



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMÁN
CIENCIAS DE LA TIERRA

“La electrónica, la programación y la geofísica en la construcción de un resistivímetro de bajo costo”

Tesis para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

Presenta:

Omar Yair López Rico

Asesor interno: Ing. Julio César Guarneros López

Asesor externo: Dra. Claudia Arango Galván



Ciudad de México, 2020

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Presente

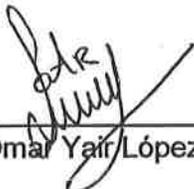
Bajo protesta de decir verdad el que suscribe **Omar Yair López Rico**, manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**La electrónica, la programación y la geofísica en la construcción de un resistivímetro de bajo costo**", en adelante "La Tesis" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales (Publicación en Línea) "La Tesis" por un período de **un año** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho período se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a El IPN" de su terminación.

En Virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de. "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que, la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "La Tesis" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, noviembre de 2020

Atentamente



Omar Yair López Rico



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

**Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán**

EP Y T/201/2020.

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Asunto

Registro de Tema

CDMX, 27 de octubre de 2020.

C. OMAR YAIR LOPEZ RICO

**PASANTE DEL PROGRAMA ACADÉMICO DE
INGENIERÍA GEOFÍSICA**

PRESENTE

A continuación, comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha, para elaborarla.

**"LA ELECTRÓNICA, LA PROGRAMACIÓN Y LA GEOFÍSICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN RESISTIVÍMETRO DE
BAJO COSTO".**

- CONTENIDO
RESUMEN
ABSTRACT
INTRODUCCIÓN
OBJETIVOS
I. MARCO TEÓRICO.
II. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.
III. APLICACIÓN DEL DISEÑO INTEGRADO.
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
REFERENCIAS
ANEXO

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico.

FRCH/gach*





Folio
EP Y T/202/2020.

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

APROBACIÓN

CDMX, 28 de octubre de 2020.

ING. FERNANDO RODRÍGUEZ CHÁVEZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, hacemos constar que el Tema, por la opción de **Tesis Individual**, **"LA ELECTRÓNICA, LA PROGRAMACIÓN Y LA GEOFÍSICA EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN RESISTIVÍMETRO DE BAJO COSTO"** presentado por el pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geofísica**, **C. OMAR YAIR LOPEZ RICO**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto, esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES

M. en C. BONIFACIO EULOGIO LUNA

M. en C. MARCOS ROBERTO CHAVACAN ÁVILA

ING. OMAR CRISTIAN CHÁVEZ HERNANDEZ

ING. MARIANA GUADALUPE HEREDIA MARTINEZ

ING. JULIO GUARNEROS LÓPEZ





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Unidad Ticomán

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Folio
EP Y T/173/2020.

Asunto
ASESORIA DE TESIS

CDMX, 01 de octubre de 2020.

ING. JULIO CESAR GUARNEROS LÓPEZ
P R E S E N T E

En atención a la Solicitud del **C. OMAR YAIR LOPEZ RICO**, pasante del Programa Académico de **Ingeniería Geofísica**, con base en el Reglamento de Titulación Profesional del I.P.N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso I, se le informa que ha sido seleccionado para asesorar la tesis del pasante mencionado, Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por el interesado.

Seguro de contar con su participación, lo saludo cordialmente.

ATENTAMENTE
"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico



c.c.p. Ing. Irais María Lizette Ortiz Prieto. - Jefa del Departamento de Innovación Educativa
Interesado

FRCH/gach*



EP Y T/174/2020.

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"
175 Aniversario de la Escuela Superior de Comercio y Administración
125 Aniversario de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía
80 Aniversario del CECyT 6 "Miguel Othón de Mendizábal"
75 Aniversario de la Escuela Nacional de Biblioteconomía y Archivonomía

Asunto

Asesoría de Tesis

CDMX, 01 de octubre de 2020.

DRA. CLAUDIA ARANGO GALVÁN

Investigadora Titular "A" DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

PRESENTE

En atención a la Solicitud del C. **OMAR YAIR LÓPEZ RICO**, pasantes del Programa Académico de **Ingeniería Geofísica** y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarla a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional que, por la opción de **Tesis Individual**, deberá desarrollar el interesado, por lo que solicito a usted, se sirva proponer a esta Subdirección el Tema y Contenido.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico

FRCH/gach*



UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



A mi madre

Agradecimientos

*Al Instituto Politécnico Nacional,
por otorgarme las facilidades para la realización de este trabajo.*

*A la ESIA Ciencias de la Tierra,
por todo el conocimiento y las instalaciones.*

*Al Instituto de Geofísica de la UNAM,
por el apoyo económico y el interés en mi investigación.*

*Al Mtro. Julio César Guarneros López,
por asesorarme en esta tesis.*

*A la Dra. Claudia Arango Galván,
por la confianza y sus valiosos conocimientos.*

*A mis sinodales,
por sus preciados comentarios.*

*A mi familia,
mamá, Faby, Fanny, Fabian,
por siempre creer en mí.*

*A mis profesores,
por generarme el interés y cariño por la materia.*

*A mis amigos,
Gerardo, Alejandro, Isaac,
y especialmente a Juan,
por los consejos y el apoyo.*

*A Ana Karen,
por escucharme.*

Contenido

Resumen.....	11
Abstract	12
Introducción	13
Objetivos	14
Objetivo general.....	14
Objetivos particulares.....	14
1. Marco teórico	15
1.1 Breviario histórico de los métodos geoelectricos y el instrumental.....	16
1.2 Propiedades electromagnéticas del subsuelo.....	17
1.3 Métodos eléctricos de corriente continua.....	18
1.3.1 Sondeo Eléctrico Vertical	19
1.3.2 Polarización inducida	23
1.4 Principios de electrónica.....	25
2. Método y técnicas de investigación.....	27
2.1 Descripción del problema	28
2.1.1 Publicaciones anteriores sobre circuitos.....	28
2.2 Diseño de la electrónica.....	34
2.2.1 Batería	36
2.2.2 Inversor.....	37
2.3 Diseño de la programación.....	37
2.3.1 Toma de datos	40
2.3.2 Interfaz de usuario	41
2.3.3 Escritura de datos.....	43
2.4 Diseño de la prospección.....	45
3. Aplicación del diseño integrado.....	46
3.1 Adquisición experimental de datos.....	47
3.1.1 PRUEBA 1	47
3.1.2 PRUEBA 2	49
3.1.3 PRUEBA 3	51

3.2 Análisis y discusión de resultados.....	52
3.3 Análisis integral del prototipo	56
Conclusiones y recomendaciones	58
Conclusiones	59
Recomendaciones.....	60
Referencias.....	61
Anexos.....	63
Anexo I. Script de Arduino.....	64
Anexo II. Resultados URF	82

Resumen

Se realizó el diseño y desarrollo de un resistivímetro de bajo costo para mediciones de resistividad en el subsuelo, así mismo se programó una interfaz para el usuario, manejo y presentación de los datos obtenidos en la plataforma Arduino. El dispositivo es capaz de inyectar corriente al subsuelo y medir a la par que recaba datos de las diferencias de potencial consecuentes. Las especificaciones eléctricas del prototipo son: 0 – 180 V CD, voltaje de salida; 0 – 400 mA intensidad; y 70 W de potencia. A partir de una batería de 12 V CD que alimenta todo el circuito. Así mismo, la plataforma digital permite procesar los datos con pulsos que van desde 500 milisegundos a 3 segundos y un receptor de voltaje de 5 V, que permite aplicar ganancia a los datos del muestreo, obteniendo mayor detalle. Uno de los apartados con mayor relevancia es la aplicación de un sistema de flujo basado en la desviación estándar como factor de calidad y el uso de la mediana estadística, permite la reducción al mínimo de datos espurios.

El prototipo fue puesto a prueba efectuando sondeos tipo Wenner en profundidades someras y con sedimentos esencialmente granulares de tamaño pequeño (limos y arcillas). Los resultados obtenidos muestran valores de potencial, intensidad de corriente y resistividad eléctrica coincidentes con estas características geológicas.

Abstract

The design and development of a low-cost resistivity meter for subsurface resistivity measurements was proposed. Also, an user interface, as well as the data handling and presentation generated using the Arduino board. The device is capable of injecting and measuring current into the subsoil and collecting the consequent electric potential difference. The prototype electrical specifications are: 0 - 180 V DC, output voltage; 0 - 400 mA current; and 70 W of power. The entire circuit is powered by a 12 V DC battery. Likewise, the digital board allows data processing with pulses ranging from 500 milliseconds to 3 seconds and a 5 V voltage receiver, which allows applying gain to the sampled data, obtaining a greater detail. One of the most outstanding sections is data processing, which allows spurious data to be minimized, through a flow system based on the standard deviation as a quality factor and the use of the statistical median.

The prototype was tested using a Wenner-type array at shallow depths within essentially small-sized granular sediments (silts and clays). Obtained results show potential values, current intensity and electrical resistivity coincident with these geological characteristics.

Introducción

La geofísica es la rama de la ciencia que estudia la Tierra a partir de sus propiedades físicas, ya sean éstas cualitativas o cuantitativas. Así mismo, la ingeniería, se encarga de realizar la investigación, exploración, evaluación, explotación y aprovechamiento de recursos energéticos, minerales e hidrológicos. Además, resulta una herramienta valiosa para determinar el impacto ambiental y los riesgos geológicos. Esto se logra a través de métodos indirectos, usando instrumental diverso para obtener estas propiedades físicas del subsuelo.

Actualmente, existen pocas empresas mexicanas que desarrollan estos instrumentos, hablando específicamente de resistivímetros, los cuales se pueden definir de manera breve como equipos usados para la medición de la resistividad eléctrica del subsuelo. A diferencia de los equipos comerciales extranjeros, el operador se encarga de decidir la cantidad de corriente a inyectar y de tomar visualmente la mejor lectura, es decir, el instrumento no hace distintas lecturas para la eliminación de datos espurios. La ausencia de equipos desarrollados en la república mexicana provoca que el precio de sus análogos extranjeros sea muy elevado además de encarecer el costo del mantenimiento, al que se le incrementan los tiempos de envío.

Este proyecto se basa en las necesidades planteadas y en la de la necesidad de innovación tecnológica para potenciar la aplicación de la geofísica.

En los últimos años se ha publicado diversa bibliografía referente a instrumentos geofísicos de menor costo, en algunos de ellos se describe de manera detallada la fabricación de instrumental eléctrico. Los diagramas publicados serán usados como base para el prototipo.

Con estos antecedentes se propone aplicar estas herramientas disponibles para fabricar un prototipo de bajo costo para medir la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo con fines experimentales.

Objetivos

Objetivo general

- Construcción de un prototipo de bajo costo para mediciones de resistividad del subsuelo que cubra con los estándares mínimos de calidad de modelos comerciales

Objetivos particulares

- Calibración del prototipo a partir de pruebas en campo
- Análisis de las diferencias fundamentales entre el prototipo y un modelo comercial.

1.

Marco teórico

1.1 Breviario histórico de los métodos geoelectricos y el instrumental

Para comenzar, hablaremos de la historia de los métodos geoelectricos, ya que, aunque su desarrollo es relativamente reciente, su origen se remonta al siglo XVIII, cuando se descubre la conductividad del suelo en 1746; según Daza Hernández (2012).

Más tarde, Robert Fox descubrió en 1815 el fenómeno de la polarización espontánea, que consiste en que los yacimientos de ciertos minerales producen débiles, pero apreciables, corrientes eléctricas. Fox sugirió el uso de este fenómeno para la prospección de yacimientos, por lo que se le ha considerado como el abuelo de los geofísicos. En 1882, Carl Barus aplica esta idea al estudio. Simultáneamente, científicos del Geological Survey de Estados Unidos, utilizan sucesivamente este método en minas, construyendo los primeros electrodos impolarizables. Sin embargo, es necesario decir que el primer éxito se atribuye a Conrad Schlumberger, nombrado como el iniciador de la prospección eléctrica, quien hizo el primer hallazgo geofísico de mineral no magnético.

Se mencionan también a otros investigadores que dirigieron su atención a campos eléctricos producidos artificialmente. El primero, Brown, quien patentó en 1883 un sistema de prospección eléctrica con dos electrodos. Daft y Williams, obtuvieron otra patente basada en el empleo de corrientes de baja frecuencia. Y al ruso Ragozin quien realizó la aplicación de la electricidad en la búsqueda de yacimientos mineros, dando los primeros pasos para las ideas que vendrían a posterior.

Los métodos eléctricos de campo artificial se consolidan con el estudio tectónico de la cuenca silúrica de Calvados (Francia) realizado en 1913 por Schlumberger, quien simultáneamente desarrollaba los métodos eléctricos de campo natural. Alrededor de 1915, Schlumberger y Wenner, de manera individual, implementan el conocido dispositivo básico de cuatro electrodos que servirá para potenciar el desarrollo de la prospección (Daza Hernández, 2012).

1.2 Propiedades electromagnéticas del subsuelo

Todo material opone cierta resistencia al flujo de la corriente eléctrica. En Geofísica, a esta propiedad se le atribuye el nombre de resistividad, ρ , la cual nos permite diferenciar entre distintos materiales en el subsuelo. Así mismo es posible definir la conductividad σ como la inversa de la resistividad y, por tanto, como facilidad de la corriente eléctrica al atravesar el material (Ruelas, 2020).

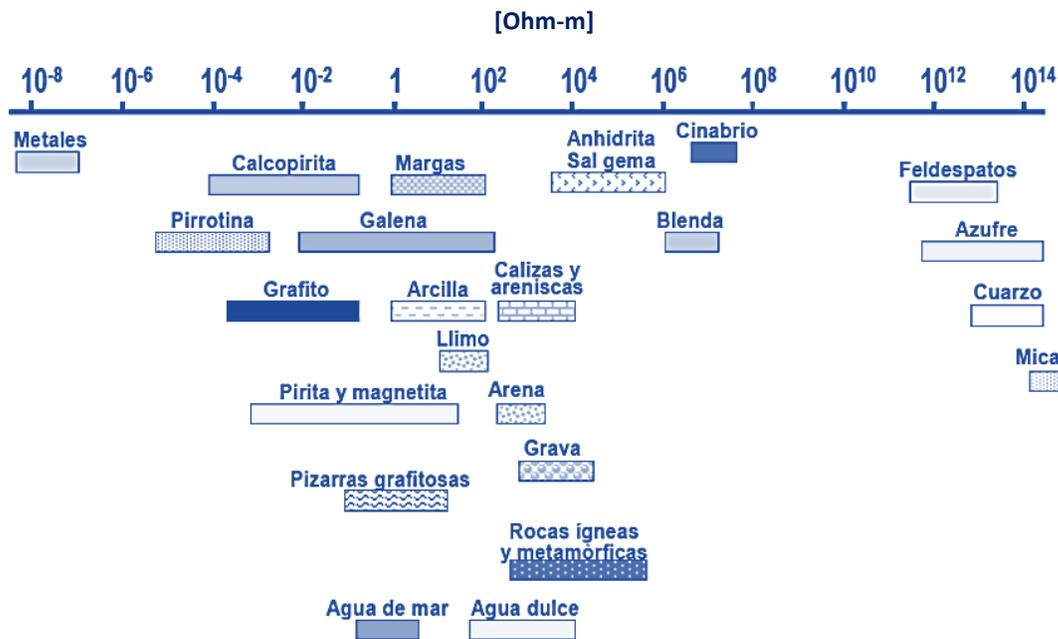


Figura 1. Valores de resistividad de diferentes rocas y minerales. (Orellana, 1982)

Dentro de la gama de materiales conductores, la resistividad de los metales varía entre 10^{-8} y 10^{-7} Ωm y, sin embargo, son pocos y muy escasos los componentes de la corteza terrestre que posean conductividad metálica. Más específicamente, para el desarrollo de esta tesis, las rocas dependen de los minerales que la componen y a su vez estos dependen de su contenido de impurezas y temperatura. De manera semejante, las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, a todo esto, se añade un factor llamado anisotropía, es decir, las distintas variaciones de dirección en la formación de los minerales. Resultando que la resistividad de las rocas varía en un margen

bastante amplio. En la figura 1 podemos encontrar los rangos de distintos tipos de roca y apreciar sus diferencias en resistividad. Hablando del subsuelo, podemos decir que es, en esencia, una mezcla de rocas, gases, agua y otros materiales. Y como indica Binley y Andreas (2006): la resistividad también depende de factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presenta resistividades diferentes con el tiempo. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es el que se puede alterar más fácilmente mediante la lluvia o el riego del suelo. Diferentes grados de humedad para un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo. Otros factores que pueden afectar la resistividad del terreno son la cantidad y tipo de sales solubles, la estratigrafía, la granulometría, la compactación, la temperatura, la presión, entre otros.

1.3 Métodos eléctricos de corriente continua

Los métodos eléctricos de corriente directa (CD) se basan en el estudio de la propagación de esta corriente eléctrica en el subsuelo. El fin último es el conocimiento de las resistividades eléctricas presentes en el medio, esto se logra mediante medidas en la diferencia de potencial que, a su vez, son generadas por la inyección de una corriente eléctrica controlada.

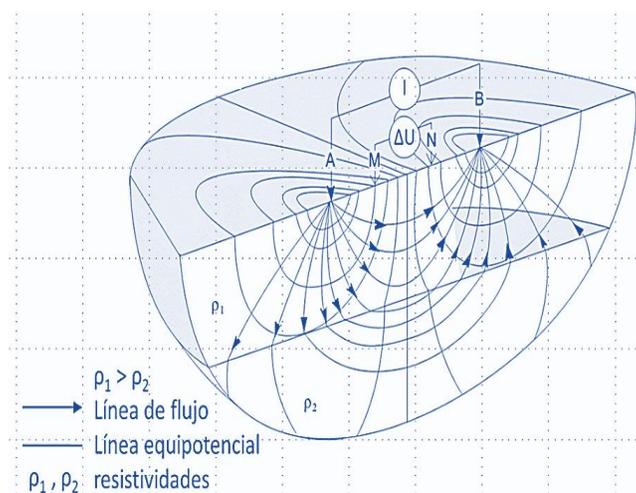


Figura 2. Ilustración esquemática del método de resistividad. (Geotem, 2016)

Existen diferentes aplicaciones dentro del método eléctrico: Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), Polarización Inducida (PI), Polarización Inducida Espectral (PIE), Tomografía de Resistividad. A continuación, vamos a describir cada uno de ellos de manera específica.

1.3.1 Sondeo Eléctrico Vertical

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es una técnica de campo que pertenece al método eléctrico 1D, es decir que sólo nos da información en una dimensión. Esta técnica consiste en la determinación del parámetro de resistividad a profundidad, esto se logra mediante la circulación de corriente eléctrica en el subsuelo y la medición del potencial resultante a través de un arreglo electródico tetraelectródico. Normalmente puede alcanzar profundidades desde 5 m hasta 1 km (Geotem, 2016).

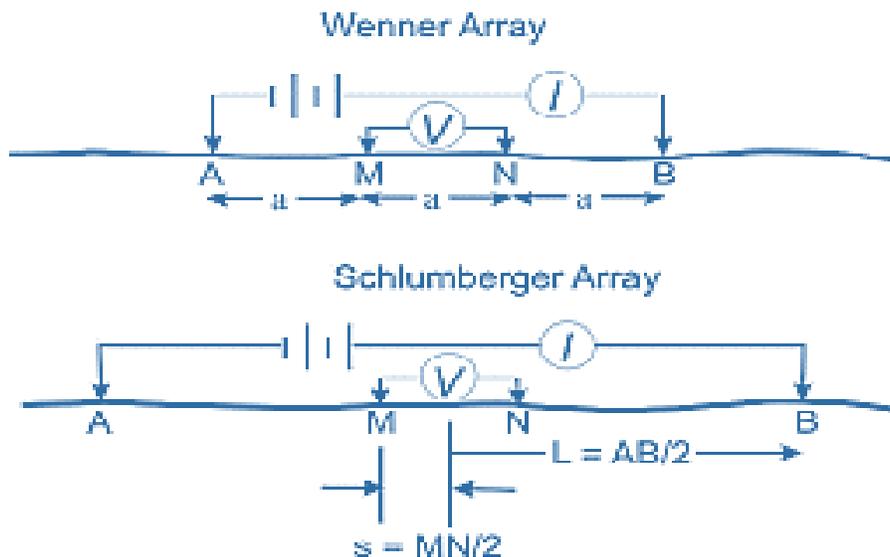


Figura 3. Configuraciones tetraelectródicas más comunes. (Clark y Page, 2011)

Es muy utilizado por su sencillez y la relativa economía instrumental para la adquisición en campo. En su aplicación se distribuyen los electrodos en un orden definido (arreglo electródico). Un voltaje (V) de CD pasa a través de dos electrodos de corriente (A, B) insertados en el suelo,

esto produce que fluya una corriente eléctrica (Figura 2). Mientras tanto, los electrodos de potencial (M, N) se insertan en línea con los electrodos de corriente y estos funcionan como receptores del sistema. Es necesario realizar mediciones de la separación entre los electrodos, la intensidad de corriente (I) y la caída de tensión entre los electrodos potenciales (ΔU). La propiedad eléctrica de interés es la resistividad del terreno (ρ) con unidades dadas en ohm-metros. Luego se aumenta la separación de los electrodos y se repite la medición, lo que provoca que aumente la profundidad de penetración de la corriente, por lo que las lecturas de la superficie se ven más afectadas por las propiedades eléctricas en profundidad (Clark y Page, 2011). Existen diversas configuraciones electrónicas, sin embargo, las más comunes son la disposición Wenner y la Schlumberger (Figura 3). Como se aprecia en la figura, en el arreglo Wenner, los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden AMNB. Mientras que la disposición Schlumberger trata de una composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores MN es mucho menor que la de los inyectores AB (en la práctica, $AB \geq 5MN$)

Las medidas de Intensidad (I) y Voltaje (V) se utilizan para calcular la resistividad aparente, que es la resistividad de en una Tierra isotrópica y homogénea en la que la medida de la relación voltaje-corriente sería siempre la misma (Spies y Eggers, 1986). El cálculo de la resistividad aparente varía según el arreglo seleccionado y las medidas entre los electrodos. Añadiendo el concepto de constante geométrica.

1.3.1.1 Bases matemáticas de la técnica SEV

El análisis de datos puede definirse como la manipulación de número para obtener cierta información concreta. En este caso, hablamos de datos de la diferencia de potencial obtenida con el instrumento y su manipulación para obtener la información de la resistividad en el subsuelo. Para definir mejor la resistividad aparente sería conveniente considerarla como la medida de resistividad obtenida en un punto (figura 4). Entonces, supongamos que introducimos una corriente de intensidad (I) en el subsuelo en un punto A, y a continuación calculamos la resistencia.

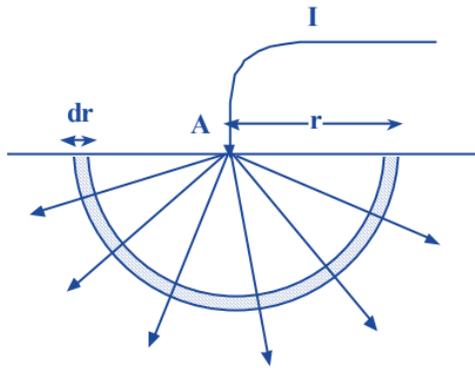


Figura 4. Suposición semiesférica de la ley de Ohm.
(hidrologia.usal.es)

Sin embargo, para introducir dicha corriente es necesario que exista otro electrodo B, por el cual el potencial se esté generando en un punto M, el cual será igual al producido por A menos el producido por B. Además, en la práctica es imposible medir el potencial sólo en un punto, ya que para esto habría que situar uno de los polos en el infinito, así que medimos la diferencia de voltaje entre el punto M y otro, que llamaremos N. En ambos puntos obtenemos una expresión parecida:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi \overline{AM}} - \frac{\rho I}{2\pi \overline{BM}}$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi \overline{AN}} - \frac{\rho I}{2\pi \overline{BN}}$$

Donde: ρ , es la resistividad

I , la intensidad de corriente

AM , BM , las distancias entre electrodos

Por tanto, la diferencia de potencial entre los puntos M y N, será:

$$V_{M-N} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} - \frac{1}{\overline{AN}} + \frac{1}{\overline{BN}} \right)$$

Esta diferencia de potencial se define como la razón de cambio de energía potencial. Y su unidad corresponde a la de energía dividida por una carga, también llamada voltaje.

Despejando la resistividad,

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)}$$

Es posible simplificar la fórmula, notando que la segunda fracción es una constante que depende de la geometría del arreglo. Podemos entonces llamar K a esta fracción, misma que se denomina coeficiente geométrico o constante geométrica. Resalta de esta constante el elemento 2π , lo que nos indica una geometría semiesférica.

Despejando la resistividad, queda al final,

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K$$

Como vimos anteriormente, es posible obtener la resistividad aparente a partir de un cálculo relativamente sencillo, este cálculo será la primera prueba en el desarrollo del dispositivo. Por tanto, habrá que obtener las otras tres incógnitas y manipularlas para obtener la resistividad. Siendo K una constante que depende de la geometría del arreglo, significa que podemos controlarla y modificarla; a diferencia de ésta, los datos de I y ΔU serán obtenidas desde el dispositivo.

1.3.1.2 Profundidad de investigación

Según Sepúlveda (2009), la proporción entre la distancia AB en relación con la profundidad de investigación varía de un autor a otro, sin dejar de lado que esto también depende de las características específicas que presente el entorno. Sin embargo, como una norma no oficial, estos valores oscilan el orden de 0.3 a 0.5 de la apertura AB para arreglos Wenner y Schlumberger (ver figura 5).

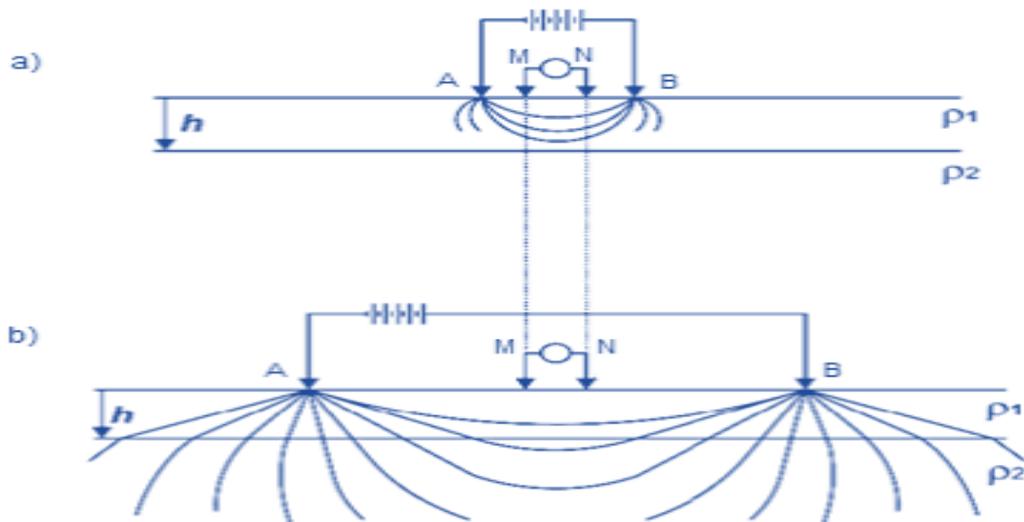


Figura 5. Suposición gráfica del comportamiento de la corriente eléctrica con respecto de la distancia AB. En el caso (a) se muestra que, en una separación reducida entre los electrodos, la corriente se mantiene confinada en la capa superficial. Mientras que en el caso (b), donde la distancia AB es mayor, la profundidad de la corriente se incrementa, llegando a capas más profundas. (Sepúlveda, 2009)

1.3.2 Polarización inducida

Mientras que la resistividad del suelo está principalmente controlada por la conductividad eléctrica de la roca y de los fluidos en los poros, la Polarización Inducida se ve más bien afectada por los procesos en la interfaz fluido-grano (Binley y Andreas, 2006). En un estudio de PI, se miden las propiedades resistivas y capacitivas del suelo. Esto quiere decir que se puede determinar información adicional sobre la litología. Las mediciones de este método se realizan en el campo utilizando una disposición tetraelectródica como en el caso anterior. Y estas mediciones se pueden hacer en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

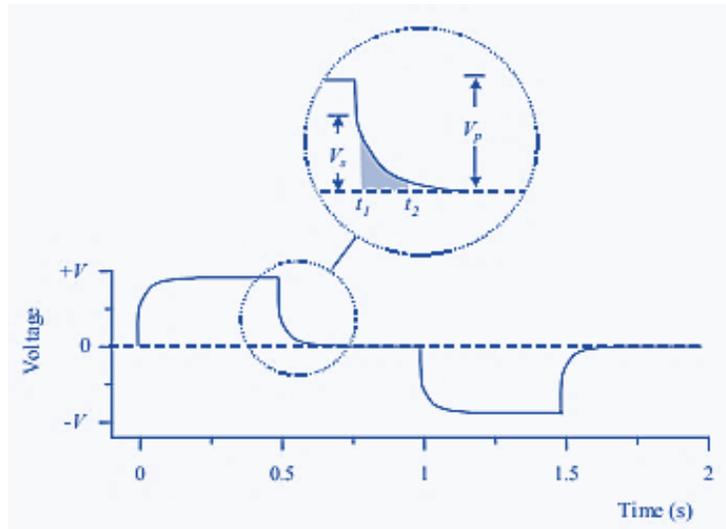


Figura 6. Medición de la polarización inducida en el dominio del tiempo. (Binley y Andreas, 2006)

La polarización está asociada con la de acumulación cargas locales inducidas por el campo eléctrico aplicado (Slater, 2007). En las bajas frecuencias de los métodos complejos (<1000 Hz), esta acumulación de carga está asociada casi exclusivamente con la redistribución local de la carga iónica en la interfaz mineral-fluido.

En el dominio del tiempo la caída de voltaje se mide después de que se detiene la inyección de corriente (figura 6). La disminución gradual del voltaje, en lugar de abrupta, es una función compleja que refleja la polarización de la carga eléctrica en la interfaz de grano-fluido y también la conducción dentro del fluido de poro y a lo largo de los límites de grano (Binley & Andreas, 2006). Por otro lado, en el dominio de frecuencia, se mide el voltaje relativo desplazado de la fase de una corriente alterna inyectada.

Tradicionalmente, el porcentaje de efecto de frecuencia (PFE) se ha utilizado como una medida de la PI en el dominio de la frecuencia (Binley y Andreas, 2006). La impedancia en términos de magnitud y ángulo de fase puede usarse como una medida del método de Polarización inducida. Esto se conoce comúnmente como resistividad compleja. La PI Espectral se le conoce a la obtención de un espectro de frecuencias al aplicar corriente en diferentes frecuencias de inyección.

Mientras que los instrumentos IP tradicionales en el dominio del tiempo midieron varios puntos en una curva de decaimiento, los instrumentos modernos digitalizan la señal a tasas de muestreo relativamente altas y permiten el análisis de Fourier en el dominio de la frecuencia (Binley y Andreas, 2006). Al hacerlo, los instrumentos en el dominio del tiempo también pueden proporcionar una medida de la Polarización en términos de resistividad compleja, sin embargo, el rango de frecuencia estará limitado por la tasa de muestreo del instrumento.

1.4 Principios de electrónica.

Ramos (2012), explica que un circuito eléctrico es una serie de elementos o componentes eléctricos y electrónicos, como resistencias, capacitores y fuentes, conectados entre sí con el propósito de generar, transportar o modificar señales eléctricas. Estos elementos son alimentados por fuentes de tensión, o voltaje, que son dispositivos que producen una tensión constante, como una batería.

En 2009, Sepúlveda concluye que los equipos utilizados para medir la resistividad se diseñan de cualquiera de las siguientes formas:

1. Aquellos que son diseñados para entregar un voltaje o una corriente invariable en el tiempo (CD) a la salida de sus terminales A y B. Deben contar con elementos supresores de ruido para eliminar la interferencia provocada por las corrientes telúricas y la polarización de electrodos, que son dos de las fuentes de ruido más importantes que pueden producir mediciones erróneas. Además, alejando los cables de corriente de los de potencial, evita la inducción de voltaje en estos. Tanto la corriente como el potencial pueden ser obtenidos con multímetros comerciales que cuenten con escalas adecuadas de corriente y voltaje en CD.
2. La otra forma es obteniendo un voltaje o una corriente alterna con forma de onda cuadrada a la salida de sus terminales A y B. Los equipos modernos entregan una corriente alterna cuya frecuencia se puede seleccionar desde fracciones de Hz hasta unos cuantos, de ellos, lo cual permite eliminar automáticamente las corrientes telúricas y la polarización de electrodos.

Este tipo de equipos son los que predominan por la aparente simplicidad con que eliminan las fuentes de ruido. Sin embargo, el problema es que se necesita contar con un medidor de potencial y de corriente que puedan medir señales cuadradas de pequeñas frecuencias, lo que requiere de un diseño propio debido a que los multímetros comerciales están diseñados para medir señales con errores mínimos desde la frecuencia de línea (60 Hz) en adelante.

Además, independientemente de la forma en la que se muestran los datos, todo equipo que mida resistividad debe contar con lo siguiente:

- a) Un transmisor (Tx), encargado de controlar la corriente que se inyecta al subsuelo
- b) Un receptor (Rx), que medirá la diferencia de potencial
- c) Cables, de un grosor específico para obtener baja resistencia
- d) Electrodo(s) metálico(s), los cuales se introducirán en el subsuelo

2.

Método y técnicas de investigación.

2.1 Descripción del problema

“La historia nos ha demostrado en repetidas ocasiones que el desarrollo económico y social de los pueblos está ligado, inexorablemente, a su desarrollo científico y tecnológico.”

Así comienza Aldama (2012) su crítica en el artículo titulado “¿Qué le hace falta a la ciencia en México?”. La ausencia de instrumental geofísico desarrollado en México provoca que su adquisición resulte complicada, debido a los altos costos tanto de compra con empresas extranjeras, como de mantenimiento. En consecuencia, realizar geofísica aplicada puede resultar complicado para distintas empresas o instituciones educativas o de investigación. En los últimos años se ha publicado diversa bibliografía referente a instrumentos geofísicos de menor costo, algunos de ellos serán comentados en este apartado. Con estos antecedentes se propone aplicar herramientas para fabricar un prototipo de bajo costo para medir la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo con fines experimentales.

2.1.1 Publicaciones anteriores sobre circuitos

Con fines de comparación, se presentarán tres diseños propuestos por distintos investigadores en años recientes.

2.1.1.1 *Diseño Clark y Page (2011)*

Comenzamos con el primer diseño propuesto por Clark y Page (2011) mostrado en la figura 7. Sin embargo, este diseño tan simple carece de la capacidad de almacenar los datos de corriente y el potencial eléctrico, por tanto, para superar estas limitaciones, al diseño se anexa un microordenador Arduino, el cual permite medir la corriente y el potencial, además de controla tres relés que reemplazan los interruptores de inversión manual. Esto significa una enorme ventaja, ya que pueden ocurrir 50 o más mediciones en cada dirección de la corriente y las lecturas se tomarán de manera precisa.

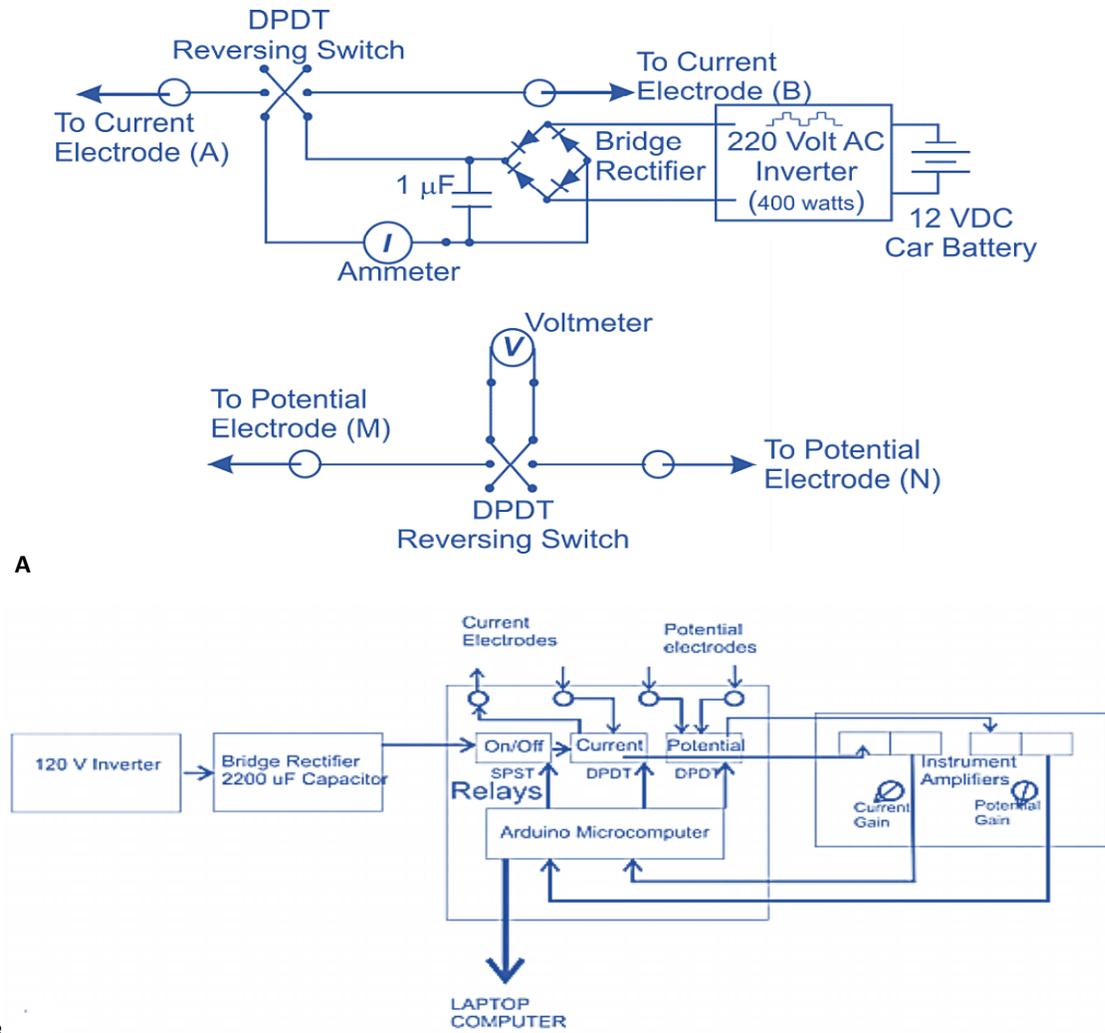


Figura 7. A. Circuito eléctrico utilizado en el dispositivo de resistividad de bajo costo. B. Diagrama del dispositivo utilizando la microcomputadora Arduino para mejorar la calidad de los datos (Clark y Page, 2016).

2.1.1.2 Diseño Sepúlveda (2009)

El diseño de Sepúlveda separa los diseños en dos, transmisor y receptor. Además de que en el documento no se muestra el circuito terminado, sino el diagrama de bloques (figura 8) y los

circuitos de cada bloque por separado. Las implantaciones remarcables que se añadirán al circuito anterior serán:

- Indicador de carga de batería
- Compensador del potencial natural
- Filtraje de los datos

El equipo fue diseñado con la alimentación de dos baterías recargables de 12 VCD y 7 A-h que permite energizar el suelo con un voltaje de 120 VCD, mismos necesarios para abarcar distancias horizontales entre electrodos de corriente de $AB=120$ metros. En el diagrama se muestra la opción de cambiar la polaridad de voltaje de salida, lo que permitirá eliminar corrientes telúricas y la magnetización de electrodos. Del diseño anterior se mantendrá la aplicación con el sistema Arduino para la toma de datos.

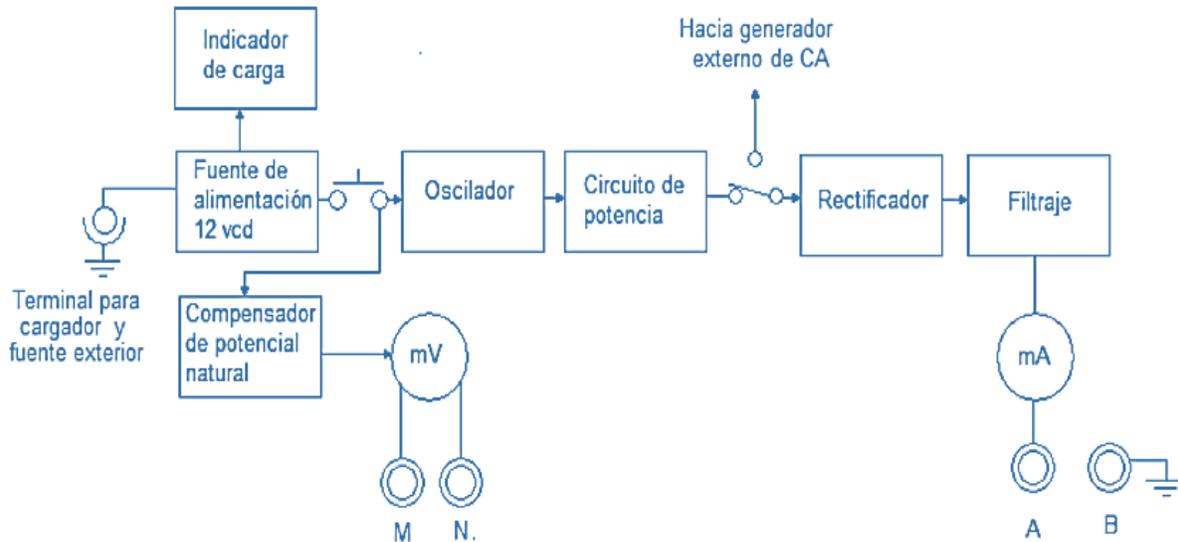


Figura 8. Diagrama de bloques para el diseño de un resistivímetro de corriente directa (Sepúlveda, 2009).

2.1.1.3 Diseño Mikailu et al (2015)

Semejante al caso anterior, Mikailu y su equipo nos presentan prácticamente un rompecabezas de las piezas que utilizaron (figura 9), aunque este caso sin una guía específica como sí hizo

Sepúlveda en 2009, así que nos apoyaremos de este último para acomodar estas piezas. El diseño de Mikailu añade algunos de los componentes que ya había anexado Sepúlveda, sin embargo, añade un elemento muy importante: El microcontrolador PIC16F877A (microcontrolador con memoria de programa tipo FLASH, lo que representa facilidad en el desarrollo de prototipos y en su aprendizaje ya que no requiere borrarse con luz ultravioleta como las versiones EPROM), el cual nos permitirá digitalizar la información obtenida. La programación del pic se realizará a partir del análisis del circuito. Este microcontrolador de 40 pines es uno de los más usados en proyectos escolares cuenta con una gran cantidad de documentación en foros de internet y es en el cual también se basan una gran cantidad de libros. Las ventajas contra el sistema Arduino son el bajo costo y su implementación a largo plazo. Sin embargo, en el desarrollo de este trabajo se resolverán las desventajas, que serían la falta de interacción con el usuario.

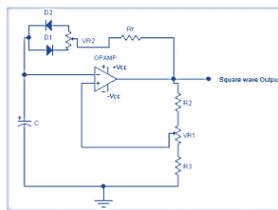


Fig 1: Square Wave Oscillator

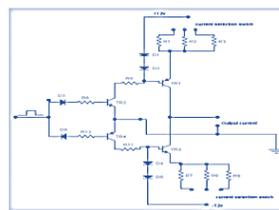


Fig 2: Constant Current

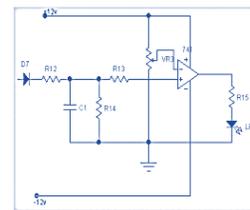


Fig 3: Current Level Detector

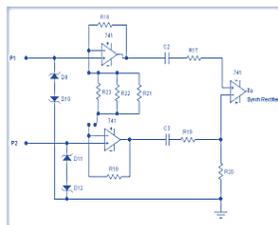


Fig 4: Differential Amplifier

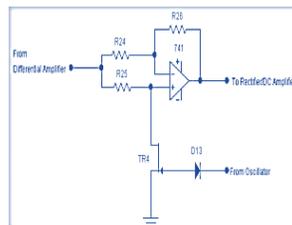


Fig 5: Synchronous Rectifier

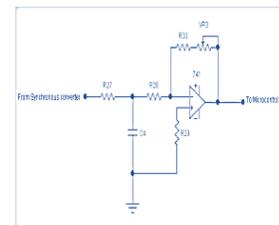


Fig 6: DC Gain Amplifier

Figura 9. Diagramas de los circuitos de los componentes del medidor (Mikailu et al., 2015).

En 2010, Haik comparte diversas formas para el proceso de un diseño, limitando el número de pasos a los siguientes cinco:

- Requisitos
- Concepto del producto
- Concepto de solución
- Diseño de incorporación
- Diseño detallado

Para encontrar un panorama más completo hablaremos primeramente de estos pasos.

Si queremos hablar de los requisitos de un diseño, es necesario identificar la necesidad; siendo breves esto proviene de la caracterización de propiedades resistivas en un medio geológico a partir de mediciones eléctricas, siendo el procesamiento de los datos adquiridos tanto de interés académico como de la sociedad en general.

Existen distintas marcas que cubren esta necesidad a partir de equipos de mediciones geoeléctricas y para clarificar esta investigación, se decidió mostrar uno de los equipos más comunes de encontrar en el mercado, el Syscal Pro. Tal y como indica en su página oficial el Syscal Pro es un sistema de polarización inducida y resistividades multimodo para estudios geofísicos. En la tabla 1 se muestran las especificaciones del mismo.

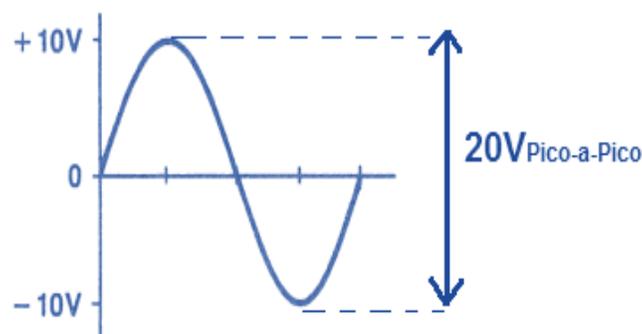


Figura 10. Ejemplo de voltaje pico-a-pico.
(learningaboutelectronics.com)

Tabla 1. Características técnicas del SYSCAL PRO.

Transmisor	
Voltaje	0-2000 Vpp
Intensidad	0 – 2500 mA
Potencia	250 W
Batería	12 V
Receptor	
Duración del pulso	250 ms, 500 ms, 1 s, 2 s, 4 s, 8 s
Impedancia	100 MOhms
Voltaje	15 V, ganancia automática
Dimensiones	
Largo x ancho x alto	31x23x31 cm
Peso	11 kg
Temperatura de funcionamiento	-20 hasta +70° C

Estos datos se emplearán más adelante para una comparación elaborada del prototipo desarrollado en esta tesis. Sin embargo, parece necesario esclarecer el término *Vpp* empleado en el rango de voltaje del transmisor. El voltaje pico a pico, *Vpp*, es una forma de onda de voltaje que se mide desde la parte superior de la forma de onda, llamada cresta, hasta el fondo de la forma de onda (Haik, 2010).

En la figura 10 podemos observar un ejemplo de lo anterior. El valor entre ambas crestas suma un total de 20 *Vpp*. Y esto, aunque está relacionado, no es el voltaje máximo (*Vmax*) de la fuente, ya que, según Haik (2010), el valor de *Vpp* será el doble que su *Vmax* y, por tanto, en el caso del Syscal, al tener un *Vpp* igual a 2000, su voltaje máximo será de 1000 V.

Continuando con la metodología, habrá que dividir el problema en partes que se puedan atacar por separado:

1. Electrónica

2. Programación
3. Prospección

En este apartado se detallará la metodología específica para cubrir cada uno de los aspectos anteriores.

2.2 Diseño de la electrónica

Después del apartado de prospección, es en la electrónica en donde tenemos más información, debido a la documentación anteriormente publicada. Como ya se había mencionado anteriormente, independientemente de la forma en la que se muestran los datos, todo equipo que mida resistividad debe contar con lo siguiente:

- a) Un generador
- b) Un receptor
- c) Cables
- d) Electrodo metálicos

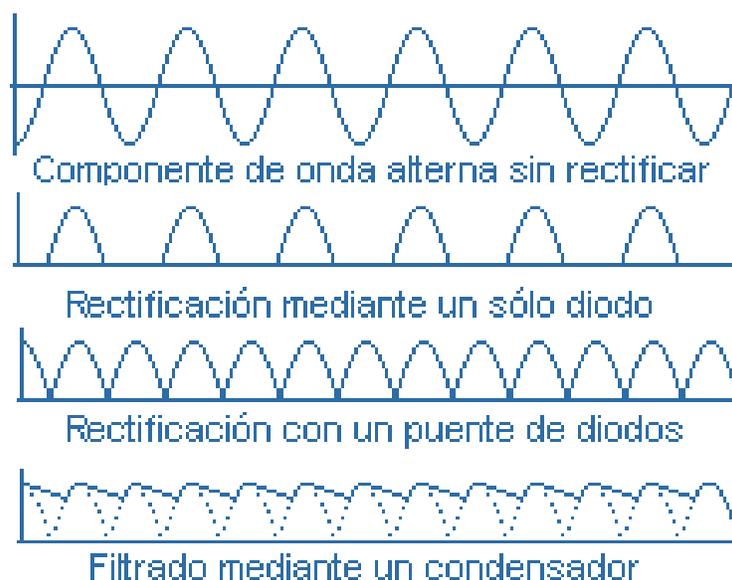


Figura 11. Proceso de rectificación de ondas alternas.
(www.ciencia-ficcion.com)

Siendo el generador el punto que más nos interesa por el momento, ya se hablará más adelante de la recepción en la división de programación. Entonces, continuando con este apartado, el generador puede definirse como la parte encargada de controlar la corriente que se inyecta al subsuelo, misma que debe ser de corriente alterna (CA) y alta tensión, debido a que con estas características se transmite mejor en el subsuelo, este tipo de corriente es la que usamos en los enchufes o tomas de corriente de nuestras viviendas Este tipo de corriente es la más habitual porque es la más fácil de generar y transportar, sin embargo, en campo no se tienen esta facilidad, lo que nos lleva a generar nuestra propia corriente.

Los inversores de corriente, o voltaje, son dispositivos electrónicos que convierten un determinado voltaje de entrada (CD) en otro voltaje de salida (CA). Es decir, reciben corriente continua de un determinado voltaje y proporciona corriente alterna generalmente de un voltaje diferente. Esto resulta ideal para nuestro proyecto ya que el transporte de baterías de CD es mucho más sencillo y gracias a un inversor podemos alternar la corriente. Cabe remarcar que es prioritario facilitar el transporte del instrumento, ya que su utilización es necesariamente en campo, lo que limita su traslado.

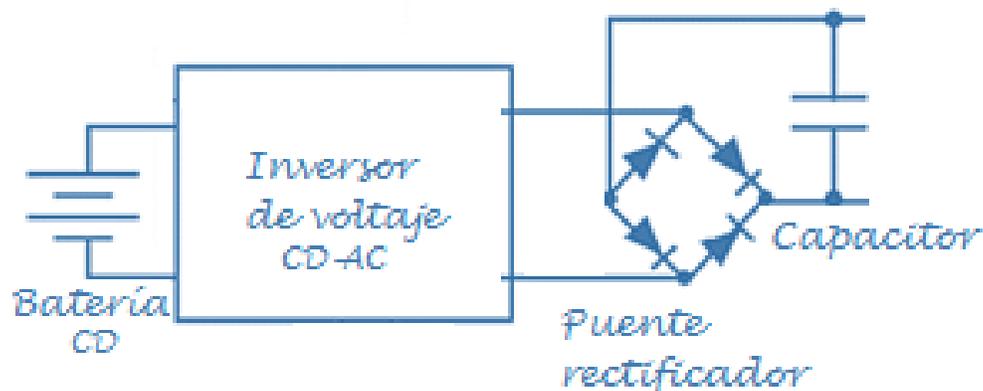


Figura 12. Diagrama eléctrico del generador

Ahora que ya tenemos la corriente alterna, que es intrínsecamente senoidal, es necesario rectificarla (Figura 11), lo que significa asemejarla de nueva cuenta a una corriente directa, ahora con el voltaje incrementado, para esto es necesario el uso de diodos que sólo permiten el paso de la corriente positiva, como se muestra en la imagen, el uso de un solo diodo nos limitaría a usar simplemente una corriente intermitente positiva, para solucionar este problema

es posible usar un puentes de diodos, los cuales redirigen las componentes negativa y positiva. Para refinar aún más el dispositivo, es posible recurrir a capacitores (también llamados condensadores, dispositivos pasivos utilizados en electrónica los cuales son capaces de almacenar energía, sustentando un campo eléctrico), a fin de alisar la componente de onda entregada por el puente de diodos.

Entonces, las partes esenciales del generador (Figura 12) serían:

- Batería de corriente directa
- Inversor
- Puente rectificador
- Capacitador

2.2.1 Batería

En este pequeño apartado describiremos los materiales y su adquisición sujeta a las posibilidades del mercado. Comenzando por la batería, la cual depende totalmente de las necesidades del inversor que será descrito más adelante. En el mercado existen diferentes tipos de baterías: Alcalinas, Ácido plomo, Níquel, Níquel hierro, Níquel cadmio, de Litio, iones de litio, Polímero de litio (LIPo), grafeno, etc.

Para este proyecto dos baterías cumplían con ciertos requisitos de transporte, duración y viabilidad: Ácido plomo y LIPo. La batería de plomo, es un tipo de batería común en vehículos convencionales, funciona como batería de arranque, aunque también se utilizan como batería de tracción de vehículos eléctricos. Y suele proporcionar una tensión de 6 V o 12 V. El principal inconveniente de este tipo de batería es el peso, que ronda los 20 kg. Por otro lado, las baterías tipo LIPo, son pilas recargables (células de secundaria), compuestas generalmente de varias células idénticas en paralelo para aumentar la capacidad de la corriente de descarga, y están a menudo disponibles en serie de *packs* para aumentar el voltaje total disponible, aunque el peso de estas baterías es radicalmente menor al de las anteriores encuentra un problema en el precio y su baja capacidad de amperaje por hora. Para los fines del proyecto resulta más rentable el

uso de baterías Ácido plomo, sin embargo, no se descarta el posible uso de baterías LIPO como mejora. Comercialmente se encontró una batería de 12 V a 33 Ah.

El amper-hora indica la cantidad de carga eléctrica que pasa por los terminales de una batería proporcionando una corriente eléctrica de 1 amper (A) durante una hora (h). Se utiliza para medir la capacidad de una batería, es decir la cantidad de electricidad que puede almacenar durante la carga y devolver durante la descarga.

2.2.2 Inversor

Como dijimos, la batería depende de las necesidades del inversor, que a su vez depende de las necesidades del proyecto. Existen inversores con diferente capacidad de salida siendo esta capacidad medida en la cantidad total de watts (W) que pueden suministrar. Siempre es conveniente adquirir un inversor con más capacidad de la que vayamos a necesitar, Clark y Page (2011) sugieren 700 W de salida. Los inversores comerciales suelen tener una entrada de 75 A y 12 V de CD (Batería) y una salida de 120 V de CA, a 60 Hz¹. Haciendo una operación rápida, para explicar mejor el concepto de Ah, habremos del amperaje-hora de la batería, 33 Ah, si suministra con esta energía a un inversor de 75 A, entonces la batería se terminaría en $33 \text{ Ah} / 75 \text{ A} = 0.44 \text{ h}$, lo que se traduce en 26 minutos de uso efectivo.

2.3 Diseño de la programación

Para comprender la programación primero hay que esclarecer la lógica de la toma de datos. Para empezar, la intensidad de corriente suele medirse con un amperímetro, para efectuar la medida es necesario que la intensidad de la corriente circule por el amperímetro, por lo que éste debe colocarse en serie entre los electrodos A y B. Esta medición debe ser realizada siempre que la corriente sea inducida en el subsuelo, por tanto, la medición pueda variar en el tiempo, dadas las condiciones irregulares del subsuelo y la sensibilidad del equipo de medición, lo que

¹ 60 Hz es la frecuencia de la electricidad doméstica en América y 120 V el valor eficaz de la tensión.

conocemos como ruido, por tanto conviene obtener una moda aritmética de varias lecturas consecutivas, implementar el promedio de las lecturas en ambientes de programación es sencillo y fácil de entender, simplemente habría que sumar las lecturas y dividir las por el número de muestras. La cantidad de muestras para calcular el promedio dependería del nivel de ruido que estas tengan.

Definimos la media aritmética entonces:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

N , que representa la cantidad de muestras dependerá del tiempo que dure la corriente inyectada y el tiempo en que se efectúe la medición de voltaje.

Para medir la diferencia de potencial de manera sencilla es utilizado comúnmente un voltímetro, también ya definido con anterioridad. Para su uso, el voltímetro debe de colocarse en paralelo al circuito, lo que significa posicionarlo sobre los puntos entre los que tratamos de efectuar la medida, en este caso, entre los electrodos M y N. Semejante al caso anterior será necesario obtener una media aritmética de los datos de voltaje obtenidos. Sin embargo, en el caso de la diferencia de voltaje habrá que ser más rigurosos con los datos obtenidos, por lo que se propone repetir este muestreo a fin de asegurarnos que los datos obtenidos no varíen tanto unos de otros, podemos hacer eso ya que la diferencia de voltaje depende de la intensidad de corriente, la cual ya determinamos como variable. Se pueden usar medidas de dispersión para este fin, usualmente las medidas de dispersión nos indican la variabilidad de los datos en la escala de medición. Mientras que las medidas de tendencia central, como la media, son valores en una distribución, las medidas de dispersión son intervalos. Siendo una serie de lecturas consecutivas se hará uso la desviación estándar como nuestra herramienta de fiabilidad, ésta es el promedio de la desviación entre las observaciones con respecto a la media, cuanto mayor es la dispersión de datos alrededor de la media, mayor es la desviación estándar. De manera sencilla: Cuánto se desvía en promedio los datos de la media de todas las lecturas.

La fórmula de la desviación sería:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N}}$$

Cabe aclarar que el promedio (\bar{X}) señalado en la fórmula anterior, no refiere al obtenido en los primeros cálculos de las lecturas del voltaje, sino a la media de estos cálculos en distintas inyecciones de corriente.

Bien, vamos a aclarar la utilidad de la desviación estándar ahora. Supongamos que realizamos n mediciones del mismo punto, con la misma geometría de los electrodos y el mismo valor de intensidad. Entonces obtenemos la desviación estándar de estas tres mediciones de voltaje, si el valor de esta desviación es mayor a un máximo establecido, se realiza otra medición, donde con los nuevos datos obtenidos, se repite la operación de desviación, de esta manera hasta obtener un valor que entre dentro de los parámetros deseables o necesarios. El proceso puede ser explicado de manera más sencilla con un diagrama de flujo (figura 13).

La prospección o toma de datos de un resistivímetro puede llevarse a cabo en cualquiera de los métodos eléctricos presentados antes, con fines explicativos, usaremos como referencia el método SEV. En esta técnica existen cuatro electrodos, dos de corriente (A, B) y dos de potencial (M, N), acomodados en línea recta de manera $A\ MN\ B$, mejor explicado durante el marco teórico. Como se expone en el diagrama de la figura 13, el primer paso resulta de la inyección de corriente y a partir de ahí la lectura continua de datos hasta encontrar resultados, esto debe activarse de manera manual y continuar con el proceso de manera automatizada.

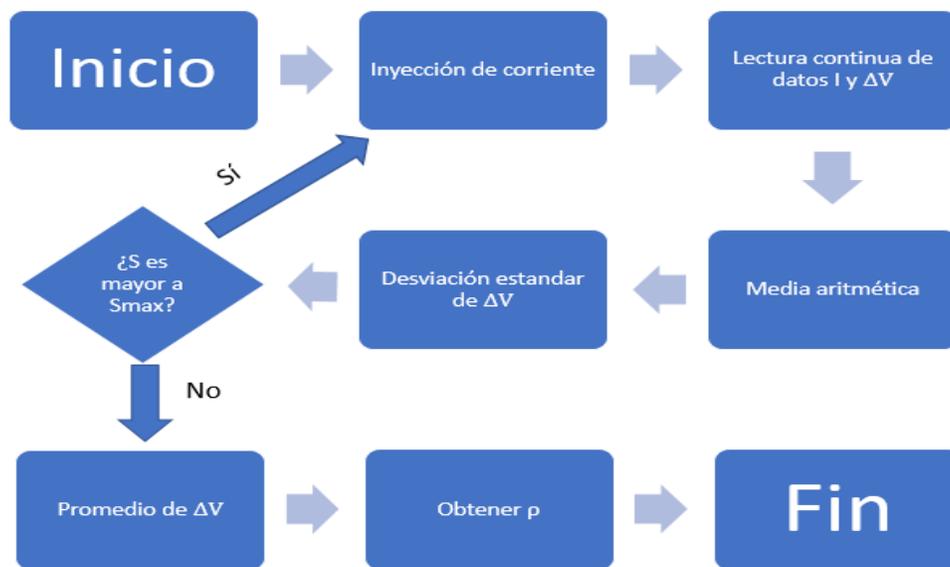


Figura 13. Diagrama de flujo de la adquisición de datos a partir del valor de la desviación estándar (S).

Por tanto, la calibración del instrumento, la selección del método, la manera en que se tomarán los datos, etc., deberá ser planteada en este Inicio y esto debe ser posible a través de la aplicación conjunta de la programación y la electrónica.

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o señales analógicas de voltaje e intensidad de corriente alterna) y convertirlas en una salida: activar un motor, encender un LED. Es posible programar la tarjeta y así enviar un conjunto de instrucciones al microcontrolador de la tarjeta. Para hacerlo, se utiliza el lenguaje de programación Arduino y el software Arduino (IDE).

Resulta ideal para este primer prototipo el uso de esta tarjeta, que nos permitirá avanzar en pruebas, y sus respectivos errores, en un ambiente amigable. De manera que nos sea posible programar el uso de lo electrónico como la toma de datos.

El proceso de programación se puede dividir en tres partes:

- **Toma de datos**
- **Interfaz de usuario**
- **Escritura de datos**

2.3.1 Toma de datos

Existen varios tipos de filtros, que dependiendo de la complejidad pueden consumir recursos en la programación, puede usarse la media aritmética de varias lecturas consecutivas; sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, existen métodos más robustos para eliminar el ruido que se pueda presentar, como la mediana y la moda. Para corroborar que los datos sean coherentes usamos la desviación estándar también explicada con anterioridad.

El proceso comienza con la lectura de los datos crudos, esto ocurre cada 12500 microsegundos y dependiendo de cuánto dure la medición se repetirá esta lectura a lo largo de 0.5, 1 o 2 segundos. En el caso de un muestreo de 1 segundo, el programa hará 80 mediciones de datos crudos y los almacenará en un *array*, el cual es procesado a través de una librería para obtener

el valor de la mediana. Este algoritmo fue propuesto por Phil Ekstrom en el 2000. Usa una combinación de buffer circular y linkedlist para mejorar la eficiencia del filtro de mediana.

En Arduino, un *array* es un conjunto de valores a los que se accede con un número índice. Cualquier valor puede ser recogido haciendo uso del nombre de la matriz y el número del índice. El primer valor de la matriz es el que está indicado con el índice 0, es decir el primer valor del conjunto es el de la posición 0. Un *array* tiene que ser declarado y opcionalmente asignados valores a cada posición antes de ser utilizado.

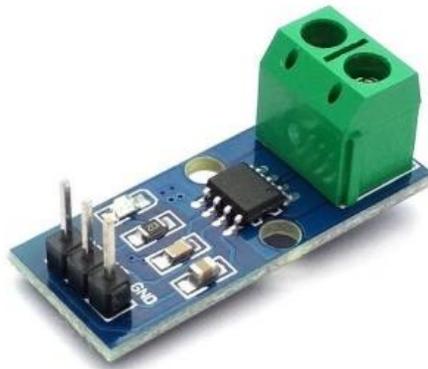
Para explicar el siguiente paso, es necesario comprender el significado de un valor bien medido, ya que los primeros filtros de adquisición son los más importantes para un buen procesado. Dicho esto, cuando el algoritmo obtiene el valor de la mediana para uno de los *arrays*, el programa continúa hasta obtener tres distintas medianas de tres distintos *arrays*. Con estos, el programa obtiene un primer valor de desviación estándar (S), el cual será comparado con un valor antes establecido al que ahora llamaremos *Quality Factor (Factor de Calidad, Q)*, si el valor de la desviación es menor al factor, entonces estos datos están dentro de un parámetro aceptable y se tomará el promedio de los tres. Caso contrario, se tomará otro conjunto de datos y se obtendrá una nueva desviación, repitiendo el proceso anterior. Esto mismo se puede realizar automáticamente hasta un total de siete veces, si en este momento el valor de la desviación estándar sigue siendo mayor al factor de calidad, entonces se descartará esa medición.

2.3.2 Interfaz de usuario

Para la lectura de los datos era no sólo necesario el proceso de la adquisición de datos, el programa debía ser manipulable por el usuario a fin de poder ingresar datos que posteriormente facilitarán su lectura e interpretación posterior cuando los datos fueran leídos por software especializado.

Se decidió por el uso de una pantalla LCD de 4x20 y un teclado matriz de 4x4 (Figura 13). En la interfaz el usuario puede introducir los siguientes datos:

- Nombre del archivo
- Tipo de arreglo tetraelectrónico
- Tipo de medición (Resistividad aparente, resistividad)
- Localización de la fuente
- Toma de datos IP (Polarización inducida)
- Tiempo de medición en segundos
- Valor del factor de calidad Q
- Posiciones de los electrodos M, N, A, B



**Figura 14. Sensor ASC712
(iberobotics.com)**

Una vez introducidos estos datos, el prototipo inyectará corriente eléctrica al subsuelo y se medirá la cantidad de amperaje inducido en el medio. La medición de la intensidad se realizará con un sensor de corriente especializado para Arduino: ASC712, (Figura 14) que internamente trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce al inducir una corriente. La salida del sensor es un voltaje analógico proporcional a la corriente, siendo 2.5 Volts el valor para una corriente de 0 Amperes y a partir de ese valor, incrementa proporcionalmente, dando una relación lineal entre el voltaje de salida y la corriente medida.

$$V = mI + 2.5$$

Donde: m , es la sensibilidad del sensor.

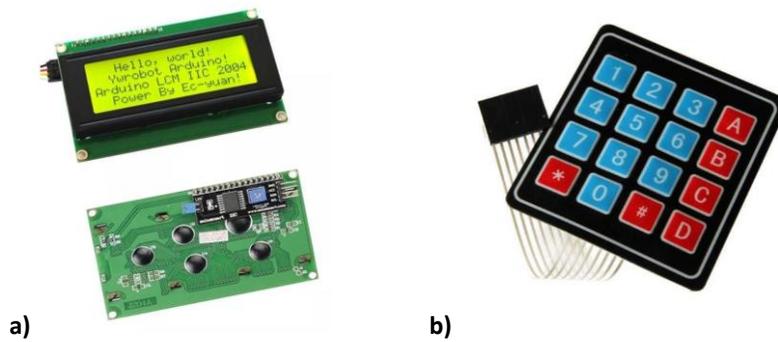


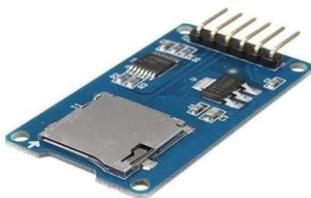
Figura 15.
a) Pantalla LCD 4x20. b) Teclado matricial 4x4
(iberobotics.com)

Posteriormente al ser inyectada la corriente, como marca la teoría, se creará una diferencia de potencial en los electrodos M y N, misma que será medida directamente en el Arduino, conectando el positivo como entrada y el negativo a tierra eléctrica.

Una vez obtenidos estos datos se escribirán en un documento *.txt mejor explicado en la siguiente sección. El proceso puede continuar para tomar el siguiente punto, actualizando los datos de las posiciones de los electrodos A, B, M y N y así repetir las mediciones las veces que sean necesarias para el proyecto.

2.3.3 Escritura de datos

En Arduino se utilizó un lector de microSD (Figura 16), en donde se creó un archivo *.txt. En el desarrollo del programa se escriben o sobrescriben los datos recopilados tal y como sugiere el uso del formato URF, dejando un archivo listo para su interpretación en software especializado en inversión.



**Figura 16. Lector SD para Arduino
(iberobotics.com)**

Existe variedad de formato de entrada de datos para procesos de inversión, normalmente las compañías que fabrican los equipos crean sus propios formatos. La compañía AGI (Advanced Geosciences, Inc, desarrollador y fabricante líder de sistemas de imágenes de resistividad / IP / SP) sugiere el uso del formato URF (Universal Resistivity Files) para su uso con diferentes equipos y softwares de inversión (Zúñiga Lara, 2012).

Para este formato es necesario escribir las dos primeras líneas como comentarios, que se marcan con “; “. En la tercera se define la unidad de longitud y posteriormente la geometría del arreglo, ID, X, Y, Z. Finalmente se encuentran las mediciones, colocando primero la secuencia de medición [A, B, M, N], completándose con los valores de [V/In, In, Error (%)] (figura 17).

```
; Línea 2A con arreglo WS  
; 220910  
Unit: Meters  
: Geometry  
; ID, X, Y, Z  
1,0,0,0  
2,6,0,0  
3, 12, 0, 0  
4, 18, 0, 0  
5, 24, 0, 0  
...  
: Measurements  
; A, B, M, N, V/In, In, ERROR (%)  
1, 4, 2, 3, 1.189943322, 41.286, 0.3  
1, 6, 3, 4, 0.432851712, 107.069, 8.7  
1, 8, 4, 5, 0.140593978, 365.67, 0.2  
1, 10, 5, 6, 0.197801088, 267.405, 0.5  
1, 12, 6, 7, -0.03559631, 1303.534, 0  
...
```

**Figura 17. Ejemplo de archivo URF
(Zúñiga Lara, 2012).**

2.4 Diseño de la prospección

En la discusión, se decidió el uso de un arreglo tetraelectródico tipo Wenner por la simplicidad, para las pruebas de prospección del dispositivo, aunque se podría programar cualquiera de los arreglos utilizados comúnmente (Figura 18).

Este mismo fue programado en el prototipo, de manera que, ingresando el valor de la distancia entre electrodos a , dentro de los cálculos establecidos, el valor del factor geométrico g es:

$$g = 2\pi a$$

En cualquier dispositivo electródico, si conocemos el factor geométrico g , la corriente eléctrica I que circula por los electrodos A y B, y la diferencia de potencial entre los electrodos M y N, podemos calcular la resistividad aparente.

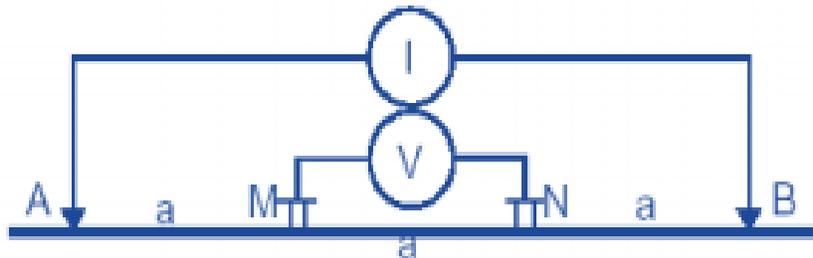


Figura 18. Arreglo tetraelectródico tipo wenner.
(Sepúlveda Escalera, 2009).

3.

Aplicación del diseño integrado.

3.1 Adquisición experimental de datos

Como parte de una correcta adquisición de datos, el prototipo debía cubrir condiciones específicas. Para poder realizar una primera prueba en campo es necesario que:

- El ensamble de circuitos sea óptimo, lo que significa que todo el apartado electrónico debe funcionar sin provocar ningún tipo de cortocircuito o descarga y que la alimentación sea correcta, así como las conexiones en cables y componentes.
- Todas las secciones de programación deben ser verificadas, de tal manera que no existan errores en la compilación ni en el flujo de proceso. El resultado final es el archivo URF que se genera en la tarjeta MicroSD, por tanto, es indispensable que este documento sea legible en cualquier programa de texto.
- Contar con el material necesario para realizar la adquisición en campo, esto es, principalmente cable (baja resistividad) y electrodos metálicos (que se introducirán en el subsuelo para dirigir la corriente eléctrica).

3.1.1 PRUEBA 1

La primera prueba se efectuó el día 11 de diciembre de 2019, dentro de las instalaciones del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, zona basáltica. Las coordenadas son 19°19'37.6" N, 99°10'34.0" O (figura 19). El departamento de Geomagnetismo y Exploración hizo préstamo del material necesario para la adquisición (cable y electrodos).

Esta prueba puede también considerarse como una prueba piloto. Tuvo como objetivo comprobar el funcionamiento general del prototipo a fin de obtener la información suficiente para avanzar con el desarrollo del mismo.

Se realizó un arreglo tetraelectrónico tipo Wenner con una separación, a , de 1 metro (figura 20). El tiempo de inyección fue de 1 segundo con el máximo de corriente, aproximadamente 500 mA.

Como primer punto de comparación se utilizó un multímetro.

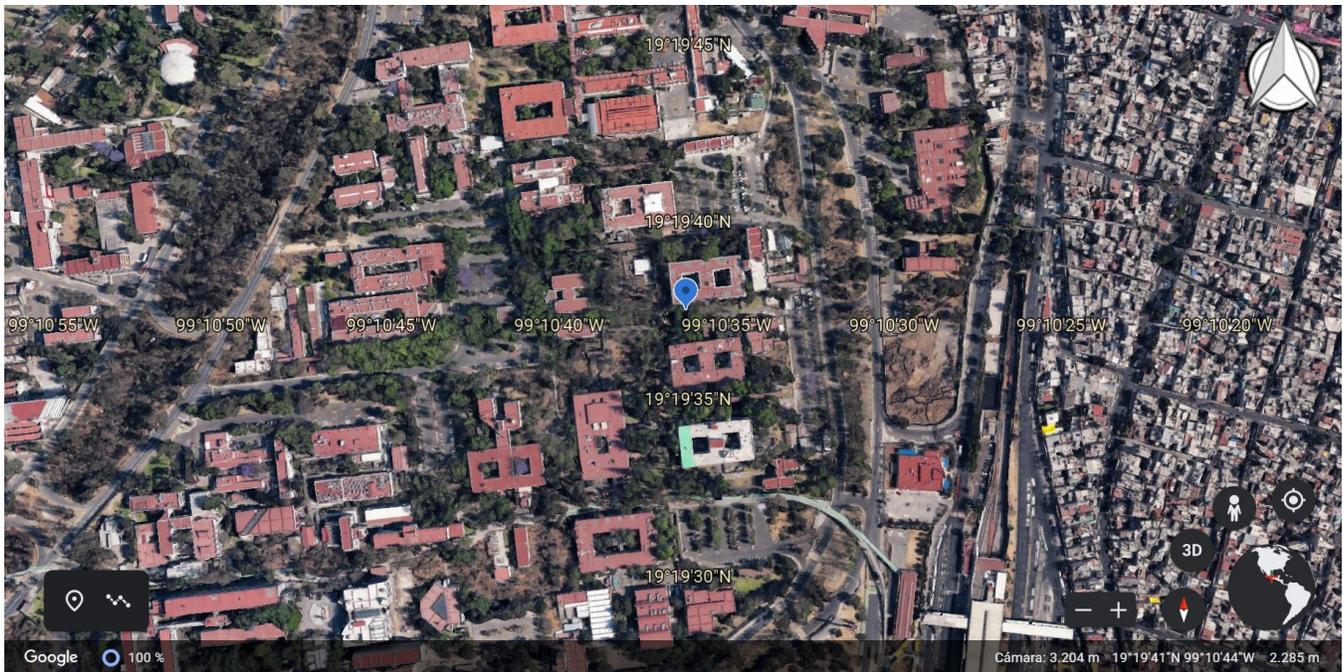


Figura 19. Localización de la primera prueba dentro de las instalaciones del instituto de geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (Google, 2020).

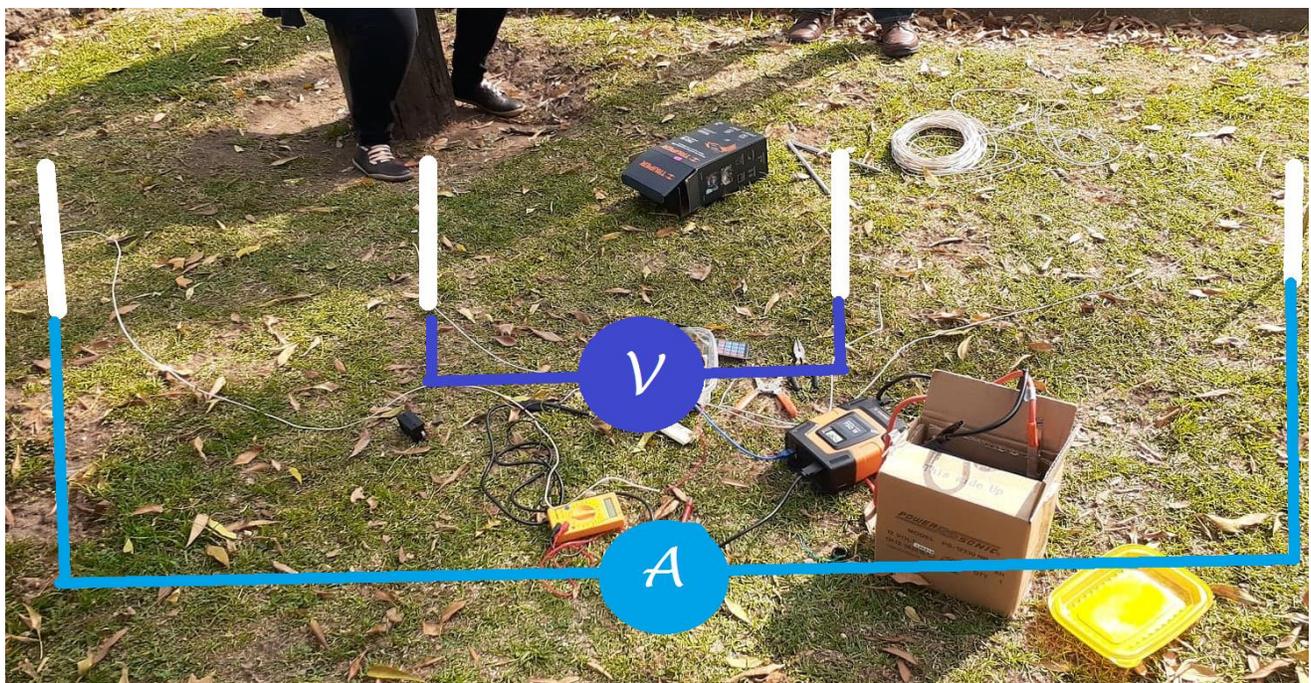


Figura 20. Fotografía de la primera prueba realizada el 11/12/2019. Con ilustraciones de electrodos A, M, N, B. Con lectura de la diferencia de potencial V, intensidad de corriente A.

Resultados

A partir de la prueba anterior se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de adquisición y resultados obtenidos a partir de la prueba 1 efectuada con el dispositivo diseñado.

Voltaje leído en Arduino: 0.20 V

Voltaje leído en Multímetro: 0.44 V

Amperaje leído en Arduino: 5 A

Amperaje leído en Multímetro: 0.6 A

Es fácil notar una diferencia amplia en la intensidad de corriente medida en Arduino contra el valor obtenido contra el multímetro. Esto se discutirá de manera más amplia en la sección Análisis y discusión de resultados.

3.1.2 PRUEBA 2

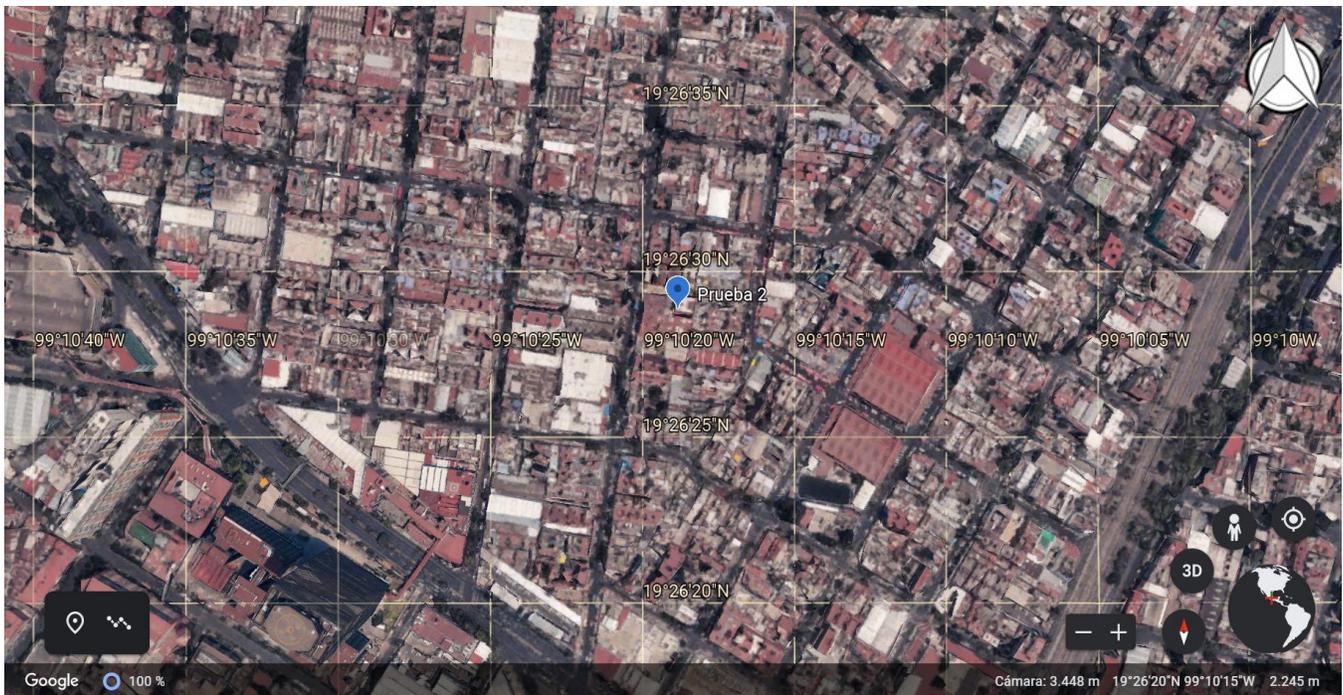


Figura 21. Localización de la segunda prueba en el interior de la Alcaldía Miguel Hidalgo de la Ciudad de México (Google, 2020).

La segunda prueba se realizó el día 16 de marzo de 2020, en domicilio privado en la Alcaldía Miguel Hidalgo de la Ciudad de México, una zona de depósitos aluviales y lacustres. Las coordenadas son 19°26'28.8" N, 99°10'18.8" O (Figura 21). De manera análoga a la prueba anterior, el departamento de Geomagnetismo y Exploración del Instituto de Geofísica de la UNAM hizo préstamo del material necesario para la adquisición (cable y electrodos).

Se realizó un arreglo tetraelectródico tipo Wenner con una separación, a , de 1 metro. El tiempo de inyección fue de 1 segundo con un valor de corriente aproximada de 150 mA.

Resultados

A partir de la prueba anterior se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 2. Evidencias en la figura 22.

Tabla 3. Parámetros de adquisición y resultados obtenidos a partir de la prueba 2 efectuada con el dispositivo diseñado.

Voltaje leído en Arduino:	0.55 V
Voltaje leído en Multímetro:	0.49 V
Amperaje leído en Arduino:	0.35 A
Amperaje leído en Multímetro:	0.38 A



**Figura 22. Se muestran evidencias de la prueba realizada el día 16/03/2020.
a. Conexión b. Resultados**

3.1.3 PRUEBA 3

Esta tercera prueba fue realizada el día 24 de agosto de 2020, en domicilio privado con coordenadas 19°26'28.8" N, 99°10'18.8" O (figura 21), al igual que la prueba anterior. Y de manera análoga a las pruebas anteriores, el departamento de Geomagnetismo y Exploración del Instituto de Geofísica de la UNAM hizo préstamo del material necesario para la adquisición (cable y electrodos).

Para esta prueba se realizó un arreglo tetraelectrónico tipo Wenner con una separación variable de a . El terreno facilitaba un aumento lineal de 0.2 m entre cada medición con un total de 13 disparos de corriente y una apertura máxima AB de 7.8 m. El tiempo de inyección fue de 1 segundo. El valor de corriente oscila entre 100 a 150 mA.

Resultados

En este caso, los resultados se tomaron directamente de la tarjeta SD del instrumento. Obteniendo un formato URF que puede ser revisado en el Anexo II.

3.2 Análisis y discusión de resultados

Los resultados de las pruebas 1 y 2 se analizaron de manera sucinta, debido a que fueron, esencialmente, muestra de que el equipo funcionaba de manera correcta. Tanto el apartado eléctrico y electrónico, como en el área de programación.

De manera breve, en la primera prueba era fácil notar una amplia diferencia en los valores obtenidos en Arduino contra los que arrojaba la medición en multímetro, especialmente en los datos de intensidad de corriente; esta desproporción sugería un daño en las conexiones eléctricas. Al no presentarse esta desigualdad en los resultados de la prueba dos, fue posible la planeación y ejecución de una prueba más elaborada como lo fue la tercera prueba presentada en esta tesis.

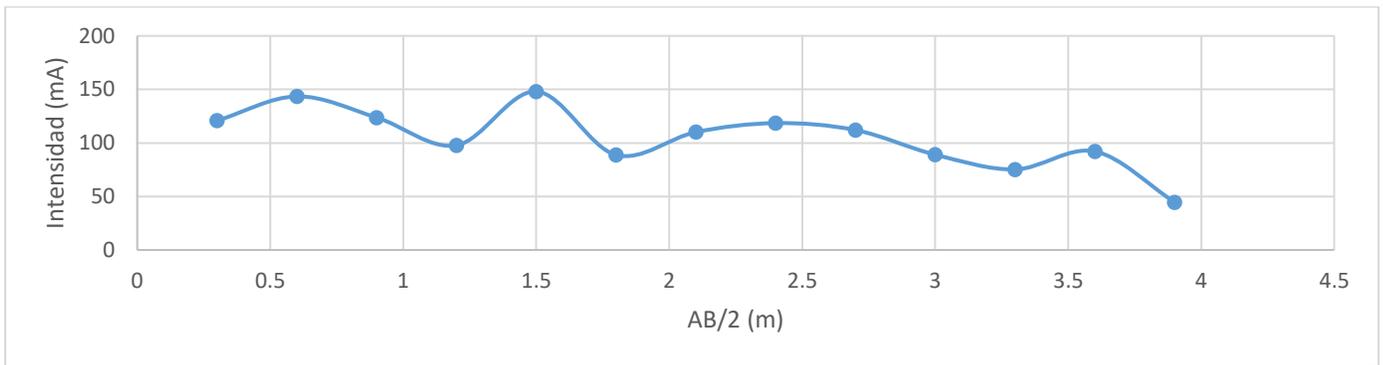
Para el análisis de la prueba tres se obtuvo la tabla 4 gracias al archivo URF.

Tabla 4. Parámetros de adquisición y resultados obtenidos a partir de la prueba 3 efectuada con el dispositivo diseñado.

a (m)	V (mV)	I (mA)	R-aparente (Ωm)
0.2	692.05	120	7.22
0.4	665.61	143	11.64
0.6	587.69	123	17.91
0.8	459.32	97.8	23.62
1	238.32	148	10.11
1.2	112.93	88	9.59
1.4	70.31	110	5.62
1.6	27.22	118	2.31
1.8	19.26	112	1.94
2	14.07	89	1.99
2.2	9.52	75	1.75
2.4	8.35	92	1.37
2.6	23.71	44	8.67

Análisis de Intensidad de corriente

Primero es necesario observar el valor de la intensidad de corriente inyectada. Que oscila entre 50 y 150 mA, con valores constantes cercanos a los 100 mA. Esta constancia nos indica que el instrumento es capaz de mantener una intensidad de corriente estable durante las mediciones. (Figura 23)



**Figura 23. Gráfico obtenido para la interpretación de la intensidad de corriente.
AB/2 vs Intensidad**

Análisis de la diferencia de potencial

Los valores obtenidos en la diferencia de potencial nos muestran una descendencia cuadrática conforme los electrodos se comienzan a separar, lo cual es usual en mediciones de resistividad. Ningún valor resulta especialmente anómalo, a excepción del $a=2.6$. (Figura 24)

La diferencia de potencial obtenida en $a=2.6$ es de 23.71 v, lo cual resulta anómalo debido a que la diferencia de potencial debería decrecer con la apertura AB, es decir, con la profundidad del arreglo. Este punto botado, puede deberse a factores propios del prototipo con el que se hizo la medición. Este tipo de anomalías puede provocar dificultades durante la interpretación de la resistividad aparente en donde es posible apreciarlo de mejor manera.

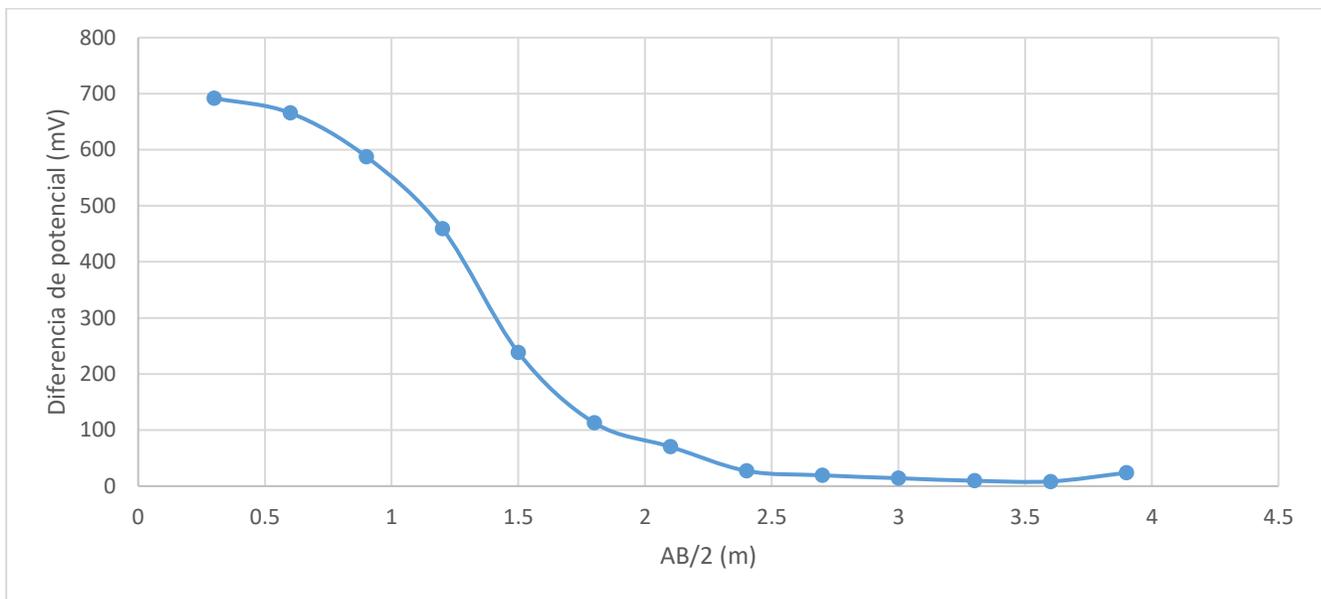


Figura 24. Gráfico obtenido para la interpretación de los datos obtenidos de la diferencia de potencial. AB/2 vs Diferencia de potencial.

Análisis de la resistividad aparente

La interpretación precisa de esta clase de datos es una labor rigurosa. Sin embargo, puede resultar evidente la tendencia que toman al verlos en la gráfica logarítmica, exceptuando el valor de la medición número 13, $a=2.6$, comentado en la sección anterior. Los valores, aunque bajos en resistividad, entran dentro de los parámetros normales para mediciones de resistividad en profundidades someras y con materiales esencialmente granulares de tamaño pequeño (limos y arcillas) (Figura 25).

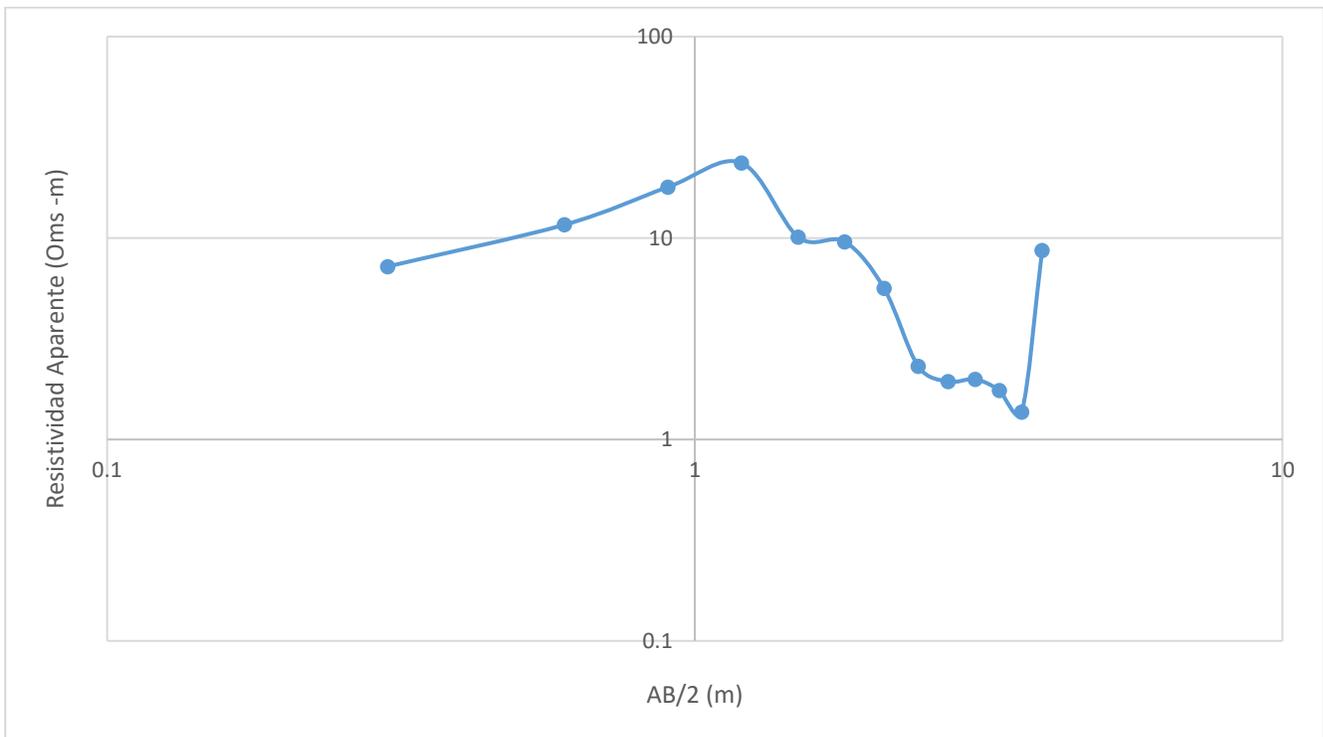


Figura 25. Gráfico obtenido para la interpretación de los datos obtenidos de resistividad aparente a partir de la constante geométrica y los valores de voltaje e intensidad. Ambos ejes se encuentran en escala logarítmica
AB/2 vs Resistividad aparente

3.3 Análisis integral del prototipo

El análisis de la prueba 3 nos da la oportunidad de obtener características reales del prototipo. Ya que se ha puesto a prueba en condiciones reales y no sólo teóricas. De manera que a continuación se presentarán estos datos.

Tabla 5. Características técnicas del prototipo

CARACTERÍSTICAS – Prototipo	
Transmisor	
Voltaje	0-180 V CD
Intensidad	0 – 400 mA
Potencia	70 W
Batería	12 V
Receptor	
Duración del pulso	500 ms, 1 s, 2 s, 3 s
Voltaje	5 V, ganancia automática
Dimensiones	
Peso	5 kg

Utilizando la tabla anterior y las características del Syscal Pro realizaremos una comparación que nos ayudará a tener una proporción más clara del prototipo.

Voltaje de salida

Prototipo: 0-180 V CD

Syscal: 0-1000 Vmax (0-2000 Vpp)

El voltaje máximo del prototipo se aproxima a un 20% del potencial del modelo comercial Syscal. Para este ejercicio de comparación podemos definir el voltaje como el trabajo ejercido sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas. Como es posible apreciar en los gráficos de la sección anterior, el potencial decrece a medida que la distancia entre electrodos aumenta; esto quiere decir que el factor que afecta el voltaje de salida será en la profundidad máxima del estudio.

Intensidad de corriente

Prototipo: 0-400 mA

Syscal: 0-2500 mA

De manera semejante al caso anterior, el factor a tomar en cuenta en este caso será la resolución del sondeo, al ser la intensidad la que mueve al potencial dentro de cualquier sistema. La resolución decrece con la profundidad, por tanto, para prospección somera, la resolución será semejante entre ambos equipos.

Duración de pulso

Prototipo: 500 ms, 1 s, 2 s, 3 s

Syscal: 250 ms, 500 ms, 1 s, 2 s, 4 s, 8s

La duración de los sondeos programados para el prototipo se determinó a partir del tiempo común de medición en campo. A mayor duración del pulso, más datos obtendrá el sistema y la desviación estándar será más precisa. Aunque, al mismo tiempo, para ambos equipos, esto también significa el uso de más memoria volátil.

Cabe aclarar que es posible aditar otras gamas de duración en la programación del prototipo, sin embargo, la memoria de almacenamiento volátil del sistema Arduino es limitada y el uso excedente a 4 segundos podría reiniciar el programa automáticamente a fin de liberar memoria

Alcance del receptor de voltaje

Prototipo: 5 V

Syscal: 15 V

El voltaje que puede alcanzar el receptor de un sistema para medir resistividad influye directamente en la calidad de los datos. Aunque los datos de entrada estén en el orden de los mV, el aplicar una ganancia a los datos permite apreciarlos de mejor manera, semejante a acercarse a una fotografía para distinguir pequeños detalles. Aunque el alcance del receptor Syscal sea tres veces mayor, el simple hecho de aplicar una ganancia a 5 V ya permite mejorar la calidad de los datos de una manera considerable.

Peso

Prototipo: 5 Kg

Syscal: 11 Kg

El peso es un factor de importancia cuando de trabajo en campo se trata. La menor masa de un artefacto para prospecciones geofísicas facilita su transporte y el trabajo mismo. Es por esto que un menor peso es un elemento importante a considerar,

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Se construyó un prototipo de bajo costo que fue capaz de realizar mediciones de resistividad eléctrica del subsuelo. Los resultados obtenidos de este dispositivo fueron comparados con un equipo altamente utilizado para los mismos fines y se comprobó la factibilidad de construir un prototipo de bajo costo capaz de realizar mediciones fiables de resistividad del subsuelo.
- El diseño y calibración de diferentes prototipos y su comparación son indispensables para una mejora constante. Al igual que la integración de electrónica, programación y geofísica.
- Las diferencias que existen entre el prototipo propuesto y el modelo comercial no son críticas al considerar los factores económicos.
- Una de las principales limitantes del equipo diseñado recae en su potencia. Los máximos de salida para los parámetros de voltaje e intensidad son apenas 1/5 de los de un equipo comercial.
- La interfaz de usuario aún resulta perfectible, debido principalmente al tipo de pantalla empleada en el prototipo.
- Finalmente, se trata de un primer prototipo, el cual es susceptible de mejora, siempre guardando la filosofía de mantener bajo costo y conservar la calidad de las mediciones realizadas.

Recomendaciones

- Interpretar completa de los datos obtenidos durante la Prueba 3
- Realizar la Prueba 3 con el Syscal Pro con el fin de comparar resultados
- Realizar nuevos sondeos con el diseño propuesto y comparar los resultados con otros modelos comerciales
- Realizar pruebas con baterías tipo litio para aminorar el peso total del prototipo
- Analizar distintas maneras de compensar el potencial natural del subsuelo de manera automatizada.
- Evaluar el uso de pantallas inteligentes que permitan configurar de modo más práctico el sondeo.
- Revisar fuentes de poder de alto voltaje, comparar precios y voltajes de entrada.
- Probar distintos arreglos tetraelectrónicos con el fin de comparar los resultados

Referencias

- Clark, J. A., y Page, R. (2011). Inexpensive Geophysical Instruments Supporting Groundwater Exploration in Developing Nations . *Journal of Water Resource and Protection*, 768-780
- Clark, J. A., Page, R. T., Franklin, R., Miller, N. M., y Morken, M. O. (2016). Appropriate geophysics technology: Inexpensive instruments for water exploration at a local level in developing nations. *The Geological Society of America, Special Paper 520*.
- Binley, A. (Diciembre de 2010). Hydrogeophysics: opportunities and challenges. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, Vol. 51, n. 4, pp. 267-284. Obtenido de researchgate.net/publication
- Binley, A., y Andreas, K. (2006). DC RESISTIVITY AND INDUCED POLARIZATION METHODS. En Y. Rubin, y S. S. Hubbard, *Hydrogeophysics* (págs. 129-156). Berkeley, EUA: Springer Science y Business Media.
- Daza Hernández, F. A. (30 de Noviembre de 2012). *dgeo.udec.cl*. Obtenido de http://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2012/09/felipe_daza_tesis.pdf
- Gama Geofísica. (2012). *Gama Geofísica*. Obtenido de <http://www.gama-geofisica.com>
- Geotem. (2016). *Geotem*. Obtenido de <http://www.geotem.com.mx>
- Haik, Y. (2010). *Procesos de diseño de ingeniería*. Obtenido de researchgate.net/publication/Engineering_Design_Process
- Mikailu, A., y et al. (2015). Development of Digital Resistivity Meter. *Advances in Physics Theories and Applications Vol. 42*, 56-63.
- Ramos Alvarez, M. (2012). *Principios de electrónica*. Estado de México: RED TERCER MILENIO.
- RUELSA. (agosto de 2020). *RUEL S.A*. Obtenido de <https://www.ruelsa.com/notas/tierras>

- Schlumberger . (2019). *Oilfield Glossary en Español de Schlumberger* . Obtenido de glossary.oilfield.slb.com
- Slater, L. (2007). Near Surface Electrical Characterization of Hydraulic Conductivity: From Petrophysical Properties to Aquifer Geometries. *Surv Geophys*, 28:169–197.
- Sanchez, J. (2019). *Hidrogeología*. Obtenido del Departamento de Geología . Universidad de Salamanca (España): hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf
- Sepúlveda Escalera, E. L. (2009). *Diseño de un resistivímetro de corriente directa para realizar estudios geoelectricos en los Valles Centrales*. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca.
- Spies, B. R., y Eggers, D. E. (1986). The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods. *GEOPHYSICS (Society of Exploration Geophysicists)* , 1462–1471.
- Zúñiga Lara, R. (2012). *Detección de zonas de riesgo en la Ciudad de Guatemala*. Obtenido de Ptolomeo UNAM: <http://www.ptolomeo.unam.mx>

Anexos

Anexo I. Script de Arduino

```
// Incluimos la librería para obtener la mediana
#include "QuickMedianLib.h"
//float Sensibilidad=0.1; // Variable de
Sensibilidad en V/A para sensor de ASC712 a
30A
int muestrasporsegundo; // Muestras/segundo
para mediana de V
//int y = 200; // Número de muestras para el
promedio de I **
const int pin_rele = A3; // Salida del relé
float V;
float mV=V*1000;
float I;
float VI;

float Vx[7];
float Ix[7];

#include <SD.h>
#include <SPI.h>
File Archivo;
String cadena="";

//Declaración de variables para Potencial
Natural
int PinM = 6;
int PinN = 9;

//Declaración de variables que serán leídas del
SD
float SD_EspacioElectrodos;
int SD_Dato2;
int SD_TipoArreglo;
int SD_TipoMed;
int SD_NumDataPoint;
int SD_Xlocal;
int SD_DatosIP;
int SD_Tiempo;
float Smax;
float Errors;

#include <LiquidCrystal.h>
const byte row1=30; //keypad row pins, shared
with the lcd data lines
const byte row2=31;
const byte row3=32;
```

```
const byte row4=33;
const byte col1=34; //keypad column lines
const byte col2=35;
const byte col3=36;
const byte col4=37;
LiquidCrystal lcd(39, 38, row4, row3, row2,
row1); //lcd object

byte numpressed; //último número presionado
del teclado
byte timespressed; //veces que se ha
presionado
byte cursorx=0; //posición x (Teclado)
byte cursory=2; //posición y
char letter; //guarda el último caracter
const int wait=1000; //Tiempo a esperar antes
de presionar el mismo número
const int preventholddelay=150; //Tiempo para
prevenir ciclos
unsigned long basetime; //while loop
unsigned long elapsed=0; //tiempo transcurrido
en el while loop
byte lastnumpressed; //Primer número
presionado en el teclado
bool disablespacedelay=false; //desactiva el
retraso en la función de espacio en el caso de
que se presione un número diferente mientras
está en el bucle while
const byte maxtimespressed[16]={
  1,3,4,4,4,4,4,5,4,5,1,7,1,1,1,1};
//?,1,2,3,4,5,6,7,8,9,*,*,*,*,*

char typedtext[16]; //almacena el texto escrito

int positionintypedtext=0; //Posición en
typedtext
int charremaining; //caracteres restantes
bool promptkeypress=false; //Espera y detecta
pulsaciones de teclas al final de la composición
prompt

int e = 0; // Casos de ENTER (D)
int a = 0; // Casos de AGAIN (A)

void setup(){
```

```

lcd.begin(20,4);
Serial.begin(115200);

if (!SD.begin(4)) {
  Serial.println(F("Error en SD"));
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Error de lectura SD");
  return;
}
Serial.println(F("Inicializacion exitosa"));
SD.remove("datalog.txt");

pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
pinMode(pin_rele, OUTPUT);

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Bienvenido");
delay(2000);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Ingrese parametros");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("de entrada");
delay(1000);

lcd.setCursor(cursorx,cursory);
lcd.noCursor();
pinMode(row1,OUTPUT);
pinMode(row2,OUTPUT);
pinMode(row3,OUTPUT);
pinMode(row4,OUTPUT);
pinMode(col1,INPUT);
pinMode(col2,INPUT);
pinMode(col3,INPUT);
pinMode(col4,INPUT);

delay(wait);
lcd.cursor();

float Arrayprueba[80];
for (int i=0; i<80; i++)
{
  Arrayprueba[i] = analogRead(A0);
  delayMicroseconds(1000000/80);
}

//Potencial Natural
pinMode(PinM, OUTPUT);
pinMode(PinN, OUTPUT);
analogWrite(PinN, 0);

```

```

analogWrite(PinM, 0);
}

void loop(){

  numpressed=16; //resetea "numpressed" (16
no refiere a ningún botón del teclado)

  if (findpress()){ //busca si se ha presionado o
buscado
  timespressed=0; //resetea "timespressed"

  if (numpressed==0){ //si se presiona 0
dozero(); //imprime cero
  letter='0'; //Escribir manualmente un 0 como
para el almacenamiento de texto
  textstorage(1); //guardar de manera regular
(revisar función)
  }

  if (numpressed==10){ // * = espacio
  textstorage(2);
  dospace();
  }

  if (numpressed==14){ // C = borrar
  textstorage(3);
  dobackspace();
  }

  if (numpressed==15){ // D = Enter
  e++;
  }

  if (numpressed==12){ // A = Again
  a++;
  }

  if
((numpressed<10yynumpressed>0)||numpress
ed==11){ //si se presionó 1,2,3,4,5,6,7,8,9 u 11
(cualquiera de las teclas con varios caracteres
asignados),
  lastnumpressed=numpressed;
  basetime=millis(); // Comienza a contar el
tiempo para el While
  while (elapsed<wait){
    if(findpress()){ // Vuelve a checar si se ha
presionado alguna tecla

```

```

        if (numpressed==lastnumpressed){ //y si
es la misma
            incrementtimespressed(); //incrementa
"timespressed"
            basetime=basetime+(wait-(wait-
elapsed));
            definepress(); // A partir de
"numpressed" y "timespressed" define "letter"
            lcd.print(letter);
            lcd.setCursor(cursorx,cursory);
            rowshigh();
            delay(preventholddelay);
        }
        else{ //en cambio, si el número es
diferente al anterior
            disablespacedelay=true; //
            break;
        }
    }
    elapsed=millis()-basetime; //reinicia para el
while
}

    elapsed=0;
    textstorage(1);
    dospace(); //guarda el caracter y se mueve
un espacio a la derecha
}
}

    if (positionintypedtext==16){ //// Máximos
caracteres
        promptkeypress=false;

        // Mensaje
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Excedio el maximo");
        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("numero de caracteres");
        lcd.setCursor(0,2);
        lcd.print("      D = ENTER");
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("      C = BORRAR");

        rowshigh();
        numpressed=16;

        while(!promptkeypress){ //Mientras no se
presione ninguna tecla relevante
            if (findpress()){
                timespressed=0; //reset "timespressed"

```

```

        if (numpressed==14){
            promptkeypress=true; //romper el while
            textstorage(3); //borrar en el vector de
almacenamiento de datos
            for (int i=0;i<20;i++){ //imprimir a la
primera línea en el lcd (3) desde el texto
almacenado
                cursorx=i;
                cursory=2;
                lcd.setCursor(cursorx,cursory);
                lcd.print(typedtext[108+i]);
            }
            for (int j=0;j<20;j++){ //imprimir a la
segunda línea en el lcd (4) desde el texto
almacenado
                cursorx=j;
                cursory=3;
                lcd.setCursor(cursorx,cursory);
                lcd.print(typedtext[123+j]);
            }
            cursorx=19; //colocar el cursor al
comienzo de la segunda fila ???
            cursory=3;
            lcd.setCursor(cursorx,cursory);
            rowshigh(); //sets all rows high
        }

        if (numpressed==15){ //Si se presiona
enter
            outputserial();
            positionintypedtext=0;
            doclear();
            rowshigh();
        }
    }
}

    delay(preventholddelay);

    switch(e){
        case 0:
            digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
            lcd.noCursor();
            break;

        case 1:
            lcd.clear();
            cursorx = 0;
            cursory = 2;

```

```

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Nombre del archivo:");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
break;

case 2:
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
break;

case 3:
e=15;
delay(10);
if (e==3){
outputserial(); // Imprimimos y guardamos el
nombre del archivo
lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 2;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Espacio entre ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("electrodos");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
}
else {
e=15;
}

break;

case 4:
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
break;

case 5:
outputserial(); // Imprimimos y guardamos el
dato anterior

delay(150);
leerSD(); //Leemos el valor de espacio entre
electrodos
SD_EspacioElectrodos=cadena.toFloat();
cadena="";

lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 2;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Tipo de arreglo");

```

```

lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("1.PP 2.PD 3.DD");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
e++;
e++;
break;

case 8:
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
break;

case 9:
outputserial(); // Imprimimos y guardamos el
dato anterior
delay (150);
leerSD(); //
SD_TipoArreglo=cadena.toInt();
cadena="";

lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 2;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Tipo de medicion");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("0.AppRes 1.Res");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
break;

case 10:
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
break;

case 11:
outputserial(); // Imprimimos y guardamos el
dato anterior

delay (150);
leerSD();
SD_TipoMed=cadena.toInt();
cadena="";

lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 2;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Localizacion de x");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("1.MP 2.?? 3.??");

```

```

lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
break;

case 12:
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
break;

case 13:
outputserial(); // Imprimimos y guardamos el
dato anterior

delay (150);
leerSD();
SD_Xlocal=cadena.toInt();
cadena="";

lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 2;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Datos IP");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("0.No 1.Si");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
break;

case 14:
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
break;

case 15:
outputserial(); // Imprimimos y guardamos el
dato anterior

delay (150);
leerSD();
SD_Xlocal=cadena.toInt();
cadena="";

lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 2;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Tiempo de medicion");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("0. 0.5s 1. 1s 2. 2s");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;

```

```

break;

case 16:
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
break;

case 17:
outputserial();

delay (150);
leerSD();
SD_Tiempo=cadena.toInt();
cadena="";

//muestrasporsegundo=40+(SD_Tiempo*40);//U
samos SD_tiempo para obtener X (numero de
muestras/seg)
muestrasporsegundo = (5*pow(2,
SD_Tiempo+3))+1;
Serial.println(muestrasporsegundo);

lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 2;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Valor de Q");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("(Factor de calidad)");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
break;

case 18:
break;

case 19:
outputserial();
delay (150);
leerSD();
Smax=cadena.toFloat();
cadena="";
e++;
break;

case 20:
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
SD.remove("datalog.txt");

```

```

Archivo = SD.open("datalog.txt",
FILE_WRITE);// Abrimos el archivo
if (Archivo) {
  Archivo.println("Linea prueba");
  Archivo.println("");
  Archivo.println("Unit: Meters");
  Archivo.println("Geometry");
  Archivo.println(" ID, X, Y, Z");
  Archivo.println("????????????");
  Archivo.println("...");
  Archivo.println("Measurements");
  Archivo.println("A, B, M, N, V/I, I, Desv");

  Archivo.close(); // Cerramos el archivo
}

```

```

Serial.print(F("Espacio entre electrodos = "));
Serial.println(SD_EspacioElectrodos);
Serial.print(F("Tipo de arreglo = "));
Serial.println(SD_TipoArreglo);
Serial.print(F("Tipo de muestreo = "));
Serial.println(SD_TipoMed);
Serial.print(F("Localización de X = "));
Serial.println(SD_Xlocal);
Serial.print(F("Tiempo seleccionado ="));
Serial.println(SD_Tiempo);
Serial.print(F("Muestras por segundo = "));
Serial.println(muestrasporsegundo);
Serial.print(F("Quality factor = "));
Serial.println(Smax);
e++;
break;

```

```

case 21:
lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 3;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Ingrese:");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("A, B, M, N");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
break;

```

```

case 22:
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
break;

```

```

case 23:
outputabmn();

```

```

tomararray(0);
seriededatos();
e++;
break;

```

```

case 24:
a=0;
break;

```

```

case 25:
lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 3;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Presione D para la");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("siguiente medicion");
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Presione A para");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("finalizar");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
break;

```

```

case 26:
if (a>0){
  e=30;
}
break;

```

```

case 27:
lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 3;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Ingrese:");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("A, B, M, N");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
e++;
break;

```

```

case 28:
break;

```

```

case 29:
a=0;
e=21;
break;

```

```

case 30:
lcd.clear();
cursorx = 0;
cursory = 3;
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Finalizado");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Retire tarjeta SD");
lcd.setCursor(cursorx, cursory);
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("D - Regresar");
e++;
break;

case 31:
break;

case 32:
e=25;
break;
}

}

void rowshigh(){
digitalWrite(row1,HIGH);
digitalWrite(row2,HIGH);
digitalWrite(row3,HIGH);
digitalWrite(row4,HIGH);
}

bool findpress(){ //finds a press to define
"numpressed", if any press occurs, returns true
bool pressfound=false; //variable for any press
detection, is returned by this function

digitalWrite(row1,LOW); //write all rows low
digitalWrite(row2,LOW);
digitalWrite(row3,LOW);
digitalWrite(row4,LOW);

digitalWrite(row1,HIGH); //write first row high
if (digitalRead(col1)==HIGH){ //if the first
column is now high, "1" has been pressed
numpressed = 1;
pressfound=true;
}
if (digitalRead(col2)==HIGH){ //if the second
column is now high, "2" has been pressed
numpressed = 2;
pressfound=true;
}

```

```

}
if (digitalRead(col3)==HIGH){ //if the third
column is now high, "3" has been pressed
numpressed = 3;
pressfound=true;
}
if (digitalRead(col4)==HIGH){ //if the fourth
column is now high, "reset" has been pressed
numpressed = 12;
pressfound=true;
}
digitalWrite(row1,LOW); //return first row low

digitalWrite(row2,HIGH); //write second row
high
if (digitalRead(col1)==HIGH){ //if the first
column is now high, "4" has been pressed
numpressed = 4;
pressfound=true;
}
if (digitalRead(col2)==HIGH){ //if the second
column is now high, "5" has been pressed
numpressed = 5;
pressfound=true;
}
if (digitalRead(col3)==HIGH){ //if the third
column is now high, "6" has been pressed
numpressed = 6;
pressfound=true;
}
if (digitalRead(col4)==HIGH){ //if the fourth
column is now high, "dial" has been pressed
numpressed = 13;
pressfound=true;
}
digitalWrite(row2,LOW); //return second row
low

digitalWrite(row3,HIGH); //write third row high
if (digitalRead(col1)==HIGH){ //if the first
column is now high, "7" has been pressed
numpressed = 7;
pressfound=true;
}
if (digitalRead(col2)==HIGH){ //if the second
column is now high, "8" has been pressed
numpressed = 8;
pressfound=true;
}
if (digitalRead(col3)==HIGH){ //if the third
column is now high, "9" has been pressed

```

```

    numpressed = 9;
    pressfound=true;
}
if (digitalRead(col4)==HIGH){ //if the fourth
column is now high, the arrows have been
pressed
    numpressed = 14;
    pressfound=true;
}
digitalWrite(row3,LOW); //return third row low

digitalWrite(row4,HIGH); //write fourth row high
if (digitalRead(col1)==HIGH){ //if the first
column is now high, "shift" has been pressed
    numpressed = 10;
    pressfound=true;
}
if (digitalRead(col2)==HIGH){ //if the second
column is now high, "0" has been pressed
    numpressed = 0;
    pressfound=true;
}
if (digitalRead(col3)==HIGH){ //if the third
column is now high, "." has been pressed
    numpressed = 11;
    pressfound=true;
}
if (digitalRead(col4)==HIGH){ //if the fourth
column is now high, "enter" has been pressed
    numpressed = 15;
    pressfound=true;
}
digitalWrite(row4,LOW); //return fourth row low

rowshigh(); //write all rows high

return pressfound; //function returns true if
any press found, otherwise returns false
}

void definepress(){ //uses "lastnumpressed" and
"timespressed" to define "letter"
if (lastnumpressed==1){
    if (timespressed==1){
        letter='Q';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='Z';
    }
}
if (timespressed==3){
    letter='1';
}

```

```

}
}
if (lastnumpressed==2){
    if (timespressed==1){
        letter='A';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='B';
    }
    if (timespressed==3){
        letter='C';
    }
    if (timespressed==4){
        letter='2';
    }
}
if (lastnumpressed==3){
    if (timespressed==1){
        letter='D';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='E';
    }
    if (timespressed==3){
        letter='F';
    }
    if (timespressed==4){
        letter='3';
    }
}
if (lastnumpressed==4){
    if (timespressed==1){
        letter='G';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='H';
    }
    if (timespressed==3){
        letter='I';
    }
    if (timespressed==4){
        letter='4';
    }
}
if (lastnumpressed==5){
    if (timespressed==1){
        letter='J';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='K';
    }
}
}
}

```

```

if (timespressed==3){
    letter='L';
}
if (timespressed==4){
    letter='5';
}
if (lastnumpressed==6){
    if (timespressed==1){
        letter='M';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='N';
    }
    if (timespressed==3){
        letter='O';
    }
    if (timespressed==4){
        letter='6';
    }
}
if (lastnumpressed==7){
    if (timespressed==1){
        letter='P';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='Q';
    }
    if (timespressed==3){
        letter='R';
    }
    if (timespressed==4){
        letter='S';
    }
    if (timespressed==5){
        letter='7';
    }
}
if (lastnumpressed==8){
    if (timespressed==1){
        letter='T';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='U';
    }
    if (timespressed==3){
        letter='V';
    }
    if (timespressed==4){
        letter='8';
    }
}

```

```

}
if (lastnumpressed==9){
    if (timespressed==1){
        letter='W';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='X';
    }
    if (timespressed==3){
        letter='Y';
    }
    if (timespressed==4){
        letter='Z';
    }
    if (timespressed==5){
        letter='9';
    }
}
if (lastnumpressed==11){
    if (timespressed==1){
        letter='.';
    }
    if (timespressed==2){
        letter='?';
    }
    if (timespressed==3){
        letter='!';
    }
    if (timespressed==4){
        letter=',';
    }
    if (timespressed==5){
        letter='\';
    }
    if (timespressed==6){
        letter='\"';
    }
    if (timespressed==7){
        letter='-';
    }
}
}

```

```

void incrementtimespressed(){ //increment
"timespressed" until at max value stored in
maxtimespressed for that lastnumpressed, then
roll over to 1
    if
(timespressed==maxtimespressed[lastnumpres
sed]){//if at the maximum,

```

```

    timespressed=1; //roll over timespressed to
one
}
else{ //otherwise,
    timespressed++; //increment timespressed
}
}

void dozero(){ //prints zero
    lcd.print('0'); //print 0
    lcd.setCursor(cursorx,cursory); //maintain
cursor position
    dospace(); //space
}

void dospace(){ //moves cursor forward once,
wraps to next line if necessary, clears and
returns to top of display if at bottom
    cursorx++; //increment the cursor to the right
    lcd.setCursor(cursorx,cursory); //set cursor to
defined location
    rowshigh(); //sets all rows high
    if (disablespacedelay){ //if the delay has been
disabled,
        disablespacedelay=false; //reset its being
disabled
    }
    else{ //otherwise,
        delay(preventholddelay); //delay a bit
    }
}

void doclear(){ //clears and returns to top-left of
display
    cursorx=0;
    cursory=0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(cursorx,cursory);
    rowshigh(); //sets all rows high
    delay(preventholddelay);
}

void dobackspace(){
// if (cursory==1){
// if (cursorx==0){
//     cursorx=15;
//     cursory=0;
// }
// else{
    cursorx--;
// }
}

```

```

// }
// else{
// if (cursorx==0){
//     cursorx=0;
//     cursory=0;
// }
// else{
//     cursorx--;
// }
// }
    lcd.setCursor(cursorx,cursory);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(cursorx,cursory);
    rowshigh();
    delay(preventholddelay);
}

void textstorage(byte mode){
    if (mode==1){ //Regular
        typedtext[positionintypedtext]=letter;
        positionintypedtext++;
    }
    if (mode==2){ //Espacio
        typedtext[positionintypedtext]=' ';
        positionintypedtext++;
    }
    if (mode==3){ //Borrar
        positionintypedtext--;
        typedtext[positionintypedtext]=' ';
    }
}

void outputserial(){
    Serial.println(typedtext);
    Archivo = SD.open("datalog.txt",
FILE_WRITE); // Abrimos el archivo
    if (Archivo) {
        Archivo.println(typedtext);
        Archivo.close(); // Cerramos el archivo
    }

    delay(preventholddelay);
    for (int q=1;q<16;q++){
        typedtext[q]=0;
        positionintypedtext=0;
    }

    lcd.clear();
    cursorx=0;
    cursory=2;
    lcd.setCursor(cursorx,cursory);
}

```

```

}

void outputabmn(){
  Serial.println(typedtext);
  Archivo = SD.open("datalog.txt",
FILE_WRITE);// Abrimos el archivo
  if (Archivo) {
    Archivo.print(typedtext);
    Archivo.close(); // Cerramos el archivo
  }

  delay(preventholddelay);
  for (int q=1;q<16;q++){
  typedtext[q]=0;
  positionintypedtext=0;
  }

  lcd.clear();
  cursorx=0;
  cursory=2;
  lcd.setCursor(cursorx,cursory);
}

void leerSD()
{
  Archivo =
SD.open("datalog.txt",FILE_READ);//abrimos
el archivo

  if (Archivo)
  {
    bool line = false;
    Archivo.seek(Archivo.size()-2); //Ubicacion
en posicion anterior a ultimo caracter

    while (Archivo.available())
    {
      if(line==false) //Primero leer en reversa para
buscar salto de linea
      {
        char caracter=Archivo.read();
        //Serial.println(caracter);
        Archivo.seek(Archivo.position()-2);

        if(caracter=='\n') //Cuando encuentra
salto de linea cambia estado
        {
          line=true;
        }
      }
    }
  }
}

```

```

    if(line==true) //Empieza a leer normalmente
de izquierda a derecha
    {
      char caracter=Archivo.read();
      //Serial.println(caracter);
      cadena=cadena+caracter;

      if(Archivo.position()==Archivo.size()) //La
cadena termina cuando se llega al último
caracter
      {
        break;
      }
    }
  Archivo.close(); //cerramos el archivo
  delay(300);
  Serial.print(F("Cadena:"));
  Serial.println(cadena);
}
else
{
  Serial.println(F("Error al abrir el archivo"));
}
//cadena="";
}

float obtener_corriente(int n_muestras)
{
  float voltajeSensor;
  float VoltajeSensorProm;
  float corriente=0;
  for(int i=0;i<n_muestras;i++)
  {
    voltajeSensor = analogRead(A1) * (5.0 /
1023.0);///lectura del sensor
    VoltajeSensorProm= VoltajeSensorProm +
voltajeSensor;
    corriente=corriente+((voltajeSensor-
2.5)/0.185); //Ecuación para obtener la
corriente dividiendo entre la sensibilidad
    //Serial.print("corriente:");
    //Serial.println(corriente);
  }
  VoltajeSensorProm=
VoltajeSensorProm/n_muestras;
  corriente=corriente/n_muestras;
  Serial.print("primedio");
  Serial.println(VoltajeSensorProm);
  return(corriente);
}

```

```

void tomararray (byte mode){
  if (mode==0){
    analogWrite(PinN, 0);
    analogWrite(PinM, 0);

    Serial.println("Tomando V0");
    digitalWrite(pin_rele, LOW);
    float Array0[muestrasporsegundo];
    for (int i=0; i<=(muestrasporsegundo); i++)
    {
      Array0[i] = analogRead(A0);

      Serial.print("[i]=");
      Serial.println(Array0[i]);
      delayMicroseconds(1000000/80);
    }

    float I0 = obtener_corriente(2000);

    // Usamos la librería para obtener la
    mediana
    float ArrayLength0 = sizeof(Array0) /
    sizeof(float);
    float V0 =
    QuickMedian<float>::GetMedian(Array0,
    ArrayLength0);

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Potencial natural:");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print(V0);

    Serial.print("V0=");
    Serial.println(V0);
    Serial.println(V0/4);

    Serial.print("I0=");
    Serial.println(I0);

    delay(1500);

    if(0>V0){
      //analogWrite(PinN, 0);
      analogWrite(PinM, V0/4);
      Serial.print("A0=");
      Serial.println(A0);
      delay (1000);
    }
    // else{
    // //analogWrite(PinM, 0);
    // analogWrite(PinM, -195);
    // //analogWrite(PinN, V0/4);
    // Serial.print("A0=");
    // Serial.println(A0);
    // delay(4000);
    // }

    //analogWrite(PinN, 0);
    analogWrite(PinM, 0);

    tomararray(1);
  }
  if (mode==1){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Midiendo");
    delay(200);
    lcd.setCursor(8,1);
    lcd.print(" .");

    analogWrite(PinN, 0);
    digitalWrite(pin_rele, HIGH);
    float Array1[muestrasporsegundo];
    for (int i=0; i<=(muestrasporsegundo-1);
    i++)
    {
      Array1[i] = analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0);
      Serial.println(Array1[i]);
      delayMicroseconds(1000000/80);
      //Serial.print(A0);
    }
    // Obtenemos la corriente promedio de 200
    muestras,
    // esto equivale a unos 35 ms; 1.035 s.
    Ix[0] = obtener_corriente(200);
    // Apagamos el relé (pa' no polarizar el
    medio, pues)
    digitalWrite(pin_rele, LOW);
    // Usamos la librería para obtener la
    mediana
    float ArrayLength1 = sizeof(Array1) /
    sizeof(float);
  }
}

```

```

    Vx[0] =
QuickMedian<float>::GetMedian(Array1,
ArrayLength1);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Voltaje:");
    lcd.setCursor(8,2);
    lcd.print(Vx[0]);
    Serial.println(Vx[0]);
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Intensidad:");
    lcd.setCursor(11,3);
    lcd.print(Ix[0]);
    Serial.println(Ix[0]);
    delay (1000);
    tomararray(2);
}
if (mode==2){

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Midiendo ..");

    analogWrite(PinN, 0);
    digitalWrite(pin_rele, HIGH);
    float Array2[muestrasporsegundo];
    for (int i=0; i<=(muestrasporsegundo-1);
i++)
    {
        Array2[i] = analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0);
        Serial.println(Array2[i]);
        delayMicroseconds(1000000/80);
    }
    Ix[1] = obtener_corriente(200);
    digitalWrite(pin_rele, LOW);
    float ArrayLength2 = sizeof(Array2) /
sizeof(float);
    Vx[1] =
QuickMedian<float>::GetMedian(Array2,
ArrayLength2);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Voltaje:");
    lcd.setCursor(8,2);
    lcd.print(Vx[1]);
    Serial.println(Vx[1]);
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Intensidad:");
    lcd.setCursor(11,3);
    lcd.print(Ix[1]);
    Serial.println(Ix[1]);
    delay (1000);
}

```

```

    tomararray(3);
}
if (mode==3){

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Midiendo ...");

    analogWrite(PinN, 0);
    digitalWrite(pin_rele, HIGH);
    float Array3[muestrasporsegundo];
    for (int i=0; i<=(muestrasporsegundo-1);
i++)
    {
        Array3[i] = analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0);
        delayMicroseconds(1000000/80);
    }
    Ix[2] = obtener_corriente(200);
    digitalWrite(pin_rele, LOW);
    float ArrayLength3 = sizeof(Array3) /
sizeof(float);
    Vx[2] =
QuickMedian<float>::GetMedian(Array3,
ArrayLength3);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Voltaje:");
    lcd.setCursor(8,2);
    lcd.print(Vx[2]);

    Serial.println(Vx[2]);
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Intensidad:");
    lcd.setCursor(11,3);
    lcd.print(Ix[2]);
    Serial.println(Ix[2]);
    delay (1000);

    // DESVIACIÓN ESTANDAR
// // 1. Media de los datos
float prom_V3 = (Vx[0]+Vx[1]+Vx[2])/3;
//Serial.println("Datos");
//Serial.println("V1:");
//Serial.println(Vx[0]);
//Serial.println("V2:");
//Serial.println(Vx[1]);
//Serial.println("V3:");
//Serial.println(Vx[2]);
//Serial.println("Suma");
}
}

```

```

// // 2. Distancia de cada dato a la media,
desviación. Al cuadrado
//float V1S=((Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2])/3))*(Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2])/3)));
//float V2S=((Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2])/3))*(Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2])/3)));
//float V3S=((Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2])/3))*(Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2])/3)));
//// // 3. Raiz de la Sumatoria del cuadrado
de las desviaciones, entre el número de datos
//float S_3t=sqrt((V1S+V2S+V3S)/3);

//Serial.print("Promedio: ");
//Serial.println(prom_V3);
//Serial.print("Resta y cuadrado 1: ");
//Serial.println(V1S);
//Serial.print("r2 2: ");
//Serial.println(V2S);
//Serial.print("r2 3: ");
//Serial.println(V3S);

float S_3t=sqrt((((Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2])/3))*(Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2])/3)))+
((Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2])/3))*(Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2])/3)))+
((Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2])/3))*(Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2])/3))))/3);

Serial.print("S3:");
Serial.println(S_3t);

if (Smax>S_3t){
V=(Vx[0]+Vx[1]+Vx[2])/3;
I=(Ix[0]+Ix[1]+Ix[2])/3;
Errors=S_3t;
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Voltaje prom:");
lcd.setCursor(13,2);
lcd.print(V);
Serial.println(V);
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("Intensidad prom:");
lcd.setCursor(16,3);
lcd.print(I);
Serial.println(I);
} else {
tomararray(4);
}
}
if (mode==4){

```

```

// *****Tomamos el cuarto
array*****

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
//lcd.print("S=");
//lcd.print(Errors);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Midiendo");

analogWrite(PinN, 0);
digitalWrite(pin_rele, HIGH);
float Array4[muestrasorsegundo];
for (int i=0; i<=(muestrasorsegundo-1);
i++)
{
Array4[i] = analogRead(A0)*(5.0 /
1023.0);
delayMicroseconds(1000000/80);
}
Ix[3] = obtener_corriente(200);
digitalWrite(pin_rele, LOW);
float ArrayLength4 = sizeof(Array4) /
sizeof(float);
Vx[3] =
QuickMedian<float>::GetMedian(Array4,
ArrayLength4);
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Voltaje:");
lcd.setCursor(8,2);
lcd.print(Vx[3]);
Serial.println(Vx[3]);
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("Intensidad:");
lcd.setCursor(11,3);
lcd.print(Ix[3]);
Serial.println(Ix[3]);
delay (1000);

//prom_V4 = (V1 + V2 + V3 + V4)/4;
//V4S=(V4-prom_V4)*(V4-prom_V4);
//S_4t=sqrt((V1S+V2S+V3S+V4S)/4);

float S_4t=sqrt((((Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2] + Vx[3])/4))*(Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2]
+ Vx[3])/4)))+
((Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2]
+ Vx[3])/4))*(Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3])/4)))+

```

```

        ((Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2]
+ Vx[3])/4))*(Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3])/4)))+
        ((Vx[3]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2]
+ Vx[3])/4))*(Vx[3]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3])/4))))/4);

Serial.print("S4:");
Serial.println(S_4t);

if (Smax>S_4t){
    V = (Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] + Vx[3])/4;
    I=(Ix[0]+Ix[1]+Ix[2]+Ix[3])/4;
    Errors=S_4t;
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Voltaje prom:");
    lcd.setCursor(13,2);
    lcd.print(V);
    Serial.println(V);
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Intensidad prom:");
    lcd.setCursor(16,3);
    lcd.print(I);
    Serial.println(I);
} else {
    tomararray(5);
}
}
if (mode==5){

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    //lcd.print("S=");
    //lcd.print(Errors);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Midiendo .");

    analogWrite(PinN, 0);
    digitalWrite(pin_rele, HIGH);
    float Array5[muestrasporsegundo];
    for (int i=0; i<=(muestrasporsegundo-1); i++)
    {
        Array5[i] = analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0);
        delayMicroseconds(1000000/80);
    }
    Ix[4] = obtener_corriente(200);
    digitalWrite(pin_rele, LOW);
    float ArrayLength5 = sizeof(Array5) /
sizeof(float);

```

```

    Vx[4] =
    QuickMedian<float>::GetMedian(Array5,
ArrayLength5);
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Voltaje:");
    lcd.setCursor(8,2);
    lcd.print(Vx[4]);
    Serial.println(Vx[4]);
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Intensidad:");
    lcd.setCursor(11,3);
    lcd.print(Ix[4]);
    Serial.println(Ix[4]);
    delay (1000);

// prom_V5 = (V1 + V2 + V3 + V4+V5)/5;
// V5S=(V5-prom_V5)*(V5-prom_V5);
// S_5t=sqrt((V1S+V2S+V3S+V4S+V5S)/5);

    float S_5t=sqrt((((Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2] + Vx[3] + Vx[4])/5))*(Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1]
+ Vx[2] + Vx[3] + Vx[4])/5)))+
        ((Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4])/5))*(Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2]
+ Vx[3] + Vx[4])/5)))+
        ((Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4])/5))*(Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2]
+ Vx[3] + Vx[4])/5)))+
        ((Vx[3]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4])/5))*(Vx[3]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2]
+ Vx[3] + Vx[4])/5)))+
        ((Vx[4]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4])/5))*(Vx[4]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2]
+ Vx[3] + Vx[4])/5))))/5);

    if (Smax>S_5t){
        V=(Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] + Vx[3]+Vx[4])/5;
        I=(Ix[0]+Ix[1]+Ix[2]+Ix[3]+Ix[4])/5;
        Errors=S_5t;
        lcd.setCursor(0,2);
        lcd.print("Voltaje prom:");
        lcd.setCursor(13,2);
        lcd.print(V);
        Serial.println(V);
        lcd.setCursor(0,3);
        lcd.print("Intensidad prom:");
        lcd.setCursor(16,3);
        lcd.print(I);
        Serial.println(I);
    } else {
        tomararray(6);
    }

```

```

}
}

if (mode==6){

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
// lcd.print("S=");
// lcd.print(Errors);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Midiendo ..");

analogWrite(PinN, 0);
digitalWrite(pin_rele, HIGH);
float Array6[muestrasporsegundo];
for (int i=0; i<=(muestrasporsegundo-1); i++)
{
Array6[i] = analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0);
delayMicroseconds(1000000/80);
}
Ix[5] = obtener_corriente(200);
digitalWrite(pin_rele, LOW);
float ArrayLength6 = sizeof(Array6) /
sizeof(float);
Vx[5] =
QuickMedian<float>::GetMedian(Array6,
ArrayLength6);
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Voltaje:");
lcd.setCursor(8,2);
lcd.print(Vx[5]);
Serial.println(Vx[5]);
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("Intensidad:");
lcd.setCursor(11,3);
lcd.print(Ix[5]);
Serial.println(Ix[5]);
delay (1000);

// prom_V6 = (V1 + V2 + V3 + V4 + V5 +
V6)/6;
// V6S=(V6-prom_V6)*(V6-prom_V6);
//
S_6t=sqrt((V1S+V2S+V3S+V4S+V5S+V6S)/6);

float S_6t=sqrt((((Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6))*(Vx[0]-((Vx[0]
+ Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6)))+
((Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6))*(Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1]
+ Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6)))+

```

```

((Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6))*(Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1]
+ Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6)))+
((Vx[3]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6))*(Vx[3]-((Vx[0] + Vx[1]
+ Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6)))+
((Vx[4]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6))*(Vx[4]-((Vx[0] + Vx[1]
+ Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6)))+
((Vx[5]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6))*(Vx[5]-((Vx[0] + Vx[1]
+ Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5])/6)))/6);

if (Smax>S_6t){
V=(Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] +
Vx[5])/6;
I=(Ix[0]+Ix[1]+Ix[2]+Ix[3]+Ix[4]+Ix[5])/6;
Errors=S_6t;
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Voltaje prom:");
lcd.setCursor(13,2);
lcd.print(V);
Serial.println(V);
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("Intensidad prom:");
lcd.setCursor(16,3);
lcd.print(I);
Serial.println(I);
} else {
tomararray(7);
}
}

if (mode==7){

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
// lcd.print("S=");
//lcd.print(Errors);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Midiendo ...");

analogWrite(PinN, 0);
digitalWrite(pin_rele, HIGH);
float Array7[muestrasporsegundo];
for (int i=0; i<=(muestrasporsegundo-1); i++)
{
Array7[i] = analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0);
delayMicroseconds(1000000/80);
}
Ix[6] = obtener_corriente(200);
digitalWrite(pin_rele, LOW);

```

```

float ArrayLength7 = sizeof(Array7) /
sizeof(float);
Vx[6] =
QuickMedian<float>::GetMedian(Array7,
ArrayLength7);
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Voltaje:");
lcd.setCursor(8,2);
lcd.print(Vx[6]);
Serial.println(Vx[6]);
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("Intensidad:");
lcd.setCursor(11,3);
lcd.print(Ix[6]);
Serial.println(Ix[6]);

// prom_V7 = (V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 +
V7) / 7;
// V7S=(V7-prom_V7)*(V7-prom_V7);
//
S_7t=sqrt((V1S+V2S+V3S+V4S+V5S+V6S+V7
S)/7);

float S_7t=sqrt((((Vx[0]-((Vx[0] + Vx[1] +
Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] + Vx[6])/7))*
(Vx[0]-
((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] +
Vx[6])/7)))+
((Vx[1]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] + Vx[6])/7))*
(Vx[1]-((Vx[0] +
Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] +
Vx[6])/7)))+
((Vx[2]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] + Vx[6])/7))*
(Vx[2]-((Vx[0] +
Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] +
Vx[6])/7)))+
((Vx[3]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] + Vx[6])/7))*
(Vx[3]-((Vx[0] +
Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] +
Vx[6])/7)))+
((Vx[4]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] + Vx[6])/7))*
(Vx[4]-((Vx[0] +
Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] +
Vx[6])/7)))+
((Vx[5]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] + Vx[6])/7))*
(Vx[5]-((Vx[0] +
Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] +
Vx[6])/7)))+
((Vx[6]-((Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] +
Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] + Vx[6])/7))*
(Vx[6]-((Vx[0] +
Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] + Vx[5] +
Vx[6])/7))))/7);

```

```

if (Smax>S_7t){
V=(Vx[0] + Vx[1] + Vx[2] + Vx[3] + Vx[4] +
Vx[5] + Vx[6]) / 7;
I=(Ix[0]+Ix[1]+Ix[2]+Ix[3]+Ix[4]+Ix[5]+Ix[6])/7;
Errors=S_7t;
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Voltaje prom:");
lcd.setCursor(13,2);
lcd.print(V);
Serial.println(V);
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("Intensidad prom:");
lcd.setCursor(16,3);
lcd.print(I);
Serial.println(I);
} else {
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Medicion erronea:");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("El error (S) es");//lcd.print(Errors);
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("mayor que el factor");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("de calidad (Q)");//lcd.print(Smax);
delay(5000);

V=999.9;
I=999.9;
Errors=0;
}
}

void seriededatos(){

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Voltaje promedio:");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(V);
Serial.println(V);
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("Intensidad promedio:");
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print(I);
delay(1500);

```

```
//float Kgeom =  
3.1415926535*SD_EspacioElectrodos;  
//float Rho = (V/I)*Kgeom;  
VI=V/I;
```

```
Archivo = SD.open("datalog.txt",  
FILE_WRITE);// Abrimos el archivo  
if (Archivo) {  
    Archivo.print(", ");
```

```
Archivo.print(VI);  
Archivo.print(", ");  
Archivo.print(I);  
Archivo.print(", ");  
Archivo.println(Errors);
```

```
Archivo.close(); // Cerramos el archivo  
}  
}
```

Anexo II.
Resultados URF

```
;Prueba 03
Unit: Meter
...
;Medicion
;A, B, M, N, V/I, I, Q
0,0.6,0.2,0.4,5.727942394,0.121,0
0,1.2,0.4,0.8,4.639043769,0.143,0.5
0,1.8,0.6,1.2,4.750161655,0.124,0.8
0,2.4,0.8,1.6,4.696523517,0.098,0
0,3,1,2,1.609291647,0.148,0.1
0,3.6,1.2,2.4,1.272164019,0.089,0.3
0,4.2,1.4,2.8,0.638485289,0.11,0.1
0,4.8,1.6,3.2,0.22962713,0.119,0.1
0,5.4,1.8,3.6,0.171902892,0.112,0.9
0,6,2,4,0.157983382,0.089,0.7
0,6.6,2.2,4.4,0.126494818,0.075,0
0,7.2,2.4,4.8,0.090691865,0.092,0.1
0,7.8,2.6,5.2,0.530900134,0.045,0.8
```