



Diseño e Implementación de una Estación Geomagnética de Bajo Costo

Christian Florencio Paniagua Quintana^a, Prof. Dr. Diego Stalder^b, Prof. Dr. Jorge Molinas^b, MSc. Tomás Rolón^b

^aAlumno, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay

^bAsesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay

PALABRAS CLAVE

CAMPO
GEOMAGNÉTICO
MAGNETÓMETRO
SENSORES FLUXGATE
CLIMA ESPACIAL
RASPBERRY PI
ADC

KEYWORDS

GEOMAGNETIC FIELD
MAGNETOMETER
FLUXGATE SENSORS
SPACE WEATHER
RASPBERRY PI
ADC

RESUMEN

El campo geomagnético es la defensa natural de la Tierra que nos protege de los rayos cósmicos procedentes del viento solar. Estas partículas energéticas pueden dañar nuestra tecnología, como satélites de comunicaciones, redes eléctricas, hidroeléctricas y sistemas de navegación GPS, especialmente en la Anomalía del Atlántico Sur (SAMA). Este trabajo presenta el diseño e implementación de una estación geomagnética de bajo coste para monitorizar las variaciones del campo magnético terrestre y sus correlaciones con la meteorología espacial. La estación utiliza dispositivos electrónicos comerciales como una Raspberry pi, convertidores analógico-digitales de alta precisión y sensores fluxgate triaxiales. El sistema de hardware y el software permiten registrar automáticamente los datos de los sensores. Los resultados preliminares permitieron medir variaciones correlacionadas con la estación geomagnética brasileña de Medianeira.

ABSTRACT

The geomagnetic field is the earth's natural defense that protects us from the cosmic rays coming in the solar wind. These energetic particles can damage our technology such as communication satellites, electric networks, hydroelectric and GPS navigation systems, especially in the South Atlantic Anomaly (SAMA). This work presents the design and implementation of a low-cost geomagnetic station to monitor the earth's magnetic field variations and their correlations with space weather. The station uses Commercial Off-The-Shelf electronic devices such as a Raspberry pi, high-precision analog-digital converters, and triaxial fluxgate sensors. The hardware system and the software allow the logging sensor's data automatically. Preliminary results allowed us to measure variations correlated with Brazil's geomagnetic station in Medianeira.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y monitoreo del campo magnético terrestre en el Paraguay es una necesidad, debido a que el país está justo en el centro de la denominada Anomalía Magnética del Atlántico Sur (SAMA del inglés), donde los valores del campo magnético terrestre se apartan considerablemente de los valores normales para estas latitudes según la aproximación del campo geomagnético dipolar.

La Fig. 1 muestra los valores del campo magnético medidos a través del Modelo Magnético Mundial (WMM del inglés), que es un producto conjunto de la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos y el Centro Geográfico de Defensa del Reino Unido [1].

Los efectos que esta anomalía magnética pueden presentar en distintos ámbitos de la vida humana son desconocidos y han sido poco estudiados hasta el momento. Se conoce, por ejemplo, que en esta región la precipitación de partículas energéticas causan problemas en los satélites, por lo que estos se deben apagar al cruzar la región; sin embargo, existen pocas mediciones para cuantificar los posibles efectos de los rayos UV y el nivel de ozono en la troposfera en todo momento, y,

sobre todo, ante la presencia de tormentas solares. Si bien ya se tiene conocimiento de los daños causados a la salud por los rayos UV, no se sabe si estos aumentan o disminuyen con dichas tormentas.

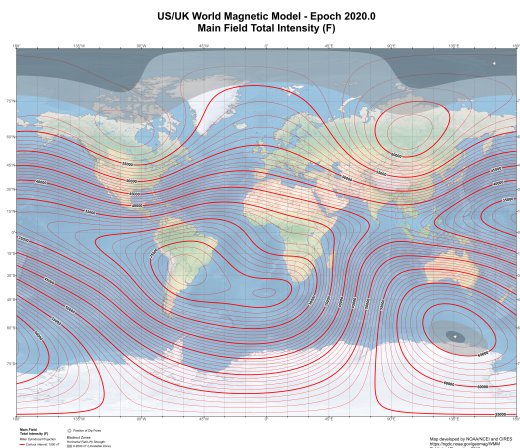


Fig. 1: Mapa mundial con los valores totales de los campos magnéticos medidos por WMM. **Fuente:** [1]

Tampoco se conoce en profundidad los efectos causados por la anomalía magnética sobre las infraestructuras, aunque varios estudios indican que existen corrientes inducidas geomagnéticamente [2] que pueden dañar severamente la red de transporte y distribución de la energía eléctrica en tiempos normales, así como durante las tormentas solares.

Existen institutos y observatorios en todo el mundo dedicados al estudio y monitoreo del campo magnético, entre los cuales se encuentran países latinoamericanos como Brasil, Argentina, Colombia y Perú.

En Paraguay todavía no existe un observatorio para medir el campo magnético terrestre, por lo que el Laboratorio de Mecánica y Energía (LME) de la FIUNA a través de este trabajo comenzará a monitorear esta magnitud, donde, para la medición y recolección de datos del campo geomagnético, se desarrolla un sistema electrónico utilizando un magnetómetro tipo fluxgate. El sistema de detección instalado consta de un magnetómetro que deberá ser calibrado y acondicionado (a fin de eliminar el ruido generado de forma externa), Sistema de Posicionamiento Global (GPS, su sigla en inglés) para saber la fecha y hora exacta de la medición del sensor, y un dispositivo electrónico capaz de guardar los datos medidos por el magnetómetro. Este trabajo complementará al estudio de otras variables del "clima espacial", que el LME está estudiando a través de la detección de rayos cósmicos y del monitoreo de las condiciones de propagación de las ondas de baja frecuencia en la ionósfera.

Se ha hecho uso de investigaciones previas relacionadas con el proyecto, entre las cuales se destacan:

- En [2], el autor emplea tanto hardware como software libre, junto con conceptos contemporáneos como el Internet de las Cosas (IoT), para lograr una monitorización geomagnética altamente precisa y exacta.
- En [3], los autores desarrollaron la tesis de un sistema magnetómetro asistido por computadora denominado COLMAGNET, que captura los valores de intensidad y monitoriza el campo magnético terrestre.
- Los investigadores del Reino Unido, según [4], construyeron diez sistemas magnetómetros de bajo costo instalados en escuelas con el objetivo de fomentar el interés en la geofísica.
- Los investigadores de la red EMBRACE [5], describen y muestran los primeros resultados obtenidos en la red.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Diseñar e implementar una estación geomagnética de bajo costo para estudiar el campo magnético terrestre en el Paraguay.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Crear un sistema electrónico para la medición del campo magnético terrestre.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita la representación visual de los datos recopilados.
- Seleccionar una ubicación idónea para la instalación de la estación geomagnética, considerando interferencias electromagnéticas externas.
- Realizar la implementación del sistema electrónico diseñado en la ubicación seleccionada.

- Recolectar y analizar la variación diurna del campo geomagnético a lo largo de un período predefinido.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. El campo geomagnético

El geomagnetismo estudia el origen, las propiedades y variaciones del campo geomagnético o también llamado campo magnético terrestre. Este campo magnético es producido desde el núcleo interno de la tierra y se extiende hasta el espacio exterior, donde se encuentra con el viento solar, es el encargado de protegernos de los fenómenos que ocurren, ya sean tormentas magnéticas y vientos solares que pueden dañar la tecnología, como los satélites de comunicación y las redes eléctricas.

El campo magnético principal de la Tierra está constituido por tres componentes: i) el componente interno originado por el proceso de dinamo en el núcleo externo de la Tierra, ii) un componente del campo cortical, y iii) un componente externo producido por las corrientes magnetoesféricas-ionosféricas.

La dinamo de la Tierra es atribuida al movimiento del fluido en el núcleo externo de la Tierra, mientras que el campo cortical es producido por los minerales magnéticos acumulados en la corteza. En la superficie, hay áreas de aumento o fuerza de campo disminuida llamadas anomalías magnéticas. Algunas anomalías magnéticas pueden ser originadas por los minerales magnetizados presentes en la corteza, mientras que otras, están relacionadas a la estructura del propio campo interno [6].

En esta región el SAMA evoluciona de acuerdo con la variación secular del campo. Varias evidencias apuntan que su evolución está regida por la combinación de los componentes de campo dipolar, cuadrupolar y octupolar [7], [8].

En primera aproximación, el campo magnético de la Tierra es un dipolo magnético inclinado 11° del eje de rotación de la Tierra. Según la teoría de la dinamo, los elementos de níquel y hierro líquidos rotan en el núcleo de la Tierra generando así el campo magnético de la Tierra con un momento magnético de $8,07 \times 10^{22} \text{ Am}^2$. El dipolo magnético está ligeramente desplazado del centro de la Tierra, debido a que la distribución de la materia magnética no es homogénea en el núcleo, lo que genera grandes desviaciones en el campo dipolar en la superficie [9]. Las observaciones geomagnéticas de los últimos 400 años muestran un desplazamiento hacia el norte del dipolo del orden de 2 km por año y una precesión hacia el oeste del eje dipolar de $0,08^\circ$ por año. Los estudios de paleomagnetismo han mostrado evidencia de la inversión de polaridad del campo magnético de la Tierra, en la que los polos magnéticos del norte y del sur intercambian posiciones cada 100 mil a 1 millón de años, aproximadamente [9], [10].

2.2. Efectos de las alteraciones del campo geomagnético

Las Eyecciones de Masa Coronal del Sol liberan descargas de alrededor de 1500 Gigavatios, lo que provoca perturbaciones en el espacio. Estas alteraciones pueden complicar infraestructuras terrestres, incluyendo líneas eléctricas y comunicaciones inalámbricas. Las tormentas magnéticas pueden modificar el campo magnético terrestre, generando corrientes en líneas de transmisión de alta tensión, lo que puede resultar en explosiones de transformadores y apagones. En marzo de 1989, una tormenta eléctrica causó la quema de un transformador en la planta de energía de Nueva Jersey (EE. UU.) y un apagón en la estación eléctrica de Quebec (Canadá) [2], [11].

2.3. Descripción del dipolo magnético

El campo magnético terrestre se asemeja a un dipolo magnético, representado como una barra magnética en el centro de la Tierra. Este campo es una magnitud vectorial que varía en el tiempo y el espacio [12]. La intensidad promedio del campo magnético terrestre es de alrededor de 50,000 nanoteslas (nT), que oscila desde 20,000 nT en la región ecuatorial hasta 65,000 nT en los polos [4].

El eje magnético se extiende a través de la superficie terrestre, generando polos magnéticos. La inclinación magnética, aproximadamente 11.5° , se refiere a la inclinación del eje magnético en relación con el eje de rotación terrestre. Por otro lado, la declinación magnética, aproximadamente 23.5° , corresponde a la inclinación del eje de rotación de la Tierra en relación a la normal del plano de su órbita alrededor del Sol [13], [14]. Estos ángulos se ilustran en la Figura 2.

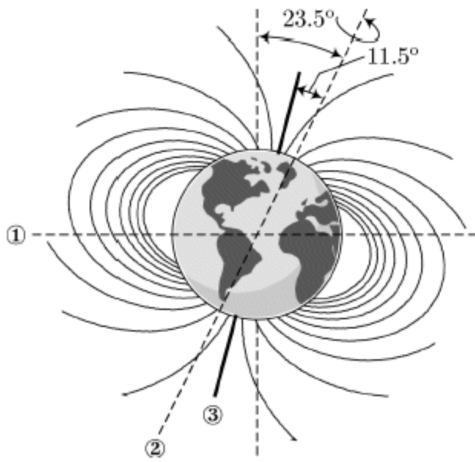


Fig. 2: Líneas de campo geomagnético como el producido por un dipolo magnético. 1: Plano de la órbita de la tierra, 2: Eje de rotación, 3: Eje magnético. **Fuente:** [14]

2.4. Elementos del vector del campo magnético terrestre

El campo magnético terrestre es una magnitud vectorial que se descompone en siete elementos principales. Representado como $\vec{B}$, este se divide en tres vectores en la superficie terrestre: X , que apunta al norte geográfico; Y , que se dirige al este geográfico; y Z , que se ubica verticalmente hacia abajo. Para una descripción completa del campo, también consideramos dos elementos adicionales, I y D . I denota la inclinación del vector $\vec{B}$ en relación al plano horizontal $\vec{H}$, mientras que D refleja el ángulo entre los vectores $\vec{H}$ y $\vec{X}$.

Los siete elementos principales se ilustran en la Figura 3, detallados a continuación:

- X : Componente hacia el norte geográfico.
- Y : Componente hacia el este geográfico.
- Z : Componente hacia abajo en el centro de la tierra.
- $\vec{H}$: Campo horizontal del campo geomagnético.
- $\vec{B}$: Campo total del vector.
- D : Declinación magnética. Ángulo entre $\vec{H}$ y $\vec{X}$.
- I : Inclinación magnética. Ángulo entre $\vec{B}$ y $\vec{H}$.

La magnitud total del campo, representada por el vector $\vec{B}$, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$|\vec{B}| = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1)$$

La magnitud del campo horizontal $\vec{H}$ se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$|\vec{H}| = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2)$$

La declinación e inclinación magnética se puede determinar a través de las siguientes ecuaciones:

$$D = \arccos \frac{X}{H} \quad (3)$$

$$I = \arccos \frac{H}{B} \quad (4)$$

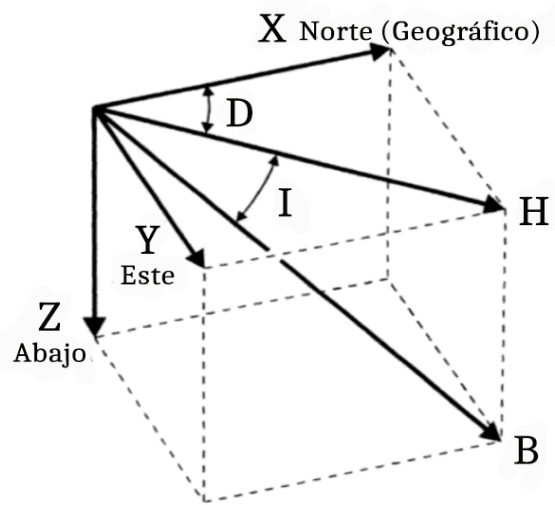


Fig. 3. Elementos del campo magnético terrestre. **Fuente:** Adaptado de [12]

2.5. Instrumentos de medición del campo magnético terrestre

En las mediciones del campo magnético terrestre, se distingue entre enfoques absolutos y relativos. Las mediciones absolutas brindan el valor de la magnitud en un momento específico, mientras que las mediciones relativas capturan las variaciones del campo entre diferentes ubicaciones o en un mismo lugar a lo largo del tiempo [15]. Este capítulo presenta una panorámica de los magnetómetros contemporáneos utilizados para la medición precisa del campo magnético terrestre.

2.5.1. Magnetómetro de precesión protónica

Los magnetómetros de protones se han destacado como dispositivos altamente precisos para medir la intensidad del campo magnético terrestre. Ejemplos notables de estos magnetómetros son el magnetómetro de precesión protónica, también conocido como magnetómetro protónico de precesión, y el magnetómetro Overhauser. Ambos se basan en el principio del paramagnetismo nuclear. En estos sistemas, se utilizan materiales nucleares que contienen espines magnéticos alineados con la dirección del campo magnético.

Estos magnetómetros constan de una pequeña botella que contiene un líquido con protones, rodeada por un sistema de dos bobinas. La primera bobina, llamada bobina de polarización, recibe una corriente continua de una fuente externa, la cual genera un campo magnético en el interior de la botella. Este campo magnético alinea los protones en la botella y hace que

precesen a una frecuencia que depende de la magnitud del campo magnético.

Cuando se interrumpe la corriente externa, se elimina el campo magnético artificial, y los protones en la botella comienzan a precesar alrededor de la dirección del campo magnético terrestre [3], [15].

2.5.2. Magnetómetro Overhauser

El magnetómetro Overhauser, un tipo de magnetómetro nuclear, guarda similitudes con el magnetómetro de precesión de protones, pero se destaca por su mayor sensibilidad. Este efecto se basa en la combinación de un líquido especial que contiene protones e iones paramagnéticos con átomos de hidrógeno, los que posteriormente se someten a una polarización continua de frecuencia de radio en un campo magnético.

El fenómeno Overhauser se desencadena cuando los electrones no apareados de alta frecuencia (VHF) transfieren su polarización intensa a los átomos de hidrógeno. Esto genera una señal de precesión fuerte, ideal para mediciones altamente sensibles de campo magnético total [15], [16].

2.5.3. Magnetómetro Ópticamente bombeado

El magnetómetro ópticamente bombeado se basa en dos fenómenos fundamentales: el efecto Zeeman y el efecto maser (amplificador de microondas por emisión estimulada de radiación). Estos fenómenos exhiben una función de autoexcitación que está intrínsecamente relacionada con el campo magnético terrestre.

El diseño de este magnetómetro incorpora una botella que contiene diversos tipos de gases, como helio, rubidio o vapores de cesio, junto con detectores de luz. Cuando se somete un gas como el rubidio a un campo magnético, cada nivel de energía se divide en subniveles electrónicos ligeramente distintos, un fenómeno conocido como efecto Zeeman. Dado que esta división es muy sutil, se emplea una técnica llamada óptica de bombeo. Esta técnica implica aumentar la población de uno de los subniveles del gas, el cual, debido a una radiación externa, se polariza circularmente a la frecuencia del nivel en el campo magnético terrestre. Esta frecuencia, relacionada con el campo magnético terrestre, se sitúa en el rango de 200 a 300 kHz.

Los magnetómetros de bombeo óptico ofrecen mediciones de la intensidad total del campo magnético con una alta precisión, sin depender significativamente de su orientación. Por consiguiente, son más sensibles que los magnetómetros de protones y pueden utilizarse para observar las variaciones temporales del campo [3], [15].

2.5.4. Magnetómetros Fluxgate

Los magnetómetros Fluxgate, conocidos como magnetómetros de núcleo saturado, se distinguen por su capacidad para realizar mediciones a lo largo de direcciones específicas. Por consiguiente, es necesario contar con varios magnetómetros dispuestos en las tres direcciones principales: Norte, Este y Vertical (dirigido hacia el centro de la Tierra).

Estos sensores se componen de un núcleo cilíndrico con alta permeabilidad magnética (materiales ferromagnéticos como Permalloy, Mu-metal o ferrita), enrollado por una bobina de alambre, generalmente de cobre. Al pasar corriente eléctrica por la bobina, el núcleo cilíndrico se magnetiza y genera su propio campo magnético. Invertir la corriente eléctrica provoca un cambio en la dirección del campo magnético, los que se anulan mutuamente. Cuando un campo magnético externo, como el campo magnético terrestre, está presente, las dos direcciones

se desequilibran, lo que permite medir el campo magnético externo. El funcionamiento del magnetómetro se basa en la variación temporal de la permeabilidad del núcleo [3], [15].

3. Diseño de la estación geomagnética

3.1. Arquitectura del hardware

La estructura del hardware de la estación geomagnética ha sido subdividida en dos etapas a fin de lograr una mejor comprensión y distribución eficiente de las tareas. En la Figura 4, se muestra el diagrama de bloques diseñado, el cual consta de las siguientes etapas:

- **Bloque 1 - Recolección de datos:** Este bloque se encarga de adquirir las variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre. Utiliza un magnetómetro triaxial equipado con tres sensores Fluxgate para este propósito.
- **Bloque 2 - Procesamiento de datos:** En esta etapa, se realiza el procesamiento de la señal analógica proveniente de la unidad de captura de datos. Para ello, se emplea una Raspberry Pi en combinación con un convertidor analógico a digital.

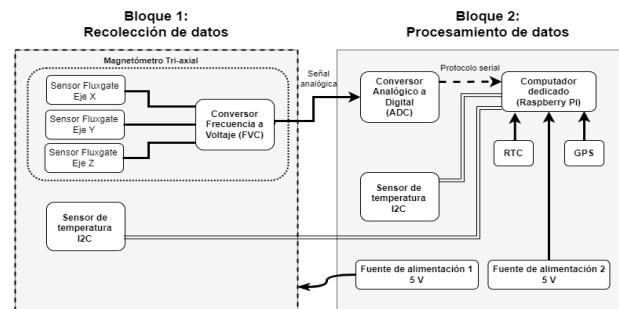


Fig. 4: Diagrama en bloque de la estación propuesta. Fuente: Adaptado de [2]

El bloque de recolección de datos consta de un magnetómetro triaxial equipado con tres sensores Fluxgate altamente sensibles, capaces de detectar minúsculas variaciones en la frecuencia magnética a lo largo de los tres ejes principales: norte, este y vertical. Cada sensor se empareja con su respectivo convertidor de frecuencia a voltaje, que transforma las frecuencias capturadas en señales de voltaje para una posterior transmisión. Igualmente, el bloque incorpora un sensor de temperatura con protocolo I²C, que supervisa continuamente los cambios de temperatura en el entorno. Esto garantiza mediciones en condiciones controladas y evalúa el posible impacto de la temperatura en los datos.

La transmisión de datos del bloque de recolección al bloque de procesamiento de datos es por medio de un cable Cat6a SSTP de alta calidad para minimizar interferencias externas.

El bloque de procesamiento de datos está controlado por una placa Raspberry Pi. Aquí, las señales analógicas se convierten en valores digitales mediante un convertidor analógico a digital (ADC), que se comunica con la Raspberry Pi a través del protocolo serial. Un sensor de temperatura con protocolo I²C para monitoreo de cambios de temperatura que puedan afectar los datos. También se implementa un módulo Reloj en Tiempo Real (RTC del inglés) para garantizar la precisión de la fecha y hora en el registro de las mediciones, incluso después de cortes de energía.

El sistema se completa con un receptor GPS que proporciona coordenadas geográficas precisas, las que aseguran la localización exacta de los datos registrados.

3.2. Arquitectura del software

La arquitectura del software está compuesto por código abierto, se realiza un código aplicativo para la lectura del ADC de valores que vienen de los sensores magnéticos, una aplicación para determinar los valores de campos geomagnéticos y un scripts para procesar los datos del GPS. Así también, tenemos guardados los datos en una base de datos para su posterior análisis y utilización en el Laboratorio de Mecánica y Energía (LME). En la Figura 5 se describe la arquitectura del software propuesta.

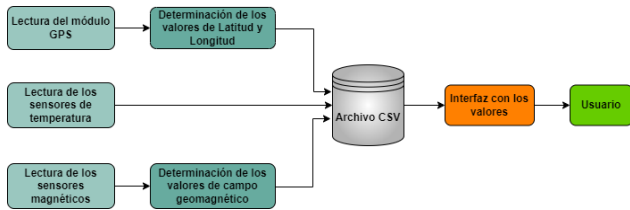


Fig. 5. Diagrama en bloque del software de EstaGeoPy. Fuente: [17].

El diagrama ilustra el proceso de convertir los valores analógicos de los sensores magnéticos en valores de campo geomagnético. Esta conversión se realiza utilizando un script en Python que lee los datos del ADC. Paralelamente, los valores del sensor de temperatura son determinados mediante el software específico del propio sensor. Además, las coordenadas de latitud y longitud se obtienen del módulo GPS.

Cada uno de estos valores adquiridos de los distintos sensores se almacena en un archivo en formato de Valores Separados por Comas (CSV, del inglés), facilitando su procesamiento posterior. Como último paso, los usuarios pueden visualizar los datos a través de una interfaz local en la Raspberry Pi, brindando una forma conveniente de acceso y observación de los resultados.

3.2.1. Adquisición de Datos de Sensores de Campo Magnético y Temperatura

La recolección de datos de los sensores de campo magnético y temperatura se realiza de la siguiente manera. Los sensores de temperatura proporcionan valores digitales que se conectan directamente a los pines de Propósito General de Entrada/Salida (GPIO, sus siglas en inglés) de la Raspberry Pi, y se leen como valores de temperatura utilizando una biblioteca de Python.

Por otro lado, los sensores de campo magnético están conectados a través del conversor de frecuencia a voltaje al ADC, que se comunica con la Raspberry Pi mediante un protocolo serial. Los valores de tensión de los sensores de campo magnético se digitalizan mediante el ADC y se leen en la Raspberry Pi. Luego, estos valores digitalizados se convierten nuevamente a valores de tensión utilizando una fórmula proporcionada por el módulo ADC.

Después de la lectura de los sensores, se aplican cálculos de medias. Esto implica el cálculo continuo de la media aritmética de las últimas n muestras de lecturas. Esta técnica ayuda a eliminar pequeñas fallas y distorsiones que pueden ocurrir durante la lectura de los sensores [2].

3.2.2. Determinación de los valores de campo geomagnético

Una vez obtenidas las lecturas de los sensores de campo magnético, se procede a llevar a cabo la conversión de los valores de tensión en mediciones correspondientes de campo magnético, expresadas en la unidad Tesla.

Para efectuar esta conversión, se emplea una curva de calibración generada en el laboratorio, que concuerda con la curva proporcionada por el fabricante y que presenta una relación lineal entre los valores de tensión y los valores de campo magnético.

Los valores de tensión registrados por los sensores se correlacionan con los valores reales de campo magnético a través de una ecuación lineal derivada de las mediciones efectuadas en el Laboratorio LME. Esta ecuación establece la correspondencia precisa entre las lecturas de tensión y las unidades de campo magnético.

4. Implementación de la estación geomagnética

4.1. Diseño y construcción de la estación geomagnética

4.1.1. Ubicación de la estación

La estación geomagnética se construyó en el interior del invernadero del Laboratorio de Sistemas Distribuidos, ubicado en el Centro de Innovación Tecnológica (CITEC) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción.

Colocar la estación dentro del invernadero ofrece varias ventajas en términos de seguridad y calidad de los datos. El invernadero cuenta con cámaras de vigilancia, un perímetro cercado que impide el acceso no autorizado, y está ubicado en una zona alejada del tránsito de personas y vehículos que puedan afectar las mediciones de los sensores magnéticos.

La estación en el invernadero se encuentra a una distancia de 3 metros de las estructuras metálicas, como se muestra en la Figura 6, con el propósito de evitar interferencias en los sensores.



Fig. 6. Lugar de instalación de la estación Geomagnética. Fuente: [17].

Sin embargo, es importante mencionar que esta ubicación tiene una ligera desventaja, ya que se encuentra en las proximidades de equipos electrónicos dentro del invernadero y cerca del cercado metálico de seguridad, lo que podría tener un impacto mínimo en la recolección de datos de los sensores.

4.1.2. Diseño de la estación

El diseño de la estación se realizó con la utilización del software Autocad 2D, y se consideran varios aspectos importantes. Estos incluyeron la excavación de un pozo, el diseño del techo de la estación para proteger los equipos de la lluvia y la disposición del sistema de procesamiento de datos. La construcción de la estación fue exclusivamente con materiales no metálicos, ya que esto es fundamental para evitar cualquier interferencia en la captación de datos por parte de los sensores magnéticos.

El pozo, en el cual se colocó el magnetómetro, tiene una profundidad de 1.10 metros. La base sobre la cual se ubica la caja que alberga los equipos de procesamiento de datos tiene las dimensiones que se muestran en la Figura 7.

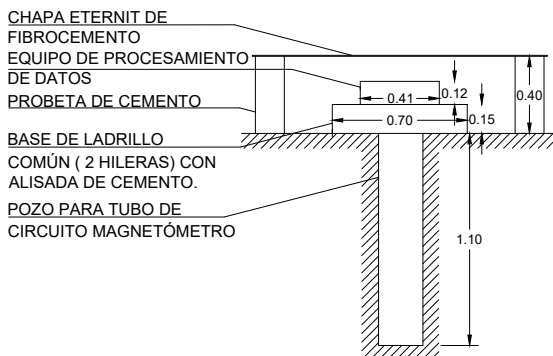


Fig. 7. Base de la estación geomagnética. **Fuente:** [17].

Finalmente, se creó un diseño tridimensional del prototipo de la estación geomagnética para obtener una representación más precisa de la disposición de los bloques de procesamiento y recolección de datos, como se muestra en la Figura 8.

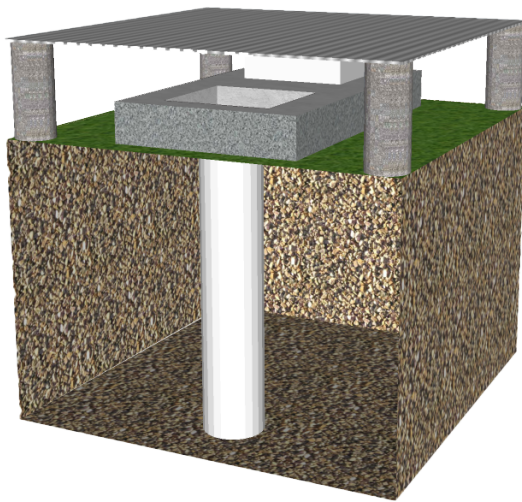


Fig. 8. Diseño final de la estación en 3D. **Fuente:** [17].

4.1.3. Construcción de la estación

En la construcción de la estación geomagnética, se evitó el uso de materiales metálicos para prevenir cualquier interacción con el campo magnético. Se empleó chapa Eternit para el techo de la estación, bloques de madera para los soportes e hilos de nailon para asegurar la chapa a la madera.

Finalmente, se muestra la estación geomagnética completamente funcional, con los bloques de procesamiento y recolección de datos, tal como se ilustra en la Figura 9.



Fig. 9. Instalación de la estación geomagnética EstaGeoPy. **Fuente:** [17].

4.2. Sistema operativo

El sistema operativo seleccionado para EstaGeoPy es Linux Debian Raspbian, ampliamente recomendado y utilizado en la placa Raspberry Pi. El proceso de instalación implicó la descarga de la imagen del sistema operativo desde la página oficial de Raspberry Pi. Luego, esta imagen ISO de aproximadamente 8GB se grabó en una tarjeta de memoria SD de 64GB mediante un proceso de flasheo.

Se realizaron configuraciones adicionales en la Raspberry Pi para habilitar los protocolos de comunicación necesarios, como Serial Peripheral Interface (SPI, por sus siglas en inglés), I²C y Secure Shell (SSH, por sus siglas en inglés). La habilitación de SSH permitió el control remoto del equipo. Igualmente, se configuró el servidor Network Time Protocol (NTP, por sus siglas en inglés) para mantener actualizado el reloj del sistema.

Por último, para asegurar la ejecución continua al iniciar la Raspberry Pi, se configuraron varios scripts de inicialización. Estos scripts incluyen uno para la adquisición de datos del ADC, otro para el monitoreo del GPS y un tercero para la interfaz de visualización local. Estos scripts desempeñan un papel crucial en el funcionamiento ininterrumpido de EstaGeoPy.

4.3. Diagrama del hardware y conexiones

Los dispositivos conectados a la Raspberry Pi son diversos y desempeñan roles específicos en la captura y procesamiento de datos de los sensores magnéticos. Asimismo, se utilizan varios protocolos de comunicación para facilitar estas interacciones.

En el conector de 40 pines de la Raspberry Pi, denominado HEADER, se conectan los sensores de temperatura, el Reloj en Tiempo Real (RTC), el Conversor Analógico-Digital (ADC) y los ventiladores utilizados para la refrigeración. A través de este conector se establecen diferentes protocolos de comunicación, como el bus de Interfaz Periférica Serial (SPI, del inglés), GPIO, Circuito Inter-Integrado (I²C, del inglés) y Transmisor-Receptor Asíncrono Universal (UART, sus siglas en inglés).

Los protocolos I²C se utilizan para la comunicación con los dos sensores de temperatura y el RTC. El protocolo SPI se emplea para el ADC. El GPIO se usa para controlar los ventiladores, y el GPS se conecta mediante USB.

La Figura 10 muestra el esquema de hardware con la Raspberry Pi como el núcleo central del sistema. Las conexiones se dividen en dos bloques, el Bloque 1 se encarga de la recolección de datos y el Bloque 2 se ocupa del procesamiento de datos, como se detalla en capítulos anteriores.

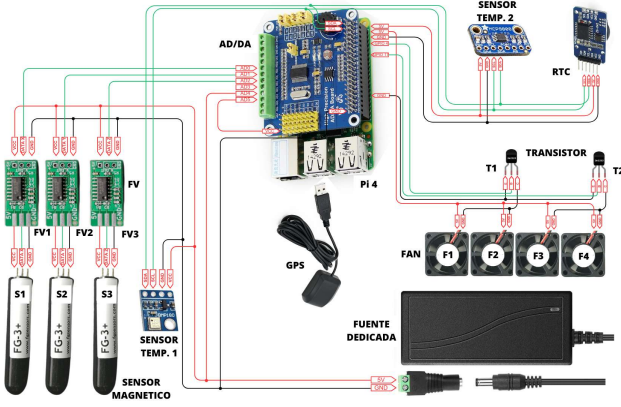


Fig. 10. Diagrama del hardware. Fuente: [17].

4.4. Captura y tratamiento de datos a través del ADC

La lectura de datos del sensor se lleva a cabo mediante el ADC, lo que requirió la creación de un script en Python para garantizar una lectura continua y sin interrupciones. Posteriormente, se aplica un proceso de posprocesamiento que involucra el uso de filtros de media móvil para el monitoreo de 5 canales del ADC. De estos, 3 canales se destinan a la lectura de los sensores magnéticos, mientras que los 2 canales restantes se utilizan para monitorear la tensión de alimentación de los sensores y la tensión de alimentación del propio ADC.

La tasa de muestreo empleada es de 2.5 muestras por segundo, asegurando una captura precisa de los datos.

4.5. Curva de calibración del sensor FG-3+

Para establecer la curva de calibración del sensor y, así, relacionar el voltaje de salida de la señal generada por el sensor con la intensidad del campo magnético que incide sobre él, se llevó a cabo un proceso de calibración en un montaje experimental en el laboratorio Láser de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) de la Universidad Nacional de Asunción, mostrado en la Figura 11. El sensor se colocó en un área libre de fuentes ferromagnéticas y corrientes eléctricas, manteniendo una distancia mínima de 2 metros, con la excepción de la bobina y una lámina de material μ que se utilizó como blindaje magnético.



Fig. 11. Calibración del sensor en el laboratorio. Fuente: [17].

Procedimiento:

1. Se colocó cada sensor dentro de la bobina, la cual estaba orientada perpendicularmente al norte para contrarrestar el valor del campo magnético terrestre.

2. Luego, se alimentó la bobina con una fuente de alimentación de precisión de 5V y corriente que varió en el rango de 0 a 80 mA, en intervalos de 10 mA, a través del potenciómetro. La corriente circulante se registró con un amperímetro para verificar su precisión.
3. Los valores de corriente se introdujeron en el software de recolección de datos, junto con la cantidad de muestras a recopilar para cada valor de corriente, en este caso, 50.
4. Finalmente, se repitió el proceso invirtiendo la dirección de la corriente, pasando de 80 mA a 0 mA. Esto se hizo invirtiendo la polaridad de la fuente de alimentación de la bobina, lo que generó valores negativos de corriente de 0 a -80 mA, en intervalos de -10 mA, cubriendo así todo el rango del sensor, que va desde 40 kHz hasta 120 kHz, correspondiente a un campo de ± 50.000 nT. El signo negativo indica que la dirección del campo es opuesta a la del sensor.

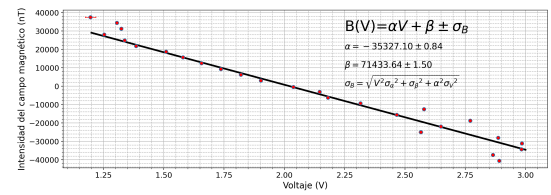


Fig. 12: Curva de calibración con un comportamiento lineal del sensor en relación al campo magnético observado. Fuente: [17].

Los resultados mostraron un comportamiento lineal del sensor en relación al campo magnético, como se observa en la Figura 12. Los datos se ajustaron a una función:

$$B(V) = \alpha V + \beta \pm \sigma_B, \quad (5)$$

donde:

$$\alpha = -35327.10 \pm 0.84, \quad (6)$$

$$\beta = 71433.64 \pm 1.50, \quad (7)$$

$$\sigma_B = \sqrt{V^2 \sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \alpha^2 \sigma_V^2}. \quad (8)$$

4.6. Almacenamiento de datos

Los datos se almacenan en un archivo en formato CSV y se guardan en una carpeta llamada "DATOS" en la Raspberry Pi para facilitar su manipulación y posterior uso en otras interfaces. El formato CSV se elige debido a su facilidad de análisis de datos.

4.7. Adquisición de datos del GPS

Los datos del dispositivo GPS se almacenan en el mismo archivo en formato CSV junto con los datos del sensor magnético. Este archivo incluye información como la latitud y la longitud de la estación geomagnética. Es relevante destacar que los datos del sensor GPS se capturan al inicio de la toma de muestras del sensor magnético y se almacenan una única vez al inicio de la ejecución. Así mismo, estos datos están disponibles para su visualización en la interfaz local.

4.8. Proceso de Montaje del Prototipo

4.8.1. Cableado y Conexiones

Los bloques de procesamiento y recolección de datos están separados por una distancia de 1.5 metros. Para minimizar interferencias de señales externas, se emplean dos cables blindados SSTP de aproximadamente 1.5 metros de longitud. Estos cables son del modelo SSTP CAT6A, con 4 pares y un grosor de 26AWG.

Dentro del bloque de recolección de datos, la distribución de cables fueron realizados de la siguiente manera: el primer cable destinado para la transmisión de datos de los sensores X (apuntando al este) e Y (apuntando al norte), mientras que el segundo cable es utilizado para conectar el sensor Z (apuntando a la vertical) y el sensor de temperatura. En un extremo de cada cable SSTP, se soldó un conector tipo socket hembra de 0.1 pulgadas (2.54 mm). En el extremo opuesto de cada cable, se soldó un conector DB9. Después de soldar ambos extremos del cable, se cubrieron con termocontraíble para proporcionar protección contra la humedad y mayor soporte físico. El cableado finalizado del bloque de recolección de datos se muestra en la Figura 13.



Fig. 13. Cableado final de la unidad de Recolección de datos. **Fuente:** [17].

4.8.2. Torre de soporte de los sensor FG-3+

La torre de soporte de los sensores se diseñó cuidadosamente para que estuvieran posicionados de manera ortogonal entre los ejes, de modo que cada eje representara un componente específico: el sensor X apuntando hacia el este, el sensor Y hacia el norte y el sensor Z en dirección vertical hacia el centro de la Tierra.

Esta torre se fabricó utilizando una impresora 3D y se empleó material PLA. Se prestó especial atención a la alineación y estabilidad de los ejes ortogonales de los sensores, como se muestra claramente en la Figura 14.



Fig. 14: Torre impresa en 3D para la unidad de recolección de datos. **Fuente:** [17].

4.8.3. Unidades de procesamiento y recolección de datos

La construcción de EstaGeoPy se realiza con la utilización de materiales no magnéticos, aquellos materiales que tengan un impacto leve en los sensores magnéticos teniendo en cuenta que son sensibles a interferencias externas y a metales.

Para la disipación de calor en el interior de la caja PVC y así evitar influencia de variaciones de temperatura sobre componentes de las unidades de procesamiento y principalmente sobre la Raspberry Pi y ADC, fueron utilizados 4 ventiladores de 5 V con dimensiones de 40x40x10 mm (Lxaxh) aproximadamente, donde 2 ventiladores se encarga de introducir el flujo de aire externo y 2 ventiladores de sacar el flujo de aire caliente dentro de la caja. Adicionalmente, se agrega un ventilador para enfriamiento de la Raspberry Pi. En la Figura 15 se puede observar la foto del interior y exterior de la caja PVC del procesamiento de datos.

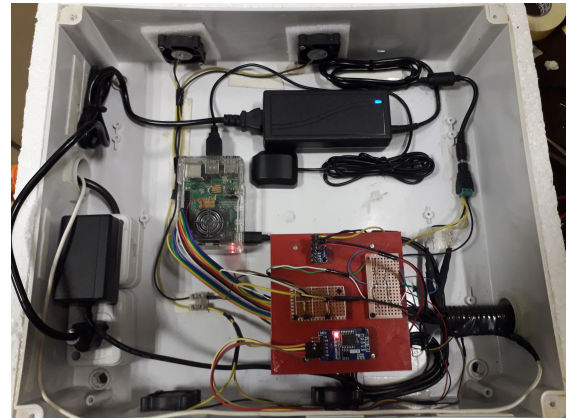


Fig. 15. Interior del bloque de procesamiento de datos. **Fuente:** [17].

Para la unidad de recolección de datos es elaborado con un caño de PVC de 200 mm de diámetro y 470 mm de largo. Los dos extremos tienen tapones de 200 mm, luego es perforado un extremo de los tapones y colocado un prensa cable PG-29 que sirve para proteger y no pueda entrar agua dentro del interior del Tubo. Para protección contra la humedad el tubo es pintado por fuera. En la Figura 16 se presenta el bloque de recolección de datos.



Fig. 16. Exterior del bloque de recolección de datos. **Fuente:** [17].

4.8.4. Instalación del Prototipo

El lugar de instalación del prototipo es el invernadero del Laboratorio de Sistemas Distribuidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción en Isla Bogado, Luque observado en la Figura 6.

El sitio de instalación del prototipo posee algunos requerimientos importantes: poca circulación de personas

y vehículos cerca del lugar, seguridad, por sus cámaras y cercos perimetrales. Es importante recalcar que el lugar de instalación debe tener que estar alejado de fuentes de ruidos electromagnéticos, los cuales pueden ser causados por redes eléctricas de alta tensión, transformadores de energía, bobinas de ignición presentes en vehículos, generadores de campos magnéticos naturales, ubicados en las vigas de construcciones [2].

Para la unidad de recolección de datos fue perforado un pozo de 1.10 m aproximadamente, observado en la figura 17, en el cual se introdujo el tubo PVC de la unidad arriba citada para proteger los sensores magnéticos de la variación de temperatura extrema, la temperatura bajo tierra se mantiene constante a temperatura ambiente alrededor de 25° C.



Fig. 17: Perforación de un Pozo de 1.10 m para la instalación de la unidad de recolección de datos. **Fuente:** [17].

En la Figura 18, concluida la instalación de la estación prototipo EstaGeoPy. La chapa de Eternit colocada sirve de protección en caso de lluvia y la terciada de madera evita la acumulación de agua en caso de fuertes lluvias.



Fig. 18. Prototipo final implementado en campo. **Fuente:** [17].

4.9. Interfaz utilizada

La visualización de los datos monitoreados por la EstaGeoPy es realizado por medio de una interfaz local, es ejecutado por medio de un script de Python al iniciar la Raspberry Pi, mostrado en la Figura 19.



Fig. 19. Página principal de la interfaz local. **Fuente:** [17].

5. Análisis de resultados

En este capítulo, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos con el detector construido. Se examina la influencia de las variaciones de temperatura en la superficie y bajo tierra, así como las fluctuaciones en las fuentes de alimentación eléctrica. Es realizada una comparación entre el magnetómetro de bajo costo EstaGeoPy, y el magnetómetro de la red EMBRACE en Medianeira, Brasil, con el objetivo de evaluar la confiabilidad de los datos generados.

La estación EstaGeoPy llevó a cabo mediciones desde julio hasta diciembre de 2022. No obstante, se debe destacar que estos datos pasaron por un proceso de pruebas y ajustes en el prototipo. Igualmente, se excluyeron los períodos en los que la estación se vio interrumpida debido a cortes de energía eléctrica, lluvias persistentes y tareas de mantenimiento como la limpieza del área de malezas y la eliminación de residuos. Para el análisis, se eligieron días consecutivos de los meses de julio, agosto y septiembre, en los cuales se obtuvieron los primeros resultados después de la instalación del prototipo. Los periodos comparados son detallados a continuación:

- **Periodo A:** del 01 al 03 de julio de 2022.
- **Periodo B:** del 01 al 03 de agosto de 2022.
- **Periodo C:** del 04 al 08 de septiembre de 2022.
- **Periodo D:** del 20 al 22 de septiembre de 2022.

5.1. Análisis de estabilidad

En esta sección, se aborda la influencia de las fuentes de alimentación en los voltajes asociados a las magnitudes magnéticas, así como la temperatura tanto en la superficie como bajo tierra.

En la Figura 20, se representan los valores de voltaje durante el periodo A. En dicha figura, se destaca que ambas fuentes, V_{mag} y V_{rpi} , muestran variaciones del orden de 10 mV y 5 mV, respectivamente. Sin embargo, es crucial señalar que los periodos resaltados en los cuadros amarillos indican que V_{mag} es el voltaje que incide significativamente en las mediciones y en la precisión de estas. Por otro lado, al analizar la variable T_{mag} , se aprecia una estabilidad de aproximadamente 1 grado centígrado, lo que, en teoría, no debería afectar el rendimiento del sensor magnético. En contraste, al observar la variable T_{est} en la superficie, se notan variaciones diurnas normales, pero no se encuentran correlaciones discernibles entre estas fluctuaciones y las mediciones efectuadas.

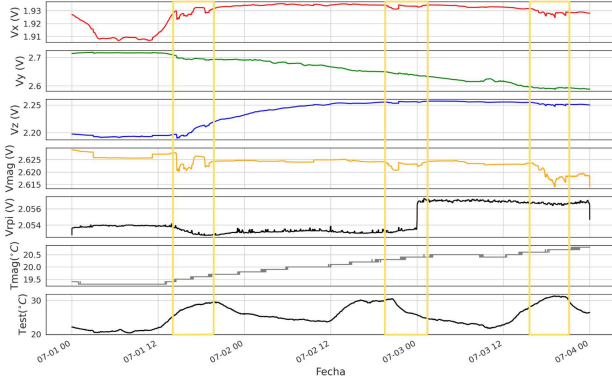


Fig. 20: Series temporales de Voltaje y Temperatura en el Periodo A. **Fuente:** [17].

En la Figura 21, se presentan los valores de voltaje correspondientes al periodo B. Una vez más, es evidente que tanto V_{mag} como V_{rpi} muestran fluctuaciones en el orden de 25 mV y 10 mV, respectivamente. No obstante, es importante resaltar que, al igual que en el periodo anterior, los cuadros amarillos destacan que V_{mag} es el componente del voltaje que influye significativamente en las mediciones y su precisión. Incluso, en este periodo, al analizar la variable T_{est} en la superficie, se observan variaciones diurnas típicas, pero no se identifican correlaciones discernibles entre estas oscilaciones y las mediciones realizadas. De forma similar al periodo anterior, al analizar la variable T_{mag} , se aprecia una estabilidad de aproximadamente 1.2 grado centígrado, lo que, no debería afectar el rendimiento del sensor magnético.

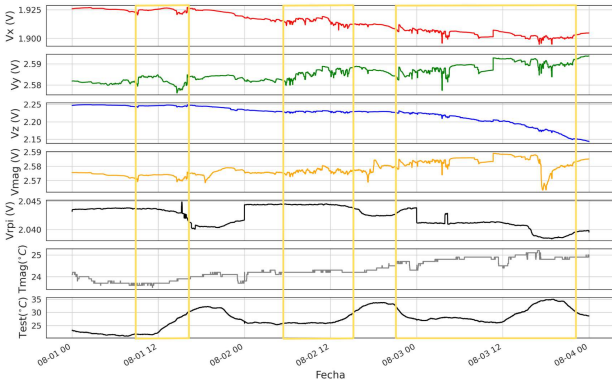


Fig. 21: Series temporales de Voltaje y Temperatura en el Periodo B. **Fuente:** [17].

En la Figura 22, se presentan los valores de voltaje correspondientes al periodo C. Nuevamente, se observa claramente que tanto V_{mag} como V_{rpi} exhiben fluctuaciones del orden de 50 mV y 46 mV, respectivamente. En cambio, es importante resaltar que, al igual que en los periodos A y B, los cuadros resaltados en amarillo destacan que V_{mag} es el componente del voltaje que ejerce una influencia significativa en las mediciones y su precisión. En este periodo, al analizar la variable T_{est} en la superficie, se observan variaciones diurnas típicas, pero no se identifican correlaciones discernibles entre estas oscilaciones y las mediciones efectuadas. De manera similar a los periodos A y B, al analizar la variable T_{mag} se aprecia una estabilidad de aproximadamente 2.3 grados centígrados, un poco más alta que en los periodos A y B, pero que no debería afectar de manera significativa los datos.

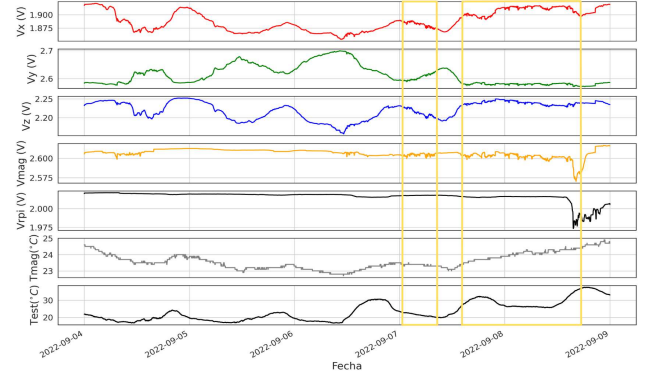


Fig. 22: Series temporales de Voltaje y Temperatura en el Periodo C. **Fuente:** [17].

En la Figura 23, se presentan los valores de voltajes correspondientes al periodo D. Como en los periodos anteriores, es evidente que tanto V_{mag} como V_{rpi} experimentan fluctuaciones, en este caso del orden de 9 mV y 30 mV, respectivamente. Nuevamente, los cuadros resaltados en amarillo subrayan la relevancia de V_{mag} en las mediciones y su precisión. En este periodo, no se observan efectos notorios de las variables T_{est} y T_{mag} en las mediciones, lo que refuerza la coherencia de los datos recopilados.

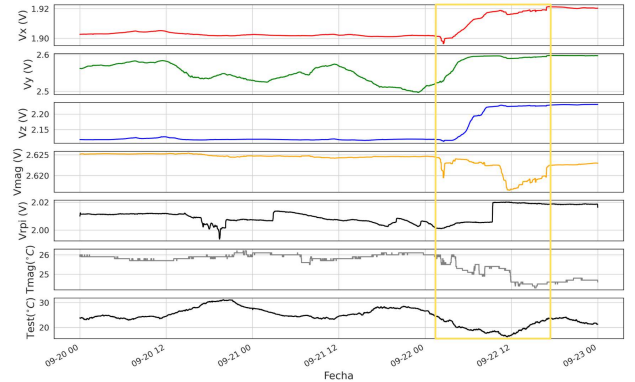


Fig. 23: Series temporales de Voltaje y Temperatura en el Periodo D. **Fuente:** [17].

A pesar de la implementación de estabilizadores de tensión tipo UPS y las expectativas basadas en las especificaciones de la fuente V_{mag} , hemos constatado que el sistema requiere una mayor estabilización electrónica para garantizar una precisión adecuada en las mediciones del campo magnético. Esta necesidad se hace evidente en las series temporales, que revelan fluctuaciones del orden de 10 mV. Estas fluctuaciones, al aplicar las curvas de calibración correspondientes, se traducirían en variaciones de aproximadamente ± 300 nT. Estos valores son considerablemente superiores a lo que se esperaría en días en que la magnetosfera se encuentra en un estado de relativa calma.

5.2. Comparación entre EstaGeoPy y el Magnetómetro del INPE - Medianeira

Los valores estimados del campo magnético se compararon con estaciones de alta precisión, en particular con la estación geomagnética del INPE ubicada en la ciudad de Medianeira, en el estado de Paraná, conforme la Figura 24.

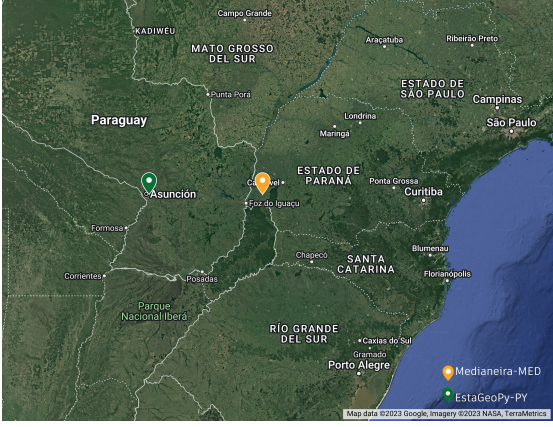


Fig. 24. Ubicación de estaciones. **Fuente:** [18].

Debido a que la estación del INPE en Medianeira se encuentra en Brasil y el prototipo está en Paraguay, existen diferencias en las coordenadas geográficas, como latitud y longitud, lo que conlleva a variaciones en los valores de los componentes del campo magnético terrestre. Dado que el campo magnético es la suma de todos sus componentes y puede variar espacial y temporalmente en todo el planeta [2], [19]. El componente vertical Z , que es parte del campo total $\vec{B}$, es particularmente susceptible a variaciones geográficas según la ubicación de las estaciones geomagnéticas. Por lo tanto, para la comparación entre estaciones, se utiliza la componente horizontal $\vec{H}$.

Se compara la relación temporal entre el proyecto EstaGeoPy, ubicado en Luque, Paraguay, y la estación del EM-BRACE MAGNET del INPE en Medianeira, Brasil. Esto se realiza durante tres días consecutivos en los meses de julio, agosto y septiembre para analizar los datos y evaluar la precisión temporal del magnetómetro instalado. En las representaciones de datos, EstaGeoPy se muestra en color rojo y la estación del INPE-Medianeira en color verde.

En el mes de julio, se analizaron los días 1, 2 y 3, observados en la Figura 25. Sin embargo, los datos de la estación de Medianeira no muestran una correlación temporal sólida. Mientras que la estación de Medianeira registró una variación en la componente horizontal menor a 100 nT , nuestra estación registró una variación de alrededor de 3000 nT . Este hallazgo confirma que las fluctuaciones en el voltaje de referencia del magnetómetro están impactando la precisión de las mediciones a largo plazo.

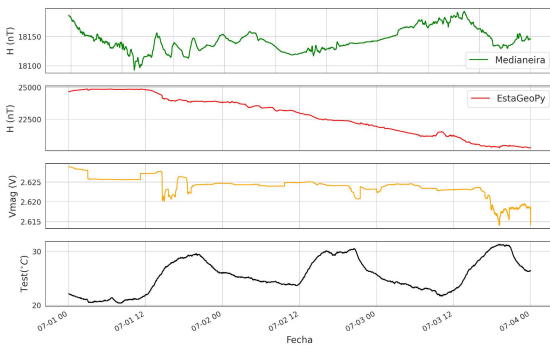


Fig. 25: Comparación entre EstaGeoPy y magnetómetro del INPE - Medianeira en el Periodo A. **Fuente:** [17].

En agosto, en los días 1, 2 y 3, como se muestra en la Figura 26, se presenta una ligera correlación temporal entre ambas estaciones. Sin embargo, destaca la relación temporal evidente entre las fluctuaciones en el componente horizontal y el voltaje

de referencia (V_{mag}). No se observan correlaciones notables con la temperatura en la superficie (T_{est}).

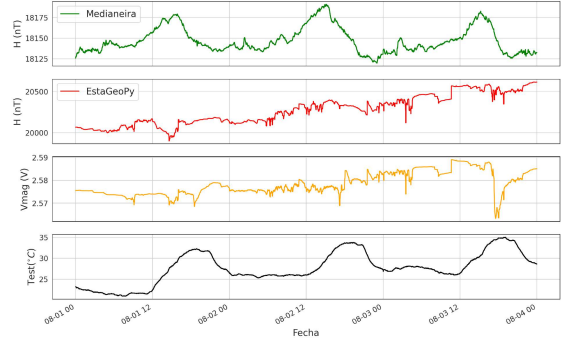


Fig. 26: Comparación entre EstaGeoPy y magnetómetro del INPE - Medianeira en el Periodo B. **Fuente:** [17].

En septiembre, se realizaron comparaciones en dos momentos distintos. Primero, se analizaron las mediciones del 4 al 8 de septiembre, demostrado en la Figura 27. Entre los días 4 y 7, se observó una correlación más fuerte entre las mediciones de Medianeira y nuestra estación. A pesar de ello, el día 8 y el 9 experimentaron inestabilidades en el voltaje de referencia (V_{mag}), junto con cambios en la temperatura exterior.

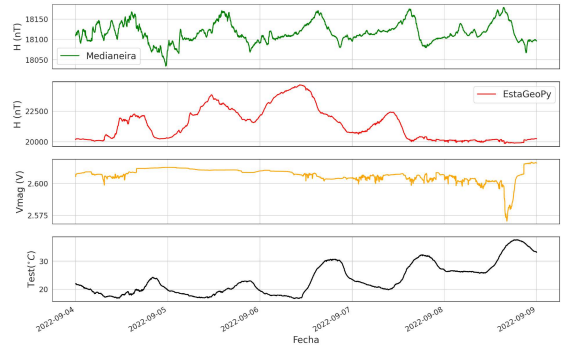


Fig. 27: Comparación entre EstaGeoPy y magnetómetro del INPE - Medianeira en el Periodo C. **Fuente:** [17].

La Figura 28 presenta las comparaciones para los días 20 y 22 de septiembre. En este caso, se encontró una sólida correlación entre los días 20 y 21. En cambio, el día 22 experimentó una variación no deseada en la fuente de referencia, lo que generó ruido en las mediciones de ese día.

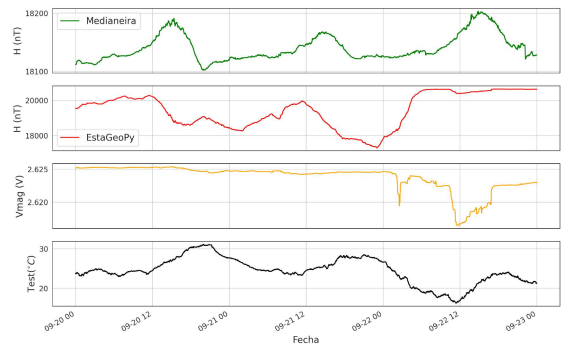


Fig. 28: Comparación entre EstaGeoPy y magnetómetro del INPE - Medianeira en el Periodo D. **Fuente:** [17].

5.3. Análisis de costos

En la Tabla 1, se detallan los precios de los componentes, materiales y equipos empleados en este proyecto.

TABLA 1. Lista de precios.

	Componente	Cant.	Precio (Gs.)
Bloque de Procesamiento de datos	Raspberry Pi 4	1	658.600
	Fuente dedicada	1	122.100
	Reloj en Tiempo Real	1	59.200
	Sensor Temp. MCP9808	1	66.600
	Conversor ADC	1	325.600
	GPS	1	140.600
	Fan	4	266.400
	Transistor 2N2222	2	10.000
	Caja de PVC	1	110.857
	Otros	-	20.000
	Subtotal:		1.779.957
Bloque de Recolección de datos	Sensor Fluxgate FG-3+	3	832.500
	Conversor FVC	3	124.300
	Sensor Temp. BMP180	1	62.000
	Cable SSTP CAT6A de 1.5 m.	-	22.500
	Conector macho 2.54 mm con 90 °C	1	15.000
	Conector hembra 2.54 mm	1	15.000
	Conectores DB9 macho y hembra	1	162.500
	Soporte impreso en 3D	1	100.000
	Tubo PVC	1	80.000
	Tapa PVC	2	40.000
	Subtotal:		1.453.800
Estructura de la estación	Techo de Chapa Eternit	4	190.000
	Cintillo	4	16.000
	Postes de madera	4	40.000
	Tirante de madera 1.10 m	2	70.000
	Base de ladrillo revocado	-	81.300
	Excavaciones	-	20.000
	Mano de obra	-	130.000
	Subtotal:		547.300
Otros trabajos	Mano de obra-tesis por 2 meses	-	5.360.746
	Total:		9.141.803

Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusión y trabajos futuros

El Laboratorio de Mecánica y Energía (LME) lleva a cabo el monitoreo del clima espacial, el cual requiere de varios equipos, como los magnetómetros, para realizar mediciones precisas. El proyecto EstaGeoPy se enfoca en la construcción de una estación de bajo costo que utiliza hardware y software libre para obtener mediciones de la variación de la intensidad del campo magnético terrestre, lo que permite monitorear el impacto de la actividad solar en el país y fomentar el estudio de la geofísica espacial en las escuelas.

Para la construcción de la estación, se utilizó un ADC de 24 bits y la biblioteca ads1256 en Python a fin de obtener los valores del ADC. La calibración de los sensores se realizó con un solenoide del laboratorio láser de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN). El prototipo fue instalado en el invernadero del Laboratorio de Sistemas Distribuidos (LSD) del Instituto Paraguayo de Telecomunicaciones (IPT), el cual pertenece a la Facultad de Ingeniería (FIUNA).

La estación EstaGeoPy ha sido capaz de medir variaciones en la intensidad del campo magnético terrestre. Sin embargo, los valores obtenidos deben calibrarse con sensores especialmente calibrados para obtener mediciones más precisas. A pesar de ello, los datos recolectados han mostrado que es posible medir cambios repentinos en las direcciones del campo magnético.

Basándose en los resultados obtenidos, se han identificado algunas áreas de mejora para futuros trabajos en esta línea, los cuales se citan a continuación:

- Realizar una nueva calibración con sensores magnéticos comerciales ya verificados e instalados, como los sensores de la red EMBRACE.

- Evaluar la posibilidad de ubicar la unidad de procesamiento en el interior, dejando solo la unidad de recolección de datos en el exterior y utilizando un cable de mayor longitud para la transmisión de datos.
- Explorar la viabilidad de incorporar paneles solares como fuente de energía para la estación geomagnética.
- Transmitir los datos recolectados al servidor del Laboratorio de Mecánica y Energía de la FIUNA a través de tecnologías de transmisión inalámbrica, como 3G o 4G.
- Desarrollar una página web con una interfaz que permita la visualización en tiempo real de gráficos, así como la descarga de datos para aquellos interesados en un análisis más detallado.
- Implementar un regulador de voltaje con el fin de mitigar la interferencia de ruido en las señales.

7. Referencias

- [1] Word magnetic model (wmm). [Online]. Available: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>
- [2] F. Franco de Oliveira, "Estgeomag: Integrando soluções de hardware, software e internet das coisas na medição de grandezas geomagnéticas," 2017.
- [3] J. A. Cortés Osorio and F. A. Medina Aguirre, "Diseño de un magnetómetro asistido por computador," 2009.
- [4] C. Beggan and S. Marple, "Construcción de una red de magnetómetros escolar con raspberry pi en el reino unido," *Geoscience Communication*, no. 1, pp. 25–34, Octubre 2018.
- [5] C. M. Denardini, S. S. Chen, L. C. A. Resende, J. Moro, P. R. Fagundes, and et al., "The embrace magnetometer network for south america: Network description and its qualification," *Radio Science*, vol. 53, pp. 288–302, Marzo 2018.
- [6] W. H. Campbell, *Introduction to Geomagnetic Fields*, 2nd ed. Cambridge University Press, 2003.
- [7] R. Caraballo, "The south atlantic magnetic anomaly: Its impact on the technological infrastructure." Ph.D. dissertation, Universidad de la República, Uruguay, 04 2016.
- [8] G. Hartmann and I. Pacca, "Time evolution of the south atlantic magnetic anomaly," *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 81, pp. 243–55, 07 2009.
- [9] H. Koskinen and E. Kilpua, *Physics of Earth's Radiation Belts: Theory and Observations*. Springer Nature Switzerland AG, 2022.
- [10] R. Lanza and A. Meloni, *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*. Springer Berlin Heidelberg, 2006. [Online]. Available: <https://books.google.com.py/books?id=2Rxq1IIBXswC>
- [11] F. A. Medina Aguirre, "Antecedentes del estudio del campo magnético terrestre en colombia," *Scientia et Technica*, no. 50, pp. 181–187, Abril 2012.
- [12] R. Merrill, M. W. McElhinny, and P. L. McFadden, *The magnetic field of the earth: Paleomagnetism, the core, and the deep mantle*, ser. International Geophysics. Academic Press, 1996.
- [13] H. Zhao and Q.-G. Zong, "Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Russell-mcpherron effect during different imf polarity and/or extreme solar wind conditions," *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, pp. 1–15, Noviembre 2012.
- [14] M. Calcina, "Un modelo dinamico para el campo geomagnético," *Revista Boliviana de Física*, vol. 15, no. 15, pp. 44–62, Mayo 2009.
- [15] J. de Arriba Bodelón, "Diseño y construcción de un magnetómetro para la obtención de las variaciones rápidas de la declinación magnética," 2008.
- [16] Magnetómetro overhauser. [Online]. Available: <https://www.gemsys.ca/spanish-landing/pdf/Overhauser>
- [17] C. Paniagua, "Diseño e implementación de una estación geomagnética de bajo costo," Noviembre 2023.
- [18] (2022) Google maps. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/>
- [19] W. J. Hinze, R. R. B. von Frese, and A. H. Saad, *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge University Press, 2013.