



Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ciencias
Escuela de Física

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA FUENTE DE
CORRIENTE CONTINUA DE ALTA TENSIÓN PARA
FINES GEOELÉCTRICOS**

Realizado por
Jesús Tomás Cabriles Ivirma

Proyecto de Grado
Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela
Como requisito para optar al título de
Licenciado en Física

Caracas, mayo de 2011

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA
DE ALTA TENSIÓN PARA FINES GEOELÉCTRICOS**

Jesús Tomás Cabriles Ivirma

Trabajo Especial de Grado presentado
ante la ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al título de:

Licenciada en Física

Realizado con la asesoría de:

Msc. Levi García

Lic. Aly Pérez

Caracas, mayo 2011

Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Física, de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado, presentado por el Br. Jesús Tomás Cabriles Ivirma, titulado “**Diseño y Desarrollo de una Fuente de Corriente Continua de Alta Tensión para Fines Geoelectrónicos**”, para optar al título de Licenciada en Física, mención instrumentación. Certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por los reglamentos respectivos y por lo tanto lo declaramos APROBADO.

Jurado Principal

Prof. José Jorge

Jurado Principal

Prof. David Leal

Tutor

Prof. Levi García

Co-tutor

Prof. Aly Pérez

RESUMEN

En este trabajo se desarrollo una fuente de corriente continua de alto voltaje para fines geoelectricos. Ésta es capaz de suministrar una corriente máxima de 1,1A y un voltaje de salida variable, que depende de la corriente, pudiendo llegar hasta 1100V. Para el diseño del prototipo, se realizó un estudio detallado de la fuente desarrollada por el profesor Alfonso Benavides, la cual presentaba algunas deficiencias referentes a seguridad y a la medición de la corriente de salida. Con la finalidad de mejorar estas deficiencias se desarrolló un sistema de encendido/apagado y cambio de polaridad controlado de manera remota desde un computador y un sistema de descarga de los condensadores de la etapa de filtrado evitando así posibles descargas eléctricas al usuario, de manera que su manipulación es realizada en un ambiente seguridad. En relación a la medición, se desorrolló un sistema de adquisición de datos digitales y se sustituyo el sensor inductivo utilizado para medir la corriente de salida de la fuente, por un sensor de basado en el Efecto Hall, cuyo comportamiento es lineal y que facilita el proceso de calibración del sistema. Se incorporó además un sistema limitador de corriente, que funciona como protección de la fuente y evita el ajuste manual del voltaje de salida.

Finalmente, el resultado de las pruebas realizadas a la fuente desarrollada, arrojó que su comportamiento es básicamente lineal, en especial para corrientes mayores de 0,5A.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos.

Y a todas aquellas personas que han estado junto a mí apoyándome.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mis tutores, el Profesor Levi García y al Profesor Aly Pérez Pérez, por haberme brindado la oportunidad de realizar este trabajo. Gracias por la confianza y el apoyo que me brindaron a lo largo de la realización de esta investigación.

También quisiera agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron para hacer posible la realización de este proyecto de grado: Al Instituto de Ciencia de la Tierra y todos mis compañeros de estudio, Ralph Panitz, David Rondón, Berekyakaleb Errico, Danny Cruz, Richard Caraballo, Joyce Sayago, Nathaly Lajo, Carlos Fernández, Carla córdobas, Ana Da Silva y Adelina Crespo.

A mis hermanos Santiago Cabriles, Carmen Cabriles, Nelson Cabriles, Gregoria Cabriles y en especial a mi madre Elida de Cabriles, siempre me apoyaron y a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de mi carrera universitaria.

Muchas Gracias...

ÍNDICE GENERAL

CARTA DE APROBACIÓN.....	i
RESUMEN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 LOS MÉTODOS ELÉCTRICOS	3
2.1.1. Ecuaciones generales relacionadas con la resistividad.....	5
2.1.2. Potencial en un medio homogéneo.....	5
2.1.3. Un electrodo en la superficie.....	8
2.1.4. Un Electrodo en la profundidad	9
2.1.5. Dos electrodos de corriente en la superficie.....	11
2.2 Distorsión del flujo de corriente en una superficie plana.....	13
2.3 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN EL LABORATORIO.....	14
2.3.1. La resistividad en las rocas.....	15

2.3.2. Resistividad aparente.....	16
2.4 TIPOS DE DISPOSITIVOS ELECTRODÍICOS.....	17
2.4.1. Dispositivos lineales básico.....	19
2.4.2. Dispositivo Schlumberger	19
2.4.3. Dispositivo Wenner.....	20
2.4.4. Dispositivos electródicos dipolares	20
2.5 TIPOS DE PROSPECCIÓN O SONDEO ELÉCTRICO	22
2.5.1. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).....	22
2.5.2. Sondeo Wenner:	23
2.5.3. Sondeo Schlumberger.....	23
2.4.4. Calicatas Eléctricas (CE).....	24
2.5 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE UN SONDEO ELÉCTRICO	25
MARCO TEÓRICO.....	28
INSTRUMENTACIÓN	28
3.1. FUENTE DESARROLLADA POR EL PROFESOR ALFONSO BENAVIDES.	28
3.1.1. Transformación, Rectificación y filtrado	29
3.1.2. Medición de corriente.....	30
3.1.3. Inversor manual	31
3.2.1. Transductor.....	33
3.2.2. Acondicionador de señal	33
3.2.3. Conversor A/D	33
3.2.4. Registrador	34
3.3. MICROCONTROLADORES	34

3.4. RECURSOS ESPECIALES DEL PIC16F877	34
CAPÍTULO IV	37
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	37
4.1. ESTUDIO Y DIAGNÓSTICO DE LA FUENTE DESARROLLADA POR EL PROFESOR ALFONSO BENAVIDES	37
4.1.1. Transformación, rectificación y filtrado	38
4.1.2. Medición de corriente	39
4.1.3. Inversor de polaridad manual	41
4.2. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA FUENTE DE CORRIENTE DE ALTO VOLTAJE	41
4.2.1. Transformación, Rectificación y Filtrado	42
4.2.2. Limitador	43
4.2.3. Encendido/Apagado.....	44
4.2.4. Descarga.....	45
4.2.5. Inversor	46
4.2.6. Medición de corriente	47
4.2.7. Control y Adquisición de datos	49
4.2.8. Interfaz gráfica Usuario	53
CAPÍTULO V	55
RESULTADOS EXPERIMENTALES	55
5.1 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA FUENTE.....	55
5.2. Ajuste de los datos experimentales.....	60
5.3. Comparación de los bloques de medición CS2106 y ACS712	61
5.4. Curva de calibración.....	64
CONCLUSIONES	67

RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69

ÍNDICE DE FIGURA

Capítulo II: Marco Teórico (Métodos Eléctricos)

Figura 2.1 Vector densidad de corriente en un semiespacio homogéneo	6
Figura 2.2 Un electrodo en el infinito y el otro en la superficie	8
Figura 2.3 Un electrodo en la profundidad	11
Figura 2.4 Dos electrodos en la superficie: se quiere saber cuánto es el voltaje total generado por los electrodos A y B de corriente suministrada al suelo	11
Figura 2.5 Dos electrodos en la superficie s	12
Figura 2.6 Distorsión de un flujo de corriente a través de dos superficies	13
Figura 2.7 Ley de Ohm.	14
Figura 2.8 Sistema tetraelectrodico.....	18
Figura 2.9 Dispositivo Electrodoicos Schlumberger.	19
Figura 2.10 Dispositivo Electrónico Wenner.....	20
Figura 2.11 Dispositivos Electrónicos dipolares.....	21
Figura 2.12 Sondeo Wenner).	23
Figura 2.13 Sondeo Schlumberger	24
Figura 2.14 Dispositivos eléctricos para las calicatas eléctricas	25
Figura 2.15 Curva de resistividad aparente para 2 y 3 capas.	26

Capítulo III: Marco Teórico (Instrumentación)

Figura 3.1 Bloques que conforma la fuente de alto voltaje, donde se adiciona un sensor de corriente	29
Figura 3.2 Conexiones de los secundarios del transformador	30
Figura 3.3 Sensor de corriente CS2106 y acondicionador de señal	31

Capítulo IV: Desarrollo Experimental

Figura 4.1 Bloque de Transformación, rectificación y Filtrado.....	39
Figura 4.2 Corriente de salida del transformador que mide el bloque de medición ...	40
Figura 4.3 Sensor de corriente y acondicionamiento de señal	40
Figura 4.4 Fuente de corriente continua de alto voltaje para fines geoelectrico.....	42
Figura 4.5 Transformador con 5 secundarios, conectados en serie	43
Figura 4.6 Sistema limitador de corriente	43
Figura 4.7 Bloque de Encendido y Apagado	45
Figura 4.8 Bloque de descarga	46
Figura 4.9 Bloque de cambio de polaridad	46
Figura 4.10 Sensor de corriente ASC712.....	47
Figura 4.11 Acondicionamiento de la señal de salida del sensor corriente ASC712..	49
Figura 4.12 Conexiones del PIC16F877.	50
Figura 4.13 Diagrama de flujo del programa para el control del PIC 16F877.....	52
Figura 4.14 Interfaz gráfica para el control de la fuente	53

Capítulo V: Análisis de Resultado

Gráfica 5.1 Curva Voltaje de salida vs Corriente salida	57
---	----

Gráfica 5.2 Voltaje de salida vs resistencia de carga	58
Gráfica 5.3 Corriente de voltaje Vs Inverso de la resistencia de carga	59
Gráfica 5.4 Potencia Vs Resistencia de carga	60
Gráfica 5.5 Curva Corriente de salida Vs Voltaje del sensor	62
Gráfica 5.6 Curva voltaje del sensor Vs Corriente de salida	64
Gráfica 5.7 Corriente de salida de la fuente vs los datos de la interfaz	66

INDICE DE TABLAS

Capítulo II: Marco Teórico (Métodos Geoeléctricos)

Tabla 2.1 Variación de la resistividad en función de concentración de ClNa	16
--	----

Capítulo VI: Marco Experimental

Tabla 5.1 Datos corrientes y voltajes de salida de la fuente	56
Tabla 5.2 Datos de voltajes de salida del sensor CS2106 y corriente de salida de la fuente.....	62
Tabla 5.3 Datos de corrientes de salida de la fuente y voltajes del bloque de medición ACS712.....	63
Tabla 5.4 Datos digitales y corriente suministrada por la fuente	65

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La Prospección Geofísica es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas tal como lo dice Orellana, E. (1972): “Prospección geoeléctrica en corriente continua, aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda y estudio de yacimiento de sustancias útiles (petróleo, aguas subterráneas, minerales, carbón, etc.), por medio de observaciones efectuadas en la superficie de la tierra. Dentro de las diversas técnicas de prospectivas destacan cuatro grupos principales, el método gravimétrico, el magnético, el eléctrico y el sísmico. Los dos primeros son métodos de campos naturales y los dos últimos de campos artificiales” (P.24).

Los métodos de campo artificial como el eléctrico, permiten obtener la distribución y la composición del terreno, con la utilización de los diferentes sondeos eléctricos.

Según Benavides (1999): “Los métodos de prospección eléctricos o geoeléctricos, son aquellos métodos en los que se hace pasar una corriente eléctrica por medios de unos electrodos conectados galvánicamente al terreno, y por otros electrodos se mide distribución de potencial que ellos resultan. Los métodos consisten básicamente en utilizar cuatro electrodos”.

En el Instituto de Ciencia de la Tierra, ubicado en la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, el Profesor Alfonso Benavides diseño y desarrollo una fuente de alto voltaje con fines geoelectricos. Sin embargo, ésta presenta deficiencias en su seguridad; Aun después de apagar el equipo el usuario al querer manipularla recibe fuertes descargas eléctricas. En relación con el sistema de medición no puede medir corrientes pequeñas. Por las razones expuestas, se realizará el presente estudio, con el propósito de diseñar y desarrollar, en forma modular, una fuente de corriente de alto voltaje que cumpla con los siguientes requerimientos:

- Voltaje de salida variable.
- Corriente máxima de 1A
- Voltaje máximo de 1000V
- Sistema automático de desconexión y descarga en el apagado de la fuente, así como, el cambio de polaridad
- Desarrollo del software para la adquisición y control, con el fin de medir la corriente de salida y manipular la fuente en forma remota respectivamente.

Basándose en lo expuesto en el párrafo anterior, este desarrollo será una herramienta importante para la aplicación de los métodos eléctricos, ya que se diseñará y desarrollará una fuente de corriente continua de alto voltaje, que garantice la seguridad para el usuario, en su manipulación y operación. Además, permitirá incorporar una mejora en el sistema de medición con un módulo de adquisición de datos para medir las corrientes de salidas suministradas por la fuente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El presente capítulo se divide en dos partes, los aspectos teóricos más importantes relacionados con los métodos geoelectricos y los fundamentos teóricos de la instrumentación empleada.

2.1 LOS MÉTODOS ELÉCTRICOS

Los métodos eléctricos de prospección también denominados geoelectricos, estudian por medio de mediciones efectuadas en la superficie, la distribución en profundidad de alguna magnitud electromagnética. Existen tres magnitudes electromagnéticas principales que en principio podría utilizarse para identificar los cuerpos situados en el subsuelo. Estas magnitudes son la permeabilidad magnética μ , la constante eléctrica ϵ y la resistividad ρ . Para estos métodos se estudia casi exclusivamente la resistividad.

El criterio para la clasificación de los métodos eléctricos es según el campo electromagnético estudiado, sea de origen natural o se cree artificialmente para la prospección, como se muestra en el siguiente esquema Orellana (1982):

- a) Método de campo natural.
 - 1) Método del potencial espontáneo
 - 2) Método de corrientes telúricas
 - 3) Método magneto-telúrica (sondeo y calicatas)
 - 4) Método AFMAG
- b) Método de campo artificial
 - 1) Método de campo constante (corriente continua)
 - 1-1) Método de líneas equipotenciales y de cuerpos cargados (mise-a-la mase)
 - 1-2) Sondeos eléctricos (simétrico, dipolares, etc.)
 - 1-3) Calicatas eléctricas.
 - 2) Método de campo variable.
 - 2-1) Sondeo de frecuencia
 - 2-2) Sondeo por establecimiento de campo (transitorio)
 - 2-3) Calicatas electromagnéticas (métodos de inclinación de campo, Turan, Slingram, etc.)
 - 2-4) Método “Radio-Kip”
 - 2-5) Método de radiografía hertziana
 - 3) Método de polarización inducida

La importancia de los métodos eléctricos es la capacidad de distinguir o reconocer las capas que constituyen al subsuelo, mediante la utilización de un parámetro eléctrico como la resistividad. En el próximo apartado está relacionado con los métodos de campos artificial y constante.

2.1.1. Ecuaciones generales relacionadas con la resistividad.

Las corrientes eléctricas que interesan en la prospección no recorren conductores lineales (hilos y cables) como en las instalaciones y aparatos eléctricos usuales, sino que se mueven en medios tridimensionales, por lo que hay que estudiar las leyes físicas que obedecen estas corrientes. A continuación, se estudiarán las ecuaciones, donde el subsuelo se supone que está constituido por un semiespacio homogéneo.

2.1.2. Potencial en un medio homogéneo.

Considerando que fluye por un medio isotrópico homogéneo (En este caso también se puede aplicar CA a baja frecuencia), si ∂A es un elemento de superficie y \mathbf{J} la densidad de corriente en A/m², la corriente que atraviesa ∂A es

$$\partial I = \mathbf{J} \cdot \partial \mathbf{A} \quad (2.1)$$

La ley de Ohm en forma diferencial relaciona la densidad de corriente y el campo eléctrico

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.2)$$

donde el campo eléctrico \mathbf{E} viene dado por V/ m y σ es la conductividad eléctrica del medio (1/Ωm) independiente de \mathbf{E} .

Donde \mathbf{E} es menos el gradiente del potencial escalar

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (2.3)$$

Donde V está en voltios, entonces se tiene que

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla V \quad (2.4)$$

Si se conserva la carga dentro del volumen encerrado en la superficie cerrada A , (figura 2.1), se puede escribir que

$$\int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

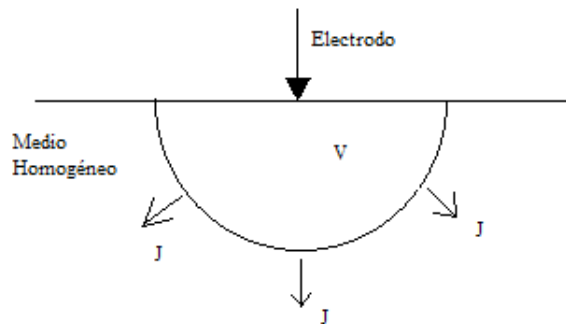


Figura 2.1 Vector densidad de corriente en un semiespacio homogéneo (Orellana,(1972))

Por el teorema de Gauss de divergencia de la densidad de corriente en esta región es igual a la carga encerrada, para este caso se tiene que

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{J} dV = 0$$

Implica que

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$$

Tomando V como un volumen infinitesimal encerrado a un punto dado, para este punto:

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = \nabla \cdot \nabla(\sigma V) = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla \sigma \cdot \nabla V - \sigma \nabla^2 V = 0$$

Dentro de cada zona de conductividad es uniforme será $\nabla \sigma = 0$, por lo tanto (Orellana,1972):

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.5)$$

Las condiciones de contorno que deben mantener los dos medios en contacto con diferente conductividad σ_1 y σ_2 . Primer el potencial debe ser continuo en la frontera, segundo correspondiente a normal de la densidad de corriente \mathbf{J} debe ser continua, también la continuidad del potencial V implica la continuidad de la derivada del potencial, si x es paralela a la superficie de frontera entonces:

$$V_1 = V_2 \quad \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)_1 = \left(\frac{\partial V}{\partial x}\right)_2 \quad J_{1n} = J_{2n} \quad (2.6)$$

las componentes normales y tangenciales del campo eléctrico para estas condiciones son las siguientes:

$$E_{1t} = E_{2t} \quad \sigma_1 E_{1n} = \sigma_2 E_{2n} \quad (2.7)$$

Las letras n y t indican las componentes tangencial y normal respectivamente, 1 y 2 los distintos medios. La cual será válida en todo semiespacio conductor, pero no en los electrodos, ni en las superficies discontinuas de la resistividad (Benavides,1999).

2.1.3. Un electrodo en la superficie

Se tiene un electrodo A de pequeñas dimensiones en un medio isótropo homogéneo y el otro electrodo B está en la superficie a gran distancia del electrodo A , como se muestra en la figura 2.1. Si se traza alrededor del electrodo A y dentro del semiespacio inferior una superficie semiesférica, por razón de simetría se tiene el mismo valor la densidad de corriente \mathbf{J} y estará dirigida radialmente. La integral de \mathbf{J} sobre la superficie semiesférica será igual a la corriente I por lo que si el radio es r se tendrá que:

$$2\pi r^2 J = I \quad \text{Por lo tanto} \quad \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = \frac{I}{2\pi r^2}$$

En donde

$$|\mathbf{E}| = \frac{I}{2\pi r^2} \rho \quad (2.8)$$

De la ecuación (2.8), el campo eléctrico \mathbf{E} de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r .

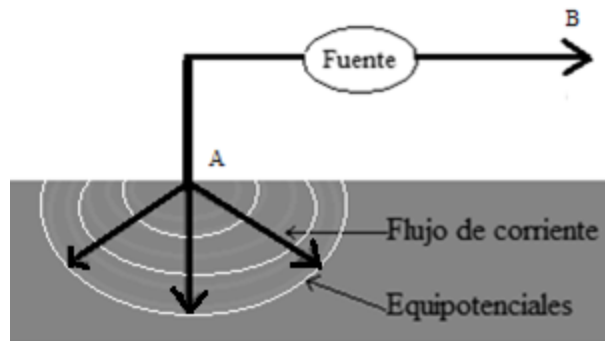


Figura 2.2 Un electrodo en el infinito y el otro en la superficie (autor)

La diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera M y N vendrá dado por la ecuación

$$\Delta V = - \int_N^M \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.9)$$

El campo es conservativo, entonces el camino de integración no depende de la trayectoria que se elija. Si r_1 y r_2 son las distancias respectiva de los puntos M y N al electrodo A, se tendrá

$$\Delta V = - \frac{I\rho}{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.10)$$

Por convenio universal se toma como origen de potenciales un punto situado a distancia infinita, por lo tanto el potencial absoluto en el punto M , calculado en el límite cuando r_2 tiende al infinito, se obtiene de la ecuación 2.10

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (2.11)$$

El potencial de un electrodo en la superficie esta dado por la ecuación (2.11), según Orellana (1972).

2.1.4. Un Electrodo en la profundidad

Se tiene un electrodo de pequeñas dimensiones dentro de un medio homogéneo e isótropo, el otro electrodo está en la superficie del medio a gran

distancia, es decir como si estuviera en el infinito. Por efecto de simetría el potencial se puede considerar que es función de r .

La ecuación de Laplace está dada en coordenadas esférica como se muestra a continuación.

$$\nabla^2 V = \frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV}{dr} = 0 \quad (2.12)$$

Multiplicamos por el radio al cuadrado r^2 e integrando la ecuación (2.12) se obtiene:

$$\frac{dV}{dr} = \frac{A}{r^2}$$

Se integra la ecuación anterior y se obtiene

$$V = -\frac{A}{r} + B \quad (2.13)$$

Se tiene que A y B son constantes, si $V = 0$ en el infinito y cuando el r tiende al infinito en la ecuación 2.13, se observa que la constante B es igual a cero. La corriente es radial en todas las direcciones desde el punto del electrodo, entonces la corriente total que atraviesa la superficie esférica está dada por:

$$I = 4\pi r^2 J = -4\pi r^2 \sigma \frac{dV}{dr} = -4\pi r^2 \sigma A$$

Despejando la ecuación anterior se tiene:

$$A = -\frac{I\rho}{4\pi} \quad (2.14)$$

El potencial de un electrodo y la resistividad viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$V = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (2.15) \quad \rho = 4\pi r \frac{V}{I} \quad (2.16)$$

Las líneas equipotenciales son todas ortogonales a las líneas del flujo de corriente, como la superficie esférica de radio constante (Orellana,1972), concéntrico al punto del electrodo como se ilustra en la figura 2.3

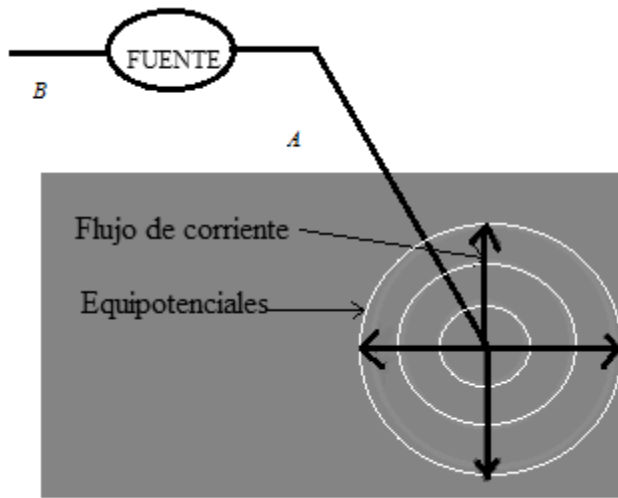


Figura 2.3 Un electrodo en la profundidad (autor)

2.1.5. Dos electrodos de corriente en la superficie

En esta configuración se tiene dos electrodos dispuesto sobre la superficie a una distancia dada, como se indica en la figura 2.4, la corriente y el voltaje generado por un electrodo se ven afectado por el inducido por el otro.

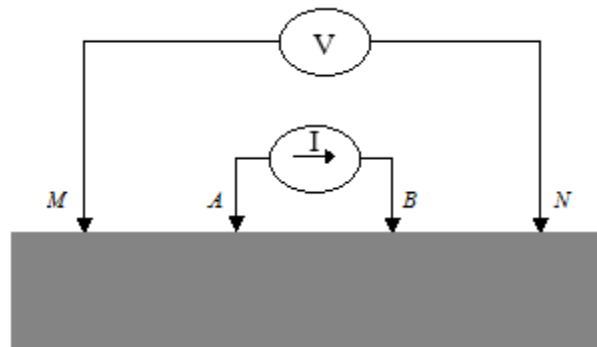


Figura 2.4 Dos electrodos en la superficie (autor)

EL potencial inducido por electrodo A en el punto M está dado por

$$V_1 = -\frac{A_1}{r_1} \quad \text{donde } A_1 = -\frac{\rho I}{2\pi} \quad (2.17)$$

Igualmente el potencial inducido por N en el punto A es

$$V_2 = -\frac{A_2}{r_2} \quad \text{donde } A_2 = -\frac{\rho I}{2\pi}$$

Si la corriente en los electrodos tienen sentidos contrarios pero con magnitudes iguales, se tiene que:

$$V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right\} \quad (2.18)$$

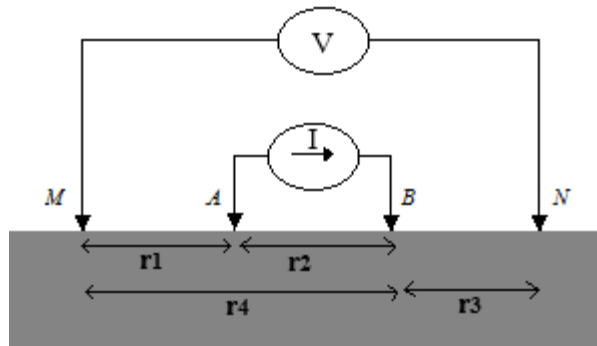


Figura 2.5 Separaciones entre los electrodos (autor)

Finalmente usando el potencial producido en el punto B se tiene que la diferencia de potencial entre el punto M y N , según Benavides (1999):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \left\{ \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right\} \right\} \quad (2.19)$$

2.2 Distorsión del flujo de corriente en una superficie plana

Si se considera un suelo que presenta distintas zonas o medios homogéneos e isótropos se tendrá que calcular la integral de la ecuación de Laplace que satisfaga las condiciones de contorno, por lo tanto con dos medios homogéneos de diferente resistividad ρ_1 y ρ_2 , separado por un plano como se observa en la figura 2.6.

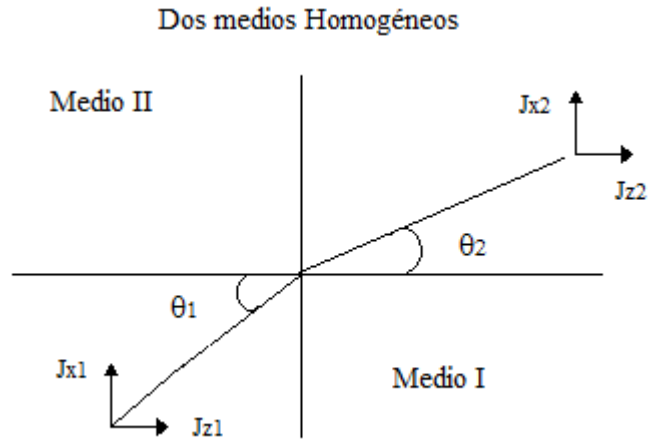


Figura 2.6 Distorsión de un flujo de corriente a través de dos superficies (Orellana, 1972)

$$\rho_1 J_{x1} = \rho_2 J_{x2} \quad (2.20)$$

$$J_{z1} = J_{z2} \quad (2.21)$$

Dividiendo estas expresiones:

$$\rho_1 \left(\frac{J_{x1}}{J_{z1}} \right) = \rho_2 \left(\frac{J_{x2}}{J_{z2}} \right) \quad (2.22)$$

Finalmente se obtiene la ecuación, que indica que el flujo de corriente de un medio homogéneo se distorsiona debido a la presencia del otro medio, según Orellana (1972)

$$\rho_1 \tan \theta_1 = \rho_2 \tan \theta_2 \quad (2.23)$$

Una variable muy importante para el estudio del método eléctrico es la resistividad, ya que permite conocer las distribuciones y composición del suelo (Orellana, 1972).

2.3 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD EN EL LABORATORIO

En forma general se coloca la muestra, en un dispositivo tetraelectrónico como se muestra en la figura 2.7, en donde por dos electrodos se suministra corriente y por otros dos se mide el potencial. Usando la Ley de Ohm, se puede obtener el valor de la resistividad, según la ecuación 2.24

$$\rho = \frac{V}{I} \left(\frac{s}{L} \right) \quad (2.24)$$

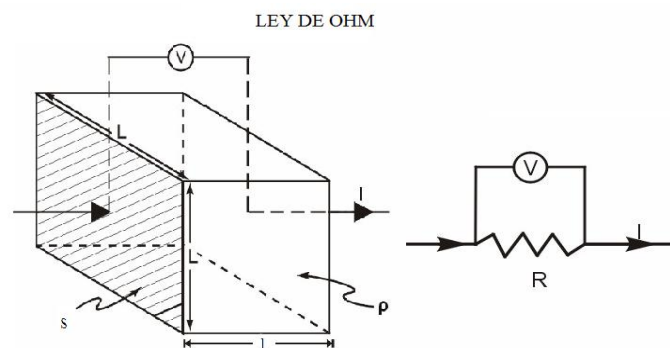


Figura 2.7 Ley de Ohm (Auge, 2008).

Donde s y L son la sección transversal y longitud de la muestra, de esta forma se mide la resistividad (Auge, 2008).

2.3.1. La resistividad en las rocas

La resistividad en la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúa como muy poca conductividad. Este comportamiento cambia significativamente cuando las fisuras o los poros están ocupados por agua, lo que disminuye la resistividad o lo que es lo mismo un aumento de la capacidad de conducción de corriente eléctrica. Además el grado de saturación también incide en la resistividad del medio; a mayor salinidad, menor resistividad y viceversa. Los contrastes de las resistividades son los que permiten aplicar exitosamente los métodos eléctricos mediante la inyección de corrientes continuas, según Walter, (2002).

Son pocos los componentes geológicos subsaturados o secos, que presentan baja resistividad o alta conductividad, entre los que pueden mencionarse a minerales metálicos como la calcopirita, pirita, magnetita, galena, pirrotina, etc. El grafito también presenta elevada conductividad eléctrica, pero la mayoría de los minerales no metálicos, al igual que las rocas, tienen resistividades significativamente mayores, en general entre 2 y 6 órdenes de magnitud superiores. En la tabla I se indican las resistividades que caracterizan a minerales, rocas y sedimentos, y dentro de estos últimos también se aprecian diferencias notorias entre los de grano fino (margas, limos, arcillas), los de grano mediano (arenas) y grueso (gravas). Según Orellana (1978): “El comportamiento físico de las rocas depende de las propiedades y modo de

agregación de sus minerales y de la forma, volumen y relleno (generalmente de aire o agua) de los poros”.



Tabla 2.1 Variación de la resistividad en función de concentración de ClNa (Walter, 2002)

2.3.2. Resistividad aparente

Considerando un subsuelo homogéneo de resistividad ρ , se colocan dos electrodo (A,B) para suministrar la corriente y otros dos (N,M) para medir la diferencia de potencial en la superficie, los electrodos están alineados. El electrodo B no afecta al circuito porque se supone muy alejado del sistema de medida. Entonces si la distancia $AM = r$ y $MN = a$ según Orellana (1982) la ecuación de diferencia de potencial se tiene que:

$$\Delta V = U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{r} - \frac{1}{r+a} \right\} = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{a}{r \cdot (r+a)} \quad (2.25)$$

Despejamos la resistividad ρ

$$\rho = 2.\pi.\frac{r(r + a)}{a}\frac{\Delta V}{I} \quad (2.26)$$

Si el suelo no es homogéneo, resulta una resistividad ficticia ρ_a , esta resistividad se obtiene aplicando los datos adquiridos sobre un medio heterogéneo, a la expresión de la resistividad correspondiente a un medio homogéneo, ésta se denomina resistividad aparente (Orellana, 1972).

En los dos párrafos anteriores se discutió sobre la corriente suministrada por la fuente y el voltaje medido, pero la resistividad también depende de un factor geométrico de cómo se colocan los electrodos, Estos se conocen como dispositivos electrodicos.

2.4 TIPOS DE DISPOSITIVOS ELECTRODICOS

Un conjunto de electrodos como el representado en la figura 2.8 o similar, recibe el nombre de dispositivos electrodicos. En general, consta de cuatro electrodos; El par de electrodos A y B son los que permiten suministrar la corriente al subsuelo y la diferencia de potencial generada se mide por los otros dos electrodos M y N . Estos van unidos a un instrumento para medir la diferencia de potencial entre ellos. Los electrodos A y B unidos a cables aisladores, a un generador eléctrico provisto de un amperímetro.

SISTEMA TETRAELECTRODICO

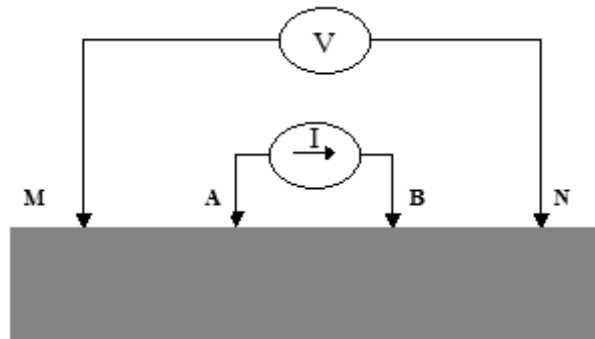


Figura 2.8 Sistema tetraelectrodico (autor)

En cualquier dispositivo, si se conoce las distancias mutuas entre los electrodos y se miden la intensidad de corriente I que pasa por los electrodos A y B , la diferencia de potencial ΔV , se puede calcular la resistividad aparente ρ_a mediante la ecuación:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.27)$$

Donde K es un coeficiente que depende únicamente de la geometría del dispositivo electródico, según Orellana (1972).

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (2.28)$$

A continuación se describirán los principales dispositivos electródicos donde el factor geométrico K va a variar dependiendo como se coloquen los cuatros electrodos.

2.4.1. Dispositivos lineales básico

Son muy empleados los dispositivos en los que los cuatro electrodos $AMNB$ se encuentran, en este orden, sobre una misma recta y están simétricamente respecto a un centro O , tendremos un dispositivo simétrico, según Orellana (1972); entre estos dispositivos se encuentran los dispositivos de Schlumberger y Wenner.

2.4.2. Dispositivo Schlumberger

Es un tipo de dispositivo lineal y simétrico, que debe cumplir con la condición, de separación AB mayor o igual $5NM$, como se muestra en la figura 2.9

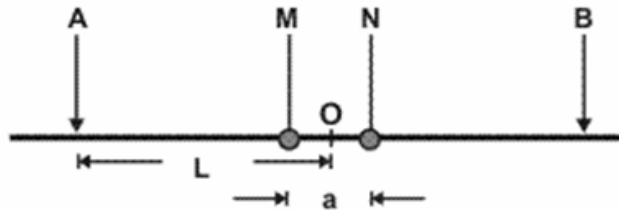


Figura 2.9 Dispositivo Electrodo Schlumberger (Auge, 2008).

Los valores de la resistividad están dado en función de $AB/2$ y el valor de la constante geométrica (Auge, 2008)

$$K = \frac{\pi}{4 \cdot NM} (AB^2 - MN^2) \approx \pi \cdot \frac{L}{a} \quad (2.29)$$

2.4.3. Dispositivo Wenner

Es un dispositivo simétrico y lineal, los electrodos se mantienen equiespaciado, las distancias de los electrodos AM , MN y NB un valor constante a , siempre manteniendo el centro O (Auge, (2008)), como se observa en la siguiente figura 2.10

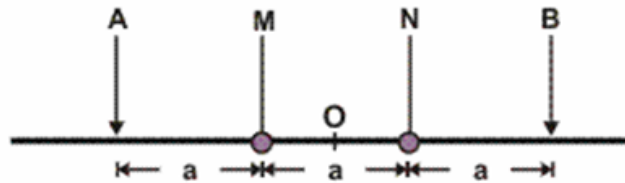


Figura 2.10 Dispositivo Electrónico Wenner (Auge,2008).

El valor de la constante geométrica K es

$$K = 2. \pi a \quad (2.30)$$

2.4.4. Dispositivos electrónicos dipolares

Los dispositivos dipolares donde los electrodos AB y NM están en distintas configuraciones geométricas, por ende el factor geométrico K varían según las distancias de separación de los electrodos. Las más comunes son la ecuatorial y axial, como se muestran en la siguiente figura 2.11.

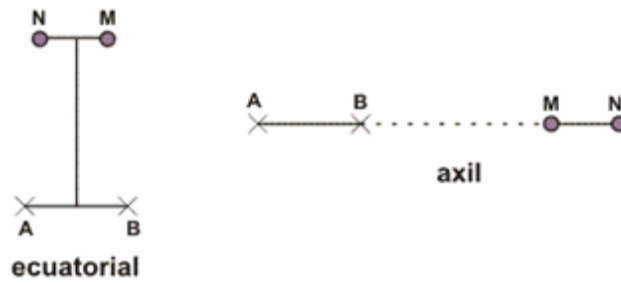


Figura 2.11 Dispositivos Electrónicos dipolares (Auge, 2008).

Considerando un dispositivo dipolar, en el que el dipolo de medición MN forme un ángulo cualquiera γ con el radio vector R (figura 2.12), según Orellana (1972): la ecuación de la resistividad aparente para dispositivos dipolares

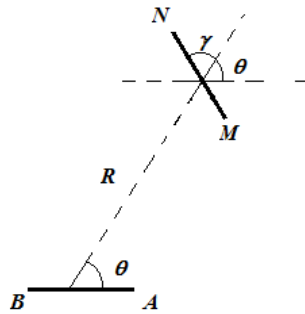


Figura 2.12 Dispositivos dipolares

$$\rho_a = \frac{2\pi R^3}{AB MN} (2\cos\gamma\cos\theta + \sin\gamma\sin\theta) \frac{\Delta V}{I} \quad (2.31)$$

El valor del factor geométrica K , para el caso axial (donde $\gamma = \theta = 0$)

$$K = \frac{\pi R^3}{AB \cdot MN} \quad (2.32)$$

En el dispositivo dipolar ecuatorial el factor geométrico K viene dado por la ecuación (donde $\gamma = \theta = \pi/2$)

$$K = \frac{2\pi R^3}{AB \cdot MN} \quad (2.33)$$

2.5 TIPOS DE PROSPECCIÓN O SONDEO ELÉCTRICO

Se llama sondeo eléctrico a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción.

2.5.1. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

La finalidad del SEV es conocer la distribución vertical en la profundidad de las resistividades aparente bajo el punto sondeado a partir de medidas del potencial en la superficie. A medida de que los electrodos A y B se separan la corriente eléctrica va penetrando en las capas más profundas. La existencia de la demás capas que influyen en la medida indirectamente de la resistividad (Apartado 2.2), por lo tanto, se de tener presente que existe una influencia de las resistividades de los medios atravesado. Según Orellana (1982): “Sí la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula con mayor profundidad pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo, el 50 % de la corriente circula por encima de la profundidad $AB/2$ y el 70 % por encima de la profundidad AB . Podría pensarse que la profundidad de penetración es proporcional a AB . Sin embargo esto es válido para un subsuelo homogéneo”.

El SEV consiste en aumentar progresivamente los electrodos manteniendo un punto central fijo (punto de sondeo). A continuación se describe la aplicación de dispositivos para un el SEV:

2.5.2. Sondeo Wenner:

El dispositivo Wenner $ANMB$ con una separación interelectródica a manteniendo un punto central P . La distancia interelectródica pasa de a ($AMNB$) a na ($A'N'M'B'$), moviéndose los cuatro electrodos en cada medición sucesiva, según Orellana (1972), como se observa en la figura 2.13.

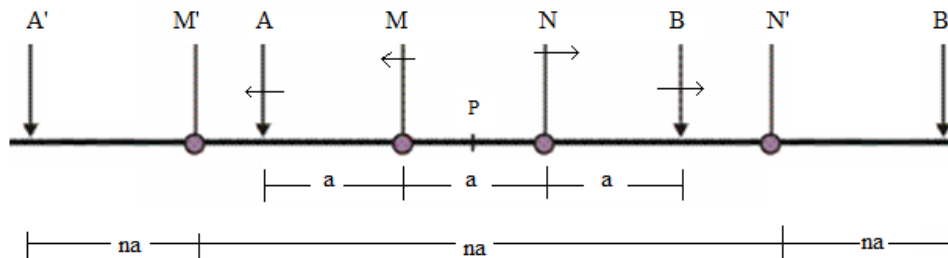


Figura 2.13 Sondeo Wenner (Auge,2008).

2.5.3. Sondeo Schlumberger

El dispositivo Schlumberger $ANMB$ con $AB \gg MN$. En la figura 2.14, se observa el sondeo, el cual consiste en separar progresivamente los electrodos inyectoros A y B dejando los electrodos detectores M y N en torno a un punto central fijo P . La representación de este sondeo muestra en la ordenada ρa (Ωm) y en la abscisa $AB/2$ (m). Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos. Cuando la distancia AB se hace tan grande que la diferencia potencial MN

es muy pequeña, entonces los electrodos M y N se mueven, de modo que los intervalos b se hacen mayor (Por ende, mayor la diferencia de potencial), se recomienza a abrir A y B progresivamente, pero siempre repitiendo un par de punto comunes a dichos empalmes (Orellana, 1972).

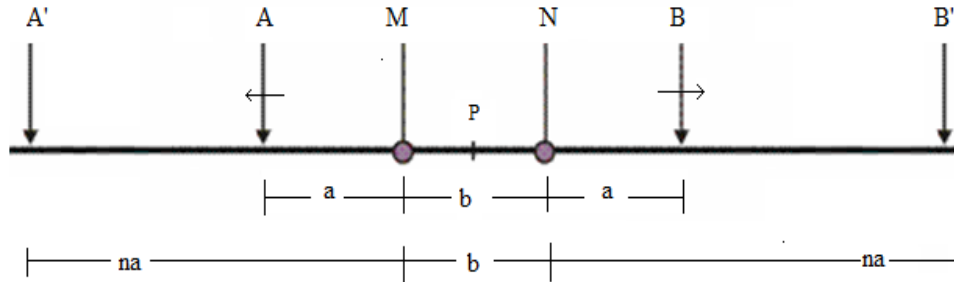


Figura 2.14 Sondeo Schlumberger (Auge ,2008).

2.4.4. Calicatas Eléctricas (CE)

Es una modalidad de sondeo, en la cual se desplaza el dispositivo a lo largo de un perfil, con una separación constante de los electrodos, a fin de conocer la variación de resistividad a lo largo del mismo pero a una profundidad de investigación constante. En las Calicatas Eléctricas se utilizan los dispositivos de Schlumberger, Wenner, Dipolos, Electrodo Lineales y otros similares al SEV.

Un tipo especial de Calicatas geoelectricas es el que se realiza con dispositivos de corriente lineales (cables tendidos en el terreno a bastantes distancias y paralelos entre sí). Sucesivamente calicatas paralelas se hacen en forma perpendicular a dichos electrodos lineales, entre uno y otro, como se observa en la figura 2.15. Conviene emplear esta técnica en terrenos llanos, con la ventaja de distribuir mejor la corriente en el subsuelo y facilitar la interpretación de las anomalías. Las CE son utilizadas para la identificación y desarrollo minero, hidrología, arqueología (Auge, 2008).

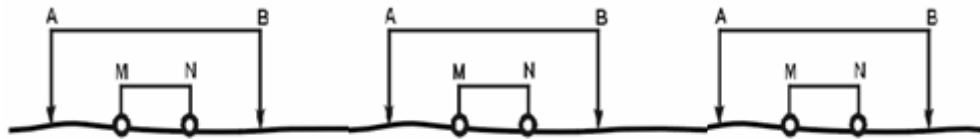


Figura 2.15 Dispositivos eléctricos para las calicatas eléctricas (CE) (Auge, 2008).

2.5 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE UN SONDEO ELÉCTRICO

La morfología de las de las curvas de la resistividad aparente (CRA) consiste en una representación logarítmica de valores medidos de ρ_a en función del espaciamiento de las separaciones electródicas. Para los arreglos Schlumberger, Wenner y dipolares ecuatoriales, las curvas teóricas (CRA) poseen propiedades generales que son independiente del numero de capas (Castro, 2002). Para identificar las capas con diferentes resistividades, deben compararse las curvas obtenidas en el campo con otras que se denominan curvas teóricas. Este procedimiento se usó hasta la década de 1970, mediante el empleo de catálogos de curvas teóricas de resistividad como las elaboradas por: Compagnie Générale de Géophysique (1955) con 480 curvas de 3 capas; Orellana y Mooney (1966) con 25 curvas para 2 capas, 912 para 3 y 480 para 4 capas (Orellana, 1982).

En la actualidad se han desarrollados diversos programas que permiten realizar una rápida comparación de las curvas de campo, con las teóricas y por ende también permiten una rápida solución del problema.

La superposición de las gráficas de campos con las curvas patrones como lo indica la figura 2.16, se representa la configuración del subsuelo para 2 capas resistivas, en el caso de a y de 3, en el caso de b. En las dos curvas se pueden observar culminaciones (1,3) y depresiones (2), también denominadas mesetas, que corresponden a las resistividades aparentes y ramas inclinadas descendentes (3, 4) y ascendente (5), que unen a las mesetas. Las ramas descendentes indican una disminución de la resistividad en profundidad y las ascendentes un aumento. De la superposición se puede interpretar el número de capas sondeadas, la resistividad de cada capa y el espesor de cada una de ella partiendo siempre de la suposición de que no existen variaciones laterales de ρ en los estratos modelados y que ρ_n (la capa subyacentes a los niveles de interés) es infinita.

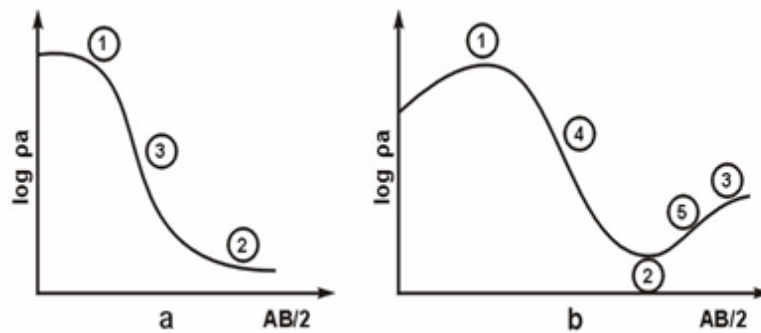


Figura 2.16 Curva de resistividad aparente para 2 capas (a) y 3 capas (b). (Sasha, 2007)

Si el dispositivo electródico está próximo a un contacto vertical, las líneas de corrientes serán distorsionadas, por lo que la medición de MN se verá afectada por el otro medio, tanto mayor sea la separación de los electrodos AB . Por lo tanto, la medición de la resistividad aparente en un SEV estará influida por la distribución de resistividades en un cierto volumen de terreno. Según Orellana (1982): Esto implica que para distancias grandes de AB no se sabrá si la resistividad aparente es debido a cambios de estructura en la profundidad o a las heterogeneidades laterales por contraste de la resistividad. Puede ocurrir que las curvas de la resistividad aparente

para dos casos diferentes de SEV sean idénticas si la relación entre la profundidad a la que se encuentra un estrato y su resistividad permanecen constante, lo que provoca una ambigüedad en la deducción del grosor de la capa y de su resistividad.

MARCO TEÓRICO

INSTRUMENTACIÓN

A continuación se describen los aspectos más importantes de la fuente diseñada por el Profesor Benavides, ya que ésta es base para el desarrollo de la fuente elaborada en este trabajo.

3.1. FUENTE DESARROLLADA POR EL PROFESOR ALFONSO BENAVIDES.

En el Instituto de Ciencias de la Tierra de la universidad Central de Venezuela, el profesor Benavides desarrolló una fuente de corriente de alto voltaje para fines geoelectrónicos, la cual fue diseñada en forma modular y cuyo diagrama de bloque está representado en la figura 3.1.

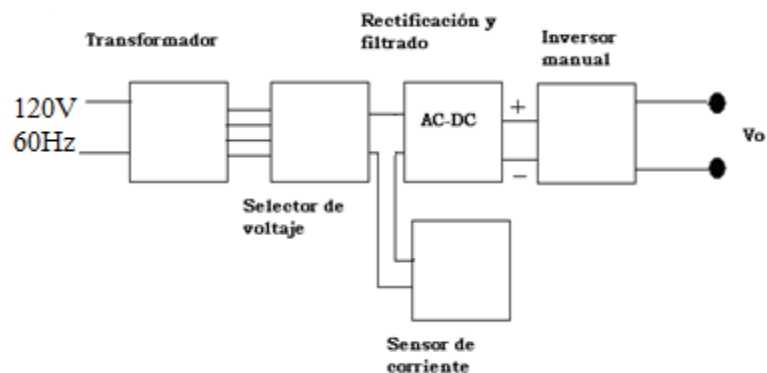


Figura 3.1 Bloques que conforma la fuente de alto voltaje, donde se adiciona un sensor de corriente (Benavides, 1999)

La fuente está constituida por los siguientes bloques, los cuales se explicarán en los siguientes apartados:

- Transformación, rectificación y filtrado
- Medición de corriente
- Inversor manual

3.1.1. Transformación, Rectificación y filtrado

La fuente de voltaje o transmisor puede suministrar una corriente máxima de 3 amperios, un voltaje máximo de salida de 1000 voltios y una potencia máxima de 1000W, según Benavides (1999).

La fuente posee un transformador con un primario y cinco secundarios de idénticas vueltas, el cual es alimentado por una tensión de 120 voltios y 60 Hz. Se conecta los secundarios de manera apropiada para generar voltajes de a 200 V, 400 V, 600 V, 800 V y 1000 V, según Benavides (1999). En la figura 3.2 se observa las conexiones de los secundarios que van conectados al selector del voltaje.

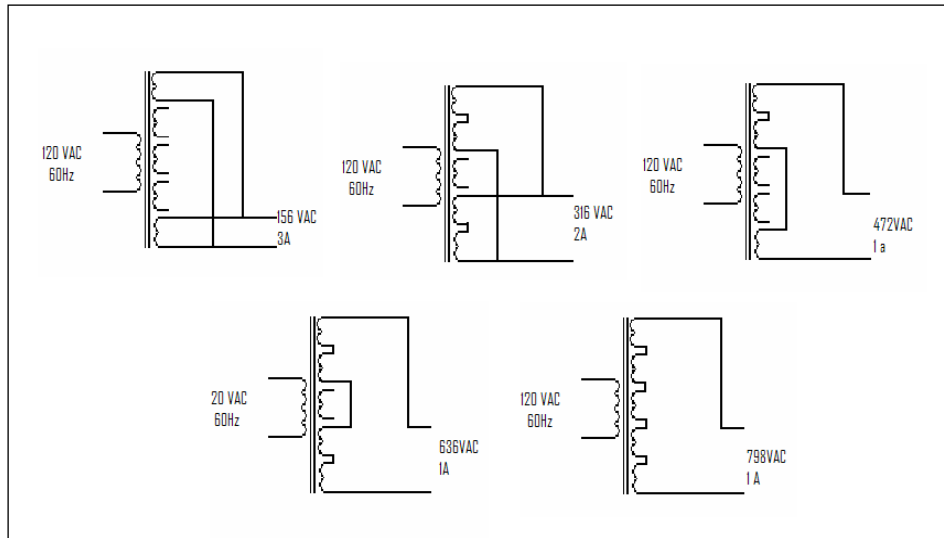


Figura 3.2 Conexiones de los secundarios del transformador (Benavides, 1999)

Las conexiones de los secundarios van conectadas a un selector rotatorio manual 6 polos y 6 posiciones para realizar los cambios de voltajes

3.1.2. Medición de corriente

La fuente posee un transductor de tipo inductivo que está ubicado en la etapa de alta tensión entre la salida del selector voltaje y el bloque de rectificador-filtrado, el cual va generar una señal de voltaje proporcional a la corriente que la fuente suministra. El transductor es un transformador pequeño de corriente CS2106 de la compañía Coilcraft, el cual está diseñado para medir corriente en línea con alimentación de 50-60 Hz, en la figura 3.3 se observa el sensor CS2106 y el acondicionador de señal.

3.2. CONTROL Y ADQUISICION DE DATOS

Un sistema de control es un ordenamiento de componentes físicos conectados de tal manera que el mismo pueda comandar, dirigir o regularse a sí mismo o a otros sistemas. Se clasifican en sistema de lazo abierto y sistema de lazo cerrado, donde la acción de control es independiente de la salida y dependiente de salida, respectivamente.

“La mayoría de científicos e ingenieros están empleando computadoras personales para la investigación en el laboratorio, al aire libre, para control industrial, pruebas y medidas” (Benavides, 1999).

El término de adquisición de datos consiste en el proceso en tomar la información de los sensores y registrarla para luego procesarlos. Para las operaciones de adquisición de datos digitales se incluye: manipulación de las variables analógicas, medición, conversión A/D y manejo de los datos digitales; en la figura 3.4 se muestra el diagrama de los elementos que con forman los sistemas de adquisición de datos.

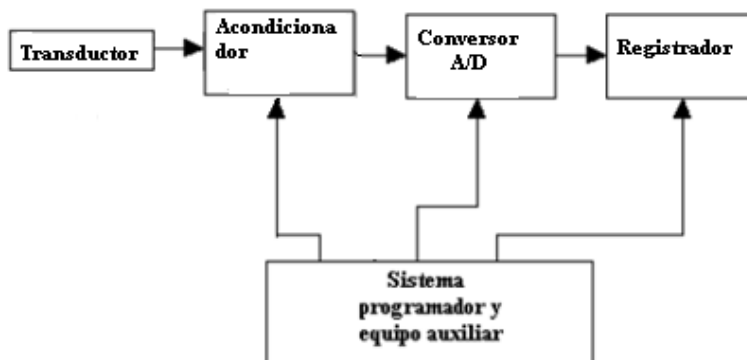


Figura 3.4 elementos de la adquisición de datos digitales

Los siguientes elementos permiten realizar la adquisición de datos digital, los cuales se explican en los siguientes apartados, tales como:

- Transductores
- Acondicionador de señal
- Conversor Análogo-Digital
- Registrador digital y equipos auxiliares

3.2.1. Transductor

Por traductor es cualquier dispositivo o elemento capaz de convertir una señal de entrada en una señal de salida de carácter diferente (Escalona, 1986).

3.2.2. Acondicionador de señal

Por lo general, el acondicionador de señal es el circuito que acompaña al transductor, que permite que la variable de salida del sensor tenga las condiciones necesaria para manipulación de la variable que se esta midiendo.

3.2.3. Conversor A/D

Este convierte la señal analógica a digital. La salida del convertidor A/D está disponible para su procesamiento posterior y almacenamiento.

3.2.4. Registrador

El registrador digital permite almacenar la información en un sistema de almacenamiento de datos. Los equipos auxiliares contienen los instrumentos para funciones de programación del sistema y procesamiento de datos.

3.3. MICROCONTROLADORES

Los microcontroladores poseen principalmente una ALU (Unidad Lógica Aritmética), memoria del programa, registros de memoria, y pines I/O (I: entrada y O: salida). La ALU es la encargada de procesar los datos dependiendo de las instrucciones que se ejecuten, mientras que los pines son los que se encargan de comunicar al microcontrolador con el medio externo; Entre las funciones de los pines encontramos, de alimentación, comunicación y control (Leal ,2008).

Los circuitos integrados programables (Programmable integrated Cicuit =PIC) son microcontroladores, es decir, una unidad que posee en su interior al microprocesador y a los elementos indispensables para que pueda funcionar como una minicomputadora en un solo chip (Vallejo, 2001).

3.4. RECURSOS ESPECIALES DEL PIC16F877

Se hace referencia a una subfamilia de microcontroladores PIC de gama media, que se identifican por tener como memoria FLASH. Es un modelo de 40

pins, el cual dispone de 5 puertos (PA, PB, PC, PD y PE). Posee un conversor A/D de 10 bits de resolución y 8 canales.

En la memoria RAM se alojan los registros operativos fundamentales para el funcionamiento del procesador y en el manejo de todos los periféricos, además de registros que el programador puede usar para información de trabajo. La memoria FLASH, es donde se graba el programa de aplicaciones en los PIC, puede tener una capacidad de 4 K u 8 K palabras de 14 bits cada una.

A continuación se dará una explicación acerca de los diferentes recursos del PIC 16F877 que se utilizarán para el diseño y desarrollo de la fuente de corriente de alto voltaje como son el puerto B, el conversor A/D y la comunicación serial (USART).

3.4.1. El Puerto digitales E/S

Todos los microcontroladores, tienen un número variable de pins que cumplen funciones de alimentación, comunicación y control. En el caso del puerto B, dispone de 8 líneas bidireccionales cuya función se elige mediante la programación del registro TRISB. Si el bit 0 del registro TRISB se pone en 1, la línea 0 (RB0) del puerto B funciona como entrada. Si se programa en 0 funciona como salida y el contenido de la báscula de salida se aplica al pin correspondiente, y así para los demás pins.

3.4.2. Conversor A/D del PIC16F877

La finalidad del conversor A/D es realizar la transformar una señal analógica a una señal digital. Según Usategui (2000): de los contenidos más utilizados del PIC16F87X, quizá el conversor A/D sea el que más aplicaciones estamos

acostumbrado a ver en la vida diaria. Sensores de temperatura, luz, humedad, entre otros, son valores que nos interesa monitorizar pero que necesitan ser traducidos para ser entendidos por el sistema de control, labor que realiza el conversor A/D. La tarea de conversión es siempre igual, independiente del sensor utilizado. A continuación se dará una explicación de los diferentes registros que se utilizan para poner en funcionamiento el conversor del PIC16F877. Los microcontroladores PIC16F87X poseen un conversor A/D de 10 bits de resolución y 5 canales en los modelos de 28 pines y 8 canales en los modelos de 40.

3.4.3. Comunicación asincrónica (EL USART)

El USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) es el modulo del PIC responsable de la comunicación serial definida en el estándar RS-232. En este trabajo se utiliza en el modo asíncrono. En el PIC los datos que se transmiten o se reciben a través de este puerto serial, pueden ser de 8 o 9 bits, los cuales van precedidos por un bit de inicio (START) y seguidos por un bit de parada (STOP).

Para poder ajustar los niveles de voltaje TTL del PIC a los definidos en el estándar RS-232, es necesario utilizar un adaptador (Driver) MAX232.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se muestra el estudio realizado a la fuente desarrollada por el Profesor Benavides, en donde se explican las causas de las deficiencias de los módulos que la conforman. Posteriormente, se describen los módulos de la fuente de corriente continua de alto voltaje, diseñada y desarrollada en el presente trabajo para solucionar los problemas que presentaba la del Profesor Benavides.

4.1. ESTUDIO Y DIAGNÓSTICO DE LA FUENTE DESARROLLADA POR EL PROFESOR ALFONSO BENAVIDES

El estudio consistió, en el levantamiento de los planos de los bloques que conforman la fuente desarrollada por el Prof. Benavides; comparalos con los descritos en su trabajo para determinar el origen de sus deficiencias.

Luego de realizar el estudio, se encontró que las deficiencias se originan en los siguientes bloques:

- Transformación, rectificación y filtrado.
- Medición de corriente.
- Inversor de polaridad manual.

los cuales se detallan a continuación:

4.1.1. Transformación, rectificación y filtrado

La selección del voltaje de salida de la fuente, se realiza manualmente a través de un conmutador Crite-Hammer de 6 polos, 6 posiciones, que conecta adecuadamente los devanados secundarios del transformador, para poder obtener los diferentes voltajes posibles: 200 V, 400 V, 600 V, 800 V y 1000 V. Este sistema tiene el inconveniente de tener que ajustar manualmente el voltaje de salida, hasta que la corriente suministrada al terreno supere los 0,5 A. Esto implica, además, que es necesario manipular la fuente mientras ésta se encuentra encendida, lo que a su vez acarrea peligro de descarga eléctrica al operador.

La capacidad equivalente del conjunto de condensadores utilizados en la etapa de filtrado, fue reportada incorrectamente en el trabajo del Prof. Benavides, en el cual se indica una capacidad total de 2350 μF , siendo el valor correcto una capacidad de unos 90 μF , que es la capacidad equivalente de cinco condensadores de 470 μF conectados en serie, como se muestra en la figura 4.1. A pesar de que se trata de un filtro con un pequeño valor, cuando se carga con voltajes tan altos puede proporcionar descargas eléctricas considerables, que también afectan la seguridad del operador al manipular la fuente, aun cuando ésta se encuentra apagada. La fuente desarrollada por el Prof. Benavides no cuenta con ningún mecanismo que permita la descarga de los condensadores utilizados en la etapa de filtrado, salvo la descarga que se realiza a través del propio terreno.

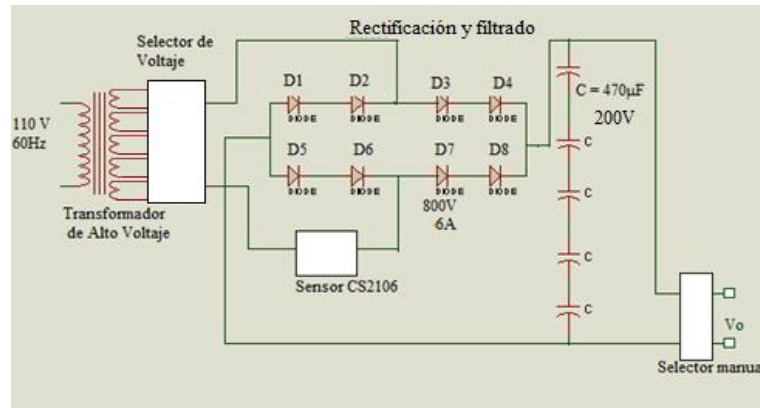


Figura 4.1 Bloque de Transformación, rectificación y Filtrado

4.1.2. Medición de corriente

El bloque de medición de corriente está constituido por un sensor inductivo CS2106 de la compañía Coilcraft y un circuito acondicionador de señal.

El sensor de corriente inductivo está ubicado entre el transformador y el puente de diodos. Este sensor es básicamente un pequeño transformador de elevado aislamiento, en el que se induce un voltaje en el secundario que es proporcional a la corriente que circula a través del primario. Este dispositivo permite medir corriente alterna de forma sinusoidal, pero en la ubicación donde se encuentra conectado, la corriente no cumple con estas características como se observa en la figura 4.2, donde V_s es el voltaje de salida del transformador, V_l es el voltaje salida rectificado y filtrado y la corriente que pasa a través del sensor es i_s . Esta corriente es pulsátil, bipolar y de ancho variable, por lo tanto no cumple con los requerimientos del sensor inductivo, necesarios para garantizar su calibración.

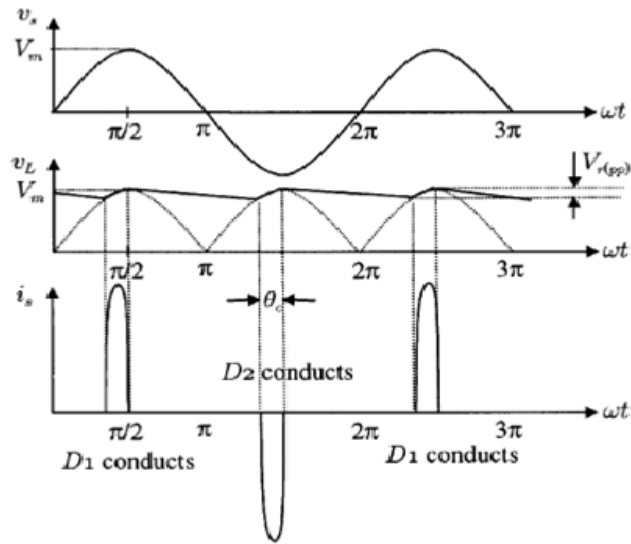


Figura 4. 2 Voltaje de salida del transformador, voltaje de salida del rectificado y filtrado; corriente de salida del rectificador (Muhammad, 2001)

El sensor de corriente está conectado al circuito acondicionador de señal como se muestra en la figura 4.3. Este circuito se encarga de rectificar, amplificar y filtrar la señal, para entregar en la salida un voltaje DC proporcional al voltaje AC inducido en el sensor.

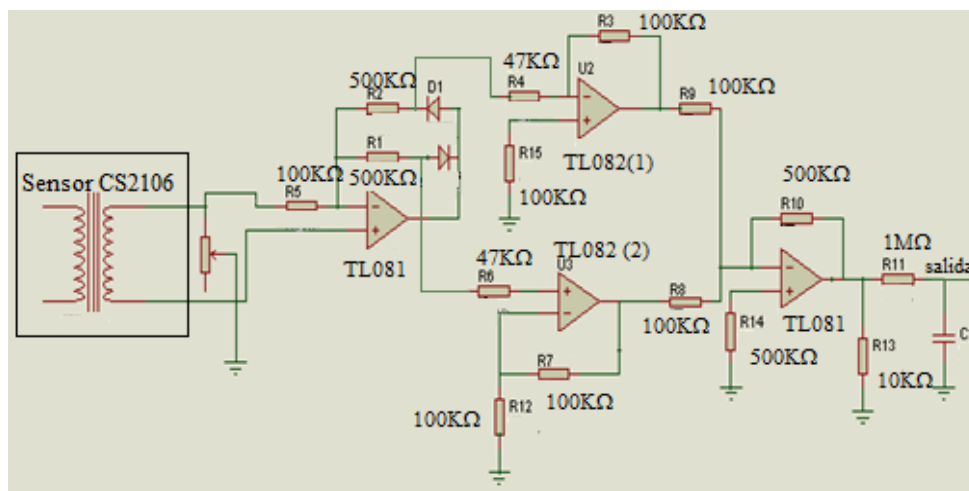


Figura 4.3 Sensor de corriente y acondicionamiento de señal

En la salida del acondicionador de señal se encuentra una resistencia de $1M\Omega$, que no fue incluida en el esquema del circuito eléctrico reportado en el trabajo del Prof. Benavides. Esta alta impedancia en la salida ocasiona un alto nivel de ruido que imposibilita la medición del voltaje que entrega este circuito.

4.1.3. Inversor de polaridad manual

El Prof. Benavides utilizó un conmutador manual de dos polos y tres posiciones para cambiar la polaridad de la salida de la fuente, pero según las especificaciones del conmutador, éste es para ser utilizado con voltajes menores a 120V, lo que implica una nueva fuente de riesgo de descarga eléctrica.

4.2. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA FUENTE DE CORRIENTE DE ALTO VOLTAJE

Teniendo en cuenta las deficiencias, que se detectaron en la fuente desarrollada por el Prof. Alfonso Benavides en cuanto a seguridad, operatividad y medición, se diseñó y desarrolló una nueva fuente en la que se corrigen estos aspectos.

La fuente se diseñó y desarrolló por bloques, es decir, en forma modular. En la figura 4.4 se muestra el diagrama de los bloques que la conforman, los cuales se mencionan a continuación:

- Transformación, rectificación y filtrado.
- Limitador.
- Apagado/Encendido
- Descarga

- Inversor
- Medición de corriente
- Control y Adquisición de datos (PIC16F877)
- Interfaz Gráfica de usuario

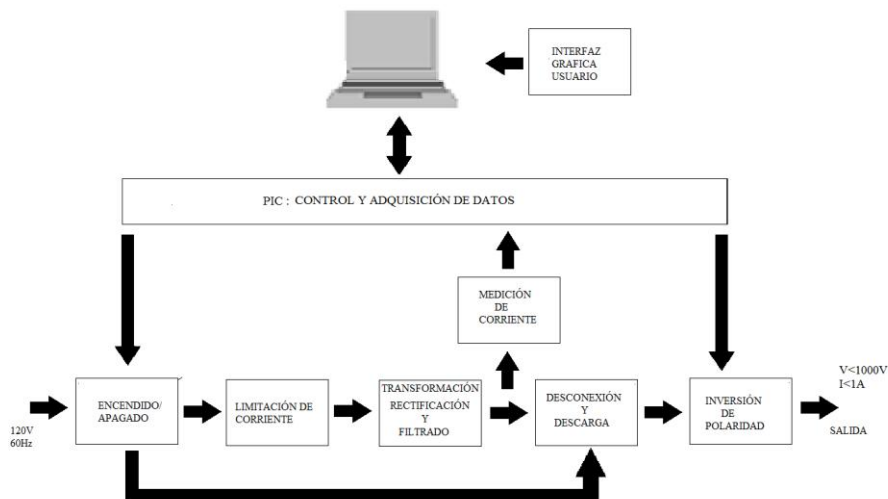


Figura 4.4 Fuente de corriente continua de alto voltaje para fines geoelectrico desarrollada.

En los próximos apartados se explica en detalle cada uno de los bloques que conforman la fuente desarrollada.

4.2.1. Transformación, Rectificación y Filtrado

El bloque de transformación, rectificación y filtrado que se empleó para el desarrollo de la fuente, es básicamente el mismo que utilizó el Prof. Benavides. Los cinco secundarios del transformador se conectaron en serie de forma permanente, con

el objetivo de obtener el voltaje más alto que éste transformador puede generar, el cual alcanza unos $800\text{ V}_{\text{rms}}$. Esto se puede apreciar en la figura 4.5.

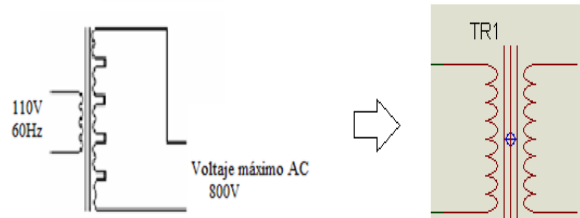


Figura 4.5 Transformador con 5 secundarios, conectados en serie

4.2.2. Limitador

El circuito limitador está constituido por un par de lámparas halógenas de 500W cada una, éstas se encuentran conectadas en paralelo entre si y en serie con el primario del transformador, como se observa en la figura 4.6.

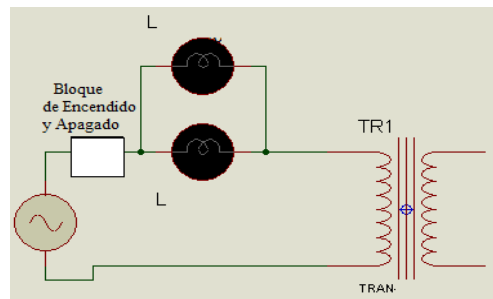


Figura 4.6 Sistema limitador de corriente

Al variar la resistencia de carga en la salida de la fuente (ver figura 4.4), la potencia entregada por el secundario del transformador también lo hará y en consecuencia, cambiará la potencia requerida por el primario. Las lámparas actúan como un elemento resistivo no lineal que permite limitar la corriente que circula por el devanado primario.

Si la salida de la fuente se cortocircuita, la corriente en el primario alcanzará su máximo valor, pero éste no puede exceder al valor de la corriente que se establecería a través de las lámparas si se cortocircuitara el primario. Aquí el valor de la resistencia de las lámparas alcanzan un máximo y la potencia en la entrada es básicamente disipada por ellas. Por el contrario para corrientes pequeñas su resistencia es muy baja, de manera que el primario tiene prácticamente el voltaje de la línea y en la salida de la fuente se alcanzará un alto voltaje.

Las lámparas, al limitar la corriente, actúan como un mecanismo de protección impidiendo que los requerimientos de potencia superen la capacidad del transformador. Pero también actúan como un sistema automático de ajuste del voltaje de salida, que garantiza la más alta corriente de inyección al terreno, que ésta fuente puede suministrar para una determinada resistencia.

4.2.3. Encendido/Apagado

Este bloque como su nombre lo indica permite encender y apagar la fuente; para ello se implementó un circuito basado en un relé, que controla la alimentación del primario del transformador a través de un microcontrolador.

En la figura 4.7 se muestra el esquema del circuito. En éste se puede apreciar que la señal de activación/desactivación proveniente del PIC (RB0-Pin 33) se hace pasar por un optoacoplador para proteger el puerto de salida de un eventual sobrevoltaje. La salida del optoacoplador polariza la base del transistor Q_1 , quien controla la activación del relé RL1, el cual a su vez enciende o apaga la fuente. El

diodo D_1 protege al transistor Q_1 de picos de voltaje generados por la bobina del relé cuando Q_1 entra en corte.

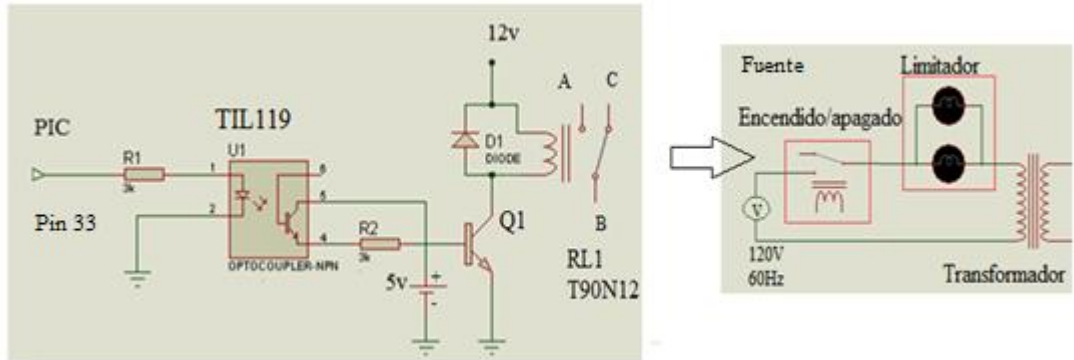


Figura 4.7 Bloque de Encendido y Apagado

4.2.4. Descarga

El sistema de descarga, como se muestra en la figura 4.8, consta básicamente de un relé cuya bobina de activación está conectada en paralelo con la alimentación del primario del transformador, la cual es controlada por el bloque Encendido/Apagado. Éste relé permite, al estar encienda la fuente, el paso de corriente hacia la salida. Al apagar la fuente, éste relé desconecta la salida y permite la descarga de los condensadores a través de un elemento resistivo.

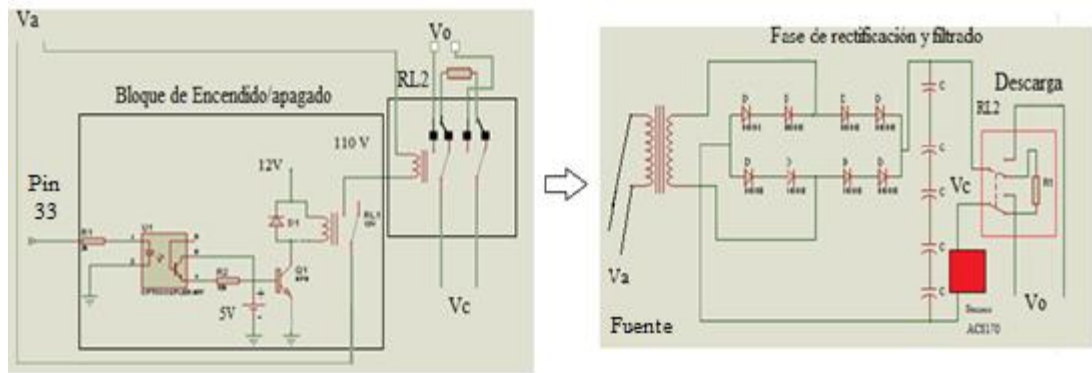


Figura 4.8 Bloque de descarga

4.2.5. Inversor

El bloque inversor se desarrolló para el cambio de polaridad del voltaje de salida de la fuente, está ubicado después del bloque de descarga. El control se realiza desde el PIC, dependiendo del estado del pin 20, si es cero (0) la salida de la fuente es positiva o negativa si es uno (1). En la figura 4.9 se observa el circuito desarrollado para cumplir con ésta función, el cual tiene una estructura similar al del circuito de descarga.

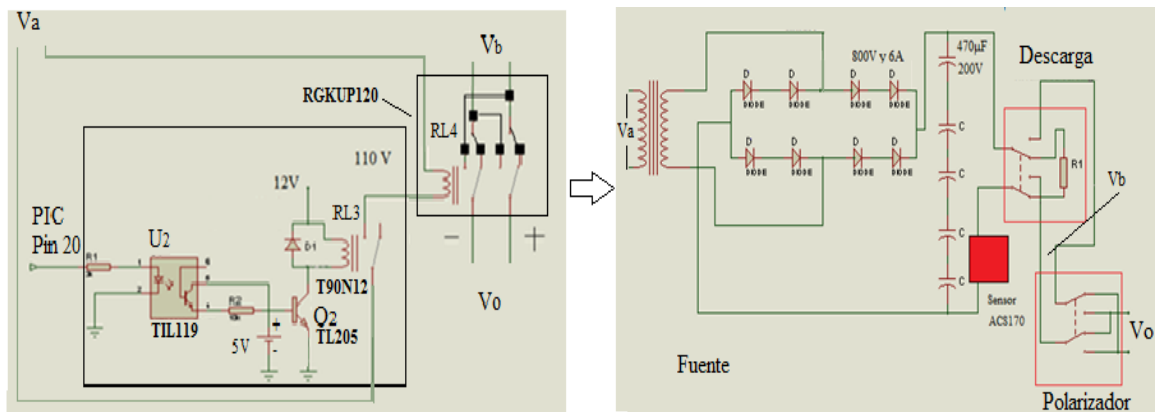


Figura 4.9 Bloque de cambio de polaridad

4.2.6. Medición de corriente

Para mejorar la medición de corriente, se sustituyó el sensor inductivo por un sensor de corriente de Efecto Hall (ACS712) de la compañía Allegro Microsystems. Éste permite genera un voltaje proporcional al campo magnético que genera la corriente que circula a través él.

En la figura 4.10, se puede observar que el sensor se conectó después de la etapa de rectificación y filtrado, donde se puede medir la corriente continua que entrega la fuente. La corriente que se mide con este sensor circula entre los pines IP+(1,2) y IP-(3,4), y el voltaje obtenido como producto de la medición se obtiene a través del pin V_{out} (7). Para el correcto funcionamiento del sensor se deben incluir los condensadores C_{BYP} y C_F con valores recomendados por el fabricante.

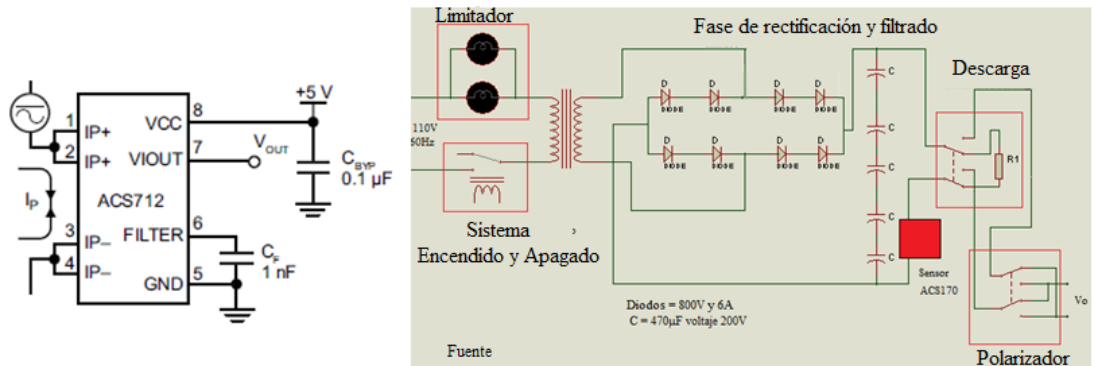


Figura 4.10 Sensor de corriente ASC712

Acondicionamiento de la señal

El sensor ASC712 puede medir corrientes que están dentro de un intervalo de -5 A hasta 5 A, para éstas, el sensor genera voltajes en un rango de 1,5 V a 3,5 V. La fuente desarrollada puede suministrar corrientes en un intervalo de 0 A hasta 1 A, para estos valores de corriente el sensor generaría voltajes en un rango de 2,5 V a 2,7

V. Se invirtió la polaridad del sensor, de manera que el rango de voltaje que se obtiene realmente es de 2,5 V a 2,3 V, según la curva característica del sensor.

El voltaje de salida del sensor cumplirá entonces con la siguiente ecuación:

$$V_s = 2,5 - 0,2I$$

Los valores de voltaje que suministra el sensor, se deben ajustar a niveles entre 0 V y 5 V, que son requeridos según la configuración utilizada en el conversor A/D incorporado en el PIC16F877.

Para realizar este ajuste en los niveles de voltaje, se desarrollo un acondicionador de señal cuyo esquema se muestra en la figura 4.11 su función básicamente, es eliminar el voltaje de base de 2,5 voltios y amplificar la señal resultante a niveles apropiados para la entrada del conversor A/D.

En el diseño del acondicionador de señal se utilizaron dos amplificadores operacionales, el primero como inversor con ganancia unitaria para invertir un voltaje de 2,5 V. El otro como sumador inversor con una ganancia $A \approx 15$, el cual suma el voltaje del sensor (V_s) y el voltaje proveniente del inversor mencionado e invierte el valor obtenido, tal como se muestra en el siguiente desarrollo:

$$V_o = -A(-(2,5V) + V_s) = A(2,5V - V_s)$$

$$V_o = A(2,5V - (2,5V - 0,2i)) = A(0,2i)$$

$$\text{Con } A = R_1/R \approx 15$$

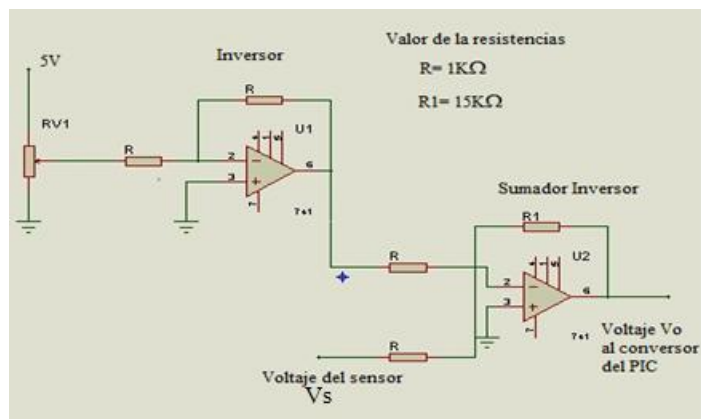


Figura 4.11 Acondicionamiento de la señal de salida del sensor corriente ASC712

4.2.7. Control y Adquisición de datos

Para realizar del control de la fuente y la adquisición de datos de la corriente suministrada por ésta, se utilizó el microcontrolador PIC16F877.

El computador se comunica con el microcontrolador de manera serial bajo el estándar RS-232, siendo necesario utilizar el circuito integrado MAX-232, para ajustar al estándar los niveles de voltaje TTL correspondientes al microcontrolador.

En la figura 4.12 se pueden observar las conexiones del PIC, donde la comunicación serial con el computador se realiza utilizando los pines TX para la transmisión y RX para la recepción de datos. Los pines RB0 y RD0 están conectados a los dispositivos que accionan a los relés de los bloques de encendido/apagado e inversor de polaridad respectivamente. La salida del bloque de medición está conectada al conversor A/D del PIC a través del pin AR0/AN0. Los valores obtenidos producto de la digitalización serán enviados a través del puerto serial al computador.

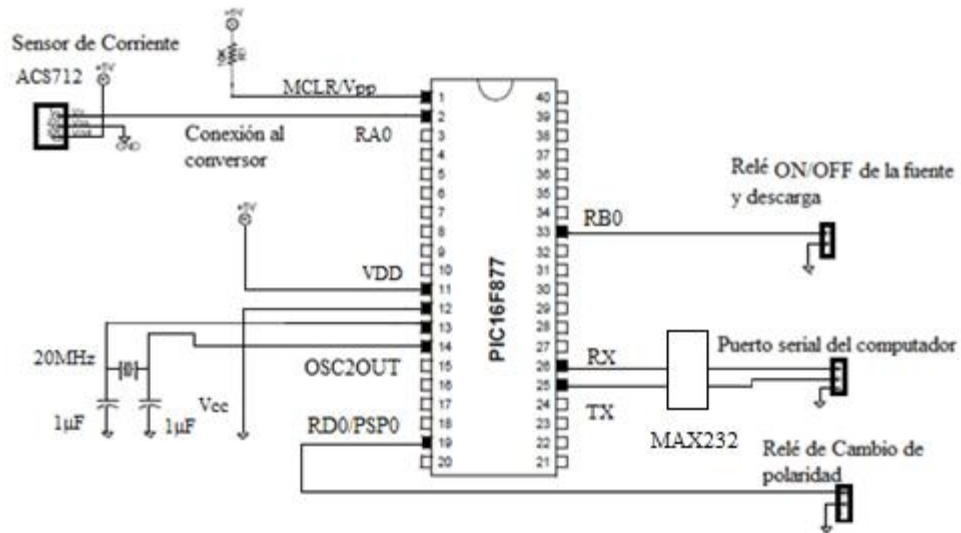


Figura 4.12 Conexiones del PIC16F877 con el Relé, el sensor de corriente y computador.

El software desarrollado para el PIC, permite de manera remota realizar funciones como: encender y apagar la fuente, cambiar la polaridad de la salida y establecer la comunicación serial con el computador.

Desde el computador se envía una palabra de control al PIC, de cual solamente se utilizan los dos bits menos significativos. Las funciones de estos dos bits son básicamente encender o apagar la fuente y cambiar la polaridad de la salida como se muestra en la tabla 4.1.

En la figura 4.13 se muestra el diagrama de flujo del programa principal del PIC16F877

1	0	Bits de la variables DATOS	Control
0	0	<p>En el PIC 16F877:</p> <p>Pin RD0 del PuertoD= 0</p> <p>Pin RB0 del PuertoB= 0</p>	<p>-Fuente Apagada</p> <p>-Finaliza la conversión de la señal recibida del sensor ACS712</p>
0	1	<p>En el PIC 16F877:</p> <p>Pin RDO del PuertoD= 0</p> <p>Pin RB0 del PuertoB= 1</p>	<p>-Fuente encendida en polaridad positiva</p> <p>- Inicia la conversión de la señal recibida del sensor ACS712</p>
1	0	No usado	No usado
1	1	<p>En el PIC 16F877:</p> <p>Pin RD0 del PuertoD= 1</p> <p>Pin RB0 del PuertoB= 1</p>	<p>-Fuente encendida en polaridad negativa</p> <p>- Inicia la conversión de la señal recibida del sensor ASC712</p>

Tabla 4.1 Bit 0 y bit1 del byte de control DATOS

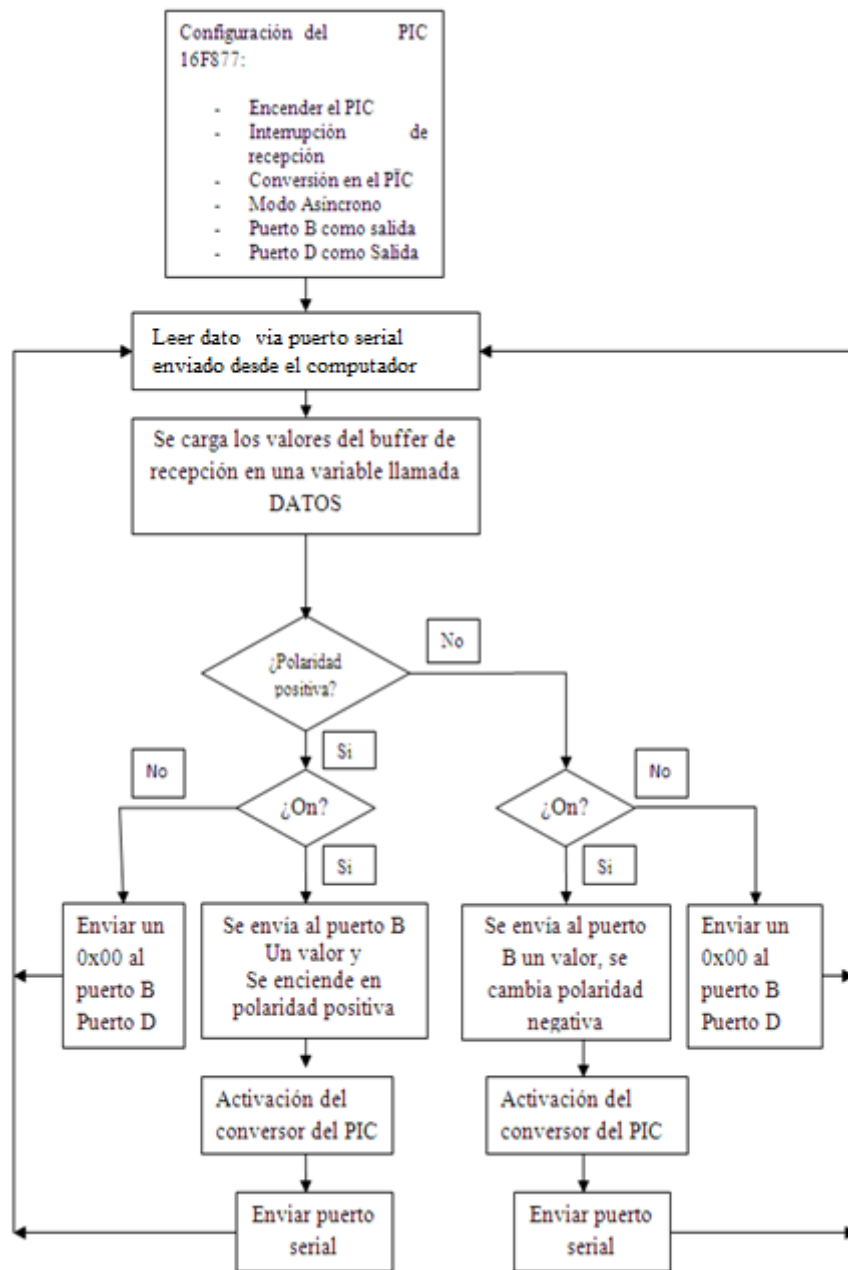


Figura 4.13 Diagrama de flujo del programa para el control del PIC 16F877

4.2.8. Interfaz gráfica Usuario

Para desarrollar la interfaz gráfica se utilizó el entorno de programación Visual Basic. El software desarrollado permite desde el computador, que el usuario controle la fuente y visualice en tiempo real la corriente que ésta suministra.

En la figura 4.14 se aprecia la ventana de la interfaz gráfica, la cual tiene dos recuadros que muestran en tiempo real, los datos de la corriente suministrada por la fuente. Además, se encuentran cinco botones para realizar el control de la fuente cuyas funciones están expuestas en la tabla 4.1.

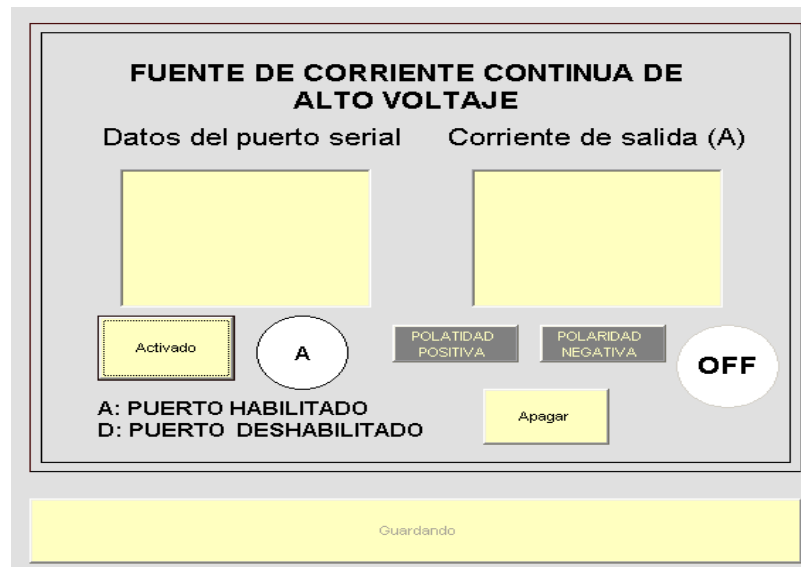


Figura 4.14 Interfaz gráfica para el control de la fuente

Botones	Función
Guardar Archivo	Permite crear un archivo.txt, donde se guardan los datos de corriente que suministra la fuente.
Habilitar/Deshabilitar	Este botón es usado como pulsador, sí lo acciona la primera vez (Habilita), se activa la comunicación con el puerto serial y sí lo vuelve a pulsar (Deshabilita), este desactiva la comunicación serial.
Positiva	Al pulsar el botón se enciende la fuente y el voltaje de salida es positivo.
Negativa	Al pulsar el botón se enciende la fuente y el voltaje de salida es negativo.
Apagado	Este finaliza todo el proceso, no permite el paso de corriente de la fuente al terreno.

Tabla 4.2 Funciones de los botones de la interfaz gráficas

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA FUENTE

Para la determinación de la curva característica de la fuente se procedió a medir la corriente de salida y el voltaje de salida, cuando se varía la resistencia carga. Estos valores se reportaron con sus respectivos errores en la tabla 5.1. También, se encuentran los valores de resistencia, el inverso de la resistencia y la potencia, los cuales se calcularon a partir de los valores de voltaje y corriente.

Con los datos expuestos en la tabla 5.1 se obtuvieron las siguientes gráficas, las cuales se comentan en los apartados que siguen:

- Corriente de salida en función del Voltaje de salida
- Voltaje de salida en función de la resistencia de carga
- Corriente de salida en función del inverso de la resistencia de carga
- Potencia de salida en función la resistencia de carga

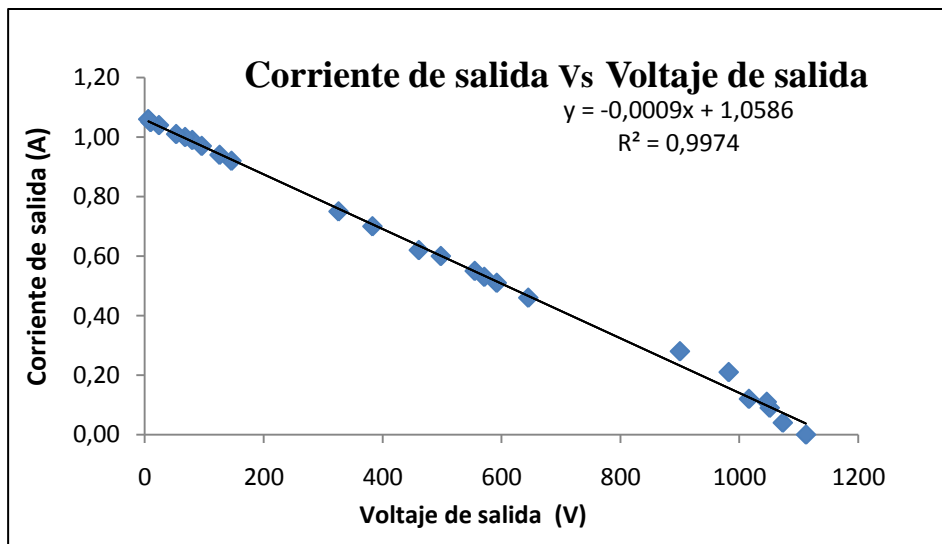
Voltaje Salida	Error	Corriente Salida	Error	Resistencia De carga	Error	Inverso Resistencia	Error	Potencia Salida	Error
$V_2(V)$	$\Delta V_2(V)$	$I_2(mA)$	$\Delta I_2(mA)$	$R(\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$	$1/R (K\Omega^{-1})$	$\Delta(1/R) (K\Omega^{-1})$	$P(W)$	$\Delta P(W)$
1112	7	0	0	0	0	0	0	0	0
1073	6	0,04	0,004	26825	163	0,037	0,004	43	5
1051	6	0,1	0,01	11678	75	0,086	0,0053	95	6
1046	6	0,11	0,01	9509	63	0,11	0,0064	115	7
1016	6	0,12	0,01	8467	58	0,12	0,0076	122	8
982	6	0,21	0,01	4676	37	0,21	0,01	206	10
900	6	0,28	0,01	3214	29	0,31	0,013	252	11
645	4	0,46	0,04	1402	35	0,71	0,067	297	28
592	4	0,51	0,05	1161	37	0,86	0,09	302	32
571	4	0,53	0,05	1077	36	0,93	0,094	303	31
555	4	0,55	0,05	1009	35	0,99	0,097	305	30
498	3	0,6	0,05	830	31	1,2	0,1	299	27
461	3	0,62	0,05	744	28	1,3	0,1	286	25
383	3	0,7	0,05	547	23	1,8	0,1	268	21
326	3	0,75	0,05	435	20	2,3	0,2	245	18
146	2	0,92	0,05	159	9	6,3	0,4	134	9
126	2	0,94	0,05	134	8	7,5	0,5	118	8
80	0,6	0,99	0,05	81	5	12,4	0,7	79	5
96	0,6	0,97	0,05	99	5	10	1	93	5
68	0,4	1	0,06	68	4	15	1	68	4
53	0,4	1,01	0,06	53	4	19	1	54	4
24	0,2	1,04	0,06	23	2	43	3	25	4
10	0,2	1,05	0,06	10	1	101	8	11	2
6	0,2	1,06	0,06	7	1	175	13	6	1

Tabla 5.1 Datos corrientes y voltajes de salida de la fuente

El equipo utilizado para medir el voltaje y la corriente de salida de la fuente fue el multímetro Digital PD-695

- **Curva de corriente de salida en función de la voltaje de salida**

En la gráfica 5.1, se puede observar el comportamiento de la corriente en función del voltaje de salida de la fuente, al variar la resistencia de carga. Aquí se aprecia que la curva puede ser considerada como lineal, igualmente se aprecia que la linealidad de la curva mejora para corrientes mayores a 0,5A.

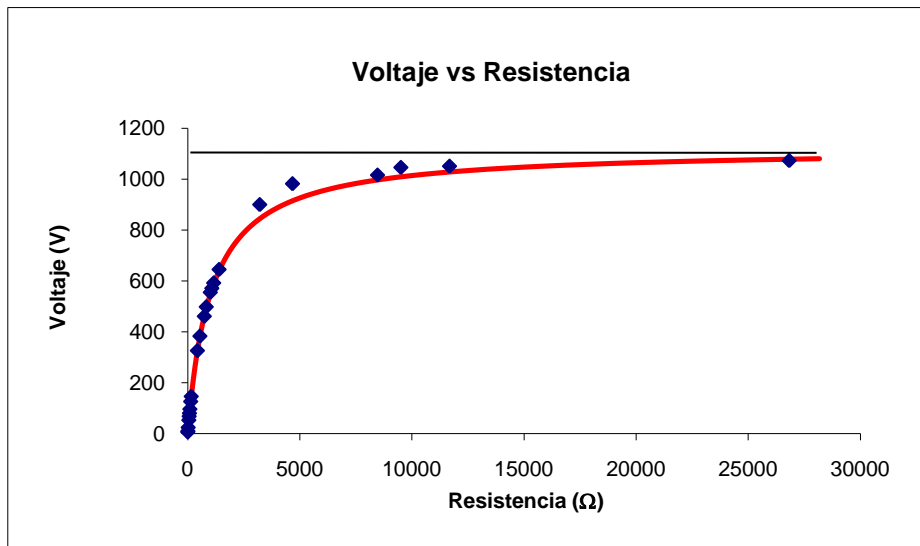


Gráfica 5.1 Curva Voltaje de salida vs Corriente salida

- **Curva de voltaje de salida en función de la resistencia de carga**

La curva de voltaje suministrado por la fuente en función de la resistencia de carga se muestra en la gráfica 5.2, en donde los puntos se corresponden a los datos

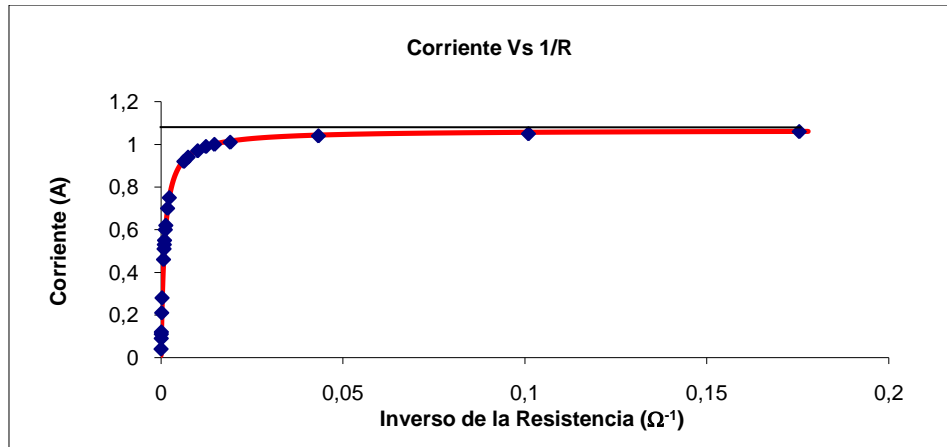
experimentales y la curva representa el resultado de un ajuste que se explicara en el punto 3.4.3. En la gráfica, se puede observar que a medida que aumenta el valor de la resistencia de carga, el voltaje de salida de la fuente va aumentando, tendiendo a un valor límite de unos 1100V.



Gráfica 5.2 Voltaje de salida vs resistencia de carga

- **Curva de corriente de salida de la fuente en función el inverso resistencia de carga**

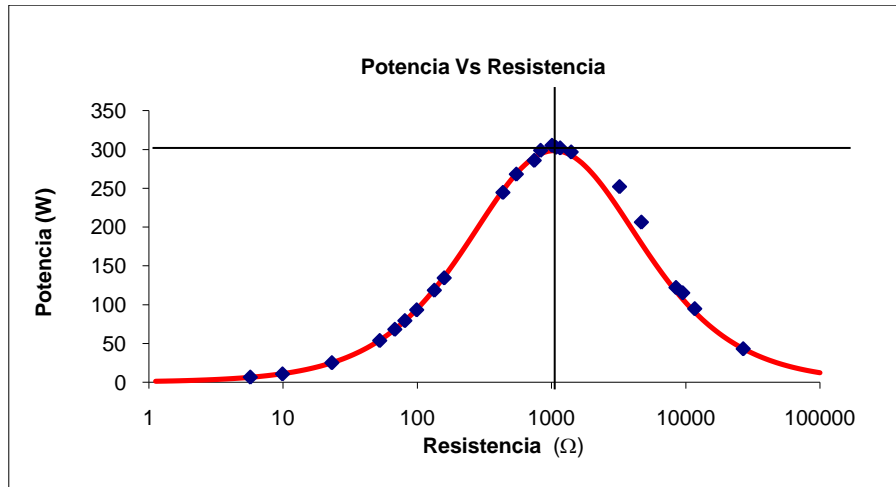
En la gráfica 5.3 se muestra la corriente de salida de la fuente en función del inverso de la resistencia de carga. Aquí igual que en la gráfica anterior, los puntos se corresponden a los datos experimentales y la curva representa el resultado del ajuste. Se puede observar que a medida que el inverso del valor de la resistencia de carga aumenta (resistencia de carga disminuye), la corriente suministrada por la fuente va aumentando, tendiendo a un valor límite de aproximadamente 1,1A.



Gráfica 5.3 Corriente de voltaje Vs Inverso de la resistencia de carga

- **Curva de la potencia suministrada en función de la resistencia de carga**

En la gráfica 5.4 se representan los datos de la potencia suministrada en función de la resistencia de carga. En ésta gráfica se observa un máximo de potencia que alcanza unos 300W, cuando la resistencia de carga es aproximadamente $1K\Omega$. Esto sucede cuando la resistencia interna de la fuente se iguala a la resistencia de carga, es decir hay una máxima transferencia de la fuente a la resistencia de carga.



Gráfica 5.4 Potencia Vs Resistencia de carga

5.2. Ajuste de los datos experimentales

El comportamiento lineal de la fuente (ver gráfica 5.1), permite modelarla según el Teorema de Thevenin, como una fuente ideal de voltaje V y una resistencia interna r_i conectada en serie, como se muestra en la figura 5.1.

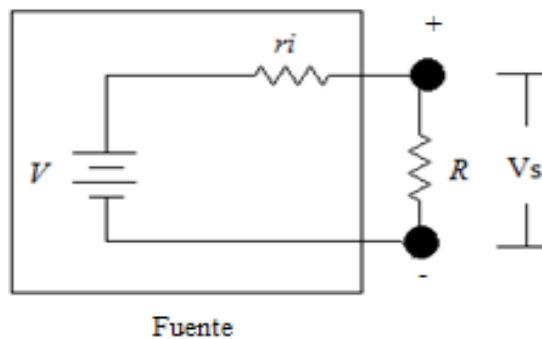


Figura 5.1 Circuito modelo

Partiendo de este modelo se realizó con el programa SIGMAPLOT, un ajuste con los datos experimentales. De aquí se obtuvo un valor de voltaje para la fuente de $V = (1120 \pm 10) \text{ V}$ y un valor para la resistencia interna $r_i = (1050 \pm 20) \Omega$. Con estos valores se realizaron las curvas que acompañan a los datos experimentales en las gráficas 5.3, 5.4 y 5.5.

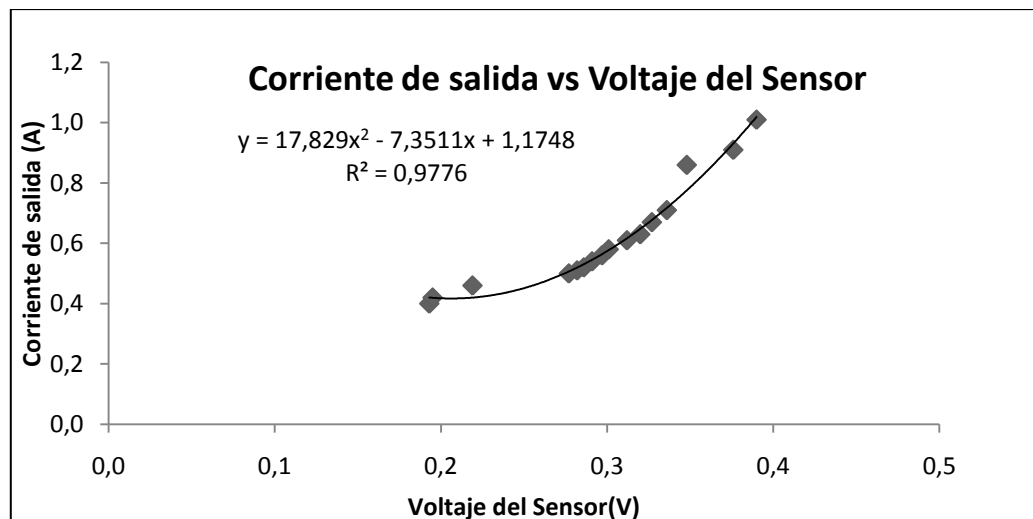
5.3. Comparación de los bloques de medición CS2106 y ACS712

Se realizó un estudio comparativo entre el sensor utilizado por el Prof. Benavides (CS2106) y el sensor (ACS712) empleado en la presente investigación. Se midieron los voltajes generados por cada uno de los circuitos, para los valores de corriente suministrada por la fuente, al variar la resistencia de carga. Los datos se muestran en las tablas 5.2 y 5.3 con los cuales fueron realizadas las gráficas 5.5 y 5.6 respectivamente.

Voltaje del bloque de Medición	Errores	Corriente de salida	Errores
V(mV)	$\Delta V(\text{mV})$	I(mA)	$\Delta I(\text{mA})$
280	10	510	10
280	10	530	10
290	10	540	10
290	10	560	10
320	20	580	10
320	20	610	10
320	20	630	10
320	20	670	10
360	20	710	10
400	20	910	10

Voltaje del bloque de Medición	Errores	Corriente de salida	Errores
V(mV)	ΔV (mV)	I(mA)	ΔI (mA)
360	20	860	10
280	20	1010	10
280	10	500	10
220	10	460	10
200	10	400	10
200	10	420	10

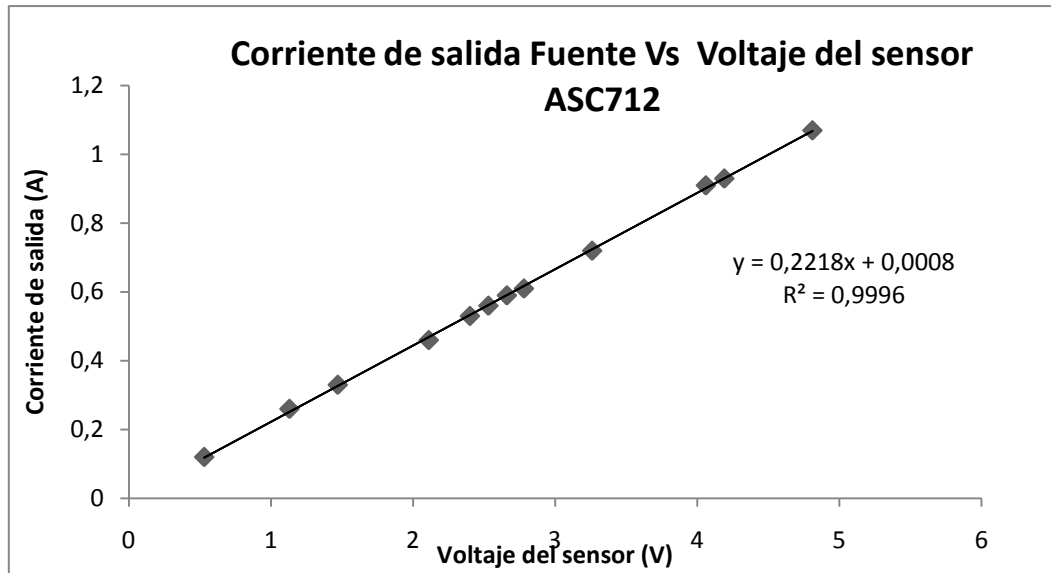
Tabla 5.2 Datos de voltajes de salida del sensor (CS2106) y corriente de salida de la fuente



Gráfica 5.5 Curva Corriente de salida Vs Voltaje del sensor (CS2106)

Voltaje del bloque de Medición	Error	Corriente de salida	Error
V(mV)	ΔV (mV)	I(mA)	ΔI (mA)
0,53	0,05	0,12	0,01
1,13	0,08	0,26	0,02
1,47	0,09	0,33	0,02
2,11	0,12	0,46	0,03
2,4	0,14	0,53	0,03
2,53	0,15	0,56	0,03
2,66	0,15	0,59	0,04
2,78	0,16	0,61	0,04
3,26	0,18	0,72	0,04
4,06	0,20	0,91	0,05
4,19	0,23	0,93	0,05
4,81	0,24	1,07	0,05

Tabla 5.3 Datos de corriente de salida de la fuente y voltajes del bloque de medición (ACS712)



Gráfica 5.6 Corriente de salida Vs Curva voltaje del sensor (ACS712)

Al comparar las dos curvas se observan ventajas al utilizar el circuito de medición desarrollado en este trabajo que utiliza el sensor de Hall, ya que éste tiene un comportamiento lineal ($R = 0,9996$) que facilita su calibración y además entrega valores de salida apropiados para su digitalización.

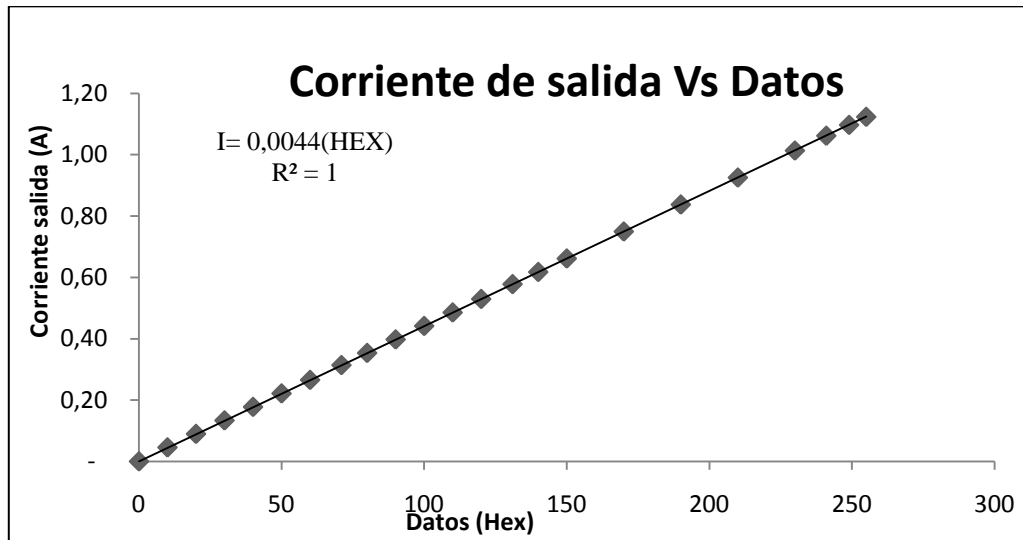
5.4. Curva de calibración

Para determinar la curva de calibración se registraron los diferentes valores obtenidos, producto de la digitalización del voltaje proveniente del bloque de medición y los valores de corriente suministrada por la fuente, medida a través de un téster digital. Obviamente, al igual que para las curvas precedentes, es necesario cambiar los valores de la resistencia de carga para obtener diferentes valores de corriente. Los valores registrados se encuentran en la tabla 5.4 y la curva obtenida

puede visualizarse en la gráfica 5.7, donde se destaca su comportamiento lineal como lo indica el factor $R^2 = 1$.

Valor (Hex)	Error	Corriente suministrada por la fuente	Error
DATOS	Δ DATOS	I(A)	Δ I(A)
10	1	0,046	0,002
20	1	0,090	0,004
30	1	0,13	0,01
40	1	0,18	0,01
50	1	0,22	0,01
60	1	0,27	0,01
71	1	0,31	0,02
80	1	0,35	0,02
90	1	0,40	0,02
100	1	0,44	0,02
110	1	0,49	0,02
120	1	0,53	0,03
131	1	0,58	0,03
140	1	0,62	0,03
150	1	0,66	0,03
170	1	0,75	0,04
190	1	0,84	0,04
210	1	0,93	0,05
230	1	1,01	0,05
241	1	1,06	0,05
249	1	1,10	0,05
255	1	1,12	0,06

Tabla 5.4 Datos digitales y corriente suministrada por la fuente



Gráfica 5.7 Corriente de salida de la fuente en función de los datos de la interfaz

De la gráfica 5.7 se obtiene la ecuación de la recta:

$$I = 0,0044(\text{DATOS})$$

donde se deriva que la apreciación del sistema de medida es de unos 4 mA, al utilizar solamente los 8 bits más significativos que entrega el conversor.

CONCLUSIONES

- ❖ El diseño de la fuente desarrollada corrige las deficiencias de la fuente elaborada por el Prof. Benavides.
- ❖ La incorporación del elemento limitador permite que la fuente suministre una corriente máxima de salida de 1,1 A, un voltaje máximo de unos 1100 V y una potencia máxima en el orden de 300 W; funciona como protección de la fuente y evita el ajuste manual del voltaje de salida.
- ❖ El sistema automático de descarga permite la desconexión de la salida de la fuente y la descarga de los condensadores de la etapa de filtrado, lo que reduce el riesgo de descargas eléctricas al usuario.
- ❖ El control de la fuente se realiza de manera remota desde el computador, lo que contribuye con la seguridad al usuario, al evitar su manipulación en forma directa.
- ❖ El sistema de adquisición de datos desarrollado, permite la medición de la corriente entregada por la fuente en un rango de 0 A a 1,1 A, con una apreciación de 4 mA.
- ❖ La fuente de corriente de alto voltaje, se puede modelar según el Teorema de Thevenin, como una fuente ideal de (1120 ± 10) V y una resistencia interna de (1050 ± 20) Ω en serie.

RECOMENDACIONES

- ❖ Sustituir el transformador de la fuente por otro que permita suministrar un voltaje más elevado, con la finalidad de aumentar la capacidad de penetración de la corriente en el terreno.
- ❖ Utilizar un PIC que permita la comunicación vía puerto USB, ya que el puerto serial RS-232 está descontinuado.
- ❖ Se debe disminuir el peso de la fuente de corriente, para mejorar su portabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

Angulo, J. (2001). *Microcontroladores. Diseño y Aplicaciones. Segunda parte: PIC16F877*. MC Graw Hill. España, Madrid.

Auge, M. (2008). *Guía: Método Geoeléctrico para la propección de agua subterránea*. Buenos Aires, Argentina.

Basic, V. (2000). *Manual del Programador*. Estados Unidos: Microsoft.

Benavides, A. (1999). *Desarrollo y Aplicación de Técnicas de Resistividad D.C en Geofísica Somera*. Tesis Maestría. Universidad Central de Venezuela.

Castro, J. (2002). *Diseño y Desarrollo de un transmisor automatizado para medir resistividad inducida*. Tesis Mestría. Universidad Central de Venezuela.

Escalona, Ivan. (1986). *Guía de laboratorio II*. Caracas, Universidad Central de Venezuela.

Manos, M. (1987). *Diseño Digital*. Prince Hall Hispanoamerica.

Muhammad, R. (2001). *Electrónica de potencia*. Paraninfo.

Leal, D. (2008). *Diseño y construcción de sistema automatizado para la elaboración de mono-capas y multi-capas delgadas, por medio de inmersión*. TEG. Licenciatura. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

Orellana, E. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Madrid: España.

Sasha, C. (2007). *Estudio Geológico y geoelectrico del yacimiento Fosilifero ORS-16 en el campo Orocual, estado Monagas*. TEG. Licenciatura. Venezuela, caracas : Universidad Simón Bolívar.

Walter, M. (2002). *Comparación de los métodos 1-d y 2-d de resistividad eléctrica por medio de sondeos tipo wenner, dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD Y RES2DINV*. TEG. Licenciatura. Caracas: Universidad Simón Bolívar.

http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0712/0712.pdf.