

**CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE INTENSIDAD DE CAMPO  
ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO**

**EDUARDO JUNIOR MARCHENA BARRAZA**

**CARLOS ALBERTO ARTEAGA GUERRA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.**

**2011**

**CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE INTENSIDAD DE CAMPO  
ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO**

**EDUARDO JUNIOR MARCHENA BARRAZA**

**CARLOS ALBERTO ARTEAGA GUERRA**

**Monografía para optar al título de  
Ingeniero Electricista**

**Director:**

**Jorge Eliecer Duque**

**Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.**

**2011**

Cartagena de Indias D.T. y C, Febrero de 2011

Señores:

**Comité evaluador**

**Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica**

La ciudad

Respetados Señores

Tengo el agrado de presentar a su consideración el trabajo de grado del cual me desempeño como director de la monografía titulada "**CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO**" desarrollada por los estudiantes EDUARDO JUNIOR MARCHENA BARRAZA Y CARLOS ARTEAGA GUERRA, como requisito para obtener el título de Ingenieros Electricistas.

Atentamente

---

Jorge Eliecer Duque

Cartagena de Indias D.T. y C, Febrero de 2011

Señores:

**Comité evaluador**

**Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica**

La ciudad

Respetados Señores

Con mucha atención nos dirigimos a ustedes para presentar la monografía titulada **“CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO Y MAGNÉTICO”** para su estudio y evaluación como requisito fundamental para obtener el título de Ingeniero Electricista.

En espera que esta cumpla con las normas pertinentes establecidas por la institución nos despedimos

Atentamente

---

Eduardo Junior Marchena Barraza

---

Carlos Alberto Arteaga Guerra

Nota de aceptación

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Cartagena de Indias D.T. y C, Febrero de 2011

Este trabajo se lo dedico a Dios, que me dio la sabiduría y la fuerza suficiente para llevar a cabo este trabajo.

A mis padres por su inagotable apoyo y comprensión durante mi desarrollo como persona.

A mis hermanas por depositar toda su confianza en mí y darme ánimos para seguir adelante.

A mi director de monografía que con su amplio conocimiento me guió durante mi proceso de formación académica.

A mis amigos que estuvieron cerca brindándome toda su ayuda.

Eduardo Jr. Marchena B

Cartagena de Indias D.T. y C, Febrero de 2011

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, a mis padres y mis hermanos, que de alguna u otra manera me ayudaron en mi formación académica y personal.

A todos los profesores que me formaron profesionalmente, a todos ellos muchas gracias...

Carlos Arteaga Guerra

## **AUTORIZACIÓN**

Cartagena de Indias D.T. y C, Febrero de 2011

Yo Eduardo Junior Marchena Barraza, identificado con número de cedula 73.194.457 de la ciudad de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catálogo online de la biblioteca.

---

Eduardo Junior Marchena Barraza

C.C. 73.194.457 de Cartagena



## **AUTORIZACIÓN**

Cartagena de Indias D.T. y C, Febrero de 2011

Yo Carlos Arteaga Guerra, identificado con número de cedula 73.191.026 de la ciudad de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catálogo online de la biblioteca.

---

Carlos Arteaga Guerra

C.C. 73.191.026 de Cartagena

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. MEDIDORES DE CAMPO ELÉCTRICO.....	9
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	9
2.2 TEORÍA OPERACIONAL.....	11
2.3 EQUIPOS DISPONIBLES.....	16
2.4 MÉTODO DE CALIBRACIÓN.....	19
3. MEDIDORES DE CAMPO MAGNÉTICO .....	22
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	22
3.2 TEORÍA OPERACIONAL.....	24
3.3 EQUIPOS DISPONIBLES.....	25
3.4 MÉTODO DE CALIBRACIÓN.....	29
3.4.1 Bobinas de Helmholtz .....	29
3.4.2 Detalles constructivos .....	33
4. CONCLUSIONES .....	36
5. REFERENCIAS .....	38

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Medidores de campo con pértiga aislada. ....	10
Figura 2. Medidor de campo electromagnético con sonda para medición remota. .....	11
Figura 3. Medición de campo al aire libre. ....	12
Figura 4. Diagrama de conexión general de un sistema de placas paralelas. ....	13
Figura 5. Equipos de gama media para medición de media tensión.....	14
Figura 6. Conexión Sonda-Multímetro para medición de media tensión.....	15
Figura 7. Diagrama de bornes de conexión de un VARIAC para 220-240 VAC. ...	15
Figura 8. Esquema de conexión del sistema de placas paralelas para generar un campo eléctrico constante. ....	16
Figura 9.....	17
Figura 10. ModeloTFBB-100XE, .....	17
Figura 11. Modelo: 8053 – EHP50C .....	18
Figura 12. Plano campo eléctrico contra tensión asociada.....	21
Figura 13. Medidor de Intensidad de Campo Magnético. ....	22
Figura 14. Medición de campo con pértiga aislada.....	23
Figura 15. Medidores de Campo Magnético Modelo: PCE – G28. ....	26
Figura 16. Medidores de Campo Magnético Modelo: TF-100XE .....	27

Figura 17. Medidores de Campo Magnético Modelo: 480823 .....	28
Figura 18. Disposición de las bobinas de Helmholtz.....	31
Figura 19. Esquema experimental. ....	32
Figura 20. Plano campo magnético contra corriente asociada. ....	33

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Máxima exposición a una frecuencia de 60 hz. ....	7
Tabla 2. Corrientes asociadas a alambres tipo magneto. ....	35

## RESUMEN

El propósito a lo largo de este trabajo está basado en la funcionalidad de los medidores de campo eléctrico y magnético que está directamente relacionado con los conceptos básicos de la teoría electromagnética, el estado del arte, características de los instrumentos empleados para la medición de campos eléctricos y magnéticos, así como su calibración, teniendo en cuenta que estas maniobras de medición están regidas por las normas vigentes nacionales e internacionales como son el RETIE, CREG e ICNIRP y tomando lo anterior como base para una futura implementación de este tipo de calibradores aplicado a la instrumentación del laboratorio de física eléctrica de la UTB.

## ABSTRACT

The purpose throughout of this work is based on the functionality of electric and magnetic field meters that is directly related with basic concepts of electromagnetic theory, the state of art, features of the instruments used for electric and magnetic fields measuring, and its calibration, bearing in mind that these measurement maneuver are regulated by the national and international standards existing such us the RETIE, CREG and ICNIRP, taking this as base for future implementation of this type of gauges applied to electrical physics laboratory of the UTB.

## 1. INTRODUCCIÓN

En nuestro país existen necesidades metrológicas en el campo de las mediciones electromagnéticas, en sectores tales como: eléctrico, metal-mecánico, automotriz, domésticos, agroalimentario, sector de la salud, telecomunicaciones y en laboratorios de metrología.

En este último se enfocan las bases para el desarrollo y/o implementación de un sistema de calibración para estas magnitudes y que a futuro permita cubrir esa necesidad para que pueda ser brindada por el laboratorio de la UTB al sector industrial, comercial, salud, entre otros.

El comportamiento de los campos electromagnéticos mencionados en este documento brinda al usuario final, con el conocimiento previo, una guía práctica para la aplicación de un método rápido y confiable de calibración de estos equipos basándose en la norma internacional ANSI/IEEE Std. 644-1987, determinando de esta manera si son o no de calidad o si están dentro de los rangos permitidos.

Paralelamente al tema de los rangos, cada país tiene sus propias normas sobre la exposición a campos electromagnéticos, sin embargo la mayoría de estas normas están basadas en recomendaciones realizadas por la comisión internacional de protección contra la radiación no ionizante ICNIRP que es reconocida por la OMS Organización Mundial de la Salud la cual evalúa los resultados de los estudios científicos en este campo, igualmente existen recomendaciones internacionales acerca de los límites de exposición a estos campos para las personas (Ver tabla 1).

Tabla 1. Máxima exposición a una frecuencia de 60 hz.

ESTÁNDAR	CAMPO ELÉCTRICO (kV/m)	CAMPO MAGNÉTICO (G)	TIPO DE PERSONAL EXPUESTO
ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection	8,333	4,1677	Trabajadores
	4,167	0,8333	Público en General
CREG, Comisión de Regulación de Energía y Gas	5	1	Trabajadores
			Público en General
RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas	10	5	Trabajadores
	5	1	Público en General
European estándar ENV 50166-1	25	13,333	Trabajadores
	10	5,333	Público en General
NRPB, UK (National Resources Planning Board)	12	16	Trabajadores
	12	16	Público en General
ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists	25	10	Trabajadores

Las normativas vigentes anteriormente descritas, muestran los valores límites que restringen la exposición a campos eléctricos y magnéticos para las zonas donde pueda permanecer público, independientemente del tiempo, basado en estudios y criterios de la OMS y la institución internacional ICNIRP para la protección de la población.



El desarrollo de este documento está enfocado al RETIE<sup>1</sup>, que es el ente que determina el grado o los niveles de exposición a estos tipos de campos en todo el territorio colombiano.

---

<sup>1</sup> Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Artículo 14.4 – Pag.58.

## **2. MEDIDORES DE CAMPO ELÉCTRICO**

### **2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL**

Los medidores de campo eléctrico en general son instrumentos que están diseñados para medir el nivel de intensidad de campo eléctrico provenientes de fuentes cercanas a su radio de acción, en este caso a 60 Hz (Frecuencia Industrial), procedente de líneas de alta, media o baja tensión, transformadores, electrodomésticos, ordenadores, entre otros.

Básicamente, un medidor de intensidad de campo eléctrico se compone de dos partes, la sonda y el detector. En algunos medidores el detector está contenido o hace parte de la sonda. La sonda y el detector se introducen en un campo eléctrico usando una extensión aislada o pértiga como la Figura 1. El detector mide la corriente inducida provocada por el campo eléctrico en la sonda.

El observador debe estar lo suficientemente alejado de la sonda para evitar la perturbación significativa del campo eléctrico en la sonda. El campo eléctrico debe ser aproximadamente uniforme en la región donde la sonda será introducida. Las sondas pueden ser de cualquier forma, sin embargo, los medidores disponibles comercialmente son por lo general en forma de cajas rectangulares, con dimensiones que van desde 7 a 20 cm.

Los medidores son calibrados para leer el valor rms de la componente de campo eléctrico a lo largo del eje eléctrico (generalmente es el eje donde se dirige la sonda hasta donde hay mayor sensibilidad).

**Figura 1. Medidores de campo con pértiga aislada.**



Fuente: Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2009- CENAM, SAR- A Basic Restriction for Electromagnetic Field Safety.

También existen medidores diseñados para la visualización remota de la intensidad de campo eléctrico, Figura 2. En este caso, una parte del circuito de procesamiento de la señal se encuentra en la sonda y el resto del detector está en un recinto separado con una pantalla analógica o digital. Un enlace de fibra óptica conecta la sonda a la unidad de pantalla. Este tipo de sonda es introducida también en un campo eléctrico con una extensión aislada (pértiga).

**Figura 2. Medidor de campo electromagnético con sonda para medición remota.**



Fuente: EHP 50-C sonda de medida remota ofrecida por Alava Ingenieros.

## **2.2 TEORÍA OPERACIONAL**

Un medidor de campo eléctrico es empleado para realizar mediciones tipo inspección, debido a sus dimensiones reducidas, ya que es portátil como el mostrado en la Figura 3, además, permite mediciones por encima del nivel del suelo. Por lo tanto, este tipo de medidor es recomendable para las mediciones al aire libre.

**Figura 3. Medición de campo al aire libre.**



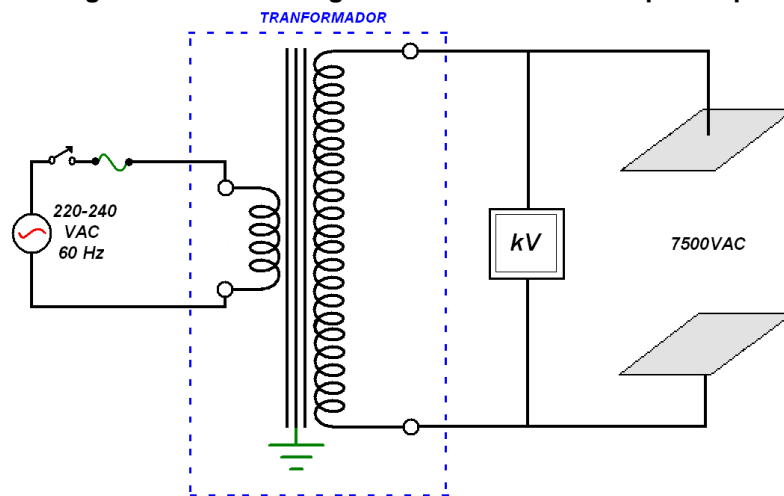
Fuente: [www.caprotecsa.com](http://www.caprotecsa.com)

Para garantizar que la instrumentación es adecuada, el fabricante debe proporcionar una descripción detallada de la electrónica del equipo, así como de información relevante, por ejemplo, si la lectura del medidor de campo tiene una dependencia de la temperatura, el coeficiente de temperatura debe ser proporcionado. Esto permite al operador corregir las lecturas de campo eléctrico hechas sobre el terreno al aire libre, utilizando un instrumento calibrado a temperatura ambiente.

Comúnmente, en el área de la metrología es utilizada una técnica de soporte para calibración de medidores de campo eléctrico conocida como la de placas paralelas, la cual está conformada por un par de placas metálicas planas, preferiblemente en material de acero inoxidable para combatir el tema de la corrosión, con unas dimensiones establecidas de acuerdo a la norma ANSI/IEEE Std. 644-1987 de 1,5 mts x 1,5 mts con una separación entre ellas de 0,75 mts, dicho arreglo de placas soportarían una tensión de aproximadamente 10kVAC, generando en medio de ellas cerca de 13 kV/m.

**Fuente de Tensión:** Las placas deben conectarse a los bornes del lado de alta de un transformador de distribución tipo elevador, de esta manera se genera a través de las placas, el campo eléctrico necesario para ser medido por el equipo a verificar, el cual va ubicado en medio de dichas placas, ver Figura 4.

**Figura 4. Diagrama de conexión general de un sistema de placas paralelas.**



Fuente: Elaboración propia del proyecto de investigación.

Las tensiones que se manejan para este tipo de arreglo varían en un rango definido de 10 VAC hasta 30 kVAC pero, para la posible implementación de un sistema de placas paralelas y ser empleado en la UTB, trabajaremos a 60 Hz y a 7,5 kVAC para generar un campo eléctrico uniforme de 10 kV/m a través de las placas, suministrados por un transformador tipo elevador donde, por el lado de baja sea de 220-240 VAC y por el lado de alta sea de 7,5KVAC, generando así un valor coincidente para la máxima exposición a este tipo de campo permitida por el RETIE<sup>2</sup>.

**Sistema de Medición:** Para medir la tensión por el lado de alta del transformador nos apoyaremos en unos equipos de gama media, Figura 5, que están

<sup>2</sup> Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Artículo 14.4 – Pag.58.

conformados por una sonda de alta tensión y un multímetro, ambos en este caso de la firma FLUKE, de acuerdo a las especificaciones del fabricante la gran mayoría de estos multímetros poseen una impedancia de entrada de  $10\text{M}\Omega$  debido a que la sonda se comporta como un divisor de tensión, la sonda representa una carga de  $1000\text{M}\Omega$  al circuito que se está midiendo, en la Figura 6 se muestra la forma de conexión entre estos equipos, de acuerdo a esto el fabricante expresa que, por cada  $1\text{kV}$  en la sonda el multímetro registra  $1\text{V}$ , en la Figura 6 se muestra la forma de conectar la sonda al multímetro.

Las especificaciones más generales para esta sonda son las siguientes:

- **Rango de Voltaje:**  $1\text{ kV}$  a  $40\text{ kV}$  en pico AC o en DC,  $28\text{ kV CA rms}$ .
- **Resistencia de entrada:**  $1000\text{ M}\Omega$
- **Precisión en CC:**  $0\text{ kV}$  a  $<20\text{ kV}$ :  $\pm 2\%$  de  $20^\circ\text{C}$  a  $30^\circ\text{C}$ ,
- **Precisión en AC:**  $60\text{ Hz}$ ,  $\pm 5\%$ .

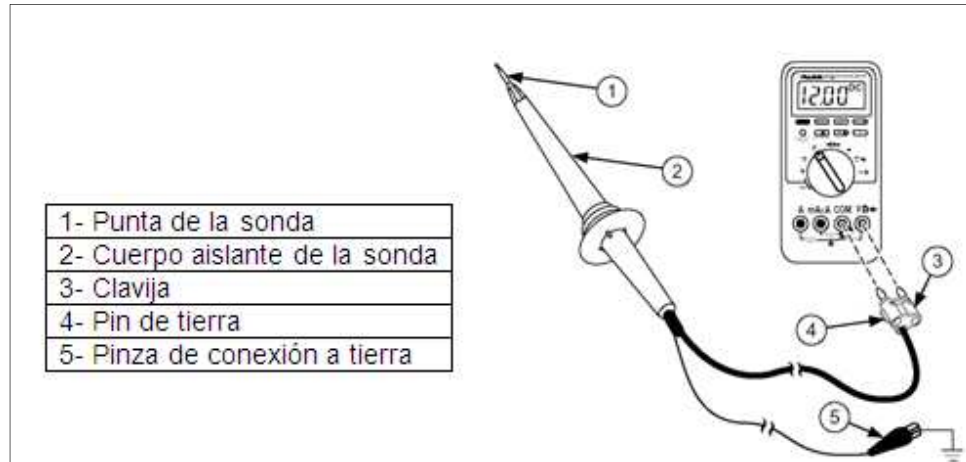
Utilizar un multímetro con una impedancia inferior a  $10\text{M}\Omega$  ( $\pm 1\%$ ), reduce la exactitud de la lectura.

**Figura 5. Equipos de gama media para medición de media tensión.**



Fuente: <http://www.fluke.com/fluke/uses/products/>

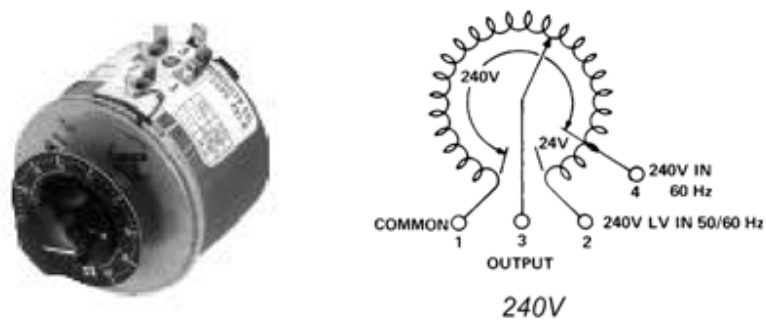
**Figura 6. Conexión Sonda-Multímetro para medición de media tensión.**



Fuente: [http://assets.fluke.com/manuals/80k15\\_iseng0000.pdf](http://assets.fluke.com/manuals/80k15_iseng0000.pdf)

Otro elemento perteneciente a la fuente necesaria para generar un campo eléctrico es el VARIAC, Figura 7, el cual consiste en un arrollamiento por medio del cual y dependiendo de cómo se conecte provee una variación de la tensión, en este proceso se conecta a la entrada del transformador antes mencionado por el lado de baja como en la Figura 8.

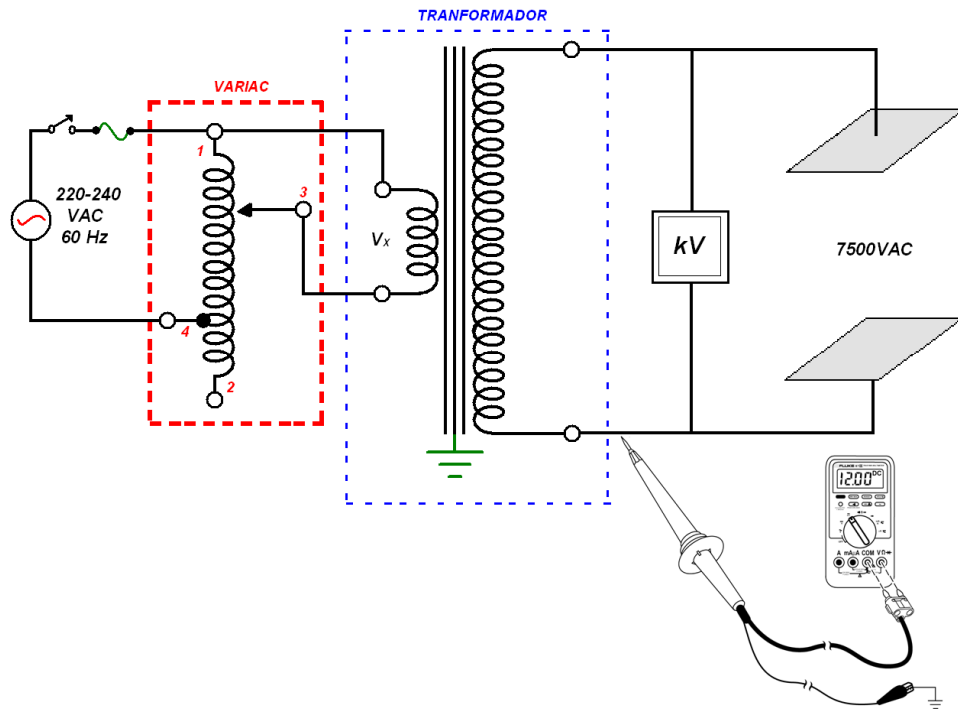
**Figura 7. Diagrama de bornes de conexión de un VARIAC para 220-240 VAC.**



Fuente: [http://www.stacoenergy.com/variable\\_transformers.htm](http://www.stacoenergy.com/variable_transformers.htm)



Figura 8. Esquema de conexión del sistema de placas paralelas para generar un campo eléctrico constante.



Fuente: Elaboración propia de proyecto de investigación.

### 2.3 EQUIPOS DISPONIBLES

Existen en el mercado varios instrumentos para realizar mediciones de intensidad de campos electromagnéticos (CEM) de baja frecuencia como los mostrados en la figura 9, que provienen de líneas de alta tensión, transformadores, aparatos eléctricos, cables de distribución, entre otros.

A continuación se detallan algunos de los equipos más usados o de gama media-baja para evaluar las exposiciones a los campos electromagnéticos de baja frecuencia.

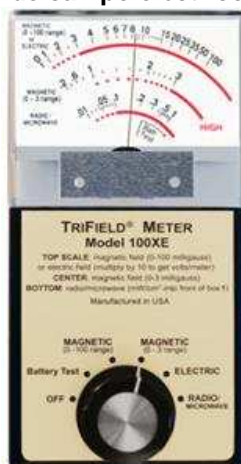
Figura 9. Medidores de campo eléctrico Display digital lcd



Fuente: <http://www.trifield.com/content/ac-electric-field-meter/>

Este equipo (ver Figura 9) es fabricado por la firma Alpha Lab, posee un display digital lcd de 5 dígitos. La frecuencia a la cual el equipo puede ser sometido para realizar una medición está entre los 40 Hz hasta 20 kHz, el rango de operación para la magnitud de campo eléctrico es de 0 a 19000 V/m. La resolución y precisión de este equipo es de 1 V/m y  $\pm 2\%$  de la lectura respectivamente y su costo es de aproximadamente USD \$200.

Figura 10. Medidores de campo eléctrico ModeloTFBB-100XE,



Fuente: <http://www.trifield.com/content/trifield-meter/>

Este equipo (ver Figura 10) al igual que el anterior es fabricado por la firma Alpha Lab Modelo: TFBB-100XE, posee un display análogo con sus respectivas escalas y múltiplos de escala. La frecuencia a la cual el equipo puede ser sometido para realizar una medición está entre los 40 Hz hasta 100 kHz, el rango de operación para la magnitud de campo eléctrico es de 0 a 100.000 V/m. La precisión de este equipo es de  $\pm 30\%$  de la lectura y su costo es de aproximadamente USD \$160.

**Figura 11. Medidores de campo eléctrico Modelo: 8053 – EHP50C**



Fuente: [http://www.gruppompb.uk.com/en/indexlucaprodotti\\_en.html](http://www.gruppompb.uk.com/en/indexlucaprodotti_en.html), <http://www.narda-sts.de/products/low-frequency.html>

Este equipo (ver Figura 11) es fabricado por la compañía Narda Modelo: 8053 – EHP50C, posee un display digital tipo LCD. La frecuencia a la cual el equipo puede ser sometido para realizar una medición está entre los 5 Hz hasta 100 kHz, el rango de operación para la magnitud de campo eléctrico es de 0,1 V/m hasta 100.000 V/m. La resolución de este equipo es de 0,1 V/m y su costo es de aproximadamente USD \$14.000.

**Criterio de selección:** Tomando como referencia las características de los equipos mencionados anteriormente, y después de comparar sus cualidades y especificaciones técnicas, el equipo más adecuado para efectos de calibración en

la UTB es el primero de ellos de la firma Alpha Lab ya que su ancho de banda es menor que los otros dos equipos para efectuar las mediciones, en este caso a frecuencia industrial (60Hz). A nivel de resolución, este equipo posee una resolución baja (1 V/m) con respecto al equipo de la firma Narda (0,1 V/m), sin embargo este último es 87,5 veces más costoso y su portabilidad es reducida con respecto al equipo de nuestra selección.

## 2.4 MÉTODO DE CALIBRACIÓN

Aprovechando el hecho de que en un arreglo de placas paralelas el campo eléctrico debido a la aplicación de una tensión entre las placas separadas una distancia  $d$  es constante en el centro de las placas, podemos llegar a construir un sistema que nos permita calibrar y determinar el correcto funcionamiento de un medidor de intensidad de campo eléctrico, colocándolo en el centro del área de las placas y de la distancia de separación entre estas. Tomando como base lo estipulado por la norma internacional ANSI/IEEE Std. 644-1987 podemos llegar a construir un sistema formado por placas cuadradas de dimensiones  $L_1 = L_2 = 1,5\text{mts}$ , con distancia de separación entre ellas  $d = 0,75\text{mts}$ , y teniendo en cuenta de que en cualquier tipo de arreglo con estas características tenemos que:

$$\vec{E} = \frac{V}{d}$$

La máxima exposición a campos eléctricos permitida por el RETIE<sup>3</sup> es de un valor no superior a 10kV/m, tendríamos que aplicar una tensión de 7,5kV entre las placas para determinar el correcto funcionamiento de los equipos a medir dependiendo de su rango de medición.

---

<sup>3</sup> Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Artículo 14.4 – Pag.58.

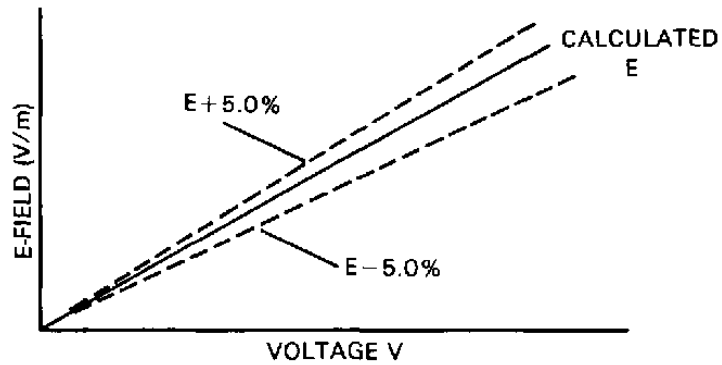
El procedimiento para llevar a cabo la calibración como lo estipula la norma ANSI/IEEE Std. 644-1987 usando un sistema de placas paralelas se desarrolla de la siguiente forma:

1. Se energiza el sistema desde una fuente de 220-240 VAC ajustando el VARIAC a una posición tal que se obtenga por el lado de alta el nivel de tensión requerido, medido con un kilovoltímetro, para generar el campo eléctrico calculado de acuerdo a la expresión:

$$\vec{E} = \frac{V}{d}$$

2. Confirmar mediante un medidor de campo eléctrico patrón, calibrado y certificado, registrando estos datos como referencia. En esta caso citaremos como equipo patrón el medidor de campo eléctrico de la firma Trifield – AlphaLab (ver Figura 9) que tiene un rango de medición de hasta 19.000 V/m.
3. Después de retirado el equipo patrón se inserta un segundo medidor, que sería el que se verificará, variando la posición de este entre  $\pm 10^\circ$  con respecto al eje vertical del campo generado entre las placas, consiguiendo su máxima lectura, posterior a esto, se registra este valor. Estos procedimientos se realizaran como mínimo 3 veces a diferentes valores de campo, para medidores de pantalla digital. Para medidores de pantalla análoga se realizan estas pruebas como mínimo 4 veces.
4. Con los datos registrados del medidor a verificar, se realiza una gráfica de campo eléctrico calculado que sería el valor arrojado por el medidor patrón, contra su respectivo valor de tensión, el valor de campo del medidor a verificar debe estar dentro de un valor correspondiente al  $\pm 5\%$  de las lecturas arrojadas por el medidor patrón como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Plano campo eléctrico contra tensión asociada.



Fuente: Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines - ANSI/IEEE Std 644-1987 – pag. 13

- Si las respectivas lecturas tomadas por el medidor a verificar están dentro del rango del  $\pm 5\%$  de las del medidor patrón, se puede deducir, soportado por la norma<sup>4</sup>, que ese medidor está en óptimas condiciones para seguir siendo empleado.

<sup>4</sup> ANSI/IEEE Std 644-1987, Cap. 4.3.2. – pag. 13

### 3. MEDIDORES DE CAMPO MAGNÉTICO

#### 3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Los magnetómetros mostrados en la Figura 13 (también llamados gaussímetros o teslámetros), son instrumentos de medición que son empleados para medir densidad de flujo magnético. Usualmente estos equipos son de tipo digital o analógico. Estos miden el campo originado por la circulación de corriente eléctrica, por tanto, todas las instalaciones y equipos que funcionen con electricidad producen a su alrededor un campo magnético que puede ser medido por estos instrumentos.

Figura 13. Medidor de Intensidad de Campo Magnético.



Fuente: <http://www.ets-lindgren.com>

La magnitud de densidad de flujo magnético o campo de inducción magnética,  $B$ , llamado también campo magnético  $B$ , expresa, como su nombre lo indica, el flujo magnético, o el número de líneas de campo magnético, por unidad de área, que es generado por corrientes eléctricas que circulan a través de circuitos eléctricos,

líneas eléctricas, transformadores, monitores de equipos de cómputo, televisores entre otros. En el Sistema Internacional de Unidades, B se expresa en tesla (T). Por lo tanto:

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 1 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2 = 10.000 \text{ gauss}$$

Teniendo en cuenta la relación anterior y de acuerdo a la máxima exposición humana a campos magnéticos permitida por el RETIE debe ser máximo de:

$$5\text{G} = 0,5\text{mT} = 500 \mu\text{T}$$

Existe una amplia variedad de medidores de campo que miden densidades de flujo magnético con pantalla de visualización tanto digital como analógica, cada vez con mejores especificaciones técnicas y fácil operación. Aunque los instrumentos digitales están reemplazando a los instrumentos analógicos, éstos últimos siguen siendo más útiles en determinadas aplicaciones que los digitales.

**Figura 14. Medición de campo con pértiga aislada.**



Fuente: Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica 2009 - CENAM, **SAR** – A Basic Restriction for Electromagnetic Field Safety.



El medidor de intensidad de campo magnético consiste en una sonda en cuyo interior está alojada una bobina apantallada y un detector con una conexión de cable blindado. La sonda puede ser sostenida con una extensión (pértiga) dieléctrica corta Figura 14, sin afectar seriamente la medición. Como se señaló anteriormente para los medidores de intensidad de campo eléctrico, el fabricante debe proporcionar una descripción detallada de la electrónica.

### **3.2 TEORÍA OPERACIONAL**

Al igual que el medidor de campo eléctrico, el medidor de campo magnético es usado para realizar mediciones a la intemperie aplicado a las líneas eléctricas y un sin número de equipos eléctricos y electrónicos que emiten un determinado campo magnético en un rango de acción el cual puede afectar la salud humana y otros equipos.

Los principios y mecanismos que explican el fenómeno magnético son complejos y aunque están bien definidos en la teoría, en la práctica, la medición de densidad de flujo magnético,  $B$ , debe tener en consideración todos los posibles factores que pueden influir en su medición.

En el ámbito metrológico se utiliza comúnmente un sistema de calibración empleando un par de bobinas idénticas (de construcción circular o rectangular) con una distancia de separación igual al doble del radio de una de las bobinas que de acuerdo a la norma ANSI/IEEE Std. 644-1987 deben tener unas dimensiones no menores a 1m de diámetro, para estas dimensiones le correspondería una distancia de separación de 0,5m lo que garantiza la uniformidad del campo magnético en el punto medio de la distancia de separación entre ellas, este arreglo es conocido como Bobinas de Helmholtz.

Las aplicaciones de la bobina de Helmholtz son las siguientes:

- Determinación de las componentes vertical y horizontal del campo magnético terrestre.
- Calibración de medidores de campo magnético de baja frecuencia.
- Estudios de los efectos de campo magnético en componentes de equipos electrónicos.
- Medidas de susceptibilidad magnética.
- Calibración de equipos de navegación.
- Estudios de efectos biomagnéticos.
- Ajuste de tubos de rayos catódicos.
- Estudios del desempeño de tubos de fotomultiplicadores en campos magnéticos.
- Medidas de magnetoresistencia.
- Desmagnetización de materiales ferromagnéticos usados en la ciencia de naves espaciales.
- En el área de enseñanza de física se usa principalmente en experimentos para la determinación de la carga específica de un electrón.

### **3.3 EQUIPOS DISPONIBLES**

Existen en el mercado varios instrumentos para realizar mediciones de intensidad de campos magnéticos de baja frecuencia como los mostrados en la Figura 15, que provienen de líneas de alta tensión, transformadores, aparatos eléctricos, cables de distribución, entre otros.

A continuación se detallan algunos de los equipos más usados o de gama media-baja para evaluar las exposiciones a los campos magnéticos de baja frecuencia.

**Figura 15. Medidores de Campo Magnético Modelo: PCE – G28.**



Fuente: <http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores.htm>

Este equipo (ver Figura 15) es fabricado por la compañía PCE GROUP Modelo: PCE – G28, posee un display digital LCD de tres dígitos. La frecuencia a la cual el equipo puede ser sometido para realizar una medición está entre los 30 Hz hasta 300 Hz, el rango de operación para la magnitud de campo magnético es 0 a 20 G. La resolución y la precisión depende de los rangos de medición que serian de 0,1/1/10mG y del  $\pm 4, 5, 10 \%$  para un rango de 0,2/2/20 G. Su costo es de aproximadamente USD \$300.

**Figura 16. Medidores de Campo Magnético Modelo: TF-100XE**



Fuente: <http://www.trifield.com/content/trifield-meter/>

Este equipo (ver Figura 16) al igual que el anterior es fabricado por la firma Alpha Lab Trifield Modelo: TF-100XE, posee un display análogo con sus respectivas escalas y múltiplos de escala. La frecuencia a la cual el equipo puede ser sometido para realizar una medición está entre los 40 Hz hasta 100 kHz, el rango de operación para la magnitud de campo magnético es de 0-100 mG (0.1G). La precisión de este equipo es de  $\pm 20\%$  de la lectura y su costo es de aproximadamente USD \$160.

**Figura 17. Medidores de Campo Magnético Modelo: 480823**



Fuente: <http://www.extech.com/instruments/>

Este equipo (Figura 17) es fabricado por la compañía EXTECH Modelo: 480823, posee un display digital LCD de tres dígitos. Puede realizar una medición entre los 30 Hz hasta 300 Hz, el rango de operación para la magnitud de campo magnético es de 200mG (0.2G). La resolución y la precisión de 0,1mG y del  $\pm 4\%$  respectivamente. Su costo es de aproximadamente USD \$130.

**Criterio de selección:** Tomando como referencia las características de los equipos mencionados anteriormente, y después de comparar sus cualidades y especificaciones técnicas, el equipo más adecuado para efectos de calibración en la UTB es el de la firma PCE GROUP Modelo: PCE – G28, ya que su rango de medición de campo magnético está por encima de los niveles de exposición máximos permitidos por el RETIE<sup>5</sup> lo que no cumple los otros equipos mencionados, además su ancho de banda es aplicable para el caso de frecuencia industrial (60Hz) . A nivel de resolución, este equipo posee una resolución que depende de los rangos de medición siendo más preciso para intensidades de

---

<sup>5</sup> Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Artículo 14.4 – Pag.58.

campo magnético más bajas. La relación costo – beneficio está acorde a sus prestaciones.

### **3.4 MÉTODO DE CALIBRACIÓN**

Frecuentemente es necesario producir campos magnéticos uniformes de baja intensidad sobre un volumen relativamente grande, para producir tal efecto son empleados los siguientes sistemas de generación de campo magnético: imanes patrón, solenoides, electroimanes y bobinas de Helmholtz; siendo este último el sistema más utilizado y el que trataremos en este documento.

La selección del método de generación del campo magnético B, depende del nivel o intensidad del campo B a ser medido, de la homogeneidad del campo necesaria para realizar la medición y la resolución con que se vayan a realizar las mediciones. Estos sistemas de generación son usados para la calibración de magnetómetros basados en sensores que detectan tensiones inducidas.

El medidor de campo magnético se calibrará periódicamente con una frecuencia que depende en parte de la intensidad de su uso (cantidad de mediciones). A continuación describiremos el método de calibración basado en el sistema de bobinas de Helmholtz.

#### **3.4.1 Bobinas de Helmholtz**

Una corriente eléctrica que circula a través de un conductor genera un campo magnético, si la disposición del conductor es en forma de bobina los efectos magnéticos se intensificaran. La descripción anterior se asemeja a la configuración de las bobinas de Helmholtz, que son dos bobinas conectadas en serie, por lo que es necesario medir el valor de la densidad del flujo magnético en el centro de dichas bobinas.

La disposición de bobinas en configuración de Helmholtz Figura 18, consiste en colocar en planos paralelos dos bobinas conectadas en serie pero con arrollamientos opuestos enfrentando los polos norte o sur de cada una de ellas. Además, se procura que la distancia entre las bobinas sea igual al radio de las mismas. Al hacer pasar por ellas una determinada corriente se genera un campo magnético constante entre las bobinas.

Podemos obtener una expresión que describe el campo magnético entre dos bobinas circulares del mismo radio, con un eje común, separadas por una distancia determinada, que este a la mitad de la separación entre las bobinas a partir del análisis realizado al campo magnético en un punto a lo largo de un eje central de una sola bobina, con lo que obtenemos:

$$B_z = \frac{8\mu_0}{5^{3/2}} * \frac{NI}{R} \cong 8,991762 * 10^{-7} * \frac{NI}{R}$$

Dónde:

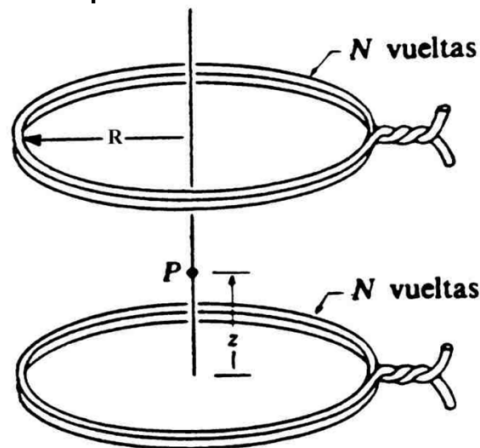
**B:** Campo magnético (Gauss)

**N:** Número de vueltas de la bobina

**I:** Corriente que circula por la bobina (A)

**R:** Radio de la bobina (m)

Figura 18. Disposición de las bobinas de Helmholtz



Fuente: [http://fiuady-lab2.blogspot.com/2011\\_02\\_01\\_archive.html](http://fiuady-lab2.blogspot.com/2011_02_01_archive.html)

El procedimiento para llevar a cabo la calibración como lo estipula la norma<sup>6</sup> usando un sistema bobinas de Helmholtz se desarrolla de la siguiente forma:

1. Se energiza el sistema desde una fuente AC regulable que suministre la corriente necesaria sin sobrepasar los límites de tolerancia de la bobina (una vez diseñado el arreglo), ajustando el nivel de corriente medido con un amperímetro o pinza amperimétrica como en el diagrama en la Figura 19, a un valor tal que se obtenga en el punto medio entre las bobinas un campo magnético constante, de acuerdo a la expresión:

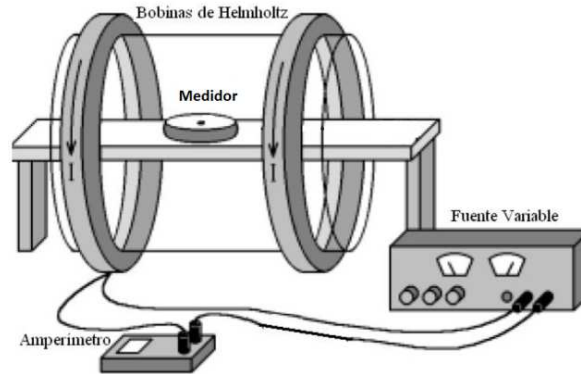
$$B_z = \frac{8\mu_0}{5^{3/2}} * \frac{NI}{R} \cong 8,991762 * 10^{-7} * \frac{NI}{R}$$

Que sería confirmado por un medidor de campo magnético patrón, calibrado y certificado, registrando estos datos como referencia.

<sup>6</sup> ANSI/IEEE Std 644-1987, Cap. 6.3.2. – pag. 19



**Figura 19. Esquema experimental.**

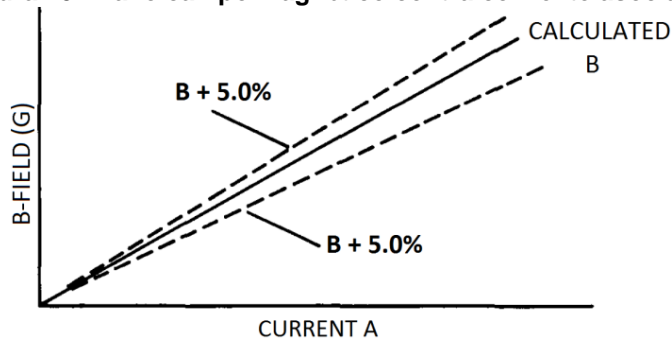


Fuente: [http://www.fisica.ru/dfmg/teacher/archivos\\_lab/Campo\\_magnetico\\_de\\_la\\_tierra\(11\).pdf](http://www.fisica.ru/dfmg/teacher/archivos_lab/Campo_magnetico_de_la_tierra(11).pdf)

Para este caso podemos citar como equipo patrón el medidor de campo magnético de la firma PCE GROUP / PCE-G28, que tiene un rango de medición de hasta 20.000 mG (Figura 15).

2. Después de retirado el equipo patrón se inserta un segundo medidor, que sería el que se verificará, variando la posición de este entre el  $\pm 10^\circ$  con respecto al eje vertical del campo generado entre las bobinas, consiguiendo su máxima lectura, posterior a esto, se registra este valor. Estos procedimientos se realizaran como mínimo 3 veces a diferentes valores de campo, esto es para medidores que sean de pantalla digital, para medidores que tengan pantalla análoga se realizan estas pruebas como mínimo 4 veces.
3. Con los datos registrados del medidor a verificar a diferentes rangos de campo, se realiza una gráfica de campo magnético calculado que sería el valor arrojado por el medidor patrón, contra su respectivo valor de corriente, el valor de campo del medidor a verificar debe estar dentro de un valor correspondiente al  $\pm 5\%$  de las lecturas arrojadas por el medidor patrón como se muestra en la Figura 20.

**Figura 20. Plano campo magnético contra corriente asociada.**



Fuente: Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines - ANSI/IEEE Std 644-1987 – pág. 13.

- Si las respectivas lecturas tomadas por el medidor a verificar están dentro del rango del  $\pm 5\%$  de las del medidor patrón, se puede deducir y soportado por la norma que ese medidor esta en óptimas condiciones para seguir siendo empleado.

### **3.4.2 Detalles constructivos**

Para dimensionar una bobina es preciso fijar para qué experimento será usada. A partir de la ecuación,

$$B_z = \frac{8\mu_0}{5^{3/2}} * \frac{NI}{R} \cong 8,991762 * 10^{-7} * \frac{NI}{R}$$

Se determina el radio R, una corriente I circulante y el número de espiras N necesario. La base sobre la cual las bobinas serán fijadas debe ser de madera o fibra de vidrio.

Las bobinas, en forma de circunferencia pueden ser montadas en estructuras aislante en fibra de vidrio con un perfil de calado tipo U. Esta estructura aislante debe ser seccionada cuando se utiliza corriente alterna CA y si por alguna razón la estructura en U llegue a ser elaborada en aluminio para que de esta manera se

minimicen los efectos de corrientes inducidas, adicionalmente se recomienda que la bobina esté tan lejos de las paredes, pisos y armarios metálicos como sea posible, especialmente cuando se utilizan CA. Otro elemento indispensable para el uso de la bobina es una fuente lo suficientemente estable de CA que permita variar la corriente de alimentación de manera continua.

Teniendo en cuenta que el reglamento de instalaciones eléctricas RETIE<sup>7</sup> dice que los valores de máxima exposición a un campo magnético no debe ser superior a  $5G \cong 500\mu T$ , se procede a diseñar un arreglo de bobinas de Helmholtz que cumpla con este valor máximo de generación de campo B.

Para este diseño se parte de la expresión:

$$B_z = \frac{8\mu_0}{5^{3/2}} * \frac{NI}{R} \cong 8,991762 * 10^{-7} * \frac{NI}{R}$$

Para determinar el número de vueltas de las bobinas se tiene en cuenta que el radio de dichas bobinas de acuerdo a la norma sea de  $R=0,5$  mts, el campo que se generará de base es  $B = 5G \cong 500\mu T$  (RETIE<sup>7</sup>), la corriente que circulará por el conductor de las bobinas se escoge a priori basándose en que los conductores sean de una sección transversal pequeña para no hacer robusto el bobinado, para nuestro diseño se escogió un alambre magneto # 22 AWG a 200°C cuya capacidad de corriente es de 3,2 A, mostrada en la Tabla 2, fácilmente suministrable por una fuente.

---

<sup>7</sup> Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Artículo 14.4 – Pag.58.

**Tabla 2. Corrientes asociadas a alambres tipo magneto.**

Calibre	Alambre Desnudo		Capa Sencilla <sup>(1)</sup>			Capa Doble			Máxima Tensión de Embobinado <sup>(2)</sup>	Resistencia D.C. a 20°C	Capacidad de Corriente <sup>(3)</sup> (A)	
	Diámetro Nominal	Peso Total Aprox.	Mínimo Incremento	Máximo Diámetro	Longitud Aproximada	Mínimo Incremento	Máximo Diámetro	Longitud Aproximada			155°C	200°C
AWG	mm	kg/km	mm	mm	m/kg	mm	mm	m/kg	kg	Ohm/km		
6	4,115	118,23	-	-	-	0,091	4,244	8,4	79,5	1,296	87	131
7	3,665	93,79	-	-	-	0,089	3,787	10,6	63,1	1,634	69	104
20	0,813	4,62	0,030	0,864	213,7	0,061	0,892	211,3	3,10	33,21	3,4	5,1
21	0,724	3,66	0,028	0,770	269,2	0,056	0,800	266,0	2,46	41,88	2,7	4,1
22	0,643	2,89	0,028	0,686	341,1	0,053	0,714	336,7	1,94	53,09	2,1	3,2
23	0,574	2,30	0,025	0,617	427,0	0,051	0,643	421,1	1,55	66,63	1,7	2,6
24	0,511	1,82	0,025	0,551	538,8	0,048	0,577	531,1	1,23	84,07	1,3	2,0

Fuente: [www.centelsa.com.co](http://www.centelsa.com.co)

Luego de esto, se procede a calcular de la expresión anterior la variable N correspondiente al número de vueltas de cada bobina lo cual nos arroja un valor de  $N = 86.885 \cong 87$  vueltas.

Con estas especificaciones se obtiene un arreglo de bobinas de Helmholtz con un radio de 0,5 mts, 87 vueltas, una corriente de 3,2 A, un calibre #22AWG a 200°C logrando un campo aproximado de  $5G \cong 500\mu T$ .

#### **4. CONCLUSIONES**

La construcción de una bobina de Helmholtz y/o un sistema de placas paralelas de bajo costo se puede implementar fácilmente en cualquier institución teniendo en cuenta las necesidades, así mismo se podrá diseñar un equipo calibrador portátil.

A nivel de instrumentación se requiere estabilidad de la señal suministrada por la fuente de voltaje/corriente, siendo necesaria para este caso la implementación de un buen sistema de control.

Es imprescindible que las personas que realicen mediciones electromagnéticas estén familiarizadas con técnicas de medición, así como entender las limitaciones de los instrumentos de medición y la necesidad de calibración de los mismos, teniendo en cuenta que es benéfico calibrar un equipo después de comprarlo, para saber si la medición del equipo está de acuerdo a lo especificado por el fabricante.

Se podría implementar en la UTB un sistema de calibración de medidores de campo electromagnético con fines de aprendizaje académico, teniendo en cuenta que para el campo eléctrico el sistema de calibración estaría conformado globalmente de un par de placas metálicas conductoras totalmente planas, de dimensiones 1,5mts x 1,5mts separadas por una distancia de 0,75mts (según norma IEEE Std 644 – 1987), una fuente estabilizada de tensión AC, accesorios de fijación y soportes en material aislante, dos medidores de campo eléctrico, uno como patrón y otro a calibrar.

Teniendo en cuenta que para el campo magnético el sistema de calibración estaría conformado globalmente de un arreglo de bobinas de Helmholtz de dimensiones 1 mts de diámetro, separadas 0,5 mts, una fuente estabilizada de corriente AC, accesorios de fijación y soportes en material aislante, dos medidores de campo magnético, uno como patrón y otro a calibrar

Es recomendable calibrar los equipos de medición de campos eléctricos y magnéticos ya que al hacerlo se obtienen los siguientes beneficios:

1. Se tiene conocimiento del valor del campo magnético y/o eléctrico RMS real.
2. Confiabilidad de las mediciones a partir de dicha calibración.
3. Después de cierto tiempo de calibrar continuamente el equipo, es posible predecir su comportamiento en el futuro y así alargar sus periodos de calibración.

## 5. REFERENCIAS

- CREG, Comisión de Regulación de Energía y Gas Res. 098-2000
- ELF Electric and Magnetic Field Measurement Methods - Martin Misakian National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899.
- Fundamentos de la teoría Electromagnética – Reitz, Cap. 8 El Campo Magnético de Corrientes Estacionarias, Pag. 199.
- Guillermo Aponte Mayor. Experiencia en la medición de Campos Eléctricos y Magnéticos en redes eléctricas, Grupo de Investigación en Alta Tensión GRALTA, Universidad del Valle, 115 Págs.
- ICNIRP - Guidelines For Limiting Exposure To Time-Varying Electric, Magnetic, And Electromagnetic Fields (Up To 300 Ghz).
- IEEE Std 644 – 1994, IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Field from AC Power Lines.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tesis y otros trabajos de grado. Bogotá: ICONTEC, 2002, NTC 1486.
- MarkusZahn - Teoría de Campos Electromagnéticos, el campo Magnético, pag. 329.
- RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, art. 14.4 - pág. 58.

- [http://www.falstad.com/vector3dm\\_es/indexm\\_es.html](http://www.falstad.com/vector3dm_es/indexm_es.html)
- <http://www.portalelectricos.com/retie/cap2art14.php>
- [www.metas.com.mx](http://www.metas.com.mx), MetAs – Laboratorio de Metrología e Ingeniería.
- <http://www.serviciencia.es/BHdise-i1.htm>
- [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo\\_magnetico/espira/espira.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_magnetico/espira/espira.html)