



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
Departamento de Física  
**Licenciatura en Ciencias Físicas**

Proyecto de Investigación Científica  
Primer Informe

**ESTACIÓN DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DEL CAMPO  
MAGNÉTICO TERRESTRE**

**GUSTAVO EDUARDO MERELES MENESSE**

Orientador: **Prof. Dr. TOMÁS ROLÓN**

SAN LORENZO - PARAGUAY  
MAYO - 2019

## Introducción

Este trabajo consiste en el desarrollo de una estación o pequeño observatorio geomagnético de bajo costo para el monitoreo en tiempo real del campo magnético terrestre. Esto implicará la calibración de los sensores, determinación de la sensibilidad, diseño e implementación de la electrónica de soporte, evaluación de robustez de la estación mediante una prueba de operación en campo, y la validación de los datos mediante comparación de los datos obtenidos con los datos provistos por otras instituciones de referencia regional en el ámbito de Geofísica.

## Planteamiento del problema

El estudio del campo magnético terrestre es un tema de interés para la geofísica, y es además, uno de los aspectos físicos más relevantes al momento de estudiar el clima espacial, en conjunto con la detección de partículas y el monitoreo de la actividad solar. El Paraguay se encuentra en una región donde el campo magnético terrestre presenta una intensidad muy inferior a la media global, esta región conocida como Anomalía del Atlántico Sur (SAA) es de gran interés para el estudio de partículas provenientes del espacio, pues la baja intensidad del campo permite una mayor penetración de las mismas (Underwood, 1990 ;Anderson et. al, 2017).

La escasez de datos geomagnéticos medidos en la superficie terrestre dentro de la región dificulta y limita el estudio del mismo. La razón principal de la ausencia de datos, es el alto costo de la instrumentación necesaria para coleccionarlos, este problema afecta principalmente a los países menos desarrollados, como es el caso del Paraguay.

## Justificación

Actualmente se cuentan con datos de referencia satelitales, modelos de mapas globales (p. ej. el Modelo Magnético Mundial y el Campo de Referencia Geomagnético Mundial), y a nivel regional existen algunos observatorios geomagnéticos en países como Brasil, Argentina, Uruguay, Perú y Chile (Denardini, et al., 2018).

En Paraguay no se cuenta con ningún observatorio geomagnético, por lo que la construcción de una estación como la propuesta permitiría la obtención de datos locales para el estudio de la anomalía en territorio nacional. Además, el trabajo se presenta como una oportunidad para el desarrollo de habilidades respecto a instrumentación y análisis de datos, principalmente para la formación grado de las distintas carreras de la institución. La base de datos a ser obtenida por la estación, podría dar lugar a otros trabajos, como el monitoreo de la actividad solar, o estudios complementarios a trabajos que actualmente ya están siendo llevados en el país, como el caso el monitoreo del flujo de muones (Nuñez, 2018).

## Objetivos

### Objetivo general

Desarrollar una estación de monitoreo del campo magnético terrestre con instrumentación de bajo costo.

### Objetivos específicos

- Determinar la sensibilidad y precisión de un fluxgate magnetometer de bajo costo.
- Diseñar un sistema electrónico de soporte para el sensor utilizando software y hardware libre.
- Validar los datos obtenidos por la estación mediante comparación con datos regionales.
- Determinar la robustez de la estación de monitoreo.

## Marco Teórico

### Observatorios geomagnéticos

A lo largo del globo existen instalaciones avocadas al monitoreo del campo magnético terrestre. Con el objetivo de uniformizar y disponibilizar los datos surgieron distintas redes de observatorios, una de las más importantes es la INTERMAGNET, que cuentan con miembros de todo el globo. En la Figura 1 se presenta un mapa con la ubicación de los distintos observatorios miembros de la INTERMAGNET.

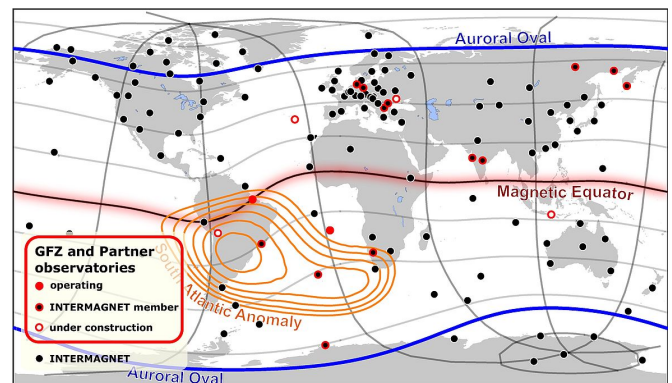


Figura 1: Observatorios miembros de la INTERMAGNET. Fuente: GFZ (2018)

Los observatorios miembros proveen datos a cada minuto sobre el vector campo magnético medido por magnetómetros vectoriales, o en otros casos escalares, con una resolución de 0.1nT. Los requisitos mínimos de la instrumentación para los observatorios miembros son una tasa de muestreo de 1Hz para Magnetómetros vectoriales, estabilidad térmica de 0.25nT/C° y estabilidad de largo termino de 5nT/año. Y en el caso de los magnetómetro escalares, una tasa de muestreo de 0.033Hz y precisión de 1nT (INTERMAGNET, 2019).

### Magnetómetros vectoriales y escalares

Los magnetómetros escalares, como indica el nombre, miden el campo total o magnitud del campo magnético en un punto, mientras los vectoriales miden las 3 componentes del vector en el punto. Los magnetómetros vectoriales tienen generalmente mayor sensibilidad y mayor tasa de muestreo, además suelen ser menores que los escalares. Los escalares, además de menos sensibles, de mayor tamaño y tasa de muestreo menor tienen la única ventaja de que al medir directamente el módulo total del campo poseen menos correcciones necesarias y son menos susceptibles a errores propios de la medición vectorial, por ejemplo no se tiene el problema de error en la ortogonalidad del sensor, problema típico de los vectoriales (Dinale, 2013).

Algunos magnetómetros vectoriales son los magnetómetros Flux-gate, los de Efecto Hall, magnetómetro SQUID (superconducting quantum interference devices), MEMS (micro electro mechanical systems), Magneto-resistivos y los Magneto-ópticos. Los más comúnmente utilizados en observatorios son los fluxgate magnetómetros,

### Magnetómetros Flux-gate

Un magnetómetro Fluxgate es un dispositivo para medir campos magnéticos utilizando la característica magnética no lineal del material de núcleo ferromagnético como elemento de detección (Gopel, et al., 1989; Ripka, 2001), es un dispositivo direccional, que mide el componente del campo paralelo al núcleo magnético. Los magnetómetros de Fluxgate se introdujeron por primera vez en la década de 1930. Algunos desarrollos fueron para levantamientos magnéticos aéreos y para detección de submarinos durante la Segunda Guerra Mundial. Fueron desarrollados para estudios geomagnéticos, para prospección de minerales y para mediciones magnéticas en el espacio exterior. También se han adaptado y desarrollado para diversos dispositivos de detección y vigilancia, tanto para uso civil como militar. A pesar de la llegada de nuevas tecnologías para la medición de campos magnéticos, los magnetómetros fluxgate se siguen utilizando con éxito en todas estas áreas, debido a su confiabilidad, simplicidad relativa y economía. Además, en la industria automotriz, se utilizan como sensores de proximidad para fines de asistencia de estacionamiento (Zorlu, 2008).

El magnetómetro fluxgate básico generalmente consiste en un núcleo ferromagnético dentro de una bobina de excitación y una bobina de captación (Ripka et. al, 2001), como se ve en la Figura 2. Sin embargo, la geometría del núcleo puede diferir de un diseño a otro.

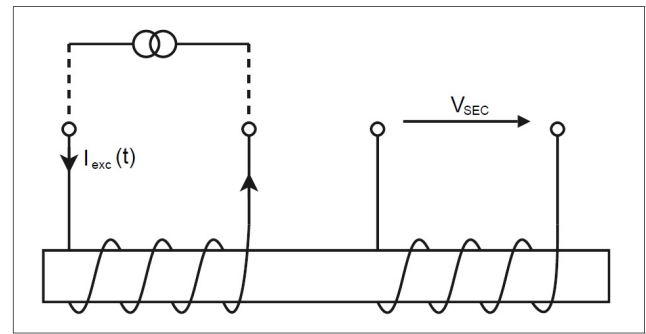


Figura 2: Esquema del magnetómetro fluxgate básico (Forslund; 2006).

Al aplicar una corriente alterna a la bobina de excitación, el núcleo magnético ocurre una saturación magnética positiva y luego negativa, acorde a la señal variable. Los cambios del flujo magnético a través de la bobina de captación dan lugar a un voltaje inducido  $V_{sec}$ . Este voltaje en la bobina de captación puede detectarse, tanto la amplitud cuando la frecuencia de la señal inducida pueden medirse (Forslund; 2006). Un ejemplo de la señal de la bobina de captación se encuentra en la Figura 3.

Sin un campo externo, el flujo magnético en el núcleo dependerá solo del campo creado por la bobina de excitación. El núcleo permanecerá en saturación magnética la mayor parte del tiempo, y las dos direcciones de saturación tomarán partes iguales del período de excitación. Si un componente del campo externo está presente a lo largo del eje central, el tiempo empleado en una de las saturaciones aumentará. Esto conducirá a cambios en el voltaje inducido de la bobina de captación, vea la Figura 3. Este cambio se puede detectar y, a partir del tamaño del cambio, se puede derivar la densidad de flujo de campo externo (Forslund; 2006).

Para cancelar la señal generada por la bobina de excitación, se puede agregar un núcleo adicional dentro de la bobina de captación con un devanado de excitación en la dirección opuesta a la primera, como se ve en la Figura 4. Para garantizar que ambas bobinas son accionadas por la misma corriente las bobinas son conectadas en serie.

Las bobinas se enrollan en dirección opuesta y, por lo tanto, generan campos magnéticos de dirección opuesta en los núcleos. En ausencia de un campo magnético externo, los flujos magnéticos de los núcleos opuestos se cancelarán entre sí exactamente (ver Figura 5) y no se inducirá voltaje en la bobina de captación.

Si hay un campo externo, la señal de activación surgirá debido a los cambios relativos de los cambios de flujo en cada núcleo (ver Figura 6). La señal medida en la bobina de captación estará dominada por el segundo armónico de la frecuencia de excitación y contendrá armónicos más altos.

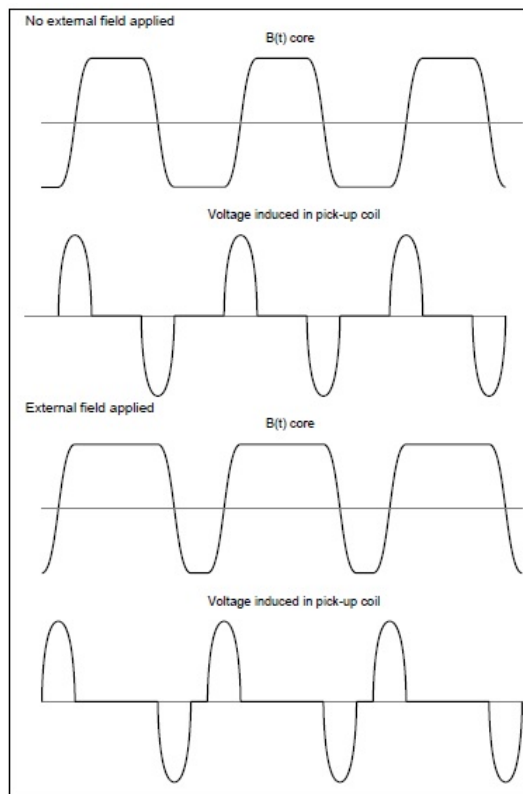


Figura 3: Esquema de la señal de la bobina de recogida (Forslund; 2006).

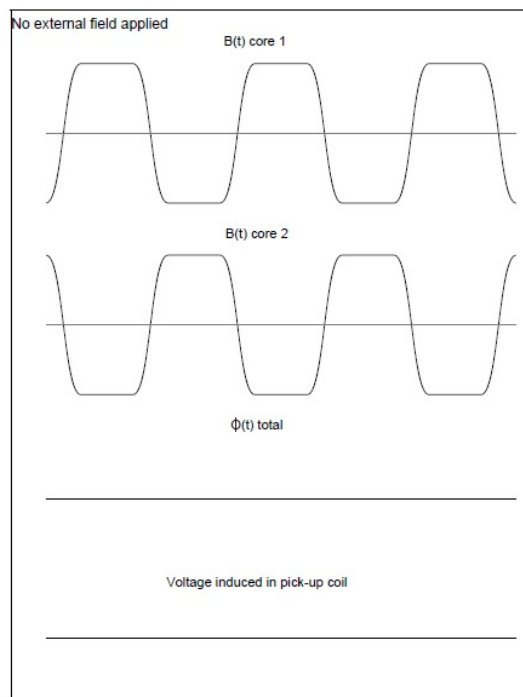


Figura 5: Esquema de la señal de salida de la bobina de captación del magnetómetro de doble varilla sin campo externo aplicado (Forslund; 2006).

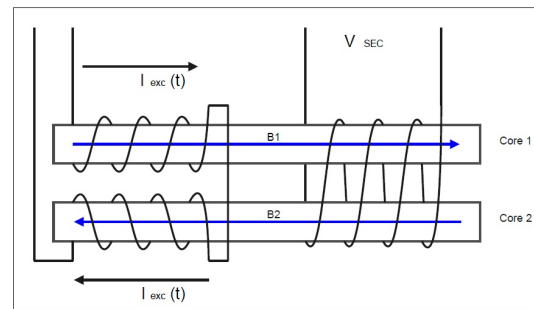


Figura 4: Esquema de compensación por el campo de excitación (Forslund; 2006).

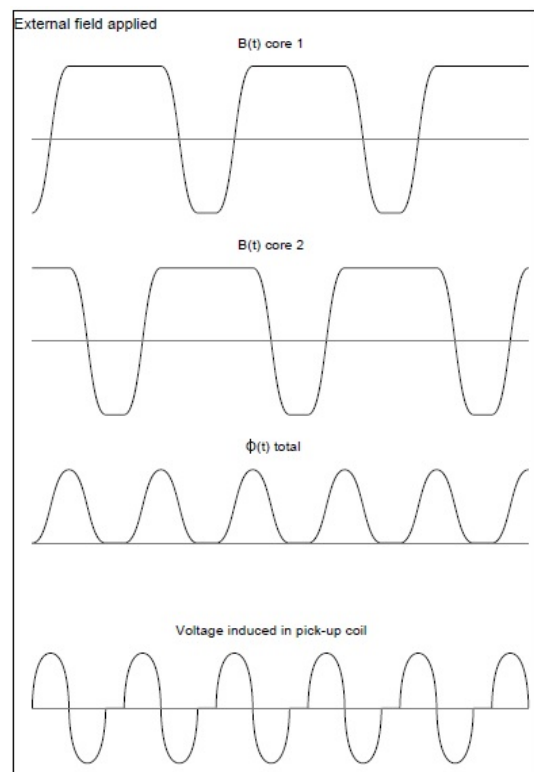


Figura 6: Esquema de la señal de salida de la bobina de captación del magnetómetro de doble varilla con un campo externo aplicado. (Forslund; 2006).

## Metodología (Etapas del desarrollo)

El desarrollo de la estación se llevará a cabo en diferentes etapas.

Estas son:

- 1) Selección y adquisición de sensores: la selección de los sensores tendrá como criterio tanto en el costo de los sensores como las especificaciones y funcionalidades.
- 2) Determinación de la sensibilidad y calibración de sensores.
- 3) Diseño e implementación de electrónica de soporte:
  - Selección de microcontrolador, modulo de transmisión de datos , controlador de carga de baterías.
  - Ensayo de consumo energético del sistema para dimensionamiento de la unidad de almacenamiento de energía y fuente de energía
  - Programación de la electrónica y ensayos de funcionamiento.
  - Test de alcance de la unidad de transmisión de datos.
- 4) Montaje del prototipo final e instalación en campo.
  - Elección del punto de instalación siguiendo recomendaciones para observatorios geomagnéticos, distancia a fuentes de ruido, profundidad de instalación, accesibilidad, etc.
- 5) Puesta en marcha de la estación y colecta de datos por 2 meses.
- 6) Preparación de base de datos y comparación de datos.
- 7) Evaluación de robustez (estado de conservación de los distintos componentes, número y tipos de averías ocurridas, calidad de los datos en el tiempo de operación)

## Primeros avances

### Selección de componentes

Siguiendo los criterios costo y especificaciones, se optó por el magnetómetro fluxgate FG-3, modelo sustituto al FGM-X de la empresa FGSensors,

Los dispositivos de la serie FGM-X son sensores de campo magnético de alta sensibilidad que operan en el rango de  $\pm 50$  microtesla ( $\pm 0,5$  oersted). Operan con una tensión de alimentación de +5 voltios y consumo típico de 12mA. Posee 3 pines, estos son alimentación, tierra y la salida de respuesta. En su salida el sensor provee un

pulso rectangular robusto de 5 voltios cuyo período es directamente proporcional a la intensidad de campo en el eje del sensor, lo que simplifica el análisis pues no requiere de ningún sistema de amplificación, únicamente un contador de pulsos suficientemente robusto, fácilmente implementable con microcontroladores de bajo costo actuales. El período típico de oscilación para el rango completo de un FGM-3 es de  $8,5 \mu s$  a  $25 \mu s$  (120 KHz a 50 KHz) (Sensores fg, s.f).

En la siguiente tabla se dan las especificaciones del sensor fluxgate FG-3 seleccionado.

Tabla 1: Especificaciones del sensor FGM-3, modelo anterior al FG-3

Especificaciones de fabrica de los sensores FGM-X	
Voltaje máximo de alimentación	7 volts
Voltaje de alimentación recomendada	$5 \pm 0,5$ volts
Corriente de alimentación típica	12 mA
Rango de temperatura de funcionamiento	0 - 50°C

El costo actual del magnetómetro fluxgate FG-3 es de 34 euros, siendo necesarios la adquisición de 3 sensores para el montaje de un magnetómetro vectorial, totalizando 102 euros, monto accesible y muy inferior al costo de magnetómetros de gamma media o alta que pueden superar fácilmente los 1500 euros. Estos dispositivos no existen en el mercado local, por lo que se realizaron compras online.



Figura 7: El sensor fluxgate FG-3+ tiene una forma cilíndrica con las siguientes dimensiones físicas: 62mm de largo y 16 mm de diametro.

El microcontrolador seleccionado para la etapa de calibración, determinación de sensibilidad y demás ensayos es el Arduino Mega. La plataforma Arduino es una de las más populares entre los microcontroladores de fácil uso. El Arduino Mega utiliza un procesador AT-mega2560, equipado con 54 pines digitales, 16 conversores analógico digitales, 4 puertas seriales, cristal oscilador de 16MHz, entre otros aspectos. La arquitectura del procesador de 8-bit capaz de trabajar por encima de los 16 millones de operaciones por segundo. Estas características hacen de este microcontrolador más que suficiente para los requerimientos de la primera etapa del proyecto y además está disponible en el mercado local.





Figura 8: Montaje experimental para las primeras pruebas del sensor seleccionado

### Primeros ensayos

Una vez adquirido el sensor, se realizaron las primeras pruebas para corroboración del correcto funcionamiento, estas pruebas consistieron en la lectura de la señal de salida del dispositivo mediante un osciloscopio al aplicar un campo magnético mediante una bobina solenoidal. Se varió el campo entre -0.5 y 0.5 oersted para comprobación de la respuesta en frecuencia del sensor. Las mediciones indicaron un funcionamiento acorde a las especificaciones del fabricante.

### Resultados esperados

Se espera obtener una estación de bajo costo funcional, apta para el trabajo en campo y de fácil mantenimiento cuyos datos sean válidos para el monitoreo geomagnético, esto implica una instrumentación con sensibilidad y precisión suficientes. Un esquema preliminar de la estación se presenta en la Figura 8.

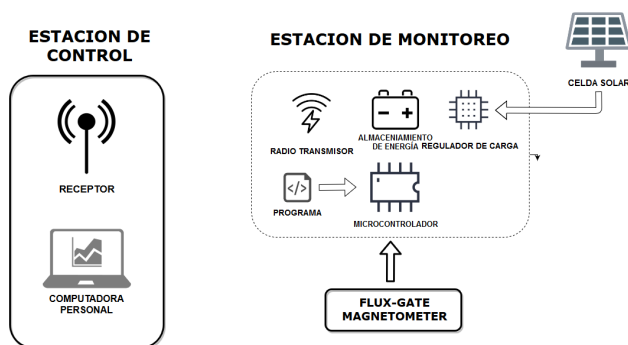


Figura 9: Esquema preliminar de los distintos componentes que conformarán la estación.

### Bibliografía

C. M. Denardini, et al., *The Embrace Magnetometer Network for South America: Network Description and Its Qualification*, <https://doi.org/10.1002/2017RS006477>, 2018.

Sensores FG. s.f. *Fluxgate magnetometer sensors*, FGM sensors documentation; <https://www.fgsensors.com/documentation>, consultado el 29/11/2018 a las 10:01 hs

Hartmann, G., Pacca, I.; *Time evolution of the South Atlantic magnetic anomaly*; An. Acad. Bras. Ciênc.81, 2009.

Jesús Nuñez. 2018. *Distribución angular de muones en la superficie terrestre*, Tesis de grado. San Lorenzo, PY.

João Domingos, et al.; *The South Atlantic Anomaly throughout the solar cycle*; 2017.

Anderson, P.C. Rich, F.J. Borisov, S. 2017 *Mapping the South Atlantic Anomaly continuously over 27 years*.

Underwood, C.I., 1990. *In-orbit radiation effects monitoring on the UoSAT satellites*.

Marco Marchesi; *Fluxgate Magnetic Sensor System for Electronic Compass*, Università Degli Studi di Pavia, Facoltà di Ingegneria; Ciclo XVIII.

W. Gopel, J. Hesse, J.N. Zemel. 1989. *SENSORS: A Comprehensive Survey*, Volume 5: Magnetic Sensors.

Ripka, P. 2001. *Magnetic Sensors and magnetometers*; Artech House Boston, London, UK.

British Geological Survey (BGS); *El campo magnético de la Tierra: una visión general*; <http://www.geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>, consultado el 12/03/2019 a las 23:59 hs.

Forslund, Åke. 2006. *Designing a Miniaturized Fluxgate Magnetometer*;

Dinale, J. 2013. *Magnetic test facility- Sensor and coil calibrations*. Tesis. University of Adelaide. AUS. 226p

Özge Zorlu. 2018. *Orthogonal Fluxgate type magnetic microsensors with wide linear operation range*; Ecole Polytechnique de Lausanne;

German Research Centre for Geosciences (GFZ). 2018. *Geomagnetic observatories [en línea]*. Consultado el 20 de may. de 2019. Disponible en: <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geomagnetism/infrastructure/geomagnetic-observatories/>

INTERMAGNET. 2019. *Magnetic Observatories IMOs*. Consultado el 20 de may. 2019. Disponible en: <http://www.intermag.net.org/imos/magobs-eng.php>