



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

Proyecto de Investigación Científica  
Segundo 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

## 1 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.

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).

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). No obstante, en Paraguay no se cuenta con ningún observatorio geomagnético, ni siquiera con una estación, 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).

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo general

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

### 2.2 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.

## 3 Avances en el desarrollo de la estación

El desarrollo de la estación se está llevando 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)

### 3.1 Selección de componentes

Esta etapa ya fue concluida y los detalles presentados en el informe anterior. En el Cuadro 1 se detalla un breve resumen de los componentes seleccionados.

### 3.2 Determinación de la sensibilidad y calibración de sensores

Para la determinación de sensibilidad y la calibración de los sensores se requiere un magnetómetro de referencia, debido al elevado costo de dicho instrumento, no es asequible para el grupo de trabajo. La solución encontrada consiste en modelar el campo magnético generado por una bobina de geometría conocida, y mediante este modelo teórico estimar el campo generado en el interior de una bobina en la cuál es introducido el sensor, y de esta manera obtener la función que mapea el periodo de la señal cuadrada dada por el sensor con la intensidad del campo magnético

La bobina utilizada para el montaje es una bobina solenoidal de 40 cm de largo y 2.54 cm de radio, fabricada por la empresa Jeulin, perteneciente a un antiguo kit de electricidad y magnetismo de la misma empresa, perteneciente al laboratorio de física. Esta bobina fue blindada con una hoja de mu-metal, aleación con alta permeabilidad magnética utilizada para blindaje de campos electromagnéticos de baja frecuencia, como es el caso del campo magnético terrestre y los campos generados por equipos electromecánicos y la red de distribución eléctrica. Según fabricante su composición es 80 % Níquel, 5 % Molibdeno, 15 % Hierro.

#### 3.2.1 Modelamiento del campo generado por una bobina helicoidal finita

El modelo se realizó mediante aplicación directa de la Ley de Biosavart para el campo magnético generado por una corriente sobre una curva helicoidal con la geometría de la bobina seleccionada para el montaje. La integral de línea que describe el campo magnético en cualquier punto  $P(R, \theta, \phi)$ , es

$$\begin{aligned} & I\mu_0 \int_{-200\pi}^{200\pi} \left( -\frac{4\pi^2(R(a\phi-2\pi z)\cos(\phi)-a(R\sin(\phi)-y))}{((a\phi-2\pi z)^2+4\pi^2((-R\sin(\phi)+y)^2+(-R\cos(\phi)+x)^2))^{\frac{3}{2}}} \right) d\phi \hat{\mathbf{i}}_N \\ & + \left( \frac{I\mu_0}{-200\pi} \int_{-200\pi}^{200\pi} \left( -\frac{4\pi^2(R(a\phi-2\pi z)\sin(\phi)+a(R\cos(\phi)-x))}{((a\phi-2\pi z)^2+4\pi^2((-R\sin(\phi)+y)^2+(-R\cos(\phi)+x)^2))^{\frac{3}{2}}} \right) d\phi \right) \hat{\mathbf{j}}_N \\ & + \left( \frac{I\mu_0}{-200\pi} \int_{-200\pi}^{200\pi} \left( -\frac{8\pi^3 R(-R+x\cos(\phi)+y\sin(\phi))}{((a\phi-2\pi z)^2+4\pi^2((-R\sin(\phi)+y)^2+(-R\cos(\phi)+x)^2))^{\frac{3}{2}}} \right) d\phi \right) \hat{\mathbf{k}}_N \end{aligned}$$

La misma fue resuelta por integración numérica mediante utilizando la función de integración numérica del modulo scipy, se utilizó el método de cuadratura de Gauss, con un error numérico en la integración inferior a  $10^{-18}T$ . En la Figura 1 se muestra el gráfico campo vectorial resultante de la simulación cuando se tiene una corriente de  $50\mu A$ .

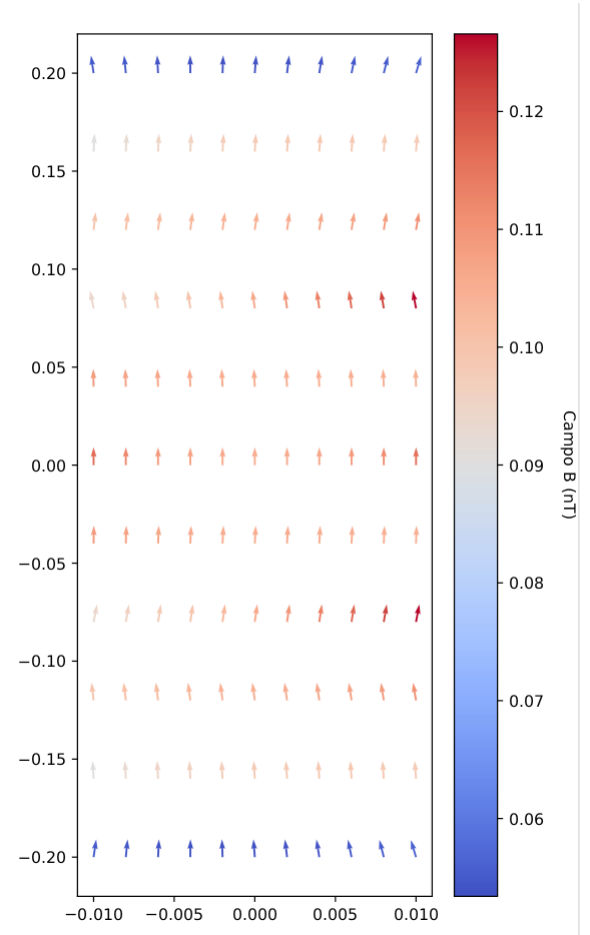


Figura 1: Corte axial del modelado del campo vectorial en el interior de la bobina, región de interés 0.4 m x 0.02 m en el interior de la bobina. Fuente: elaboración propia

#### 3.2.2 Obtención de curva de calibración

Para la realización de la curva que relacione la frecuencia de salida de la señal dada por el sensor con la intensidad del campo que actúa sobre el mismo, se planteó el montaje que se observa en la Figura 2. El montaje consiste en dos sensores, uno ubicado en el interior de la bobina y otro en el exterior a 20cm, la bobina fue parcialmente blindada con una lámina de 0.5mm de blindaje magnético, y orientada en sentido Este a Oeste buscando minimizar el efecto del campo magnético terrestre durante la calibración.

Se alimentó la bobina con una fuente de precisión de 5 voltios DC, se reguló la corriente con potenciómetro de  $5k\Omega$  de 10 vueltas puesto en serie con la bobina y una resistencia  $50\Omega$  se protección también puesta en serie. La corriente se varió de  $0.4\mu A$  a  $80mA$ , lo que según el modelo genera un campo de  $0.1nT$  a  $50000nT$ . Además se realizó la medición del cero para obtener el denominado offset.

Para medir el periodo de la señal de salida del sensor, se utilizó una placa Arduino Mega, programada para realizar el conteo del número de pulsos recibidos por segundo. La corriente se midió mediante un amperímetro en la escala de  $\mu A$  con una resolución de  $0.1\mu A$  y precisión

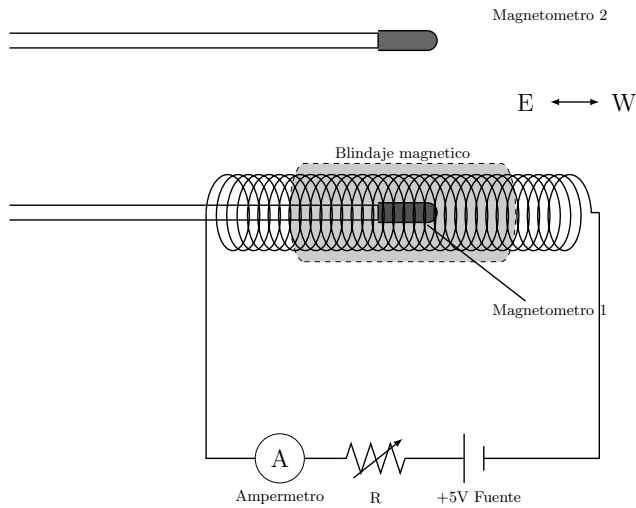


Figura 2: Montaje experimental para la obtención de la curva de calibración. Fuente: elaboración propia

instrumental de  $\pm 0,0015\mu A$  según especificaciones del fabricante.

El procedimiento de obtención de la curva se resume en los siguientes pasos, primeramente alimentar la bobina con una corriente determinada regulando el potenciómetro, se registra la misma, luego se realiza la toma de datos por 1 min, 60 datos de periodo, se tomaron datos a espaciamientos regulares de frecuencia de 0 a 80mA, luego se invirtió la dirección de corriente para obtener la lectura de intensidad de campo en el sentido inverso. Los periodos de la señal estuvieron contenidos en el intervalo de aproximado de  $[8\mu s, 25\mu s]$  como se esperaba según especificaciones del fabricante. Además se realizaron al mismo tiempo lecturas de la señal del sensor instalado fuera del sistema, que luego se utilizó para restar el campo magnético del fondo y obtener de manera aislada el periodo correspondiente al campo creado en el interior de la bobina.

El procedimiento para el aislamiento del campo interno creado en la bobina, asumió una relación lineal entre el periodo de la señal y la intensidad del campo. Primeramente se define razonablemente que el periodo de la señal dada por los sensores sin la presencia del campo magnético creado por la bobina es, esto se indica usando el subíndice 0,

$$X_e = X_T + X_{zero} \quad (1)$$

$$X_{i0} = X_T + X_{zero} - X_b \quad (2)$$

Donde  $X_e$  es el periodo dado por el sensor instalado fuera de la bobina,  $X_i$  es el periodo dado por el sensor instalado dentro de la bobina,  $X_{zero}$  es el offset o valor del periodo cuando el campo es nulo y  $X_b$  es la diferencia entre los periodos de la bobina externa e interna debido al blindaje magnético. Por diferencia entre la primera y

segunda ecuación se tiene que  $X_b = X_{e0} - X_{i0}$ .

Cuando existe un campo creado por la bobina, el periodo del sensor interno pasa a ser

$$X_i = X_T + X_{zero} + X_c + X_b \quad (3)$$

Donde  $X_c$  es el periodo correspondiente al campo creado internamente. El sensor externo no se debería ver alterado por la aparición de un campo en el interior de la bobina luego sigue siendo válida la primera expresión. Restando la ecuación (1) de la ecuación (3) se obtiene el valor del periodo  $X_c$  que finalmente será correlacionado con la intensidad de campo magnético sobre el sensor.  $X_c = X_i - X_e + X_b$ .

La toma de datos fue parcialmente automatizada mediante un script hecho en lenguaje Python para obtención de datos del Arduino mediante comunicación por puerto serial y almacenar los datos en un archivo csv. Todo el análisis estadístico posterior, entre ellos la obtención de los parámetros estadísticos descriptivos media, desviación, varianza, coeficiente de variación, como el ajuste de la curva, fueron implementados en Python utilizando los módulos Numpy, SciPy y Pandas.

Los primeros resultados indicaron un comportamiento no lineal del sensor con el campo magnético, además de una variación todavía grande entre curvas obtenidas para un mismo sensor, no obstante, en los puntos medidos para la obtención de cada una de las curvas, la desviación del dato medio es pequeña, recordando que cada punto consisten en el valor medio de 60 datos, el coeficiente de variación fue en todos los casos inferior a 0,1%, por lo que la diferencia entre las curvas de un mismo sensor no se deben a la incertidumbre de los propios datos, sino a algún aspecto que no está siendo considerado al momento de obtención de las curvas. La curvas no fueron obtenidas en un mismo día, luego las condiciones del entorno pueden estar ocasionando las diferencia, todavía se desconoce el efecto de la temperatura sobre la operación del sensor seleccionado.

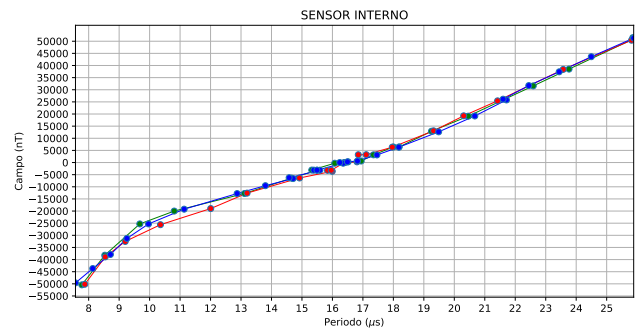


Figura 3: 3 curvas de calibración para un mismo sensor Fluxgate FG-3. Fuente: elaboración propia

La diferencia media entre las curvas supera los 700nT, por lo que no se considera todavía adecuada para obtener el campo magnético con la precisión deseada, inferior a

los 10nT. El ajuste de de curva fue calculado dividiendo el dominio en dos partes, ambas con ajuste cuadrático, una de  $7\ \mu$  a  $12\ \mu$ s y la otra de  $12\ \mu$ s a  $26\ \mu$ s. Se logra un ajuste con coeficiente de determinación  $R^2$  superior al 98 % en las curvas individuales, no obstante al tomar los datos de todas las curvas juntas el ajuste es más pobre  $< 97\%$ . No se discute a detalle este aspecto, pues el hecho de que exista una diferencia de más de 700nT entre curvas en algunos puntos, nos lleva a buscar mejorar el montaje experimental y volver a llevar a cabo el trabajo de obtención de las curvas. En la figura 5 se presenta una fotografía del montaje utilizado.

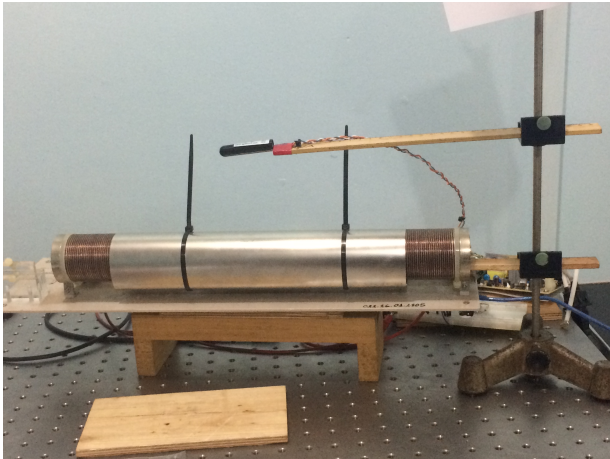


Figura 4: Fotografía del montaje experimental para obtención de la curva de calibración. Fuente: elaboración propia

### 3.3 Determinación de sensibilidad

Para la determinación de la sensibilidad del sensor se estableció una metodología propia, desarrollada por el equipo de investigación. La misma consistió en someter el sensor a un campo magnético variable de amplitud y frecuencia conocida, realizando una exposición prolongada del sensor al campo variable para luego, mediante aplicación de transformada de Fourier, realizar el análisis de la señal del sensor en el dominio de frecuencia y observar si ocurre la detección del campo variable artificialmente creado.

Su utilizó la misma bobina descrita anteriormente. El campo variable fue creado controlando el paso de corriente sobre la bobina mediante un transistor de BJT controlado por Arduino. El sistema diseñado es sencillo, consiste apenas en un utilizar un transistor como interruptor para crear una señal cuadrada de baja frecuencia en la bobina. Se realizó una medición de prueba del sistema utilizando una frecuencia de 0.125Hz, iniciándose con amplitudes de 1000nT, y luego reduciéndolas hasta un límite de detección del campo variable en el sensor. Al mismo tiempo, se tomaron datos con el sensor externo.

Los resultados fueron positivos, pues se muestra que

inclusivo con el ruido externo, el sensor fue capaz de detectar el campo variable de amplitud inferior a 1 nT. En las Figuras 5 y 6 se muestran los datos del periodo de la señal de salida de los sensores durante más de una hora de medición, donde el sensor interno está sometido a un campo variable de 0.125Hz y una amplitud de 0.6nT.

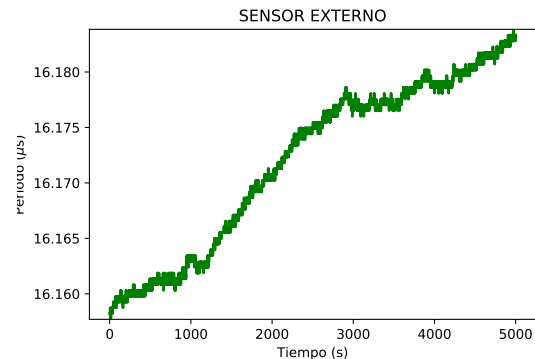


Figura 5: Datos de periodo de la señal de salida del magnetómetro fluxgate FG-3 externo obtenidos durante 5000 segundos de medición. Fuente: elaboración propia

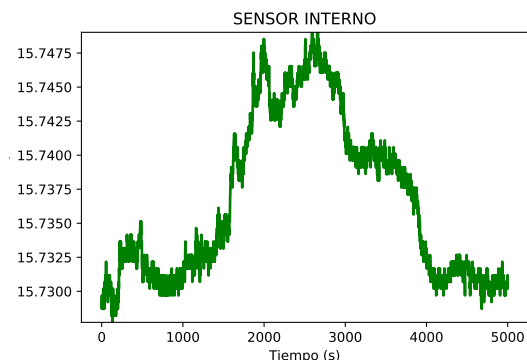


Figura 6: Datos de periodo de la señal de salida del magnetómetro fluxgate FG-3 interno obtenidos durante 5000 segundos de medición. Fuente: elaboración propia

Al pasar al dominio de frecuencia se obtiene los resultados mostrados en las Figuras 7 y 8. Se observa claramente la aparición de una señal de amplitud  $0.0002\ \mu$ s (medida en periodo de la señal de salida del sensor) a una frecuencia de 0.125Hz, que aparece únicamente en el sensor interno, y corresponde al campo variable de 0.6nT creado por la bobina. Más pruebas a distintas frecuencias serán realizadas una vez obtenida la curva de calibración adecuada.

### 3.4 Reunión con especialista en Clima Espacial y monitoreo Geomagnético en la Facultad de Ingeniería

El 03 de octubre del corriente año, se realizó una reunión con un especialista en Clima Espacial gracias a la colaboración del grupo de investigación de clima espacial, grupo actualmente en formación en el laboratorio de Mecánica y Energía de la Facultad de Ingeniería



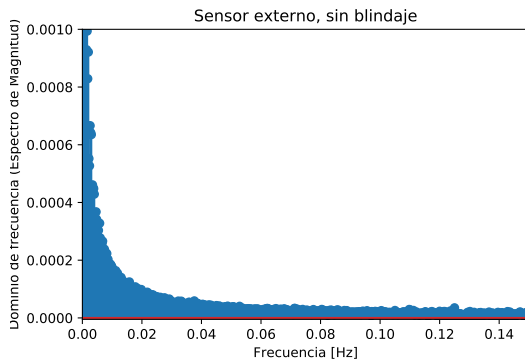


Figura 7: Datos de periodo de la señal de salida del magnetómetro fluxgate FG-3 externo obtenidos durante 5000 segundos de medición en el dominio de frecuencias. Fuente: elaboración propia

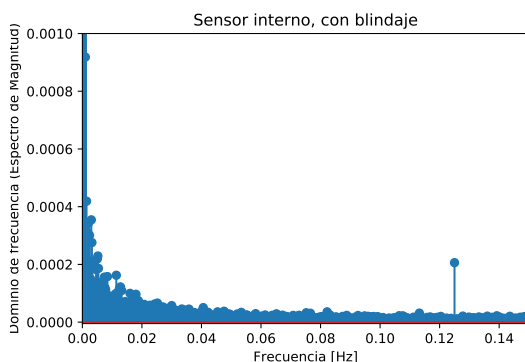


Figura 8: Datos de periodo de la señal de salida del magnetómetro fluxgate FG-3 interno obtenidos durante 5000 segundos de medición en el dominio de frecuencias. Fuente: elaboración propia

de la UNA, dirigido por el Dr. Jorge Molinas de la misma Institución. El Dr. Clesio Denardini es director de la Red de Estaciones Geomagnéticas MAGNET de Brasil, red que actualmente cuenta con estaciones de monitoreo geomagnético asociadas en varios países de Sudamérica, entre ellos Argentina y Uruguay. El Dr. Denardini realizó importantes acotaciones sobre los cuidados a tener en cuenta al momento de realizar el trabajo de calibración de magnetómetros fluxgate y otras consideraciones importantes al momento de seleccionar el lugar de instalación de la estación. Entre las acotaciones, la principal y más relevante para el trabajo de desarrollo actual, es el hecho de que se recomienda realizar las operaciones con el sensor aislando el mismo de cualquier objeto ferromagnético en un radio de al menos 30 metros, lo que evidencia un problema crítico de toda la metodología planteada en el proyecto hasta ahora.

Como resultado de esta reunión, se requirió realizar un rediseño de la metodología de calibración del sensor. El aspecto más importante es el hecho de que deberá realizarse el trabajo en campo abierto, alejado de cualquier fuente potencial de ruido magnético, incluyendo los

propios investigadores y los equipos electrónicos para la toma de datos. Esto plantea un desafío importante, se propone como primera medida, la utilización de un cable blindado de 6 núcleos, de 30 metros de longitud, para separar la electrónica del sensor mismo.

### 3.5 Otros avances

Fue diseñada e impresa mediante impresión 3D un primer soporte para el montaje de un magnetómetro triaxial, recordando que cada magnetómetro mide principalmente la componente del campo que actúa sobre su eje, es necesario 3 magnetómetros de este tipo para obtener un magnetómetro de tipo vectorial. El resultado del primer diseño se observa en la Figura 9.



Figura 9: Soporte para montaje del magnetómetro triaxial. Fuente: elaboración propia

Otro avance importante es el diseño e implementación del sistema de alimentación autónoma de la estación, éste consiste en una celda solar de 10W y 12V, una placa de MPPT para el control de carga de una batería de ión Litio de 3.7V de 5000 mAh, un elevador de tensión de 3.3 a 5V para alimentar el sistema a partir de la batería. Las primeras pruebas de consumo del sistema muestran un consumo de 0.6mA, lo que daría una autonomía de poco más de 2 horas a la estación, claramente insuficiente. Se requiere optimizar la eficiencia del sistema y si necesario, aumentar la capacidad de la batería.



Figura 10: Medición preliminar del consumo del sistema

Se realizaron pruebas en campo utilizando el sistema de alimentación autónoma, buscando observar una

reducción del ruido y un incremento en la estabilidad de la señal medida, un pequeño registro fotográfico de este primer trabajo de campo se muestra en la Figura 11. Los resultados de esta prueba fueron positivos, pues aun cuando no se incluyó el aislamiento en un radio de 30 metros, la componente horizontal del campo magnético medido presentaba una variación menor a 40nT en 30 min de medición, recordando que la variación diaria del campo terrestre debido al ciclo diurno está en torno a los 40nT.

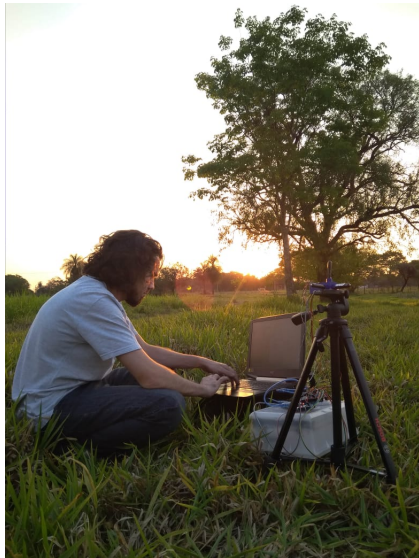


Figura 11: Pequeña prueba realizada en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Veterinarias.

## Bibliografía

Denardini, C. M., Chen, S. S., Resende, L. C. A., Moro, J., Bilibio, A. V., Fagundes, P. R., Bertolotto, T. O. (2018). The Embrace Magnetometer Network for South America: Network Description and Its Qualification. *Radio Science*, 53(3), 288–302.  
<https://doi.org/10.1002/2017RS006477>

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.

Domingos, J,. 2017. *The South Atlantic Anomaly throughout the solar cycle*

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.*

Marchesi, M. s.f. *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.intermagnet.org/imos/magobs-eng.php>