraseña del usuario (Bloque F).

En la Configuración de Hardware (Bloque E) se pueden modificar los valores con los cuales el software interactúa con el sistema, es decir, modificar los comandos con los cuales el sistema realiza las tareas requeridas y también la configuraciones realizadas correspondientes a los parámetros de transmisión y recepción.

Si se desea cambiar los valores de identificación de usuario y contraseña, se emplea la opción del Bloque F.

En la pantalla principal (Bloque G) se pueden ejecutar las funciones del sistema: Realizar los experimentos de magnetismo, y tomar muestras para analizar el comportamiento de los campos magnéticos. Teniendo esto en cuenta las opciones que presenta el sistema son las siguientes:

- Bloque H: Control de campo magnético, cuando se ejecuta esta opción es posible aumentar o disminuir el campo magnético ejercido por las bobinas, logrando así dar al usuario la libertad de variar el campo a un valor deseado que este entre los límites del sistema.
- Bloque I: Por medio de este proceso es posible modificar la orientación de los campos magnéticos que atacan a la muestra, logrando así campos horizontales y verticales.
- Bloque J: Este proceso se encarga de realizar la conmutación de los campos magnéticos que atacarán a la muestra.
- Bloque L: Se estipula el tiempo de muestreo para el conversor ADC, una vez se han terminado de tomar las muestras, estas se exportan a un documento de Microsoft Excel para analizar los datos y ver el comportamiento de los campos magnéticos con respecto a la corriente inducida (Bloque N).

En el bloque K se puede encender o apagar la luz que ilumina a la muestra y el Bloque M finaliza el programa.