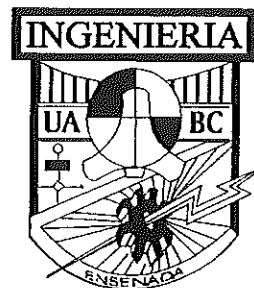




Escuela de Ingeniería U.A.B.C.

## Diseño y construcción de un equipo de resistividad terrestre



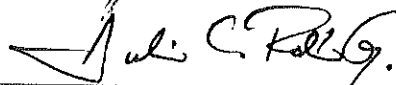
**Diseño y construcción de  
un equipo de resistividad terrestre**

**que fue desarrollado por  
Raúl Antonio Velasco Andrade**

**y aprobado por los sinodales**



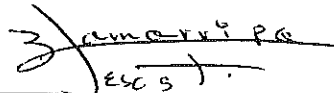
**M. en C. Jesús Ma. Brassea Ochoa**



**M. en C. Julio César Rolón Garrido**



**Ing. Juan de Dios Sánchez López**



**M. en C. José de Jesús Zamarripa Topete**



**Con Cariño, Afecto, Respeto y Admiración**

**a mi Padre**

**a mi Madre**



Con cariño y respeto a mis abuelos

abuelito Carlos  
Carlos Andrade Leetch  
abuelita Odilia  
Odilia Montemayor

papapá  
Dr. Raúl Velasco Zimbrón  
mamamá  
Mamamá

A mis HERMANOS

Carlos  
Juanfra  
Jorge  
José  
Nuri  
Víctor  
Monse



**A mi escuela con gratitud**

**A mis maestros con agradecimiento**

**A mis compañeros y amigos con amistad**



## *Contenido*

♦ Presentación .....	7
♦ Introducción. ....	9
♦ Parte Primera: <i>El Área de Estudio</i> .....	15
I. Geofísica.	
II. Métodos de exploración geofísica.	
III. Método de resistividad.	
♦ Parte Segunda: <i>El Diseño</i> .....	26
IV. Diseño del equipo.	
V. Estructura y funcionamiento.	





◆ Parte Tercera: <i>El Instrumento</i> .....	40
VI. El circuito.	
VII. Pruebas de laboratorio.	
VIII. Características eléctricas.	
◆ Comentarios, aportaciones y conclusiones.....	65
◆ Apéndices.....	69
Apéndice A: Glosario.	
Apéndice B: Manual de operación.	
Apéndice C: Programa de control.	
Apéndice D: Diagramas esquemáticos.	
Apéndice E: Mascarillas para el circuito impreso.	
◆ Bibliografía.....	96
◆ Índices.....	99



## *Presentación*

El presente trabajo de tesis, titulado "*Diseño y construcción de un equipo de resistividad terrestre*" fue desarrollado por Raúl Antonio Velasco Andrade en el departamento de *Geofísica Aplicada* del *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.*, teniendo como director de tesis a el **M. en C. Jesús Ma. Brassea Ochoa.**

El Sr. Raúl Antonio Velasco Andrade es miembro egresado de la primer generación de ingenieros en electrónica, de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, unidad Ensenada. El académico responsable ante la escuela de este proyecto, es el **M. en C. José de Jesús Zamarripa Topete.**



**Equipo de Medición de  
Resistividad Terrestre**

**Presentación**



Con este trabajo se persiguen dos objetivos principales; en el primero se define el ¿Por qué? y en el segundo el ¿Cómo?.

*Primero.-* Realizar un trabajo formal con las características necesarias para que sea aceptado como proyecto de tesis de licenciatura, y cubrir con él uno de los puntos requeridos para obtener el título de ingeniero en electrónica.

*Segundo.-* Diseñar y construir un equipo de medición de resistividad terrestre, para aplicación en mediciones geofísicas de campo, por lo que deberá ser de fácil manejo, ligero, robusto y resistente, así como de bajo consumo de energía, ya que deberá operar por baterías.

El trabajo de tesis tiene como parte medular el desarrollo de un instrumento de medición, que por su naturaleza de aplicación queda dentro del área de estudio de la geofísica aplicada (instrumentación geofísica). Un instrumento de este tipo es capaz de sensar la resistencia eléctrica del subsuelo.

Un equipo de resistividad es empleado en la exploración de el subsuelo no muy profundo.

Para una correcta presentación y lograr un mejor entendimiento, el tema se desarrolla en tres partes:

*Primera Parte. "El área de estudio".-* Aquí se plantea el marco de aplicación para este tipo de instrumentos.

*Segunda Parte. "El diseño".-* En este tema se tratan los principios teóricos empleados en el diseño, se ve de manera general el funcionamiento así como también la composición del equipo.

*Tercera Parte. "El instrumento".-* En esta parte se analizan los circuitos que forman el equipo y los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio.



## *Introducción*

Desde que el hombre se interesa por conocer los secretos del mundo que le rodea, ha desarrollado las herramientas necesarias para superar sus propias limitaciones y de esta forma poder observar, analizar, medir, predecir y reproducir fenómenos, que de otra manera no podría. Tal es el caso de los fenómenos relacionados con la electricidad y el magnetismo, los cuales no pueden ser estudiados a simple vista o con el tacto, es así como, el hombre desarrollo diferentes sistemas de medición.

El objetivo de un sistema de medición es presentar a un observador un valor numérico correspondiente a la variable que se mide. En general, este valor numérico o valor medio no es igual al valor verdadero de la variable, Se considera que la entrada del sistema de medición es el valor real ó valor verdadero y que la salida es el medido (ver *Figura i.1*).



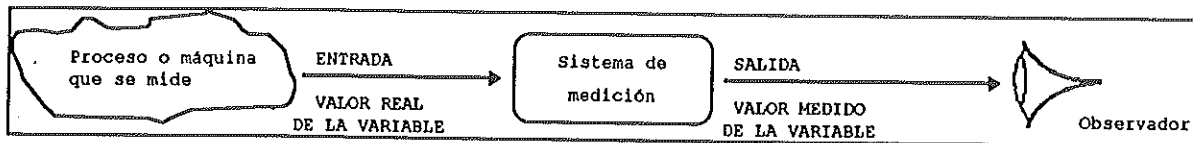


Figura i.1. Objetivo del sistema de medición

Un sistema de medición consta de varios elementos o bloques. Generalmente se pueden identificar cuatro tipos de elementos; aunque en un sistema determinado puede ser que aparezca alguno, o bien, ocurrir más de una vez. En la *Figura i.2* se presentan estos bloques.

**ELEMENTO SENSOR:** Está en contacto con el proceso y genera una salida que depende de alguna manera de la variable por medir. Si hay más de un elemento sensor en un sistema, al elemento en contacto con el proceso se le denomina sensor primario; a los otros, se les conoce como sensores secundarios.

**ELEMENTO ACONDICIONADOR DE SEÑALES:** Toma la salida del elemento sensor y la convierte en una forma más adecuada para un procesamiento adicional, por lo general en una señal de frecuencia, de corriente directa (cd) o de voltaje de cd.

**ELEMENTO PROCESADOR DE SEÑALES:** Toma la salida del elemento acondicionador y la convierte a una forma más adecuada para la presentación. Son ejemplos: el convertidor de analógico a digital, que transforma un voltaje a una forma digital para entrada a una computadora; una microcomputadora, que calcula el valor medido de la variable a partir de los datos digitales de entrada.

**ELEMENTO PRESENTADOR DE DATOS:** Presenta el valor medido en una forma que el observador puede reconocer fácilmente.

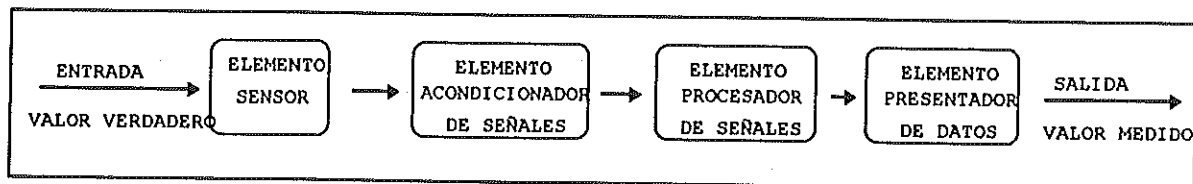


Figura i.2. Estructura general de un sistema de medición



### *CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE MEDICIÓN.*

En cualquier sistema de medición se pueden identificar diferentes cualidades o características, las cuales pueden ser sistemáticas o estadísticas. Las características sistemáticas son aquellas que pueden cuantificarse con precisión por medios matemáticos o gráficos. Son distintas de las estadísticas, las cuales no pueden cuantificarse con exactitud.

Algunas características sistemáticas son:

**ALCANCE:** El alcance de entrada de un elemento se especifica con los valores mínimo y máximo de  $I$  (entrada), es decir,  $I_{\min}$  a  $I_{\max}$ . El alcance de salida se especifica con los valores mínimo y máximo de  $O$  (salida), esto es,  $O_{\min}$  a  $O_{\max}$ .

**INTERVALO:** El intervalo es la variación máxima en la entrada o la salida, o sea el intervalo de entrada es  $I_{\max} - I_{\min}$  y el intervalo de salida es  $O_{\max} - O_{\min}$ .

**LINEALIDAD:** Se dice que un elemento es lineal si los valores correspondientes de  $I$  y  $O$  están sobre una línea recta. La línea recta ideal conecta el punto mínimo  $A(I_{\min}, O_{\min})$  con el punto máximo  $B(I_{\max}, O_{\max})$ .

**NO LINEALIDAD:** En muchos casos la relación en línea recta, no se cumple y se dice que el elemento es no lineal. La no linealidad puede definirse en términos de una función  $N(I)$ , que es la diferencia entre el comportamiento de la línea recta real y la ideal.

**HISTÉRESIS:** Para un valor particular de entrada  $I$ , la salida  $O$  puede ser diferente, dependiendo de si  $I$  aumenta o disminuye. Histéresis es la diferencia entre estos dos valores de  $O$ .

**RESOLUCIÓN:** Algunos elementos se caracterizan por una salida que crece en una serie de escalones o saltos discretos en respuesta a un aumento continuo en la entrada. La resolución se define como el mayor cambio en  $I$  que puede ocurrir sin que se produzca el cambio correspondiente en  $O$ .

**BANDAS DE ERROR:** Los efectos de la no linealidad, histéresis y resolución en muchos casos son tan reducidos que resulta difícil y poco conveniente cuantificar con exactitud cada efecto individual. En estos casos se define el desempeño de un elemento en términos de banda de error, que indica que para cualquier valor de  $I$ , la salida  $O$  estará dentro de  $\pm h$  del valor de la línea recta ideal  $O_{\text{IDEAL}}$ .



Las características estadísticas no pueden definirse con exactitud, debido a que están sujetas a variaciones aleatorias, sin embargo se pueden representar por una función densidad de probabilidad.

Algunos ejemplos de este tipo de características son:

*Variaciones estadísticas en la salida de un solo elemento con el tiempo - REPETIBILIDAD.* La repetibilidad es la facultad que tiene un elemento de producir la misma salida con la misma entrada. La falta de repetibilidad se debe a efectos aleatorios en el elemento y su ambiente; siendo el más común las variaciones aleatorias con el tiempo en las entradas ambientales.

*Variaciones estadísticas entre un lote de elementos similares - TOLERANCIA.* Es la diferencia permisible entre el valor real y el valor medio de un elemento. Esta diferencia se debe a pequeñas variaciones aleatorias en el proceso de manufactura. Los límites de tolerancia indican el rango aceptable de estas variaciones.

### ***RUIDO E INTERFERENCIA EN UN SISTEMA DE MEDICIÓN.***

El comportamiento de procesos reales se ve afectado por factores que no se pueden predecir con precisión. Así, en aplicaciones reales de medición, la señal de entrada al sistema no es determinística, sino aleatoria.

La magnitud de la señal no deseada puede ser comparable o más grande que aquella de la señal de medición misma, lo que origina un error de medición en todo el sistema. La señal no deseada puede ser aleatoria o determinística. Las señales aleatorias suelen denominarse *señales de ruido*; y las señales determinísticas no deseadas, *señales de interferencia*.

Para eliminar o reducir los efectos producidos por estas señales no deseadas existen diferentes métodos:

***SEPARACIÓN FÍSICA:*** Como las inductancias mutuas y las capacitancias de acoplamiento entre circuitos de medición y de potencia son inversamente proporcionales a la distancia entre ellos, esta distancia debe ser lo más grande posible.

***PROTECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA:*** La forma más simple de reducir los efectos del acoplamiento a una fuente de interferencia externa se ilustra en la *Figura 1.3*. Esta disposición se conoce comúnmente como pares trenzados. Si un voltaje es inducido en el ciclo  $j$ -ésimo, entonces se induce un voltaje contrarrestante en el  $(j+1)$ -ésimo ciclo. En el



caso ideal donde ambos ciclos tienen la misma área y experimentan los mismos campos magnéticos, existe un voltaje resultante cero inducido.

**BLINDAJE Y PROTECCIÓN ELECTROSTÁTICOS:** El método más adecuado para evitar el problema del acoplamiento capacitivo a un circuito de energía, consiste en envolver todo el sistema de medición con una protección metálica o blindaje con conexión a tierra.

**USO DE AMPLIFICADORES DIFERENCIALES:** Los voltajes de interferencia de modo común pueden rechazarse mediante el uso de un amplificador diferencial (Figura i.4). Un amplificador diferencial tiene una salida ( $V_{SAL}$ )

$$V_{SAL} = \frac{R_F}{R_1}(V_2 - V_1) = -\frac{R_F}{R_1}E_{Th}$$

es decir, sólo se amplifica el voltaje del sensor  $E_{Th}$ . Sin embargo, la salida de un amplificador real contiene una contribución proporcional a  $V_{CM}$ , de la ecuación anterior se tiene

$$V_{SAL} = -\frac{R_F}{R_1}E_{Th} + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\frac{V_{CM}}{RRMC}$$

La razón de rechazo de modo común (RRMC) del amplificador es el cociente de la ganancia de voltaje diferencial sobre la ganancia de voltaje modo común, y debe ser tan grande como sea posible para minimizar este efecto. Dicho factor es característico de cada componente y es determinado por el fabricante.

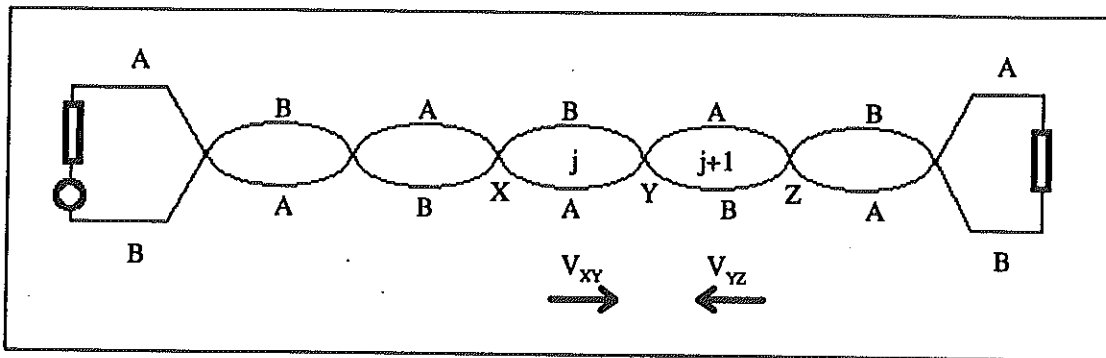


Figura i.3. Reducción del acoplamiento electromagnético por pares trenzados.

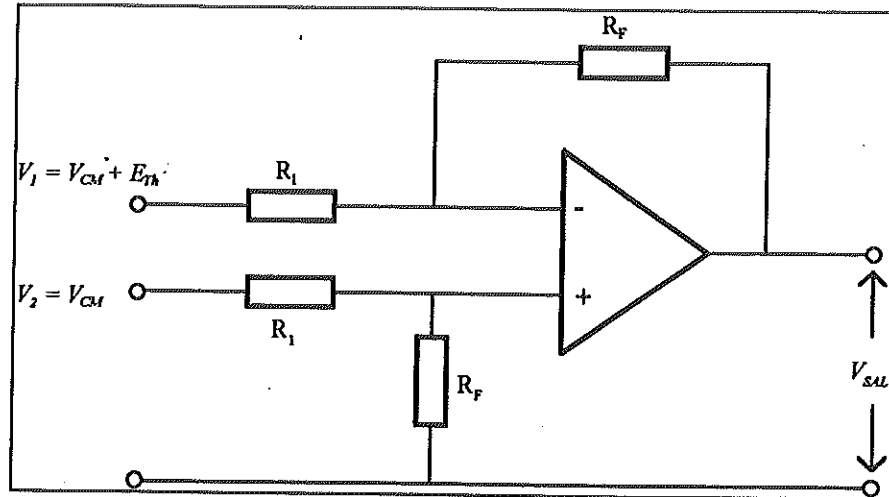
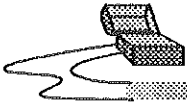


Figura 1.4. Diagrama de un amplificador diferencial

**FILTRACIÓN:** Un filtro es un elemento que permite la transmisión de una banda de frecuencias y atenúa considerablemente todas las demás. Un **filtro analógico** es una red eléctrica, que consta por lo general de capacitores, resistores y amplificadores operacionales (tipo activo), que acondiciona las señales continuas. Un **filtro digital** por lo general es implementado con un microprocesador programado para procesar valores de muestras de una señal. Siempre que el espectro de potencia de la señal de medición ocupe una banda de frecuencias diferente a la de las señales de ruido o de interferencia, entonces el filtrado mejorará la razón de señal - ruido.

Podrá realizarse una filtración analógica en la etapa de acondicionamiento de señales y un filtrado digital en la etapa de procesamiento de señales. Sin embargo, si los espectros de señal de medición y de ruido se superponen, la filtración tiene un valor limitado.

**PROMEDIACIÓN:** La promediación de señales puede servir para recuperar una señal de medición repetitiva afectada por ruido aleatorio, aun si el valor r.c.m. de la señal es mucho menor que el del ruido.



*Parte primera:*

***EL ÁREA DE ESTUDIO***



**Equipo de Medición de Resistividad Terrestre**



## *Parte primera* **"EL ÁREA DE ESTUDIO"**

Un equipo como el desarrollado en este trabajo de tesis, es empleado en la exploración geofísica. Por lo que es necesario hablar acerca de esta área de estudio.

En estos capítulos se analiza el marco de aplicación, dando un enfoque general, sin entrar en detalles pues este no es el propósito del presente trabajo.



**Equipo de Medición de Resistividad Terrestre**



## *I. Geofísica*

Por definición, geofísica es el estudio científico de la tierra utilizando métodos de la física. Estrictamente hablando, cubre el estudio de todo el planeta desde las profundidades de su interior hasta el límite exterior de la atmósfera. Sin embargo, en la práctica, es comúnmente empleada en un sentido más restringido, refiriéndose a la aplicación de la física al estudio de la "*tierra sólida*" (excluyendo la hidrosfera y la atmósfera) y es, bajo este punto de vista que la geofísica es considerada en este trabajo.

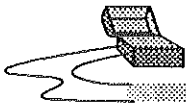
El dominio de la geofísica, inclusive en su significado restringido, engloba varios campos de estudio. Estos campos son:

Geodesia y gravimetría.- Tratan con la forma de la tierra y el campo gravitacional.



**Equipo de Medición de  
Resistividad Terrestre**

**Parte I:  
El área de  
estudio**



Sismología.- Estudio de los terremotos y otras vibraciones terrenas.

Geomagnetismo y geoelectricidad.- Tratan con los fenómenos eléctricos y magnéticos de la tierra.

Geotermometría.- Trata con el flujo de calor y la distribución de la temperatura de la tierra.

Tectonofísica.- Estudia los aspectos físicos de la tectónica regional y global.

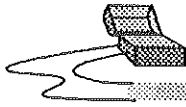
Geocosmogonía.- Trata sobre el origen de la tierra.

Geocronología.- Estudia y define la fecha de los eventos en la historia de la tierra.

La geofísica se desarrolló de las disciplinas de física y geología, y no tiene un marcado límite que diferencie el principio y fin entre cada una de ellas. Los estudios geofísicos son considerados como cuantitativos y tangibles, en comparación con los geológicos que son tradicionalmente caracterizados como cualitativos y descriptivos<sup>†</sup>.

---

<sup>†</sup> *Geophysical methods in geology. P.V. SHARMA*



## *II. Métodos de exploración geofísica*

Los métodos de exploración geofísica han sido aplicados a una gran cantidad de problemas que varían en diversidad desde la estructura, composición y dinámica interna de la tierra, hasta la detección de depósitos minerales en el subsuelo poco profundo. Los estudios a gran escala relacionados con la estructura y el comportamiento dinámico se consideran que forman parte del área principal de la *geofísica general (global)*. Por otro lado, aplicaciones especiales de las técnicas geofísicas en la prospección de petróleo y minerales, pertenecen al área de *geofísica aplicada (exploración)*. La segunda se desarrolló de las técnicas y métodos empleados por la primera, y la relación entre ambas es muy estrecha y a evolucionado a una interdependencia muy provechosa para ambas disciplinas.

Los instrumentos y técnicas geofísicas son ampliamente utilizados para determinar las características de rocas en las capas exteriores de la corteza terrestre, con el propósito



**Equipo de Medición de  
Resistividad Terrestre**

**Parte I:  
El área de  
estudio**



de detectar depósitos metalíferos, trazar los mapas de la estructura de rocas estratificadas que puedan contener petróleo ó gas natural, o determinar la configuración del lecho de roca bajo la superficie.

Los métodos e instrumentos empleados en la exploración geofísica dependen del tipo de información deseado. Las propiedades físicas de las rocas que son más comúnmente utilizadas son la elasticidad, densidad, susceptibilidad magnética, magnetización remanente, *resistividad eléctrica*, radioactividad y la conductividad térmica. Estas propiedades han sido utilizadas para proyectar métodos geofísicos que esencialmente detectan una discontinuidad, esto es, donde una región difiere suficientemente de otra en alguna propiedad física. †

La gran diversidad de métodos existentes los podemos arreglar dentro de ocho grupos:

- Métodos sísmicos.
- Métodos de gravedad.
- Métodos magnéticos.
- Métodos paleomagnéticos.
- Métodos eléctricos.
- Métodos electromagnéticos.
- Métodos radiométricos.
- Métodos geotérmicos.

Métodos sísmicos.- Estos cubren varios tipos de movimientos terrestres, que varían desde los terremotos hasta las siempre presentes pulsaciones sísmicas.

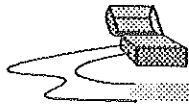
Métodos de gravedad.- Buscan anomalías causadas por cambios en las propiedades físicas de las rocas del subsuelo. Las variaciones de la gravedad, relacionadas con la diferencia de la tierra de una forma esférica, son de interés para la geodesia. Por otro lado, las variaciones que reflejan contrastes laterales en la densidad de las rocas, son de primordial interés para los geólogos, para extraer información acerca de las estructuras a diferentes profundidades.

Métodos magnéticos.- Se basan en las propiedades magnéticas de las rocas.

Métodos paleomagnéticos.- Son también métodos que emplean el magnetismo, pero se interesan principalmente en el estudio de la magnetización remanente natural de las rocas para proveer información confiable acerca del campo magnético de la tierra en tiempos geológicos.

---

† *Geophysical Methods in Geology. P.V. Sharma.*



## Métodos de exploración

Métodos eléctricos.- Estos métodos emplean las propiedades eléctricas de los materiales. Algunos de estos métodos son: el de resistividad, el magnetotelégrafo y el de polarización inducida.

Métodos electromagnéticos.- Estos métodos se basan en la medición de campos electromagnéticos asociados con corrientes alternas inducidas en el subsuelo por un campo primario. Son usados en la detección de cuerpos de gran conductividad eléctrica, tales como yacimientos metálicos.

Métodos radiométricos.- Estos métodos emplean la radioactividad de rocas y minerales. Son utilizados para establecer la 'edad' de eventos geológicos, establecer el tiempo en que se formaron las rocas en la corteza terrestre, así como para detectar yacimientos metalíferos radioactivos.

Métodos geotérmicos.- El estudio del comportamiento térmico de la tierra es una de las ramas más especulativas de la geofísica. Sin embargo, el tema es de relevante interés debido a su importancia respecto a las hipótesis sobre el origen y desarrollo de la tierra.



### *III. Método de resistividad*

Las mediciones de resistividad eléctrica son empleadas rutinariamente en exploración de: fuentes geotérmicas, minas de metales y carbón así como en la búsqueda de agua en el subsuelo. Se utilizan con menor frecuencia en la prospección de petróleo y gas así como en la exploración de la corteza profunda. Por medio de sondeos de resistividad es posible obtener mapas de profundidad sobrecargada, estratigrafía, fallas, fracturas, depósitos metalíferos conductivos, soluciones salobres termales y alteraciones hidrotérmicas asociadas, variaciones en la conductividad en la corteza profunda.<sup>†</sup>

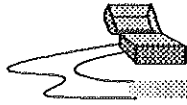
---

<sup>†</sup> *Methods of Experimental Physics. Stanley H. Ward*



**Equipo de Medición de  
Resistividad Terrestre**

**Parte I:  
El área de  
estudio**



### Principios básicos.

El método de resistividad involucra la medición de una resistencia, con la subsecuente interpretación en términos de propiedades eléctricas del subsuelo, y en su momento la correspondiente traducción a términos geológicos. Una resistencia es la razón de la respuesta a la excitación. En el método de resistividad, la entrada es una corriente inyectada al subsuelo entre dos electrodos y la salida es un voltaje medido entre otro par de electrodos. †

Este método se basa en la manera en que se comportan (la respuesta) los materiales de la tierra al ser sometidos a un flujo de corriente de baja frecuencia o corriente directa. El método de resistividad de cd se basa en la teoría de potencial, la cual requiere de corriente continua.

Consideremos una capa de material homogéneo de longitud  $l$  y resistencia  $R$  a través de la cual fluye una corriente  $i$ . La diferencia de potencial a través de los extremos de la resistencia está dada por la ley de Ohm: †

$$V = Ri$$

*Ecuación 3.1.*

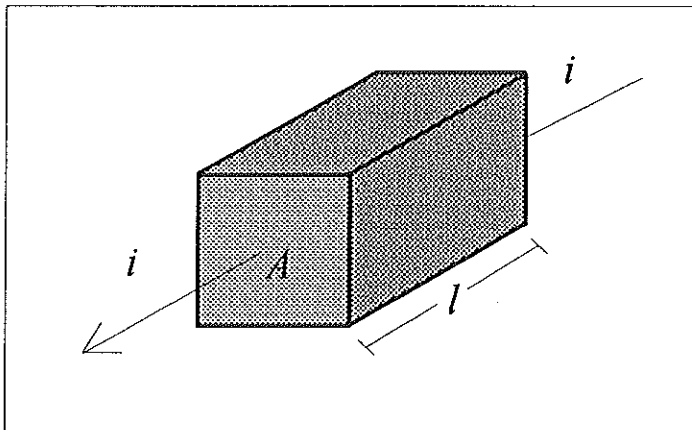


Figura 3.1. La resistencia de un material depende de su longitud, el área de sección transversal y su resistividad.

La resistencia  $R$ , está especificada por su longitud  $l$ , el área de sección transversal  $A$ , y por su resistividad  $\rho$ . Por definición la resistencia se expresa de la siguiente manera:

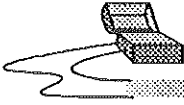
$$R = \rho l / A \quad \text{Ecuación 3.2.}$$

Entonces la *ecuación 3.1*, se puede reescribir:

$$V / l = \rho i / A \quad \text{Ecuación 3.3.}$$

† *Methods of Experimental Physics. Stanley H. Ward*

† *Geophysical Methods in Geology. P.V. Sharma.*

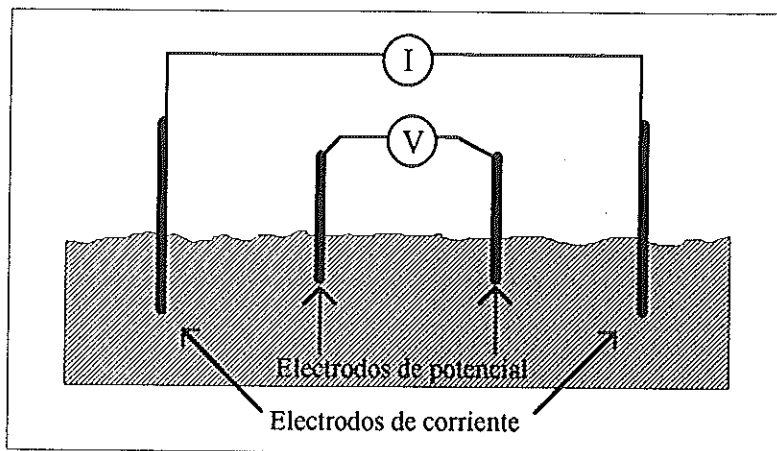


## Método de resistividad

A partir de esta definición (*ecuación 3.3*) se determina que para una tierra homogénea, la resistividad esta dada por

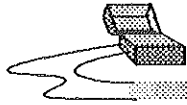
$$\rho = K V/i \quad \text{Ecuación 3.4.}$$

donde **K** es un factor geométrico que depende de la configuración empleada en los electrodos; se emplean cuatro, dos de potencial y dos de corriente (*Figura 3.2*). En la figura 3.3 se muestran cuatro arreglos típicos en la disposición de los electrodos, con su factor geométrico correspondiente.



*Figura 3.2.* Se requieren 4 electrodos para realizar una medición.

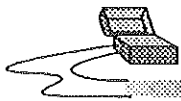
Para un terreno no homogéneo, la resistividad varía con la posición de los electrodos. Por lo que la resistividad obtenida según la *ecuación 3.4*, es conocida como resistividad aparente.



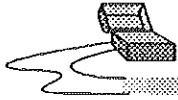
## Método de resistividad

ARREGLO	GEOMETRIA	K
WENNER		$2\pi a$
SCHLUMBERGER		$\pi n(n+1)a$
DIPOLO-DIPOLO		$\pi n(n+1)(n+2)a$
POLO-DIPOLO		$\pi n(n+1)a$

Figura 3.3. Arreglos comúnmente empleados en sondeos de resistividad. Para los cuales se muestra el factor K correspondiente. Donde a es la distancia entre electrodos de potencial y n es un número entero  $n=0,1,2,\dots$



Equipo de Medición de Resistividad Terrestre



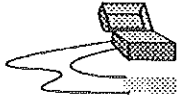
## *Parte segunda* **"EL DISEÑO"**

En esta segunda parte, se tratan los temas relacionados con el diseño, estructura y funcionamiento del instrumento.

En el campo, los sondeos de resistividad terrestre pueden llevarse a cabo con equipos tan simples consistiendo: de una batería de alta tensión, como fuente de corriente; cuatro estacas metálicas; un miliamperímetro; un voltímetro y cuatro carretes de cable aislado. Las mediciones pueden ser realizadas utilizando corriente alterna (ca) o directa (cd). Si se emplea ca, es necesario que sea de baja frecuencia, de no ser así, debido al efecto superficial se tiene una caída rápida de la corriente con la profundidad y consecuentemente se tendrá un sondeo poco profundo.



**Equipo de Medición de Resistividad Terrestre**



## ***IV. Diseño: Planteamiento de la solución***

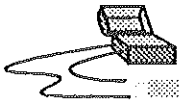
En este capítulo se desarrolla el planteamiento matemático, para llegar al algoritmo que resuelve el problema de la medición de resistividad terrestre. Esta exposición emplea varios conceptos de electricidad e implica algunos desarrollos matemáticos, los cuales se mencionan, mas no se plantean ni se explican en detalle, debido a que hacerlo no es de importancia ni representa utilidad alguna al trabajo y si desviaría la atención al tema principal.

Una vez encontrada la expresión matemática requerida, se plantea la forma en que puede ser aplicada para encontrar un resultado real, a partir de datos físicos obtenidos directamente del terreno.



**Equipo de Medición de  
Resistividad Terrestre**

**Parte II:  
El Diseño**



### IV.1. Planteamiento matemático.

El algoritmo matemático que describe la solución al problema de resistividad, se basa en la *LEY DE OHM*; principio que establece: "la corriente varía en forma directa con el voltaje e inversamente con la resistencia, es decir:

$$I = \frac{E}{R} \tag{Ecuación 4.1}$$

donde *I* es la corriente, *E* el voltaje y *R* es la resistencia".

De tal forma que para conocer el valor de la resistencia eléctrica de un material basta con aplicarle una diferencia de potencial conocido y saber la corriente que fluye por él, debido a la acción de dicho potencial. La expresión matemática se deduce de lo anterior y quedará expresada de la siguiente manera:

$$R = \frac{E}{I} \tag{Ecuación 4.2}$$

Considerando la *ecuación 4.2*, se deduce que solo es necesario medir un voltaje y una corriente. Cuando se realiza una medición de resistividad real, dichas magnitudes se deben obtener en los puntos mostrados en la *Figura 4.1*.

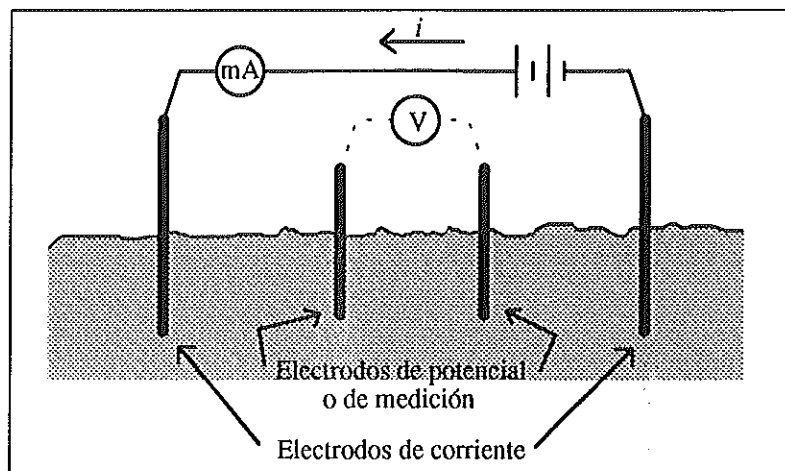


Figura 4.1. Diagrama de medición.

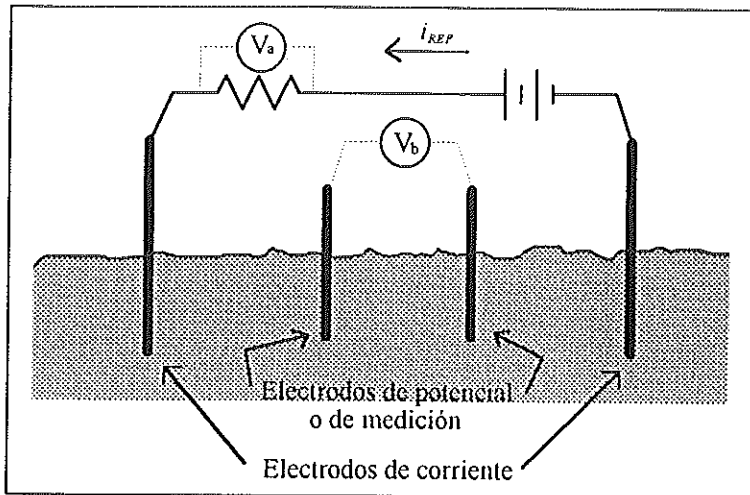
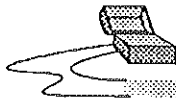


Figura 4.2. Esquema del circuito de medición.

Para obtener la corriente que suministra la fuente se utiliza la ecuación 4.1, se hace una modificación al circuito de medición introduciendo un componente de valor constante y conocido (Figura 4.2), y se mide la diferencia de potencial a través del mismo.

De esta manera el instrumento básicamente mide dos diferencias de potencial; el primero se obtiene entre los electrodos de medición ( $V_b$ ) y el segundo a través de una resistencia conocida, que será usado como referencia ( $V_a$ ).

Como se mencionó anteriormente,  $V_a$  es el voltaje de referencia y  $V_b$  es la diferencia de potencial entre los electrodos de potencial (la resistencia que se desea conocer corresponde a la porción de terreno situada entre estos dos electrodos). Si conocemos el voltaje ( $V_a$ ) y la resistencia de referencia, podemos fácilmente calcular la corriente ( $i_{REF}$ ) que se inyecta a la tierra:

$$i_{REF} = \frac{V_a}{R_{REF}} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Suponiendo que el circuito eléctrico equivalente al mostrado en la Figura 4.2 fuese el de la Figura 4.3, la corriente en cada punto sería la misma, de tal manera que una vez conociendo el voltaje entre ellos y la corriente de referencia, es posible calcular la resistencia incógnita, utilizando la ecuación 4.2:

$$R_X = \frac{V_b}{i_X} = \frac{V_b}{i_{REF}} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

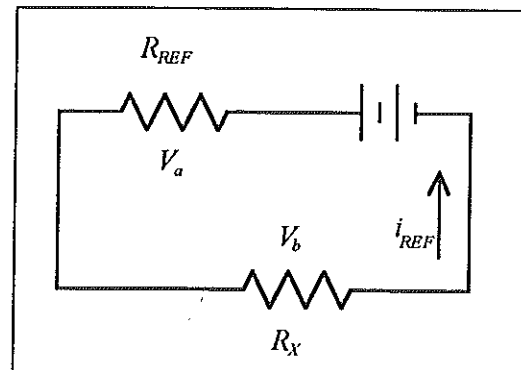
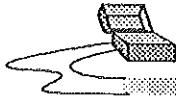


Figura 4.3. Diagrama esquemático del circuito de medición.



sustituyendo la ecuación 4.3 por  $i_{REF}$  en la ecuación 4.4:

$$R_X = \frac{V_b}{\frac{V_a}{R_{REF}}} = \frac{V_b}{V_a} R_{REF} \quad \text{Ecuación 4.5a.}$$

$$R_X = R_{REF} \left[ \frac{V_b}{V_a} \right] \quad \text{Ecuación 4.5b.}$$

Si bien esta expresión (Ecuación. 4.5b) es la base en la solución del problema, no está completa. El terreno real no se comporta tal como se muestra en la Figura 4.3 debido a que la corriente no tiene una sola trayectoria y existen otros parámetros que se deben considerar; siendo el más significativo el de *POTENCIAL ESPONTÁNEO*.

**Potencial espontáneo.-** Es el potencial eléctrico producido en el subsuelo por acción electroquímica entre los minerales y las soluciones con las cuales están en contacto, sin la aplicación de campos eléctricos externos.

Introduciendo este parámetro, la expresión de la resistencia quedará:

$$R_X = R_{REF} [ \Delta V_X / V_a ] \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde:  $\Delta V_X$  = La diferencia entre el voltaje B y el potencial espontáneo, es decir:

$$\Delta V_X = V_b - PE \quad \text{Ecuación 4.7}$$

sustituyendo la ecuación 4.7 en la 4.6, se obtiene la expresión empleada para encontrar la resistencia del suelo:

$$R_X = R_{REF} \frac{V_b - PE}{V_a} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde:

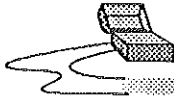
$R_X$  = Resistencia del suelo.

$R_{REF}$  = Resistencia de referencia.

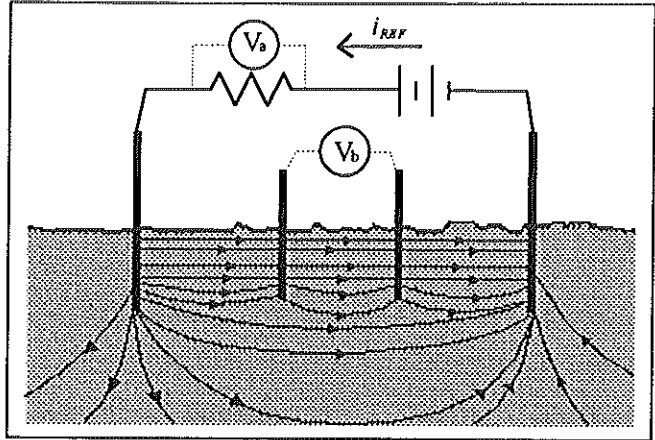
$V_b$  = Voltaje entre los electrodos de medición, con corriente aplicada.

$PE$  = Potencial espontáneo.

$V_a$  = Voltaje en la resistencia de referencia.



Se debe remarcar que el término *resistencia* del suelo es en cierta manera inapropiado o mal asignado, ya que la forma en que se obtiene dicha magnitud no corresponde a la correcta aplicación e interpretación de la Ley de Ohm; esto es porque se desconoce la corriente que fluye entre los electrodos de potencial, que de ninguna manera es igual a la suministrada por la fuente (*Figura 4.4*)



*Figura 4.4.* La corriente suministrada por las baterías tiene diferentes trayectorias en el terreno y solo una parte fluye entre los electrodos.

El método de resistividad eléctrica no mide o pretende encontrar una resistencia, sino que la interpretación de los resultados obtenidos se hace en función de la resistividad aparente ( $\rho_a$ ) del terreno (*capítulo III*), la cual se define como:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{i} \qquad \text{Ecuación 4.9.}$$

donde  $\Delta V$  es la diferencia de potencial medido en los electrodos de potencial,  $i$  es la corriente inyectada y  $K$  es el factor geométrico de la configuración empleada en los electrodos.

En una medición real de campo al encontrar  $R_x$ , lo que en realidad se obtiene, debido al comportamiento del terreno, es la razón de la diferencia de potencial en los electrodos de medición entre la corriente inyectada al suelo ( $\Delta V_x / i$ ), que corresponde al  $\Delta V / i$  de la *ecuación 4.9* que es lo que interesa a un investigador geofísico conocer para realizar la correcta interpretación de los resultados de la medición.

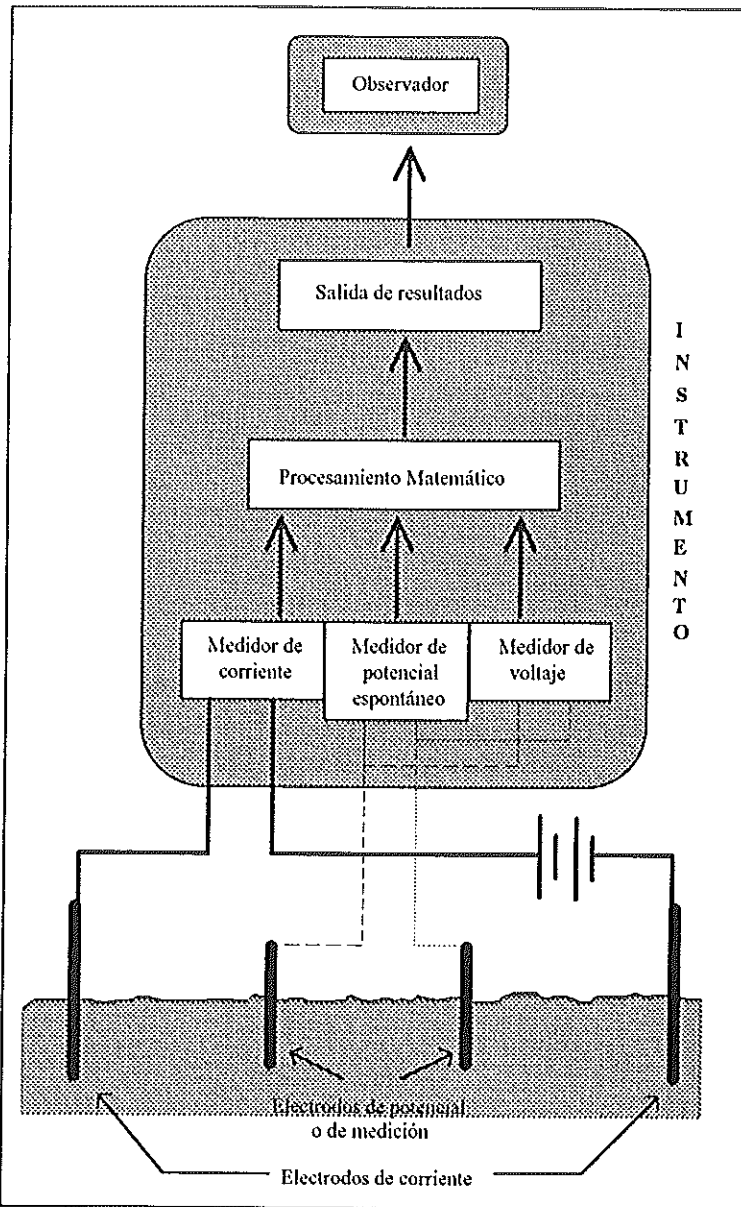
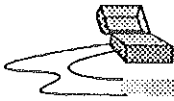


Figura 4.5. Diagrama a bloques del sistema de medición requerido.

## IV.2. Planteamiento del sistema de medición requerido.

Con la ecuación 4.8 se concluye el planteamiento matemático y se identifican las variables a considerar para resolver el problema. Ahora bien, solo faltan los elementos y procesamientos necesarios para llevar las magnitudes físicas del terreno hasta el observador, quien realiza la medición. Este procedimiento se ejemplifica en la Figura 4.5.

Se requiere un sistema de medición que sea capaz de realizar lo siguiente:

- ♦ Medir tres diferencias de potencial en dos partes diferentes.
- ♦ La diferencia de potencial entre dichos puntos puede ser considerable (superior a 50 voltios).
- ♦ Que el tiempo de lectura sea pequeño, para que las variaciones naturales del terreno no alteren la validez de la medición.

- ♦ Realice la interpretación de la medición en forma de una razón entre las variables medidas.
- ♦ Que la presentación de los resultados sea de manera tal, que simplifique la labor del observador en cuanto a interpretación, toma de lecturas e información sobre el estado de funcionamiento del equipo.

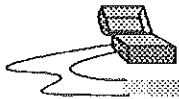


## ***V. Diseño: Estructura y funcionamiento***

En el capítulo anterior se hizo la proyección de un instrumento, se plantearon las funciones que debe ejecutar y se indicaron las características que debe reunir. Es en este tema, cuando se trata la aplicación de las conclusiones anteriores mediante la exposición del equipo de medición diseñado, analizando su estructura y funcionamiento.

La estructura es tratada sin entrar en detalles específicos de circuitería y el funcionamiento analizado sin detallar cada procedimiento, esto debido, a que estos temas serán tratados posteriormente.





### V.1. Estructura.

Un equipo de medición que reúna los requisitos definidos en el capítulo anterior debe tener la capacidad de realizar operaciones matemáticas, por lo que se requiere la utilización de un microcontrolador; hacer conversiones de analógico a digital, siendo necesario emplear un convertidor analógico a digital; y que la presentación de los resultados este acompañada de indicaciones y letreros, para lo cual se incluye una pantalla de caracteres alfanuméricos.

Para un mejor análisis del equipo, lo podemos separar en diferentes bloques, según se muestra en la *Figura 5.1*.

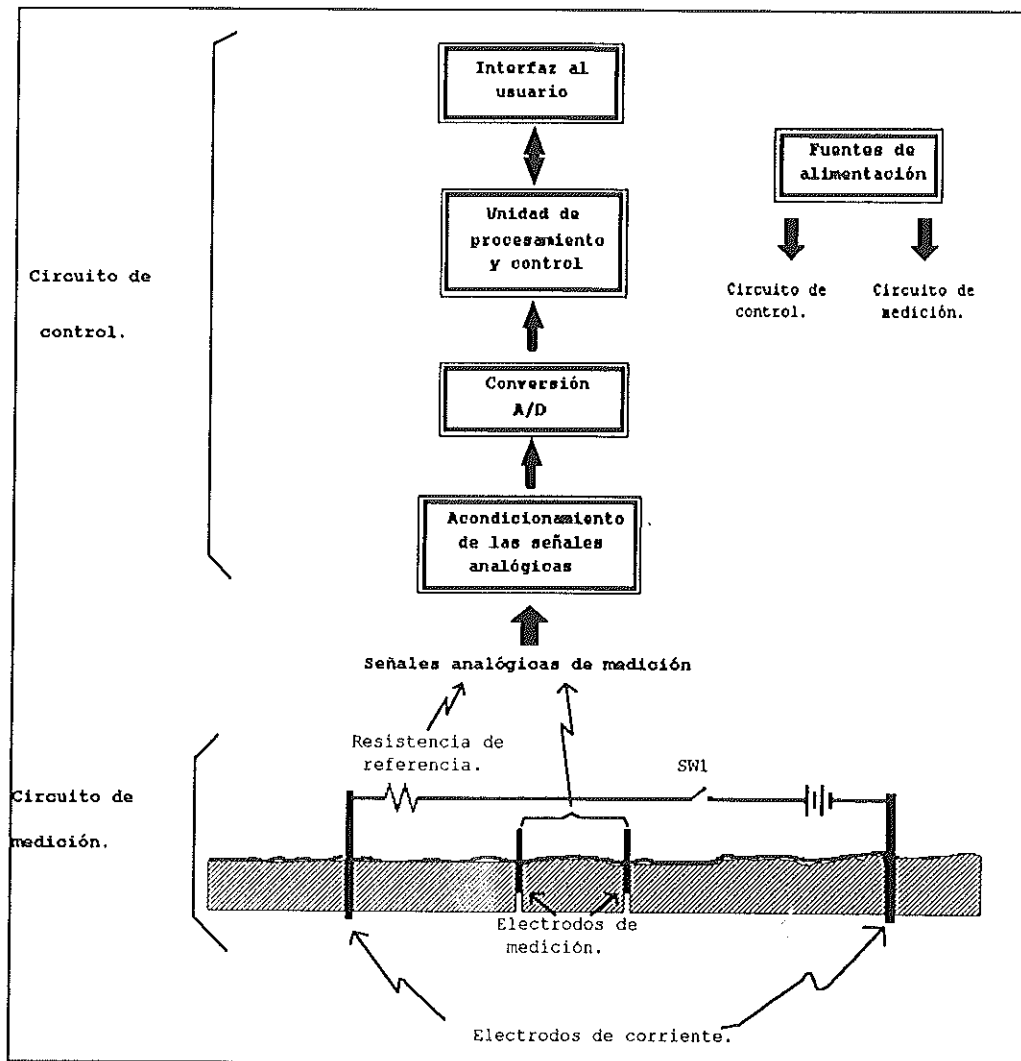
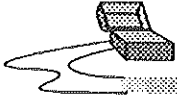


Figura 5.1. Diagrama a bloques de la estructura del equipo.



El *interfaz con el usuario*, son los elementos con los que el operador se comunica con el instrumento y viceversa, los cuales consisten en una pantalla de cristal líquido, un botón de reset, un selector de referencia y un control de intensidad del visualizador.

La *unidad de procesamiento y control*, esta conformada por el microcontrolador y un programa desarrollado para el funcionamiento del instrumento.

En el bloque de *conversión A/D*, se emplea un convertidor analógico a digital de 12 bits.

Para el *acondicionamiento de las señales analógicas* se emplea una etapa de entrada de alta resistencia, un filtro pasa bajas con frecuencia de corte a 10 Hz. y un amplificador de instrumentación con ganancia seleccionable por programa.

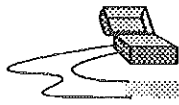
### V.2. Operación y funcionamiento

Como se estableció en el capítulo anterior, se deben hacer tres mediciones: el *potencial espontáneo (PE)*, el *voltaje en la resistencia de referencia ( $V_a$ )* y el que se presenta entre los *electrodos de medición ( $V_b$ )*.

El potencial espontáneo es medido en los mismos puntos que  $V_b$  pero con el interruptor *SWI* abierto, es decir, que se mide sin corriente en el circuito de medición. Para medir los voltajes  $V_a$  y  $V_b$  se cierra el interruptor (SW1). Como cada medición puede ser de diferente nivel es necesario acondicionar cada señal para que pueda ser interpretada convenientemente en un valor digital.

El funcionamiento del instrumento es llevado a cabo por un programa de control, cuya secuencia se muestra en el diagrama a bloques en la *Figura 5.2*. Se obtiene un solo valor para cada variable y se hace un ciclo en el despliegado de los resultados:

- A) El primer paso después de encender el equipo consiste en configurar el instrumento, ejecutando ciertas instrucciones de control interno, con lo que se inicializan el microcontrolador, el convertidor, los multiplexores y la pantalla de cristal líquido, también la memoria de acceso aleatorio es borrada.
- B) Se despliega un letrero que indique al operador que el instrumento se encuentra realizando las mediciones.



C) Se identifica la referencia seleccionada.

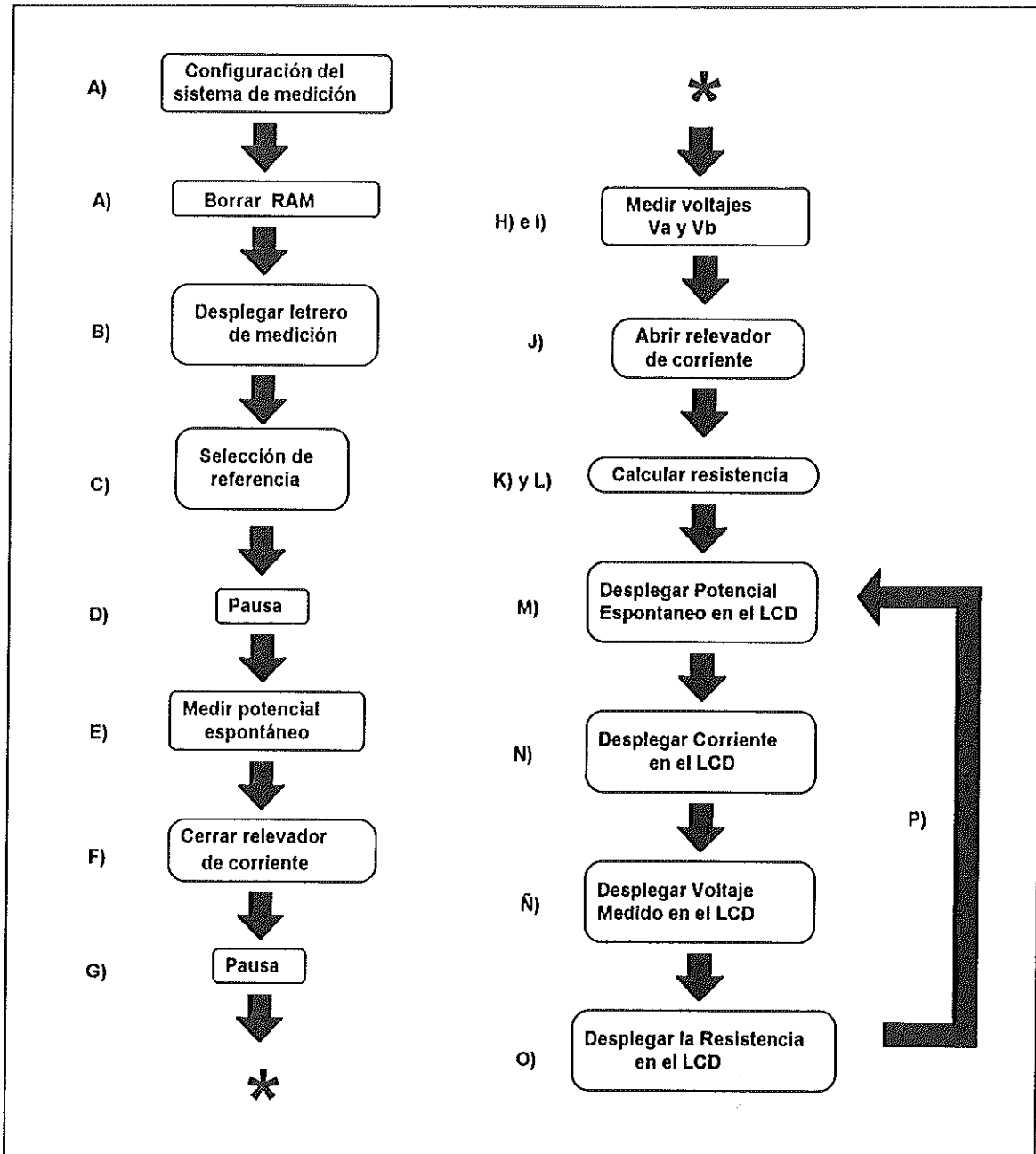


Figura 5.2. Esquema a bloques de la operación del instrumento.

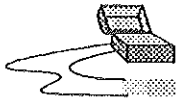


- D) Se hace una pausa para permitir que los circuitos se establezcan.
- E) Se mide el potencial espontáneo, el valor se guarda en la memoria de acceso aleatorio.
- F) Se cierra el interruptor (SW1) de corriente..
- G) Se hace una pausa para permitir el establecimiento de los circuitos.
- H) Se miden el voltaje  $V_a$  el valor es guardado en la memoria de acceso aleatorio o memoria de escritura / lectura (RAM).
- I) Se mide el voltaje  $V_b$ , sus valores son almacenados en RAM.
- J) Se abre el interruptor (SW1).
- K) Se calcula el valor de la corriente.
- L) Se calcula la razón  $(V_b - PE) / i$ . Esto se hace, haciendo la división de  $V_b / i$ , después  $V_{PE} / i$ , y se encuentra la diferencia entre ellos.
- M) Se despliega el valor medido del POTENCIAL ESPONTÁNEO.
- N) Se despliega el valor de la CORRIENTE inyectada a la tierra.
- Ñ) Se despliega el valor medido del VOLTAJE ( $V_b$ ) entre los electrodos de medición.
- O) Se despliega el valor de la RESISTENCIA calculada.
- P) El instrumento se cicla en la parte de desplegado de resultados, ya no se hace otra medición. Es decir, se hace un brinco al inciso M.

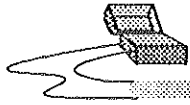
A continuación se explica de una manera más detallada *el proceso de medición*:

### **Procedimiento de medición.-**

El procedimiento de medición es muy similar en los tres casos, solo difieren en la selección de la señal de entrada y en la parte de RAM en que se almacene el resultado.



- I) Seleccionar la señal de entrada a medir, así como establecer las condiciones de medición. Abrir el interruptor (SW1) si se desea medir el potencial espontáneo, de otra manera cerrarlo.
- II) Pausa, que permita que los componentes se estabilicen.
- III) Medir la señal seleccionada.
- IV) Verificar si la señal queda dentro del rango de medición óptimo, si no es así, modificar la ganancia de los amplificadores programables y volver a medir (regresar al paso anterior). En caso de que la ganancia no pueda ser modificada para lograr que la señal quede dentro del intervalo de valores confiables, se abre el interruptor (SW1) (en caso de estar activado) y se despliega un letrero que indique al operador que la medición no podrá ser realizada. En caso de que la señal quede por arriba del intervalo el letrero indicará que el instrumento esta en *SATURACIÓN*, cuando la señal sea muy pequeña el mensaje será *BAJO NIVEL*.
- V) El valor obtenido para cada variable es un promedio de 256 lecturas.

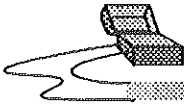


*Parte tercera:*

**EL INSTRUMENTO**



**Equipo de Medición de Resistividad Terrestre**



## *Parte tercera*

# **"EL INSTRUMENTO"**

Hasta este momento se ha tratado el proyecto desde un punto de vista más teórico que práctico. Es en esta tercera parte que se trata la aplicación de los temas anteriores, para analizar los resultados del diseño.

En el primer capítulo de esta tercera parte se analiza el circuito electrónico tal como fue construido, para en los siguientes capítulos tratar los resultados prácticos obtenidos y las características del equipo.

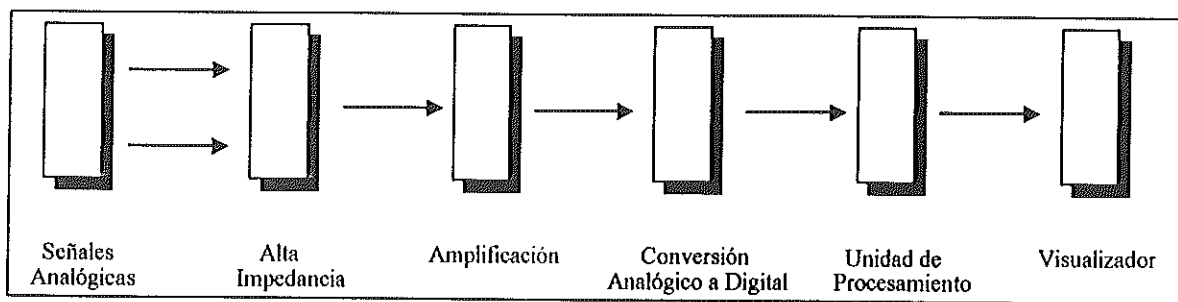


## **Equipo de Medición de Resistividad Terrestre**



## VI. El Circuito

En la *Figura 6.1*, se pueden observar las diferentes etapas funcionales dentro del instrumento de medición, cada una de las cuales será tratada de manera específica en este capítulo.



*Figura 6.1.* Diagrama a bloques de las diferentes etapas del sistema de medición.





### SEÑALES ANALÓGICAS

El primer bloque '*señales analógicas*' comprende todos los elementos necesarios para llevar las señales a medir desde el terreno hasta el instrumento y los circuito de referencia. Algunos de estos componentes no se encuentran dentro del equipo, tal es el caso de los electrodos de potencial y los de corriente, los cables de conexión, y el paquete de baterías. Los que si forman parte del instrumento son los relacionados con la selección de la referencia, con la conmutación de la batería y la conexión de la variable seleccionada a medir ( ver *Figura 6.2*).

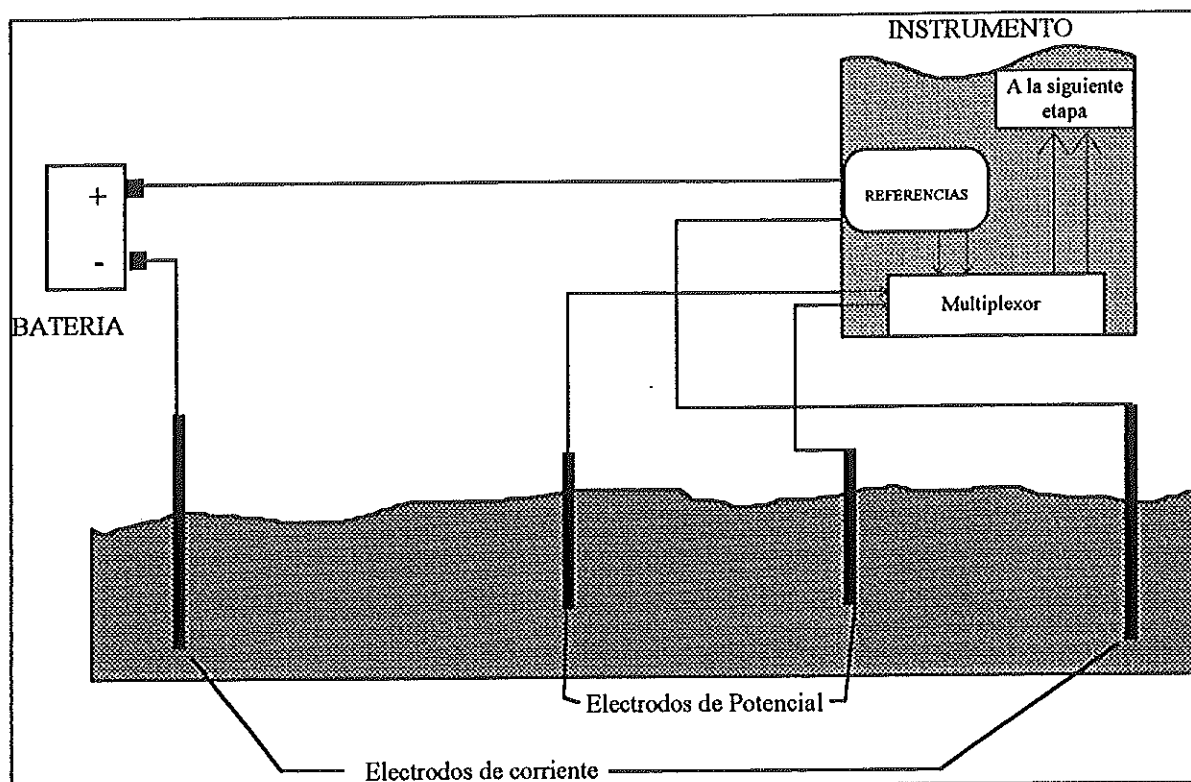


FIGURA 6.2. Diagrama del bloque de señales analógicas.

### ALTA IMPEDANCIA.

Se requiere de una etapa de alta impedancia en la entrada para no alterar las condiciones del terreno y de esta manera evitar que las lecturas obtenidas se vean afectadas por el funcionamiento del circuito. En la *Figura 6.3* se muestra este circuito.

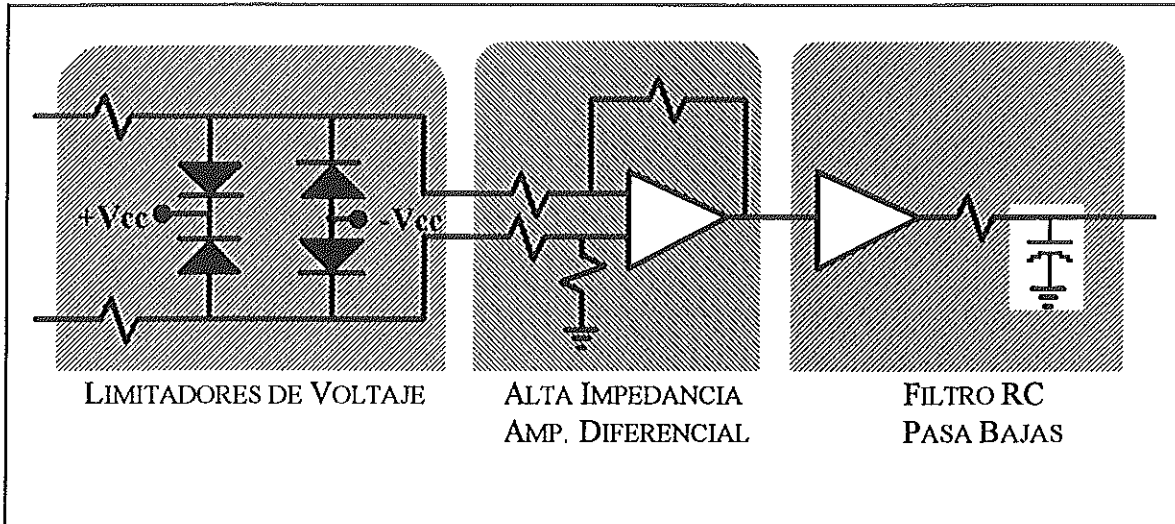
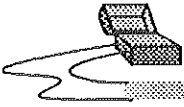


FIGURA 6.3. Etapa de entrada con alta impedancia.

Como se puede observar, aquí se considera también un circuito de protección de sobrevoltaje, y un filtro sencillo RC pasabajas. La alta impedancia se obtiene empleando un amplificador diferencial con ganancia unitaria.

Las resistencias en la protección de sobrevoltaje son para limitar la corriente a través de los diodos, en caso de ocurrir una sobrecarga.

El filtro es muy fácil de diseñar, recordando la fórmula de frecuencia de corte para un filtro de este tipo (filtro RC, pasabajas)

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

si se determina uno de los componentes, es fácil encontrar el otro.

### AMPLIFICACIÓN:

La etapa de amplificación consiste en un amplificador de ganancia seleccionable por programa (software) y un reforzador. Las ganancias que pueden ser seleccionadas son de 1, 10 y 100.

El reforzador es necesario ya que los elementos siguientes requieren de mayor corriente de la que puede ser suministrada por el amplificador *SPGA* (del inglés, *Software Programmable Gain Amplifier*).

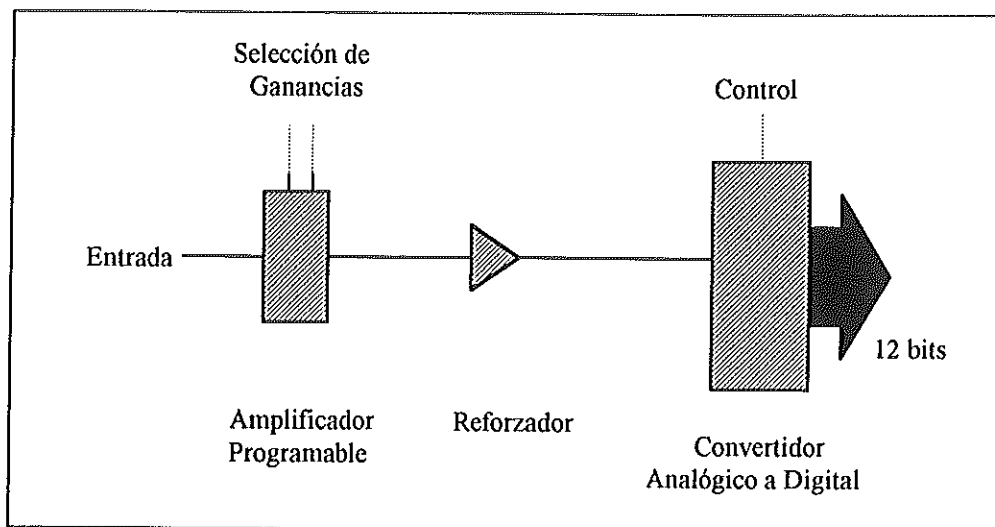
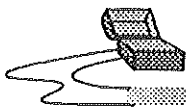


FIGURA 6.4. Etapas de amplificación y conversión analógica a digital.

### CONVERSIÓN A/D.

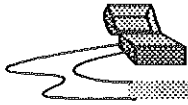
Los elementos de la fase de conversión, conforman un convertidor analógico a digital con una resolución de 12 bits.

### UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO.

En este bloque se encuentran un microcontrolador de Intel (8751), así como otros circuitos auxiliares, tales como: la codificación digital en la selección de la referencia y los circuitos de reloj (el oscilador), entre otros.

### DESPLEGADO DE LOS RESULTADOS.

Los resultados de la medición son presentados al operador, por medio de una pantalla de cristal líquido. La empleada en este sistema tiene capacidad de desplegar simultáneamente, dos líneas de 20 caracteres cada una. La intensidad de los caracteres al despliegue puede ser controlado por el operador.



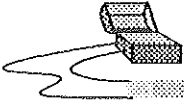
## ***VII. Pruebas de Laboratorio***

El instrumento fue probado en el laboratorio con diferentes mediciones en varios circuitos eléctricos, entre los cuales sobresalen en importancia los mostrados en la *Figura 7.1*.

El circuito 1, fue el primer circuito de prueba y su finalidad fue definir parámetros de operación, tales como tiempo de establecimiento de los circuitos de conmutación (relevador, multiplexor) y el de captura del convertidor así como realizar la calibración del instrumento.

Con el segundo se introduce la simulación de otros factores que se presentan en el campo; específicamente el potencial espontáneo.





Debido a que en el terreno no existe una sola trayectoria para la corriente, en el tercer circuito se introduce otro camino; con lo que se obtiene un modelo que se acerca un poco más al real.

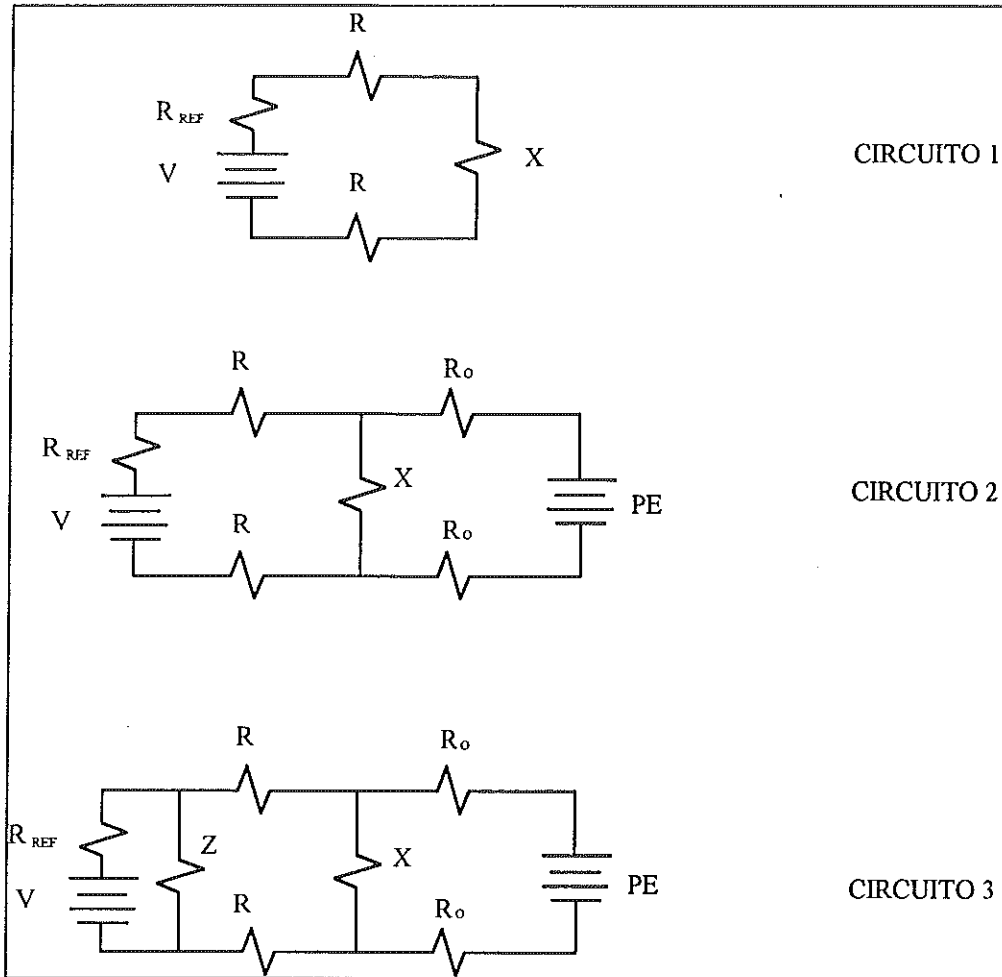


FIGURA 7.1. Diagrama de algunos circuitos de prueba empleados.

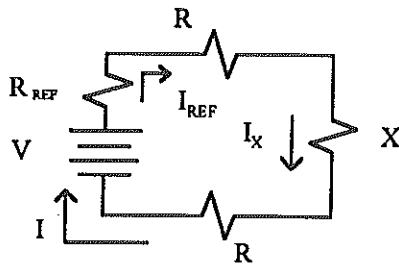
ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS CIRCUITOS DE PRUEBA

En la *Figura 7.1* se muestran los diagramas de tres circuitos de pruebas, en los cuales los puntos de interés o de medición son los mismos en cada uno de ellos: se requiere medir los voltajes a través de las resistencias  $R_{REF}$  y  $X$  ( $V_{REF}$  y  $V_X$  respectivamente).

A continuación se presenta el análisis matemático para cada uno de los circuitos anteriores, resolviendo para  $V_{REF}$  y  $V_X$ .



## CIRCUITO UNO.



Como se puede observar en la figura adyacente,

$$V_{REF} = R_{REF} I_{REF} \quad V_X = X I_X$$

Al ser este un circuito en serie, la corriente que pasa por cada uno de los elementos es la misma por lo que:

$$I = I_{REF} = I_X$$

y según la LEY DE OHM:

$$I = \frac{V}{R_{TOTAL}} \quad \text{Ecuación 7.1.}$$

la resistencia total ( $R_{TOTAL}$ ), esta dada por la expresión de suma de resistencias en serie:

$$R_{TOTAL} = R_{REF} + 2R + X \quad \text{Ecuación 7.2.}$$

Sustituyendo la ecuación 7.2 en 7.1

$$I_{TOTAL} = \frac{V}{R_{REF} + 2R + X} \quad \text{Ecuación 7.3.}$$

El voltaje a través de un elemento resistivo es igual a la corriente que pasa por el elemento multiplicado por el valor de la resistencia,  $V=IR$ ; sustituyendo las ecuaciones anteriores en esta expresión, se tiene la expresión del divisor de voltaje. De tal forma que los voltajes a través de la referencia y de la resistencia X son:

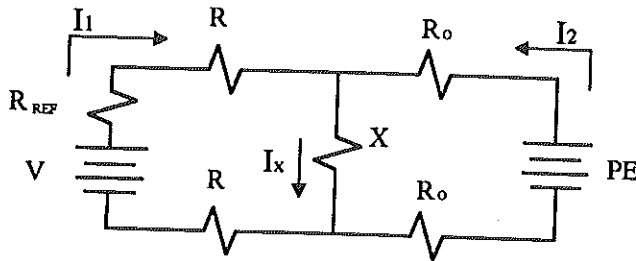
$$V_{REF} = \frac{V}{R_{REF} + 2R + X} (R_{REF}) = \frac{R_{REF}}{R_{REF} + 2R + X} (V) \quad \text{Ecuación 7.4.}$$

$$V_X = \frac{V}{R_{REF} + 2R + X} (X) = \frac{X}{R_{REF} + 2R + X} (V) \quad \text{Ecuación 7.5.}$$



**CIRCUITO DOS.**

En este circuito se introduce una rama más, para simular la presencia de las diferencias de potencial generadas en el terreno. Es necesario establecer que estos voltajes (la magnitud de la fuente PE) no corresponden al valor del potencial espontáneo medido ya que éste es la parte de PE que aparece en la resistencia X.



En la figura de la izquierda se observa que:

$$\begin{aligned} V_{REF} &= R_{REF} I_1 \\ V_X &= X I_1 + pe \\ &= X I_X \\ &= X I_1 + X I_2 \end{aligned}$$

donde:

*pe* = Potencial espontáneo

Resolviendo este circuito por medio del método de análisis de mallas, se tiene que las ecuaciones de malla correspondiente son:

$$(R_{REF} + 2R + X)I_1 + X I_2 = V \tag{Ecuación 7.6}$$

$$X I_1 + (2R_0 + X)I_2 = PE \tag{Ecuación 7.7}$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones, encontramos las expresiones para  $I_1$  e  $I_2$ .

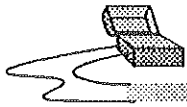
$$I_1 = \frac{V(2R_0 + X) - XPE}{(2R_0 + X)(R_{REF} + 2R + X) - X^2} \tag{Ecuación 7.8}$$

$$I_2 = \frac{PE}{2R_0 + X} - \frac{VX(2R_0 + X) - X^2 PE}{[(2R_0 + X)(R_{REF} + 2R + X) - X^2](2R_0 + X)} \tag{Ecuación 7.9}$$

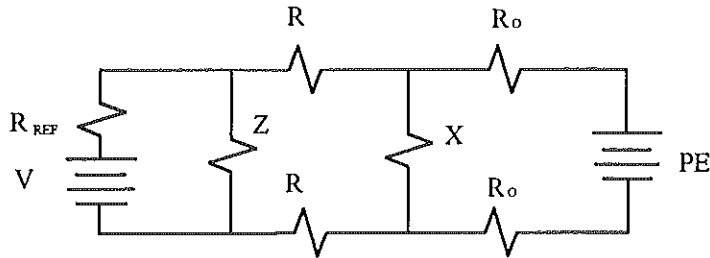
Con los valores de las corrientes de malla, es fácil encontrar el voltaje en las resistencias de interés. La corriente que fluye por  $R_{REF}$  es la corriente de malla 1, y por X pasan  $I_1$  e  $I_2$ , de tal forma que:

$$V_{REF} = I_1 R_{REF} \tag{Ecuación 7.10}$$

$$V_X = X(I_1 + I_2) \tag{Ecuación 7.11}$$



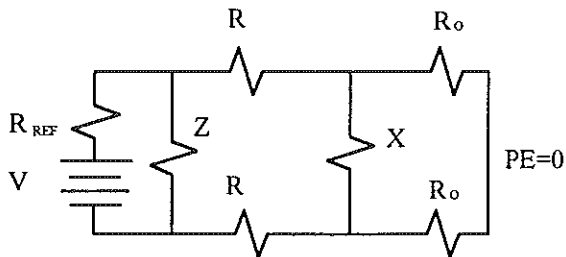
**Circuito Tres.**



A este circuito en comparación con el primero, se le han agregado dos ramas extras; una cuyo objetivo es simular el efecto del potencial espontáneo y otra las diferentes trayectorias que puede seguir la corriente en el suelo.

Resolviendo este circuito por el método de superposición:

Debido a V:

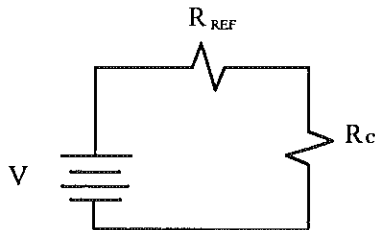
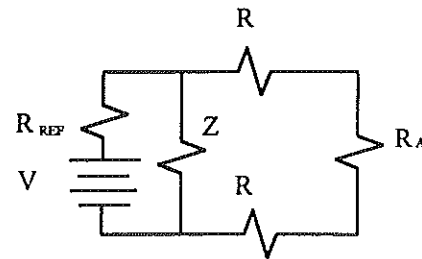


Simplificando X y R<sub>o</sub>, la resistencia equivalente será R<sub>A</sub>:

$$R_A = \frac{2R_o X}{2R_o + X} \quad \text{Ecuación 7.12.}$$

Reduciendo las resistencias en serie: R+R<sub>A</sub>+R=R<sub>B</sub>; con la resistencia Z en paralelo

$$R_C = \frac{ZR_B}{Z + R_B} \quad \text{Ecuación 7.13.}$$

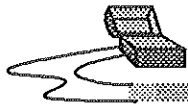


Queda un circuito serie con dos resistencias y una fuente de voltaje. Por división de voltajes se encuentra fácilmente el voltaje en R<sub>REF</sub>:

$$V_{REF} = \frac{R_{REF}}{R_{REF} + R_C} V \quad \text{Ecuación 7.14.}$$

La corriente total suministrada por la fuente V es:

$$I_V = \frac{V}{R_{REF} + R_C} \quad \text{Ecuación 7.15.}$$



## Pruebas

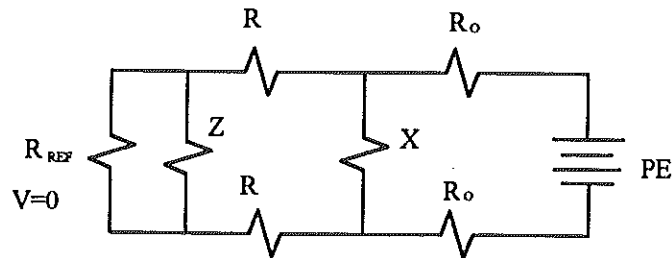
Del análisis anterior se puede deducir la expresión para calcular la caída de voltaje en la resistencia X:

$$V_x = \frac{R_A}{R_A + 2R} V_{Rc} \quad \text{Ecuación 7.16.}$$

Debido a PE.

Haciendo un análisis similar para encontrar los efectos sobre el circuito, producidos por la fuente PE, se tiene que:

El voltaje en X, es:



$$PE_x = \frac{F_2}{F_2 + 2R_0} PE \quad \text{Ecuación 7.17.}$$

donde  $F_2$  es la resistencia equivalente formada por X,  $2R$ , Z y  $R_{REF}$ ; y el que se presenta en  $R_{REF}$  esta definido por:

$$PE_{REF} = \frac{F_0}{F_0 + 2R} PE_x \quad \text{Ecuación 7.18.}$$

;donde  $F_0$  es la resistencia en paralelo entre  $R_{REF}$  y Z.

Las expresiones para  $F_0$ ,  $F_1$  y  $F_2$  son:

$$F_0 = \frac{R_{REF} Z}{R_{REF} + Z} \quad F_1 = F_0 + 2R \quad F_2 = \frac{F_1 X}{F_1 + X}$$

Con estos tres circuitos, se muestra que para realizar una medición de resistividad terrestre se requiere:

- ◆ Obtener tres diferentes voltajes  $V_{REF}$  y  $V_x$  ( $V_x$  = el voltaje producido por la fuente externa + el potencial espontáneo).



- ♦ La corriente suministrada por la fuente ( $I_{REF}$ ) es diferente a la que circula entre los electrodos de medición ( $I_X$ ).

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis teórico realizado anteriormente, resuelve de una manera general tres circuitos que se emplearon en diferentes pruebas de laboratorio, sin definir ningún parámetro y por consiguiente sin encontrar valor específico alguno. A continuación se presentan los resultados obtenidos en dos pruebas con igual número de circuitos correctamente definidos.

La primer prueba se realizó empleando el circuito mostrado en la figura 7.2. El objetivo de ésta fue verificar el correcto funcionamiento de los elementos del circuito y principalmente la consistencia en los resultados entre ambos medidores; esto se hizo conectándolos al mismo punto. Las entradas de medición del instrumento se conectaron en paralelo de tal manera que ambas midieran  $V_X$ , el interruptor que se emplea para cortar la corriente cuando se mide el potencial espontáneo se deshabilitó de tal manera que siempre estuviera cerrado.

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA 7.1. Los valores obtenidos en las columnas 1 y 5, MEDIDO EN LA ENTRADA y MEDIDO EN EL CONVERTIDOR, se obtuvieron con voltímetros METEX M-4650. Las columnas centrales POTENCIAL ESPONTÁNEO, CORRIENTE y VOLTAJE MEDIDO contienen los valores medidos con el instrumento de resistividad, las etiquetas anteriores son las que aparecen en la pantalla del equipo desarrollado.

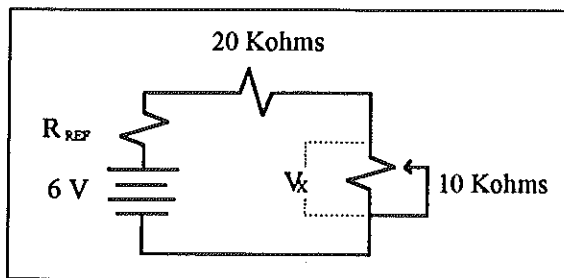
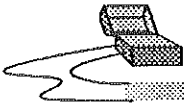


FIGURA 7.2. En este circuito las dos entradas de medición del instrumento se conectaron de tal manera que midieran la diferencia de potencial a través del potenciómetro (medir  $V_X$ ). Los resultados de esta prueba se muestran en la TABLA 7.1



**TABLA 7.1.** Valores obtenidos del circuito de la FIGURA 7.2. Los valores de la primer columna fueron medidos en  $V_x$ . Los valores de POTENCIAL ESPONTÁNEO, CORRIENTE Y VOLTAJE MEDIDO son los desplegados por el equipo de resistividad. Para la última columna, el voltímetro se colocó de manera que midiera la entrada del convertidor.<sup>†</sup>

MEDIDO EN LA ENTRADA	POTENCIAL ESPONTÁNEO	CORRIENTE	VOLTAJE MEDIDO	MEDIDO EN EL CONVERTIDOR
1.7149	1.6870	1.6870	1.6870	1.699 ①
	1.6870	1.6870	1.6870	
	1.6870	1.6870	1.6894	1.700
	1.6870	1.6894	1.6894	
	1.6870	1.6894	1.6894	
2.001	1.9702	1.9702	1.9702	1.983
	1.9702	1.9702	1.9702	
	1.9702	1.9702	1.9702	
	1.9702	1.9702	1.9702	
	1.9702	1.9702	1.9702	
1.501	1.4721	1.4721	1.4721	1.484
	1.4721	1.4721	1.4721	
	1.4721	1.4721	1.4721	
	1.4721	1.4721	1.4721	
	1.4721	1.4721	1.4721	
1.225 1.226	1.1987	1.1987	1.1987	1.209
	1.1962	1.1987	1.1987	
	1.1987	1.1987	1.1987	
	1.1987	1.1987	1.1987	
	1.1987	1.1987	1.1987	
1.000 1.001	0.9741	0.9741	0.9741	0.986
	0.9741	0.9741	0.9741	
	0.9741	0.9741	0.9741	
	0.9741	0.9741	0.9741	
	0.9741	0.9741	0.9741	
0.802	0.7763	0.7763	0.7763	0.787
	0.7763	0.7763	0.7763	
	0.7763	0.7763	0.7763	
	0.7763	0.7763	0.7763	
	0.7763	0.7763	0.7763	

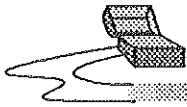


TABLA 7.1. Continuación...

MEDIDO EN LA ENTRADA	POTENCIAL ESPONTÁNEO	CORRIENTE	VOLTAJE MEDIDO	MEDIDO EN EL CONVERTIDOR
0.503	0.4785 0.4785 0.4785 0.4785 0.4785	0.4760 0.4760 0.4760 0.4760 0.4785	0.4785 0.4785 0.4785 0.4785 0.4785	0.489
0.306	0.2807 0.2807 0.2807 0.2807 0.2807	0.2807 0.2807 0.2807 0.2807 0.2807	0.2807 0.2807 0.2807 0.2832 0.2832	0.292
0.249	0.2246 0.2246 0.2246 0.2221 0.2221	0.2246 0.2246 0.2246 0.2221 0.2221	0.2246 0.2246 0.2246 0.2246 0.2246	0.236
0.1745	0.1513 0.1489 0.1513 0.1489 0.1513 0.1513	0.1513 0.1489 0.1513 0.1513 0.1513 0.1513	0.1513 0.1513 0.1513 0.1513 0.1513 0.1513	0.1619
0.1011 0.1018	0.9912 0.9936 0.9912 0.9936 0.9936	0.9863 0.9887 0.9912 0.9912 0.9936	0.9887 0.9912 0.9912 0.9936 0.9936	1.0029 ① 1.0096
0.0636 0.0638	0.6176 0.6152 0.6176 0.6176 0.6176	0.6152 0.6152 0.6152 0.6127 0.6152	0.6152 0.6152 0.6176 0.6176 0.6176	0.6270 0.6285
0.0092	0.8959 0.8984 0.8813 0.8813	0.8715 0.8764 0.8593 0.8593	0.8935 0.8984 0.8813 0.8813	0.8730 ② 0.8880

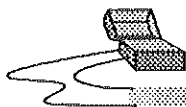


TABLA 7.1. Continuación...

MEDIDO EN LA ENTRADA	POTENCIAL ESPONTÁNEO	CORRIENTE	VOLTAJE MEDIDO	MEDIDO EN EL CONVERTIDOR
0.0092	0.8764	0.8569	0.8789	
0.0053	0.5712	0.5371	0.5566	0.556
	0.5712	0.5395	0.5590	0.575
	0.5737	0.5395	0.5615	
	0.5712	0.5395	0.5590	
	0.5761	0.5444	0.5639	
0.0027	0.3247	0.3002	0.3125	0.310
	0.3247	0.2954	0.3149	0.326
	0.3222	0.2954	0.3125	
	0.3198	0.2880	0.3100	
	0.3222	0.2954	0.3100	
0.0009	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO	0.06

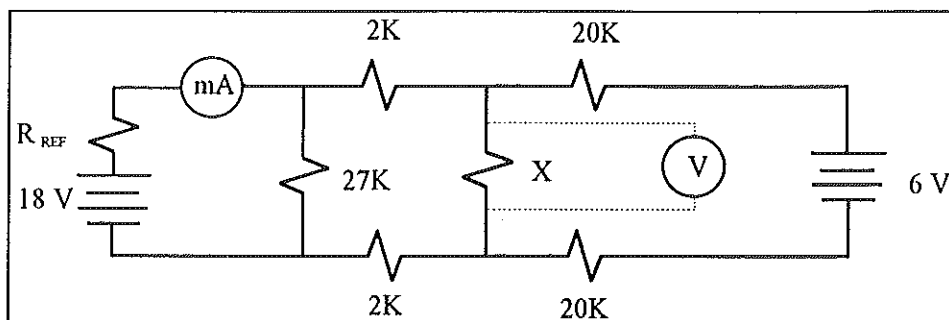
NOTAS:

- ① A partir de este renglón la ganancia seleccionada en el SPGA es 1.<sup>†</sup>
- ① A partir de este renglón la ganancia seleccionada en el SPGA es 10.<sup>†</sup>
- ② A partir de este renglón la ganancia seleccionada en el SPGA es 100.<sup>†</sup>
- † Todas las unidades están en volts.
- † Las ganancias en el SPGA afectan a todas las cantidades excepto a MEDIDO EN LA ENTRADA.



La segunda prueba se llevó a cabo empleando el circuito mostrado en la *figura 7.3*. Con este experimento se analizó el comportamiento y desempeño del instrumento en mediciones completas, aquí se simuló una medición que se puede realizar en el terreno real. Se obtuvieron los valores de la corriente inyectada ( $i$ ), el voltaje medido ( $V$ ), y el potencial espontáneo ( $P$ ), utilizando dos multímetros METEX M-4650 y el equipo de medición desarrollado.

Los resultados obtenidos se muestran en la TABLA 7.2, que consiste de 8 grupos de mediciones; cada uno de ellos con condiciones propias que alteran el comportamiento del circuito, las que se definen en el primer renglón del conjunto. Dentro de cada grupo se registra la misma medición (con objeto de verificar la repetibilidad), donde la primera de ellas y en **negrita** se realizó con los multímetros con lo cual se comprueba la precisión y exactitud del equipo.



**FIGURA 7.3.** Los resultados de este circuito de prueba se muestran en la TABLA 7.2. Para los medidores mostrados se emplearon dos multímetros METEX M-4650. El instrumento media las diferencias de potencial a través de las resistencias  $R_{REF}$  y  $X$ .

**TABLA 7.2.** Tabla de resultados obtenidos en el circuito de la FIGURA 7.3. Los valores en **negrita** indican los respectivos a las mediciones hechas con multímetros METEX M-4650. Para  $P$  y  $V$  (Potencial espontáneo y Voltaje medidos), las unidades están en volts, para  $i$  (Corriente inyectada medida) en amperes y para  $R$  (Resistencia) en ohms.

	$V= 18\text{ V}$	$PE= 6\text{ V}$	$Ref= 10\ \Omega$	$X= 4,7\ \Omega$	
$P=$	<b>0.8 mV</b>	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO
$i=$		NIVEL BAJO	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO
$V=$		NIVEL BAJO	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO	NIVEL BAJO
$R=$					

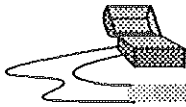


TABLA 7.2. Continuación...

	V= 18 V	PE= 6V	Ref= 10 Ω	X= 10 Ω	
P=	<b>1.54 mV</b>	0.1147e-2	0.1147e-2	0.1147e-2	0.1293e-2
i=	<b>5.39 mA</b>	0.5175e-2	0.5175e-2	0.5175e-2	0.5200e-2
V=	<b>47.94 mV</b>	4.7338e-2	4.7412e-2	4.7558e-2	4.7485e-2
R=		0.089245e2	0.089386e2	0.089669e2	0.088826e2
P=	0.1147e-2	0.1245e-2	0.1220e-2	0.1269e-2	0.1245e-2
i=	0.5175e-2	0.5200e-2	0.5200e-2	0.5200e-2	0.5200e-2
V=	4.7412e-2	4.7509e-2	4.7509e-2	4.7509e-2	4.7509e-2
R=	0.089386e2	0.088967e2	0.089014e2	0.088920e2	0.088967e2

	V= 18 V	PE= 6V	Ref= 100 Ω	X= 10 Ω	
P=	<b>1.54 mV</b>	0.1220e-2	0.1220e-2	0.1245e-2	0.1318e-2
i=	<b>5.26 mA</b>	0.5004e-2	0.5004e-2	0.5004e-2	0.5004e-2
V=	<b>46.75 mV</b>	4.6289e-2	4.6289e-2	4.6313e-2	4.6386e-2
R=		0.090048e2	0.090048e2	0.090048e2	0.090048e2
P=	0.1220e-2	0.1245e-2	0.1220e-2	0.1269e-2	0.1269e-2
i=	0.5004e-2	0.5004e-2	0.5004e-2	0.5004e-2	0.5004e-2
V=	4.6264e-2	4.6337e-2	4.6313e-2	4.6367e-2	4.6386e-2
R=	0.09000e2	0.090097e2	0.090097e2	0.090048e2	0.090048e2

	V= 18 V	PE= 6V	Ref= 1000 Ω	X= 10 Ω	
P=	<b>1.53 mV</b>	0.1440e-2	0.1391e-2	0.1440e-2	0.1489e-2
i=	<b>4.20 mA</b>	3.8720e-3	3.8696e-3	3.8696e-3	3.8720e-3
V=	<b>37.66 mV</b>	3.7402e-2	3.7353e-2	3.7426e-2	3.7451e-2
R=		0.009287e3	0.009293e3	0.009299e3	0.009287e3
P=	0.1416e-2	0.1220e-2	0.1464e-2	0.1416e-2	0.1416e-2
i=	3.8720e-3	3.8696e-3	3.8720e-3	3.8696e-3	3.8720e-3
V=	3.7402e-2	3.7231e-2	3.7451e-2	3.7402e-2	3.7402e-2
R=	0.009293e3	0.009303e3	0.009293e3	0.009299e3	0.009293e3



TABLA 7.2. Continuación...

	V= 18 V	PE= 6V	Ref= 10 Ω	X= 68 Ω	
P=	10.46 mV	0.0781e-1	0.0781e-1	0.0781e-1	0.0781e-1
i=	5.19 mA	0.4956e-2	0.4956e-2	0.4956e-2	0.4956e-2
V=	0.320 V	3.1323e-1	3.1298e-1	3.1323e-1	3.1323e-1
R=		0.616256e2	0.615763e2	0.616256e2	0.616256e2
P=	0.0781e-1	0.805e-1	0.0781e-1	0.0781e-1	0.0781e-1
i=	0.4956e-2	0.4956e-2	0.4956e-2	0.4956e-2	0.4956e-2
V=	3.1323e-1	3.1323e-1	3.1323e-1	3.1323e-1	3.1323e-1
R=	0.616256e2	0.615763e2	0.616256e2	0.616256e2	0.616256e2
P=	0.0781e-1	0.0781e-1	0.0781e-1	0.0781e-1	0.0781e-1
i=	0.4956e-2	0.4956e-2	0.4956e-2	0.4956e-2	0.4956e-2
V=	3.1323e-1	3.1323e-1	3.1323e-1	3.1323e-1	3.1323e-1
R=	0.616256e2	0.616256e2	0.616256e2	0.616256e2	0.616256e2

	V= 18 V	PE= 6V	Ref= 100Ω	X= 68 Ω	
P=	0.0106 V	0.0805e-1	0.0781e-1	0.0805e-1	0.0805e-1
i=	4.16 mA	4.0112e-3	4.0112e-3	4.0112e-3	4.0112e-3
V=	0.2569 V	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5292e-1	2.5268e-1
R=		2.5268e-1	0.061046e3	0.061046e3	2.5268e-1
P=	0.0805e-1	0.0830e-1	0.0805e-1	0.0805e-1	0.0805e-1
i=	4.0112e-3	4.0112e-3	4.0112e-3	4.0112e-3	4.0112e-3
V=	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1
R=	2.5268e-1	0.060985e3	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1
P=	0.0805e-1	0.0805e-1	0.0805e-1	0.0805e-1	0.0805e-1
i=	4.0112e-3	4.0112e-3	4.0112e-3	4.0112e-3	4.0112e-3
V=	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1
R=	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1	2.5268e-1



TABLA 7.2. Continuación...

	V= 18 V	PE= 6V	Ref= 10Ω	X= 100 Ω	
P=	<b>0.01542 V</b>	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1
i=	<b>5.29 mA</b>	0.5126e-2	0.5126e-2	0.5151e-2	0.5102e-2
V=	<b>0.4785 V</b>	4.7314e-1	4.7363e-1	4.7290e-1	4.7314e-1
R=		0.897619e2	0.898571e2	0.892891e2	0.901913e2
P=	0.1269e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1
i=	0.5102e-2	0.5126e-2	0.5102e-2	0.5126e-2	0.5102e-2
V=	4.7314e-1	4.7314e-1	4.7314e-1	4.7314e-1	4.7314e-1
R=	0.902392e2	0.897619e2	0.901913e2	0.897619e2	0.901913e2
P=	0.1269e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1
i=	0.5102e-2	0.5102e-2	0.5102e-2	0.5102e-2	0.5102e-2
V=	4.7314e-1	4.7314e-1	4.7314e-1	4.7314e-1	4.7314e-1
R=	0.901392e2	0.901913e2	0.901913e2	0.901913e2	0.901913e2

	V= 18 V	PE= 6V	Ref= 100Ω	X=100 Ω	
P=	<b>0.0156 V</b>	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1
i=	<b>5.15 mA</b>	0.4907e-2	0.4907e-2	0.4907e-2	0.4907e-2
V=	<b>0.4670 V</b>	4.6166e-1	4.6142e-1	4.6142e-1	4.6142e-1
R=		0.914427e2	0.913930e2	0.913930e2	0.913930e2
P=	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1
i=	0.4907e-2	0.4907e-2	0.4907e-2	0.4907e-2	0.4907e-2
V=	4.6142e-1	4.6166e-1	4.6142e-1	4.6142e-1	4.6142e-1
R=	0.913930e2	0.914427e2	0.913930e2	0.913930e2	0.913930e2
P=	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1	0.1293e-1
i=	0.4907e-2	0.4907e-2	0.4907e-2	0.4907e-2	0.4907e-2
V=	4.6142e-1	4.6166e-1	4.6166e-1	4.6166e-1	4.6166e-1
R=	0.913930e2	0.914427e2	0.914427e2	0.914427e2	0.914427e2

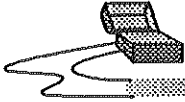


## *VIII. Características Eléctricas y Componentes Empleados*

### COMPONENTES EMPLEADOS

Se emplearon varios componentes en el proyecto, de entre los cuales destacan el microcontrolador, la pantalla de cristal líquido, el amplificador programable y el convertidor analógico a digital. Este trabajo no quedaría completo si no se tratara un poco acerca de estos elementos, es por esto que a continuación se mencionan las características principales de cada uno de ellos.





### Microcontrolador - 8751

Se decidió usar un microcontrolador sobre un microprocesador por facilidad de uso, menor necesidad de componentes externos (tal como ROM y RAM), mayor versatilidad. Se escogió éste ya que se contaba con la infraestructura para programar, desarrollar, implementar y simular, además de la experiencia de trabajar con productos de Intel.

El 8751 es un microcontrolador de la familia del 8051. Esta familia de productos está basada en el estándar industrial para microprocesadores de 8 bits. La estructura ha sido optimada para funciones de control en tiempo real.

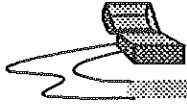
El 8051 es el miembro original de la familia, entre sus características principales se encuentran:

- ◆ UCP (Unidad Central de Procesamiento) de 8 bits optimado para operaciones de control.
- ◆ Capacidad de procesamiento booleano extenso (lógica de simple bit).
- ◆ 32 líneas de entrada / salida, bidireccionales y de acceso individual.
- ◆ 128 bytes de RAM integrada.
- ◆ Dos temporizadores / contadores de 16 bits.
- ◆ Comunicación serie full dúplex.
- ◆ Estructura de 5 interrupciones con prioridad de dos niveles.
- ◆ Circuitos de oscilador y reloj.
- ◆ 4k bytes de memoria de programa. En el 8751 es EPROM.
- ◆ Direccionamiento hasta 64k bytes para memoria de datos.
- ◆ Direccionamiento hasta 64k bytes para memoria de programa.

### Amplificador de ganancia programable - AD625

Una vez determinada la necesidad de tener ganancias que no fueran fijas en la etapa de acondicionamiento de la señal de entrada, se analizaron diferentes opciones para lograr esto, se llegó a la conclusión de que lo conveniente sería emplear un amplificador de ganancia programable.

Se hizo una comparación entre diferentes amplificadores considerando parámetros como funcionamiento - precio y disponibilidad, de lo cual resultó que el conveniente sería el amplificador de ganancia programable para instrumentación AD625.



Las características principales son:

- ◆ Rango de ganancias programables por el usuario desde 1 hasta 10,000.
- ◆ Bajo error en ganancia: 0.02% max.
- ◆ No linealidad: 0.001% max.
- ◆ Voltaje de desbalance (offset): 25  $\mu$ V
- ◆ Bajo ruido.
- ◆ Ancho de banda 25 MHz
- ◆ Bajo costo

El AD625 es un amplificador de precisión para instrumentación especialmente diseñando para satisfacer dos áreas de aplicación:

- 1) Circuitos que requieran ganancias no específicas
- 2) Circuitos que requieran un amplificador de precisión de ganancia programable a bajo costo.

Para configurar un amplificador programable se requiere emplear un multiplexor externo y una red resistiva apropiada. Las ganancias pueden ser desde 1 hasta 10,000, y la selección queda completamente a disposición del diseño del usuario.

### Convertidor A/D - ADS7800

En el primer análisis del proyecto, se determinó que se utilizaría una precisión mínima de 12 bits en la conversión analógica a digital. Se analizaron diferentes convertidores y se determinó que emplearía el ADS7800 ya que se encontró que éste cubría satisfactoriamente las condiciones de funcionamiento, precio y disponibilidad que se requerían.

Características principales:

- ◆ Muestreo de 3 microsegundos.
- ◆ 333,000 muestras por segundo.
- ◆ Rangos de entrada de  $\pm 10$ V a  $\pm 5$ V.
- ◆ No se pierden códigos.
- ◆ Muestreo y retención, referencia, reloj internos y salidas de 3er. estado.



- ◆ Disipación de potencia: 215 mW max.

El ADS7800 es un convertidor analógico digital de 12 bits completo que emplea estructuras CMOS de vanguardia. Contiene un convertidor de aproximaciones sucesivas de 12 bits. Cuenta internamente con circuito de muestreo y retención, referencia, reloj, interfaz digital para control por microprocesador, y salidas de tercer estado.

### Pantalla de cristal líquido - AND501.

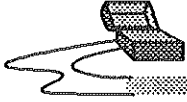
El despliegado de los resultados obtenidos requería que fuese un poco mas sofisticado que las pantallas de ocho segmentos, para poder transmitir las condiciones de operación del instrumento, sin que el operador requiriese mayor apoyo que el instrumento mismo. Se determinó que lo apropiado sería utilizar una pantalla de cristal líquido, por la versatilidad de funcionamiento.

La pantalla que se empleó es la AND501. Esta se utilizó debido a la disponibilidad con la que se contaba en ese momento.

#### Características:

- ◆ Módulo integrado y compacto.
- ◆ Pantalla clara y de alto contraste con caracteres grandes.
- ◆ Requiere bajo voltaje, una fuente de +5V.
- ◆ Amplio rango de operación (0° - 50° C).
- ◆ Formato de carácter de 5x7 puntos, y línea de cursor.
- ◆ Interfaz directo a UCP (*Unidad Central de Procesamiento*) de 4 u 8 bits.
- ◆ 11 comandos de control.
- ◆ Bajo consumo: 10 mW

El AND501 es un módulo LCD (pantalla de cristal líquido; del inglés *Liquid Crystal Display*) compacto que tiene una pantalla de matriz de puntos, un controlador y un driver. Este módulo puede mostrar 160 diferentes tipos de caracteres, números, símbolos y letras "Kana", así como 8 propios del usuario. Puede desplegar 40 caracteres simultáneamente en dos líneas (20 por línea) y la intensidad del despliegado en la pantalla puede ser controlado por el operador.



### CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL EQUIPO:

#### Alimentación:

Voltaje (Vcc): 12 Volts (10 - 15 Vcd)

Corriente: 200 mA

Potencia consumida: 2400 mW

#### Características de medición: ①

Voltaje máximo: 4.96 V

Voltaje mínimo: 0.99 mV

Corriente máxima: 0.496 A ②

Corriente mínima: 0.099  $\mu$ A ③

Error porcentual: 0.6 % a plena escala y ganancia máxima. ④

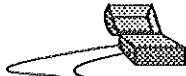
#### Tiempo de medición:

Para medir una variable: 0.012 seg.

Total de medición: 2.036 seg.

#### NOTAS:

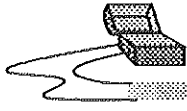
- ① SE REFIERE A LOS LÍMITES EN LAS CONDICIONES DE MEDICIÓN.
- ② CORRIENTE MÁXIMA, SELECCIONANDO LA REFERENCIA DE 10  $\Omega$ .
- ③ MÍNIMA CORRIENTE QUE SE PUEDE DETECTAR, CON REFERENCIA DE 10K $\Omega$ .
- ④ A PLENA ESCALA Y GANANCIA MÁXIMA. PLENA ESCALA ES 4.97 Y LA GANANCIA SELECCIONADA EN EL SPGA ES DE 100.



**COMENTARIOS, APORTACIONES Y  
CONCLUSIONES**



**Equipo de Medición de Resistividad Terrestre**



## *Comentarios, aportaciones y conclusiones*

Para concluir este trabajo, empezaremos con recordar los objetivos principales que se plantearon al inicio de este proyecto:

Primero. Realizar un trabajo formal, para ser un trabajo de tesis profesional que cubriese uno de los requisitos para obtener el título de *ingeniero en electrónica*.

Segundo. El trabajo se centraría en diseñar y construir un instrumento de medición para investigación científica, específicamente un *equipo de medición de resistividad terrestre*.

Este trabajo me dejó diversas y valiosas experiencias tanto en lo académico como en lo profesional, entre las cuales puedo destacar y debo mencionar las siguientes (no se





mencionan en orden de importancia, con el fin de que ninguna sobresalga sobre las demás, considero que el valor y la esencia de las aportaciones, radican en su conjunto);

Al trabajar en un proyecto de investigación científica tuve la oportunidad de conocer este aspecto de la vida académica nacional.

Este instrumento es un equipo de medición científico, y como lo desarrollé en el departamento de geofísica, no solo estuve en contacto con lo relacionado a este proyecto sino que también tuve la oportunidad de conocer diferentes sensores empleados en la recopilación de datos del subsuelo.

Participé en el desarrollo de instrumentación científica especializada.

En cuanto al desarrollo de diseño electrónico, es muy similar al desarrollado a lo largo de la carrera con la diferencia de la selección de los componentes de mayor precisión, exactitud y robustez.

Profundicé en el uso, manejo, programación y desarrollo de sistemas que emplean microcontroladores, ya que se empleó uno de buena capacidad y amplio uso actualmente, en muchas partes es considerado un estándar industrial. Lo cual se traduce en un desarrollo electrónico altamente actualizado y de gran validez si consideramos que los otros elementos empleados son de tecnología de vanguardia.

Algo que no había utilizado anteriormente y que encontré de gran utilidad son los amplificadores de ganancia seleccionable para instrumentación. El que empleamos tiene la capacidad de definir la ganancia por software o por hardware.

El empleo de una pantalla de cristal líquido también es significativo, en vista de que reduce el consumo de energía y da más versatilidad al desplegado de resultados con lo que se facilita el procedimiento de medición, e incluso puede presentar instrucciones en pantalla.

Por la manera en que se realizó y presenta este trabajo, se lograron diversas metas, las cuales acentúan la relevancia e importancia del proyecto realizado, haciendo valiosas aportaciones a la comunidad.

Se realizó el diseño de un instrumento de medición científico.

A partir del diseño hecho se obtuvo un prototipo para el equipo de medición de resistividad terrestre, en el cual se emplearon componentes de tecnología vanguardista.



Se logró reducir el tamaño, la complejidad y el costo del instrumento realizado, comparado con los ya existentes y se integraron el transmisor y receptor en un solo módulo. Con lo cual se cubren las características deseadas, y los resultados obtenidos son compatibles con los equipos comerciales ya existentes; de esta manera los resultados obtenidos son familiares para un observador experimentado, y no se requerirá un nuevo adiestramiento.

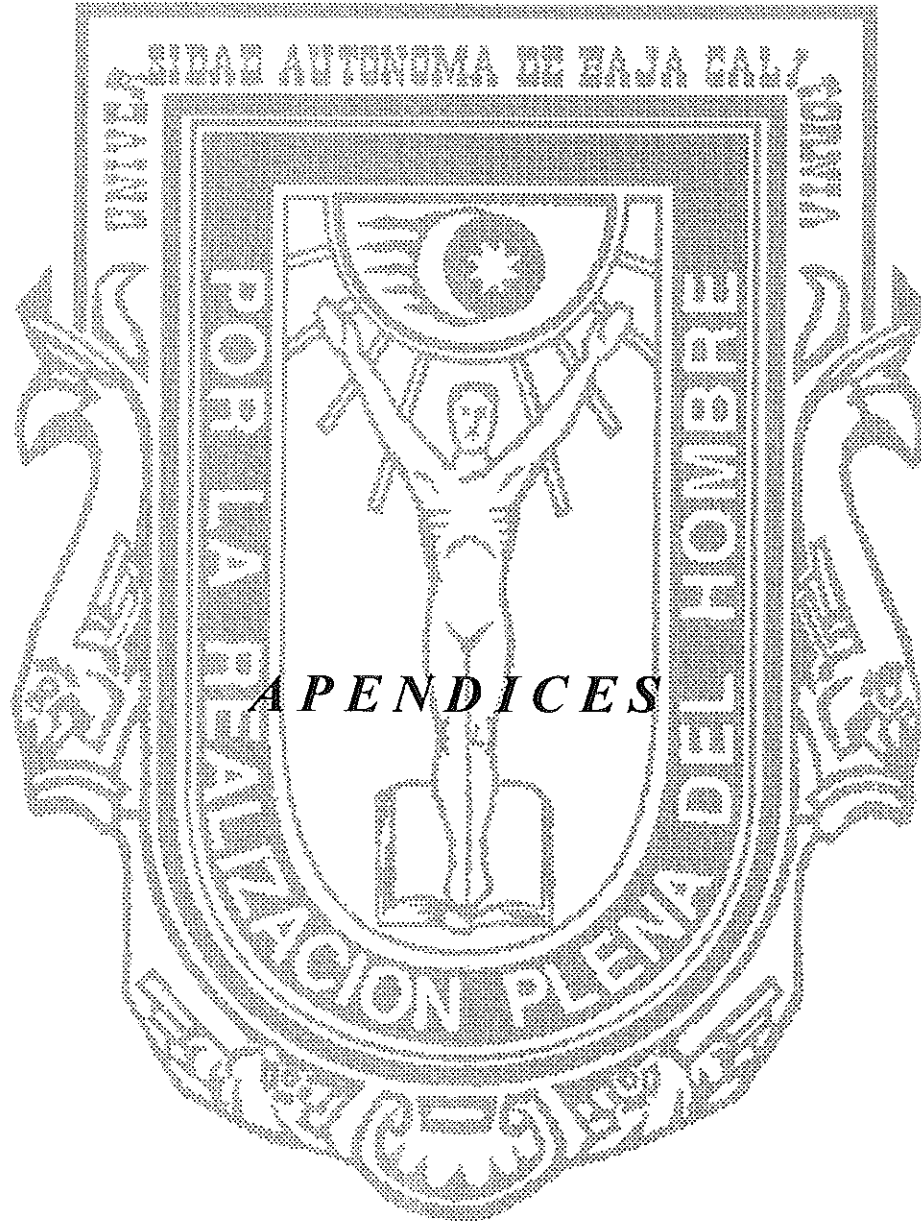
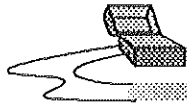
Y un aspecto muy importante es que con este proyecto se logró la formación de recursos humanos especializados de alta calidad.

Se concluye el trabajo en los siguientes términos: se construyó un equipo prototipo, que satisface las características proyectadas inicialmente, el cual se encuentra en completo funcionamiento; se hacen algunas recomendaciones para una versión mejorada del equipo.

Para mejorar el funcionamiento del instrumento hago las siguientes recomendaciones:

1. Reemplazar los componentes que no son de precisión, por otros que si lo sean. Como es el caso de algunas resistencias y capacitores.
2. Si se requiere medir cantidades menores a 1 milivolt, es necesario tener un buen diseño de tierras, mejorar el filtrado de las señales e incrementar la ganancia.
3. Para reducir el consumo de energía se puede cambiar el microprocesador por su versión de bajo consumo, reemplazar los relevadores por otros interruptores de menor consumo.
4. La etapa de amplificación programable puede ser mejorada empleando amplificadores que no requieren de componentes externos.

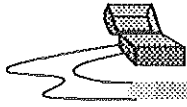
Las recomendaciones anteriores mejoran el funcionamiento sin introducir un cambio importante en la estructura ni en el principio de operación del equipo. Pero se pueden hacer modificaciones interesantes, como llevar un monitoreo de los estados de las baterías tanto de alimentación como de medición y se podría conectar el equipo al puerto serie o al paralelo de una PC.



*APENDICES*



**Equipo de Medición de Resistividad Terrestre**



## *Apéndice A:*

### *Glosario*

**CIRCUITO.** Una trayectoria cerrada por la cual fluye corriente de un generador, a través de varios componentes, y de regreso hacia el generador.

**CIRCUITO EN SERIE.** Un circuito cuyas componentes están, en efecto, conectadas en una hilera, es decir, extremo a extremo. Solo existe una trayectoria posible a la corriente, es decir, la corriente que pasa por un componente es la misma que fluye por los demás.

**CIRCUITO PARALELO.** Un circuito en el que más de dos elementos tienen una conexión común. En este circuito hay varias

trayectorias de corriente, es decir, la corriente que pasa por un elemento no es la misma que pasa por los demás.

**DIFERENCIA DE POTENCIAL.** Es la diferencia algebraica de voltajes en dos puntos de potencial eléctrico.

**EFEECTO SUPERFICIAL.** Es la tendencia de las corrientes de alta frecuencia para viajar a lo largo de la superficie de un conductor, debido a que la reactancia a alta frecuencia es menor a lo largo de la parte exterior que en el centro de un conductor.





- ELECTRODO.** Un cuerpo, punta o terminal en un dispositivo o circuito que entrega electricidad o al cual se aplica ésta. Un electrodo positivo es un ánodo; un electrodo negativo, un cátodo.
- ESTRATIGRAFÍA.** Rama de la geología que estudia las rocas estratificadas. Describe y fecha los estratos, fijando la sucesión de los mismos en el tiempo. Establece correlaciones e intenta dar una base para la comprensión de la evolución geológica de la corteza terrestre.
- EXACTITUD.** En una medición, es la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero de una cantidad.
- FILTRO.** Circuito o dispositivo que deja pasar una frecuencia o bandas de frecuencias, mientras bloquea a otras, o viceversa.
- GEOFÍSICA.** Parte de la geología que se ocupa de los fenómenos físicos ocurridos en la atmósfera, sobre la superficie de la tierra y en el interior de ella.
- GEOLOGÍA.** Rama de las ciencias naturales que estudia el origen, composición, estructura y evolución de la tierra.
- HISTÉRESIS.** Condición en la que una cantidad variable decrece a una velocidad diferente de que con la que aumenta, la gráfica para esto es de doble curva.
- HOMOGENEO.** Perteneciente a un mismo género. Dícese del compuesto formado por elementos de la misma naturaleza.
- IMPEDANCIA.** La oposición total ofrecida por un circuito o dispositivo al flujo de corriente alterna. Esta es la suma vectorial de la resistencia y la reactancia.
- INTERFERENCIA.** El efecto perturbador de cualquier señal no deseada.
- LEY DE OHM.** El enunciado de la relación entre la corriente, voltaje y resistencia en un circuito de cd. *La corriente varía en forma directa con el voltaje e inversamente con la resistencia, es decir  $I=E/R$ .*
- LINEALIDAD.** El grado al cual el comportamiento o respuesta se aproxima a la condición de ser lineal. Normalmente se expresa en porcentaje o en partes por millón.
- MEDICIÓN.** Acción y efecto de medir.
- MEDIR.** Determinar alguna de las dimensiones de un objeto.
- METALÍFEROS.** Se refiere a los compuestos que contienen metal.
- MICROCONTROLADOR.** *Microcomputadora.* Cualquier pequeña computadora cuyo elemento de proceso central está contenido en una sola tableta dentro de un solo circuito integrado.
- MINERALOGÍA.** Ciencia que estudia la forma, propiedades, composición, yacimiento y génesis de los minerales.
- MULTIPLEXOR.** Equipo o dispositivo que toma un cierto número de canales de entrada y combina las señales en un canal común.
- OCEANOGRAFÍA.** Ciencia que estudia el mar desde los aspectos físico, químico y biológico.
- POTENCIAL ESPONTÁNEO.** Es el potencial producido en el suelo sin la aplicación de campos eléctricos externos. Este potencial es producido por la acción electroquímica entre los minerales y las soluciones con las cuales están en contacto.
- PRECISIÓN.** Especifica la repetibilidad de un conjunto de lecturas, cada una hecha



independientemente con el mismo instrumento.

**PROSPECCIÓN.** Conjunto de técnicas destinadas a localizar depósitos de hidrocarburos y minerales útiles, efectuando mediciones de las propiedades físicas de los materiales del interior de la tierra.

**REDUCCIÓN.** Disminución del contenido de oxígeno de un compuesto; disminución del número de valencias positivas de un átomo por aceptación de electrones.

**RESISTENCIA.** Símbolo  $R$  o  $r$ . Unidad, ohm. En un dispositivo, componente o circuito, la oposición sencilla al flujo de corriente. La resistencia por sí misma no causa cambio de fase;  $R=E/I$ , donde  $E$  es el voltaje e  $I$  es la corriente.

**RESISTIVIDAD.** Símbolo  $\rho$ . Unidad, ohm-m. Resistencia específica, es decir, resistencia por unidad de volumen o por unidad de área.

**RESOLUCIÓN.** El grado al cual pueden diferenciarse partes adyacentes cercanas de una imagen. *En un convertidor*, es el mayor cambio que puede presentarse en la

entrada sin que ocurra una variación en la salida.

**RUIDO.** Una corriente de frecuencia aleatoria, (por lo general interferencial) o señal de voltaje que se extiende sobre un espectro considerable de frecuencia y que no tiene un propósito de uso, al menos que sea generada intencionalmente para propósito de prueba.

**SENSOR.** 1) Elemento que se activa por la energía entregada por un sistema y que entrega otro tipo de energía distinta a otro sistema. 2) Un dispositivo que muestrea un fenómeno y entrega una corriente o voltaje proporcionado en términos de lo que se puede medir el fenómeno con los cuales se puede iniciar la acción de control.

**TECTÓNICA.** Parte de la geología que estudia las deformaciones de la corteza terrestre producidas por fuerzas internas.

**TOLERANCIA.** La cantidad por la cual se permite un error en un valor, capacidad nominal, dimensión, etc. Usualmente se expresa como un porcentaje del valor nominal, más y menos tantas unidades de medida, o partes por millón.



## *Apéndice B:*

### *Manual de operación*

El equipo desarrollado es muy sencillo de manejar, exteriormente solo se tienen el visualizador o pantalla, el selector de referencia, el control de intensidad de la pantalla y el botón de nueva medición (o de reset), el interruptor de encendido y los conectores para el paquete de baterías y para los electrodos, tanto de corriente como para los de potencial. La localización de estos se muestra en las *figuras 1 y 2*.

#### *PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN:*

1. Se colocan los electrodos en el terreno, con la distribución deseada.
2. Se conecta el circuito de corriente; el paquete de baterías va directamente al instrumento, al par de conectores situados al frente, la terminal positiva al conector superior marcado con el signo “+” (I), el negativo al conector J. Los conectores para los cables a los



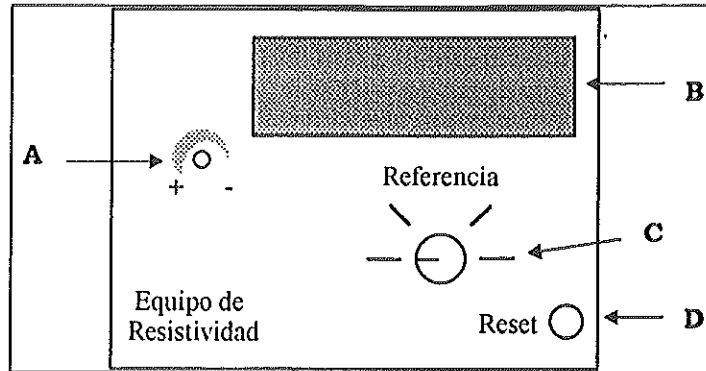
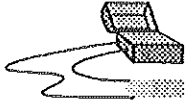


FIGURA B.1. Vista de la carátula del equipo de medición. Donde A es el control de intensidad de la pantalla, B es el visualizador, C es el selector de referencia y D es el botón de reset.

- electrodos de corriente están situados en el lado izquierdo, son los indicados con las letras E y F (positivo y negativo correspondientemente).
3. Se conectan los electrodos de potencial. El electrodo positivo es el que se encuentra más cerca al electrodo positivo de corriente.
  4. Una vez hechas las conexiones se enciende el instrumento.
  5. Aparece un letrero en la pantalla que indica que se están haciendo las mediciones. Este letrero tarda aproximadamente 6 segundos.
  6. Cada resultado aparecerá secuencialmente en la pantalla y tendrá una duración de visualización de 6 segundos; una vez desplegados todos

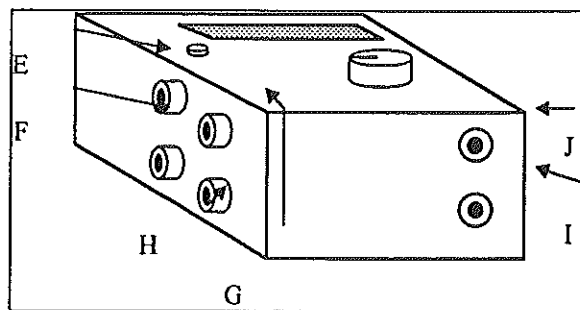
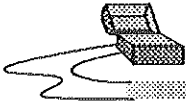


FIGURA B.2.. Colocación de los conectores para los cables de los electrodos como para el paquete de baterías. E) Terminal positiva de corriente. F) Terminal negativa de corriente. H y G) Conectores para los electrodos de potencial, positivo y negativo. I y J) Conectores para el paquete de baterías; I positivo, J negativo.



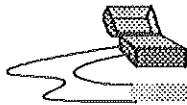
## Instructivo

se regresa a desplegar el primero y el ciclo se repite.

Este es el ciclo normal de operación. En caso de que alguna o varias de las variables medidas se encuentren fuera del rango óptimo de medición; hacia

arriba (saturación) o hacia abajo (nivel bajo); se indicará cual es el caso en la pantalla.

Para realizar otra medición se presiona el botón de *NUEVA MEDICIÓN* (D).



## *Apéndice C:*

### *Programa de control*

El microcontrolador funciona en su modo monopastilla, por lo que opera únicamente con sus memorias internas. Es decir el programa de control se encuentra en la memoria no volátil, de solo lectura, contenida en el mismo integrado.

El programa desarrollado es muy extenso, sin embargo, funcionalmente es sencillo, ya que se pueden identificar 4

bloques de operación, los cuales son, las rutinas de CONFIGURACIÓN, MEDICIÓN, CÁLCULO y DESPLEGADO DE RESULTADOS; es por este motivo, que para lograr una exposición general y clara del tema, se optó por la presentación de un diagrama de flujo y las rutinas más importantes que componen el programa, dando una explicación breve de cada una de ellas.



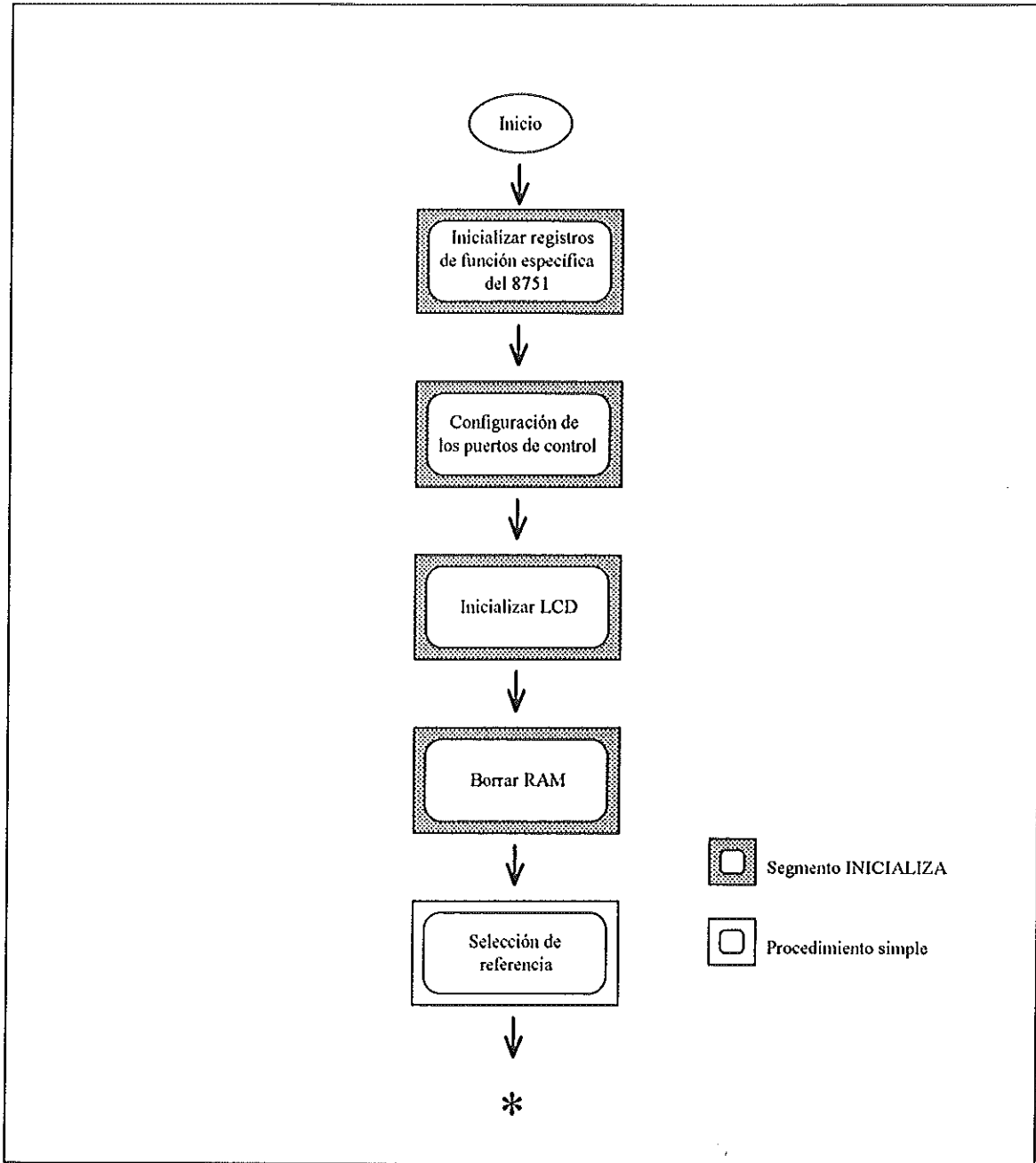
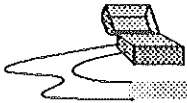


Figura C1. Diagrama de flujo del programa de control.

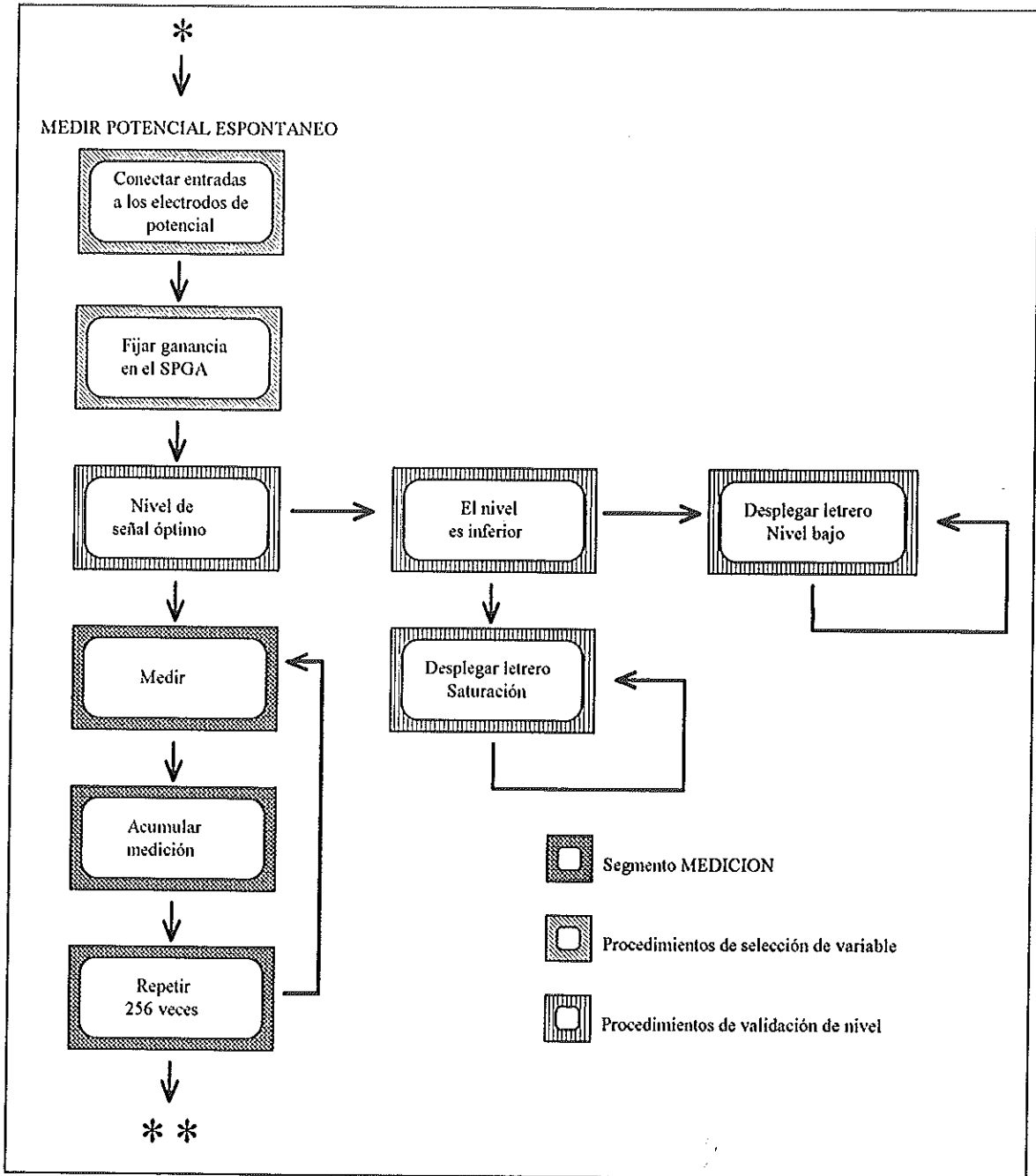
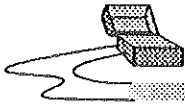


Figura C.2. Diagrama de flujo... (Continuación)

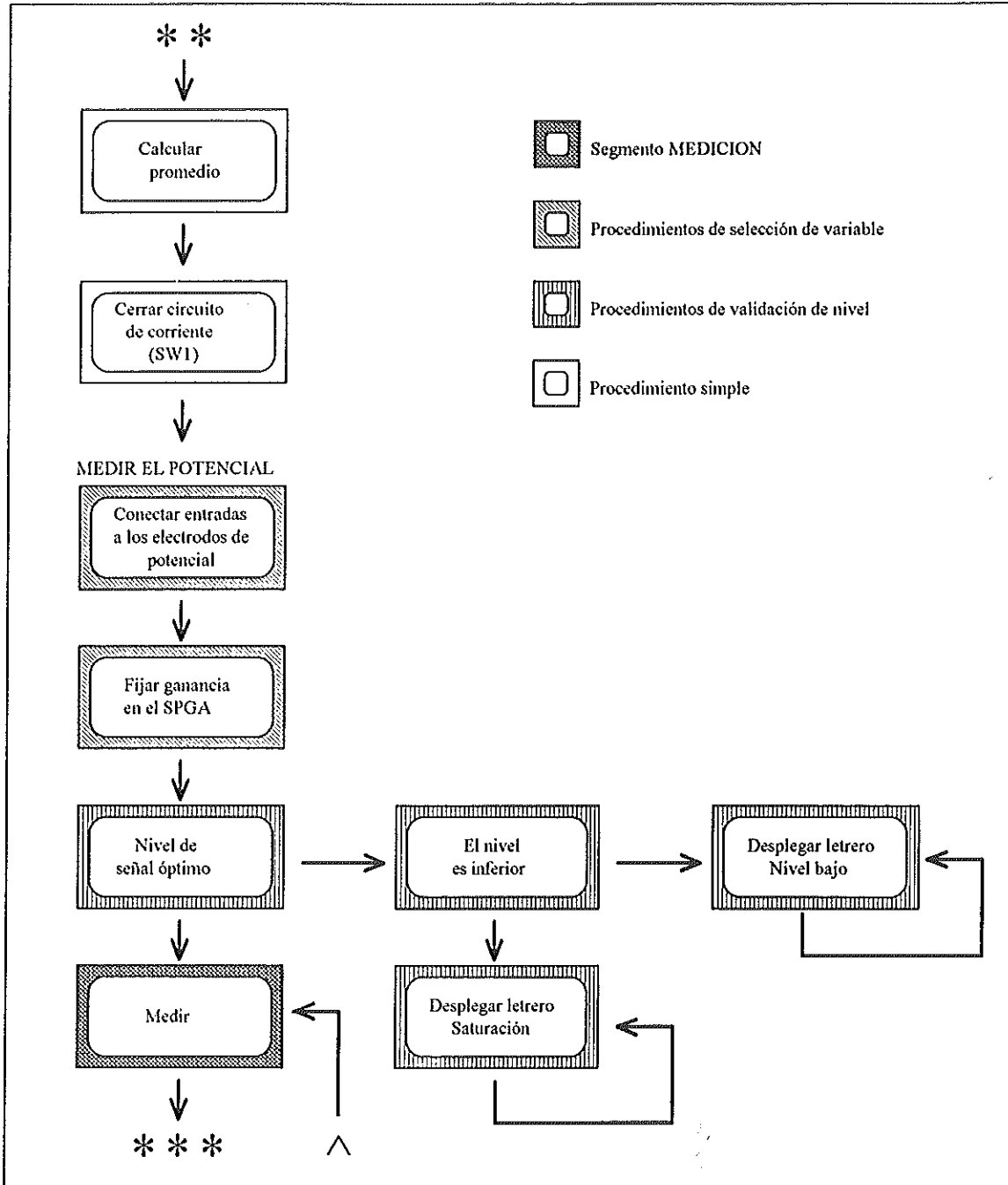


Figura C.3. Diagrama de flujo... (Continuación)

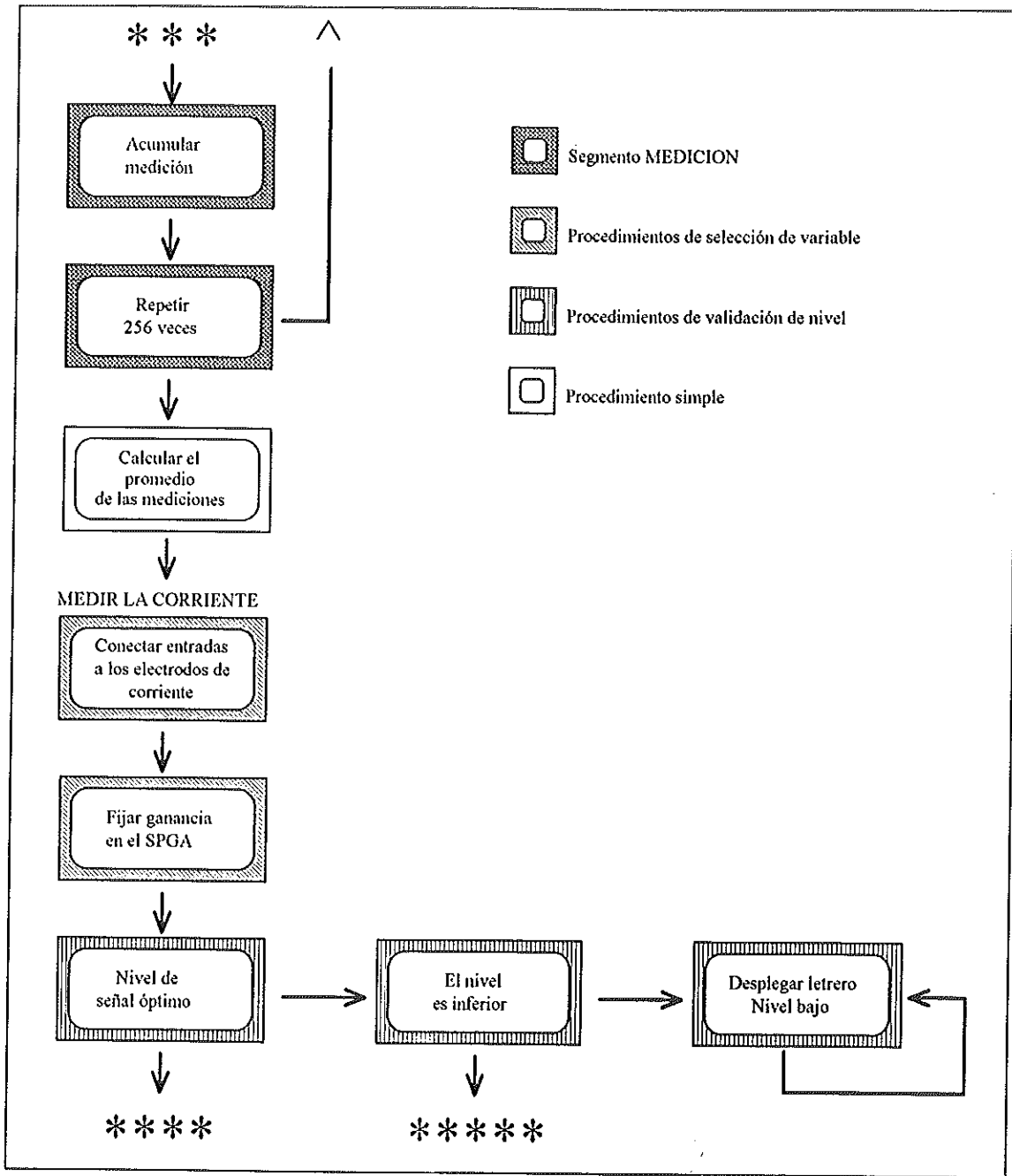
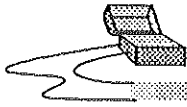


Figura C.4. Diagrama de flujo... (Continuación)

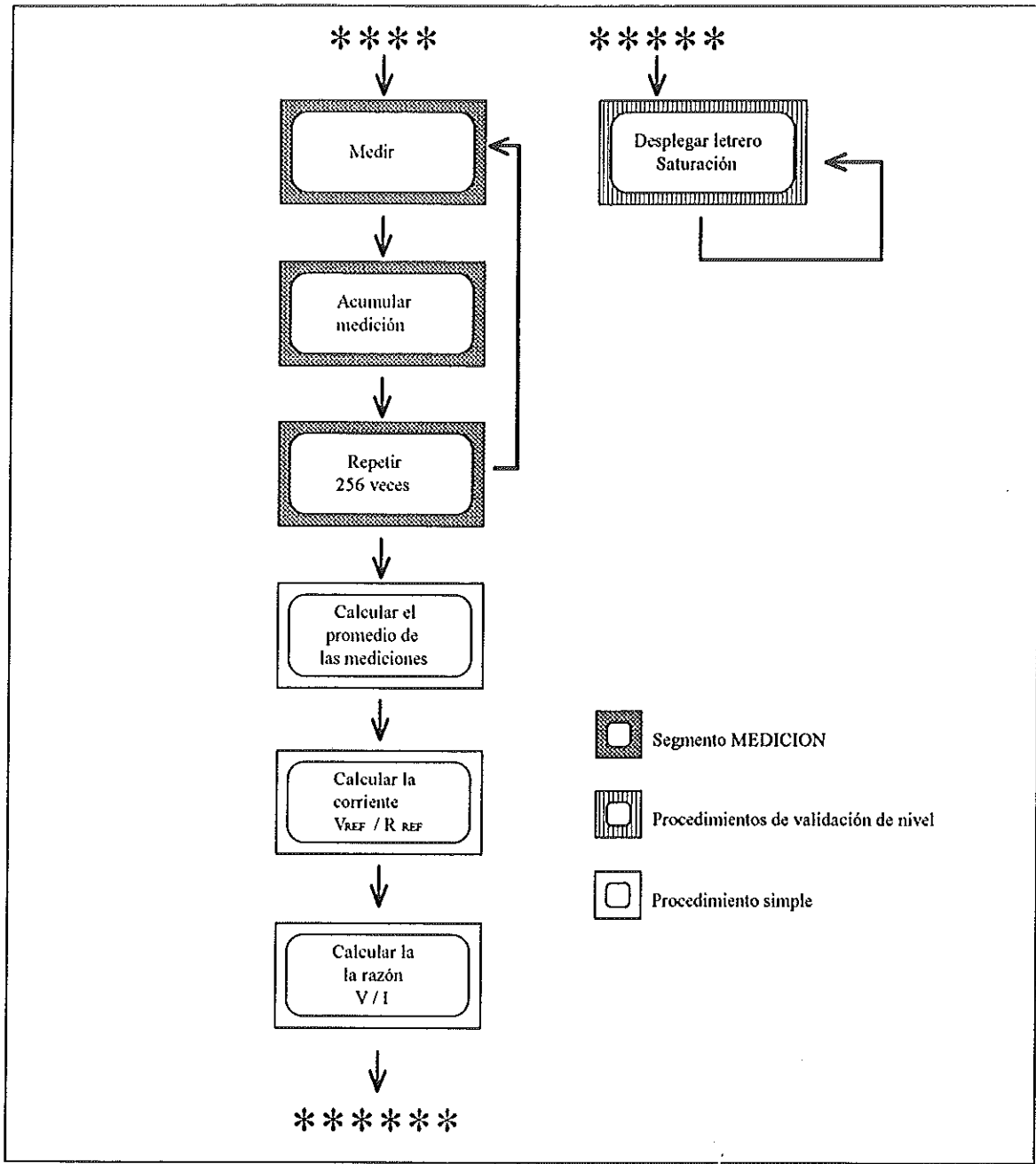
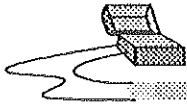


Figura C.5. Diagrama de flujo... (Continuación)

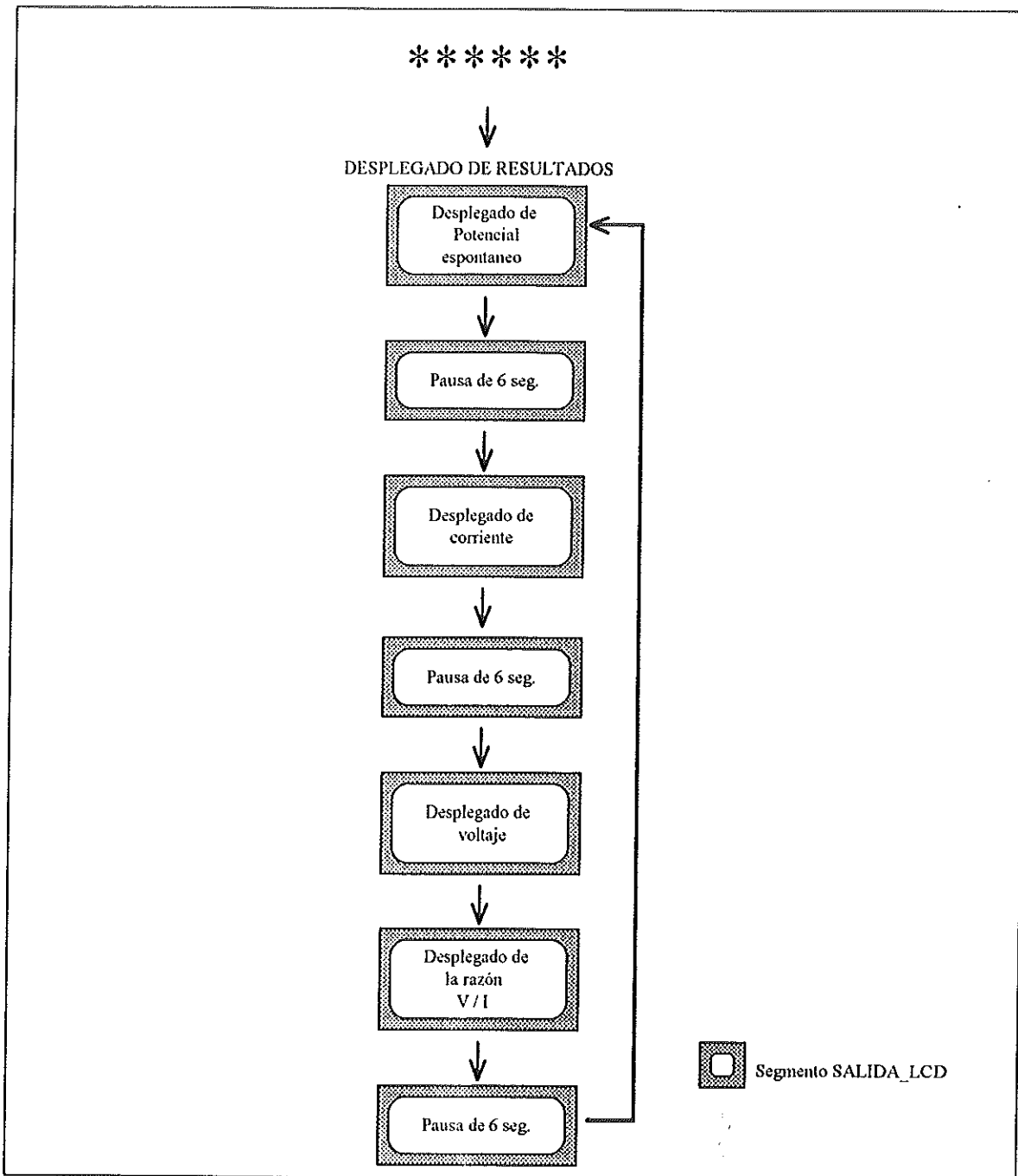
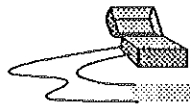
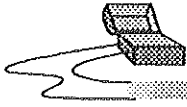


Figura C.6. Diagrama de flujo... (Continuación)



El programa desarrollado para llevar el control del equipo se hizo en forma modular, con diferentes segmentos que pueden funcionar independientemente y que se encuentran relacionados todos en un bloque central donde se realiza los accesos a cada subrutina. A continuación se explican los segmentos principales: *INICIALIZACIÓN*, *MEDICIÓN*, *RUTINA DE DIVISIÓN DE 32 BIT* y *SALIDA\_LCD*.

Lo que aparece en *cursiva* son comentarios sobre las funciones a ejecutar, lo escrito en normal son las instrucciones del programa.

El segmento de configuración, inicializa las condiciones de operación del equipo: fija con el valor adecuado los *registros de función especial* del 8751, asegura que el contenido de RAM sea 00h en cada byte y especifica el modo de operación de la pantalla.

```

=====
Defseg INICIALIZA, class=code
seg INICIALIZA

    Inicialización del microcontrolador, con el puerto 3 y los bits p2.4..p2.7 se realiza el control de los dispositivos periféricos (convertidor, pantalla, amplificadores, interruptores etc.), los bits p2.0..p2.3 son de entrada.
IniMicro:
    mov tcon,#00h
    mov tmod,#00h
    mov p3,#7ah
    mov p2,#2fh
;.....

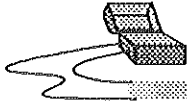
    Procedimiento para especificar el modo de operación de la pantalla de cristal líquido; caracteres de 5x7 puntos, dos líneas de desplegado, sin cursor y acceso a ducto de 8 bits.
IniLCD:
    mov p1,#38h
    clr p3.2
    setb p3.2
    mov p1,#0ch

    clr p3.2
    setb p3.2
    mov p1,#01
    clr p3.2
    setb p3.2
    mov p1,#06h
    clr p3.2
    setb p3.2
    mov p1,#80h
    clr p3.2
    setb p3.0
    setb p3.2
;.....
borrar:
    mov r0,#6fh
    mov r1,#60h
    mov r1,#04h

    mov @r0,#00
    dec r0
    djnz r1,$-3

    RET
;.....

```



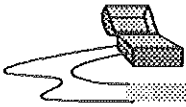
El segmento MED\_VAR realiza el proceso completo de medición de la variable seleccionada anteriormente, la que puede ser: *el potencial espontáneo, el potencial o la corriente inyectada*. Se realizan 256 lecturas y se calcula el promedio de ellas, este valor medio es el asignado como cantidad obtenida a la variable seleccionada.

```
=====
;
    Defseg MED_VAR, class=code
    seg MED_VAR

medicion:
    mov medicion_b,#00
    mov medicion_m,#00
    mov medicion_a,#00
    mov i_rep,#10h
ciclo_x256:
    mov i_med,#10h
ciclo_x16:
    lcall conver
    mov a,S_TMP
    cjne a,Sign,Dif_signo
    clr c
    mov a,medicion_b
    addc a,L_TMP
    mov medicion_b,a
    mov a,medicion_m
    addc a,L_TMP+1
    mov medicion_m,a
    mov a,#00
    addc a,medicion_a
    mov medicion_a,a
    ljmp F_Ciclox16
Dif_signo:
    mov a,medicion_a
    cjne a,#00,mayorZ
    mov a,medicion_m
    cjne a,L_TMP+1,mayorZ
    mov a,medicion_b
    cjne a,L_TMP,mayorZ
mayorZ:

;=====
    jc al_reves
    clr c
    mov a,Medicion_b
    subb a,L_tmp
    mov Medicion_b,a
    mov a,Medicion_m
    subb a,L_TMP+1
    mov Medicion_m,a
    sjmp F_Ciclox16
al_reves:
    clr c
    mov a,L_TMP
    subb a,Medicion_b
    mov Medicion_b,a
    mov a,L_TMP+1
    subb a,Medicion_m
    mov Medicion_m,a
    mov Sign,S_TMP
F_Ciclox16:
    djnz i_med,ciclo_x16
    djnz i_rep,ciclo_x256

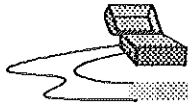
    mov L_TMP,medicion_m
    mov L_TMP+1,medicion_a
    RET
;=====
    Aquí se dan las instrucciones al convertidor A/D para que haga la conversión y se pasa a RAM el resultado, con su signo.
conver:
    clr p3.3
    setb p3.3
    jnb p3.4,$
    mov r0,#L_TMP
```



```
mov @r0,p0
inc r0
mov @r0,p2
mov r1,#S_TMP
signo:
mov b,@r0
mov @r1,#43
jb b.3,positivo
dec r0
mov a,@r0
cpl a
mov @r0,a
inc r0
mov a,@r0
cpl a
mov @r1,#45
positivo:
mov a,@r0
anl a,#07h
mov @r0,a
RET
```

La rutina de división es importante ya que es aquí donde se encuentra el cociente del voltaje medido entre la corriente inyectada. Como el microcontrolador cuenta con una instrucción que puede realizar esta operación puede parecer una cuestión simple y directa, pero no ocurre así, debido a que se limita a cantidades de 8 bits (dividendo y divisor) y se requiere dividir cantidades mayores; el denominador de 32 bits y el numerador de 16 bits.

```
divide: mov num_0,la_B
mov num_1,la_A
mov a,r4
swap a
mov L_TMP+1,a
mov a,r5
anl a,#0f0h
swap a
add a,L_TMP+1
mov Den_3,a
mov a,r5
anl a,#0fh
swap a
mov Den_2,a
mov Den_1,#00
mov Den_0,#00
;-----
mov L_TMP,#32
division:
call rota_den
mov a,residuo_0
rlc a
mov Residuo_0,a
mov a,residuo_1
rlc a
mov Residuo_1,a
clr c
mov a,Residuo_1
subb a,num_1
jc menor_divisor
jnz can_sub
clr c
mov a,Residuo_0
subb a,num_0
jc menor_divisor
;=====
can_sub:clr c
mov a,Residuo_0
subb a,num_0
mov Residuo_0,a
mov a,Residuo_1
subb a,num_1
mov Residuo_1,a
```



```
        setb c
        ljmp cocient
cocient: call cociente
        djnz L_TMP,division
;*****
        RET
;-----
rota_den:clr c
        mov a,den_0
        rlc a
        mov den_0,a
        mov a,den_1
        rlc a
        mov den_1,a
        mov a,den_2
        rlc a
        mov den_2,a
        mov a,den_3
        rlc a
        mov den_3,a
        rlc a
        mov Coc_0,a
        mov a,Coc_1
        rlc a
        mov Coc_1,a
        mov a,Coc_2
        rlc a
        mov Coc_2,a
        mov a,Coc_3
        rlc a
        mov Coc_3,a
        ret
```

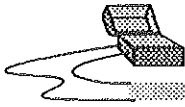
En el segmento SAL\_LCD están las instrucciones requeridas para desplegar cada resultado en la pantalla, con toda la información necesaria de identificación. Para optimar el uso de memoria, es necesario convertir de hexadecimal a decimal el valor medido de la variable a desplegar.

```
;=====
        Defseg SAL_LCD,class=code
        seg SAL_LCD

        Definir las características del
desplegado de cada resultado: ganancia,
identificación, cantidad de dígitos de
despliegue y el signo (el potencial espon-
táneo, la corriente inyectada, el voltaje y
la razón se definen en Sal_PE, Sal_Corr,
Sal_Volt y Sal_R correspondientemente).
Sal_PE:
        lcall Let_pot
        lcall Deci_Espontaneo
        mov letra,#"P"
        mov r0,#Voltajes+10h

        mov ganancia,GanPE
        mov Sign,signPE
        mov limite,#05h
        mov digito,#10h
        call Salida
        RET

Sal_Corr:
        lcall Let_Corriente
        lcall Deci_VoltA
        mov letra,#"i"
        mov r0,#VoltajeA+10h
        mov ganancia,GanR
        mov Sign,SignA
        mov limite,#05h
        mov digito,#10h
        call Salida
```



```
RET
Sal_Volt:
    lcall Let_Voltaje
    lcall Deci_VoltB
    mov letra,#"V"
    mov r0,#VoltajeB+10h
    mov ganancia,GanB
    mov Sign,signB
    mov limite,#05h
    mov digito,#10h
    call Salida
    RET
```

```
Sal_R:
    lcall Let_Razon
    nop
    nop
    mov letra,#"R"
    mov r0,#Resist+10h
    mov ganancia,GanR
    mov Sign,#" "
    mov limite,#07h
    mov digito,#0fh
    call Salida
    RET
```

-----  
salida:

*Rutina para desplegar los datos  
definidos anteriormente.*

```
    mov BanDig,#00h
    mov p1,letra
    call sal
    mov p1,#"="
    call sal
    mov p1,Sign
    call sal
```

repetir:

```
    dec r0
    dec digito
    mov a,BanDig
    cjne a,#00,ModBanDig
    cjne @r0,#00,ModBanDig
    cjne r1,#0bh,Repetir
```

```
ModBanDig:
    inc BanDig
    cjne r1,#0ah,xx
    mov p1,#" ."
    call sal
```

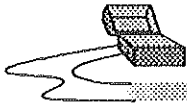
xx:

```
    mov a,@r0
    add a,#30h
    mov p1,a
    call sal
    mov a,BanDig
    cjne a,Limite,repetir
    mov p1,#"e"
    call sal
    mov p1,SignE
    lcall sal
    mov a,Ganancia
    add a,#30h
    mov p1,a
    call sal
    ret
```

-----  
sal:

*Instrucciones de desplegado para  
el manejador del LCD.*

```
    setb p3.2
    clr p3.2
    setb p3.2
    ret
```



*Apéndice D:*  
*Diagramas esquemáticos*



**Equipo de Medición de  
Resistividad Terrestre**

**Diagramas**

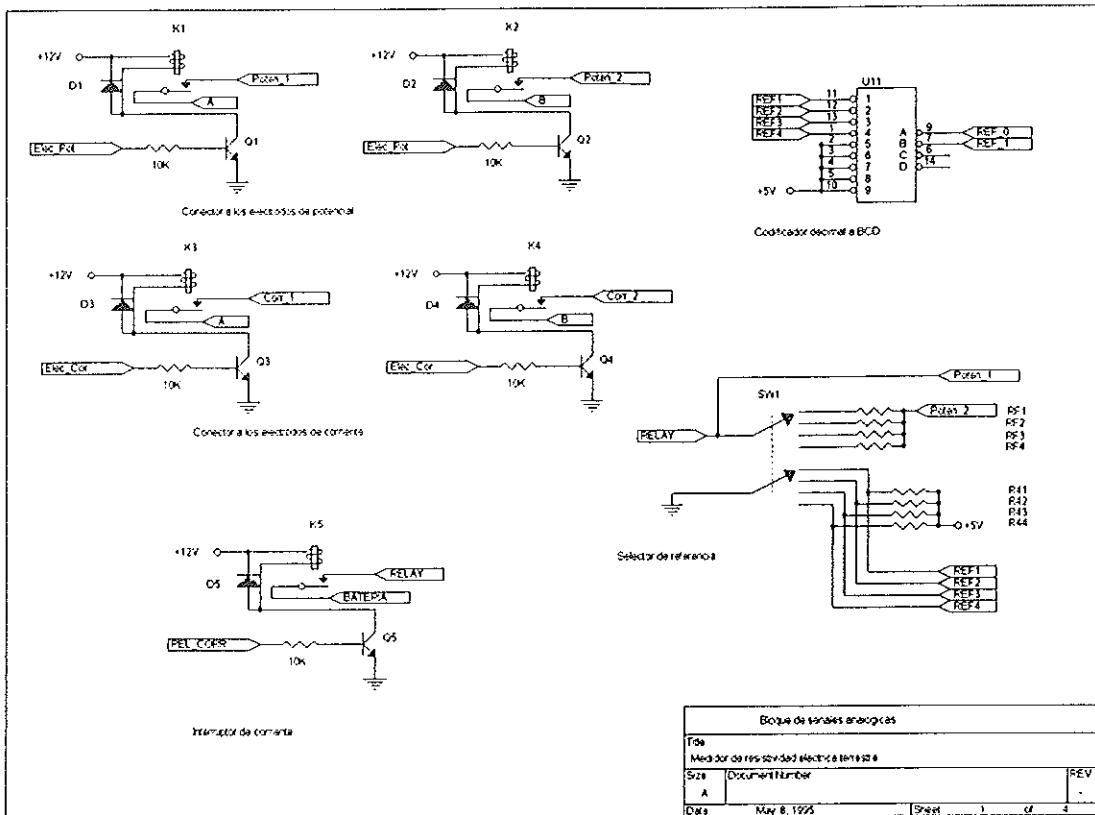
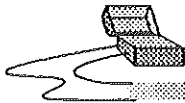


Figura D.1. Bloque de señales analógicas.

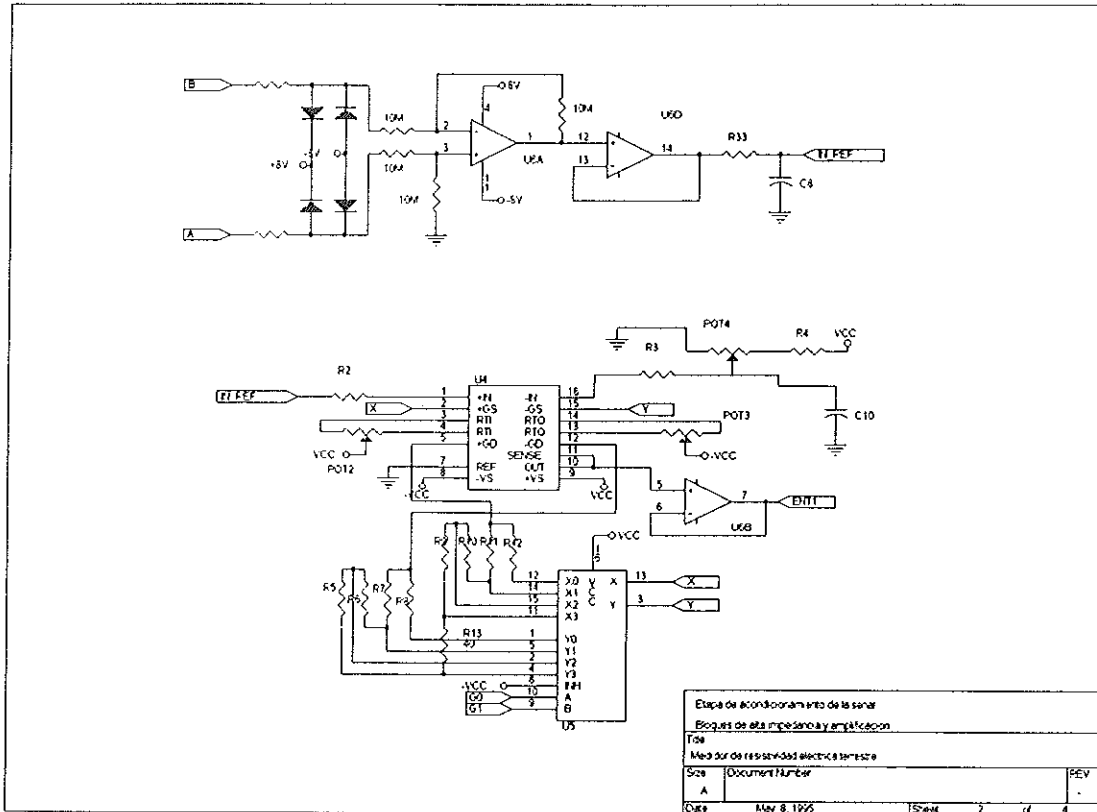
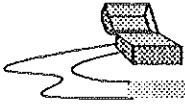


Figura D.2. Etapa de acondicionamiento de la señal.

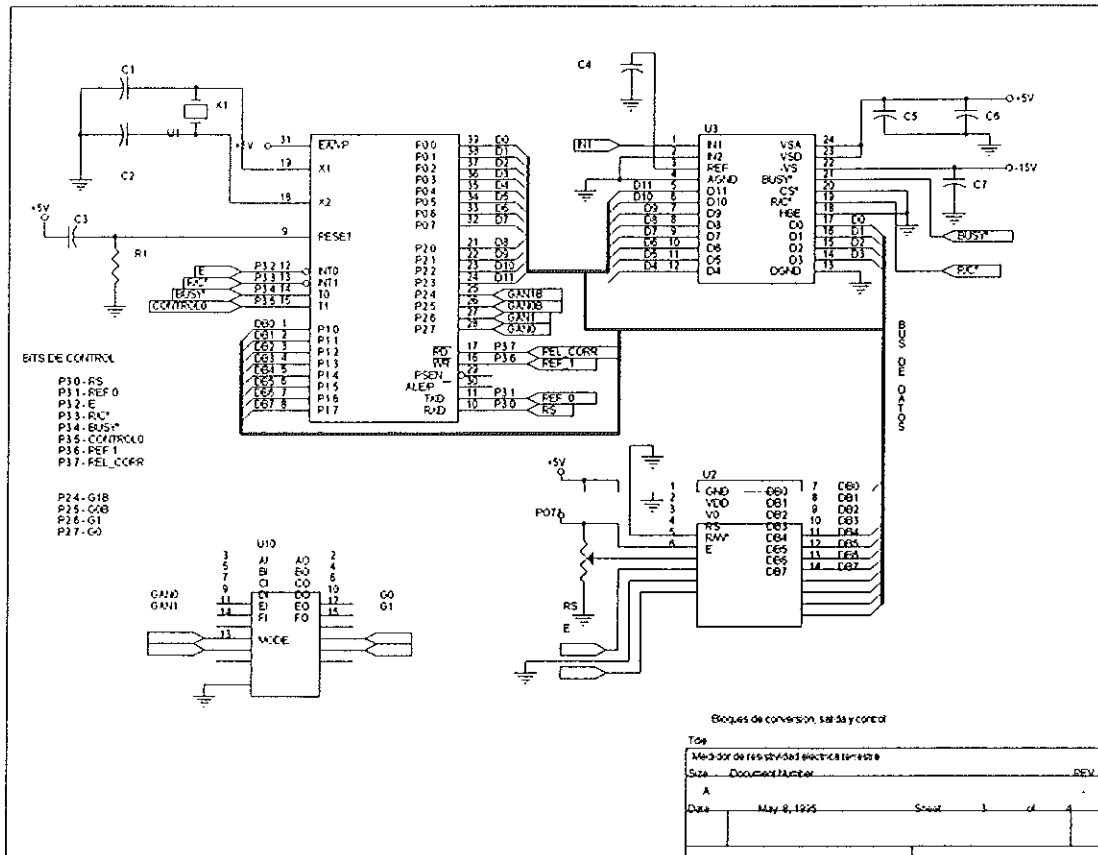
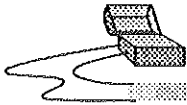


Figura D.3 Bloque de digital.

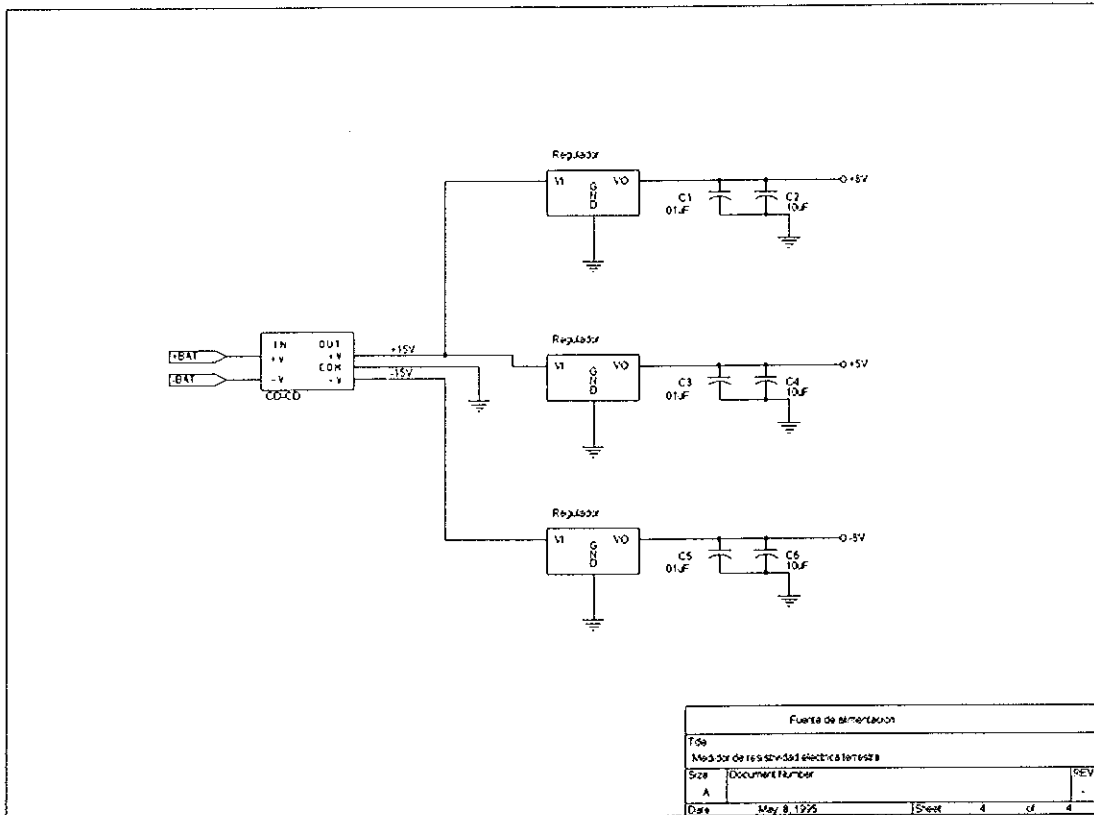
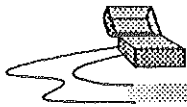


Figura D.4. Fuente de alimentación.



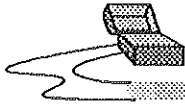
*Apéndice E:*

*Mascarillas para  
el circuito impreso*

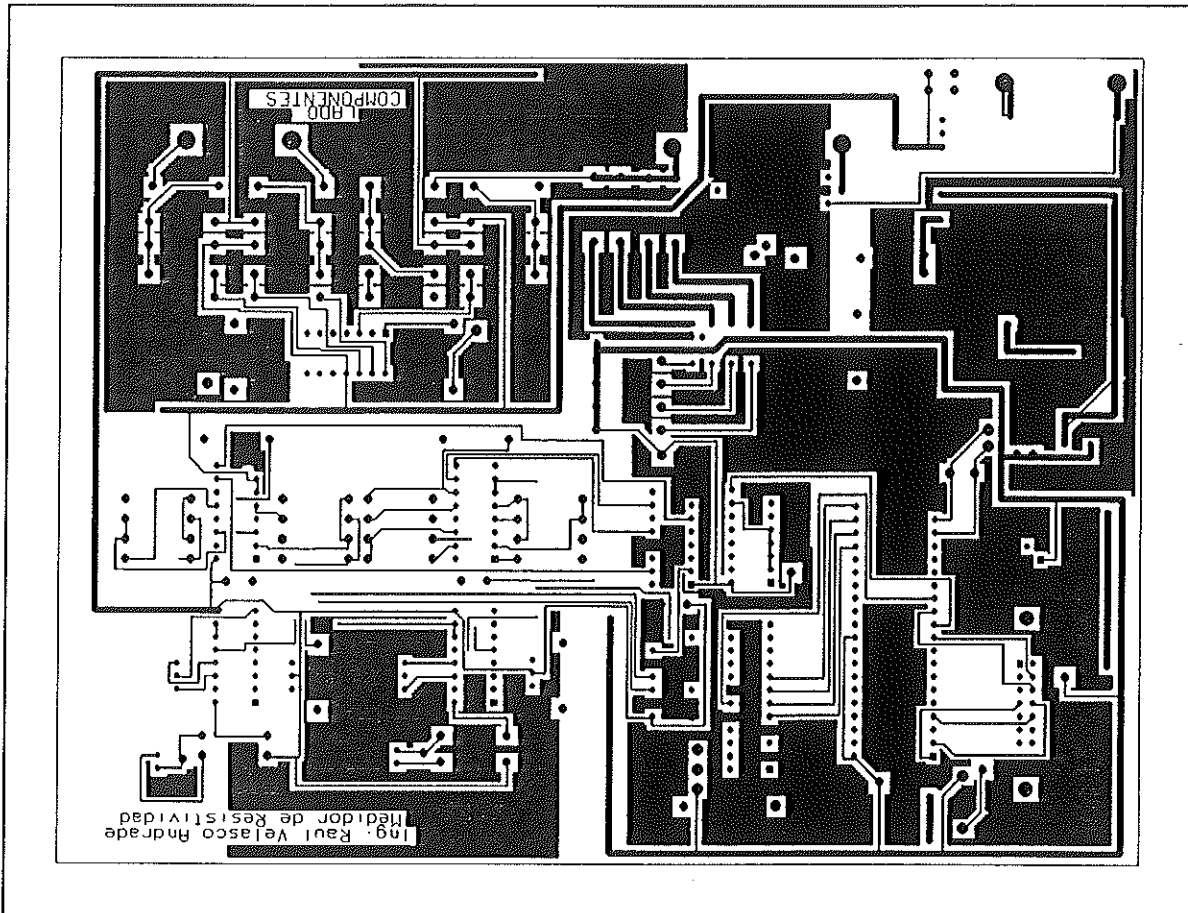


**Equipo de Medición de  
Resistividad Terrestre**

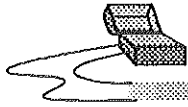
**Circuito  
impreso**



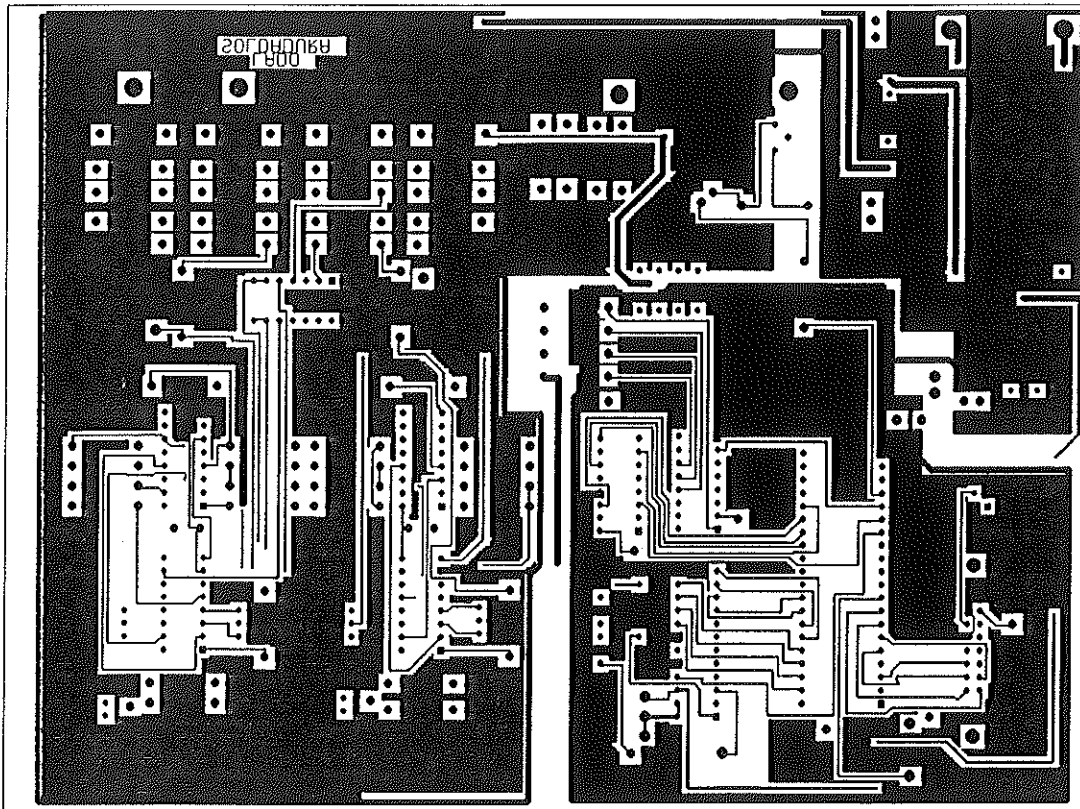
Lado de componentes.



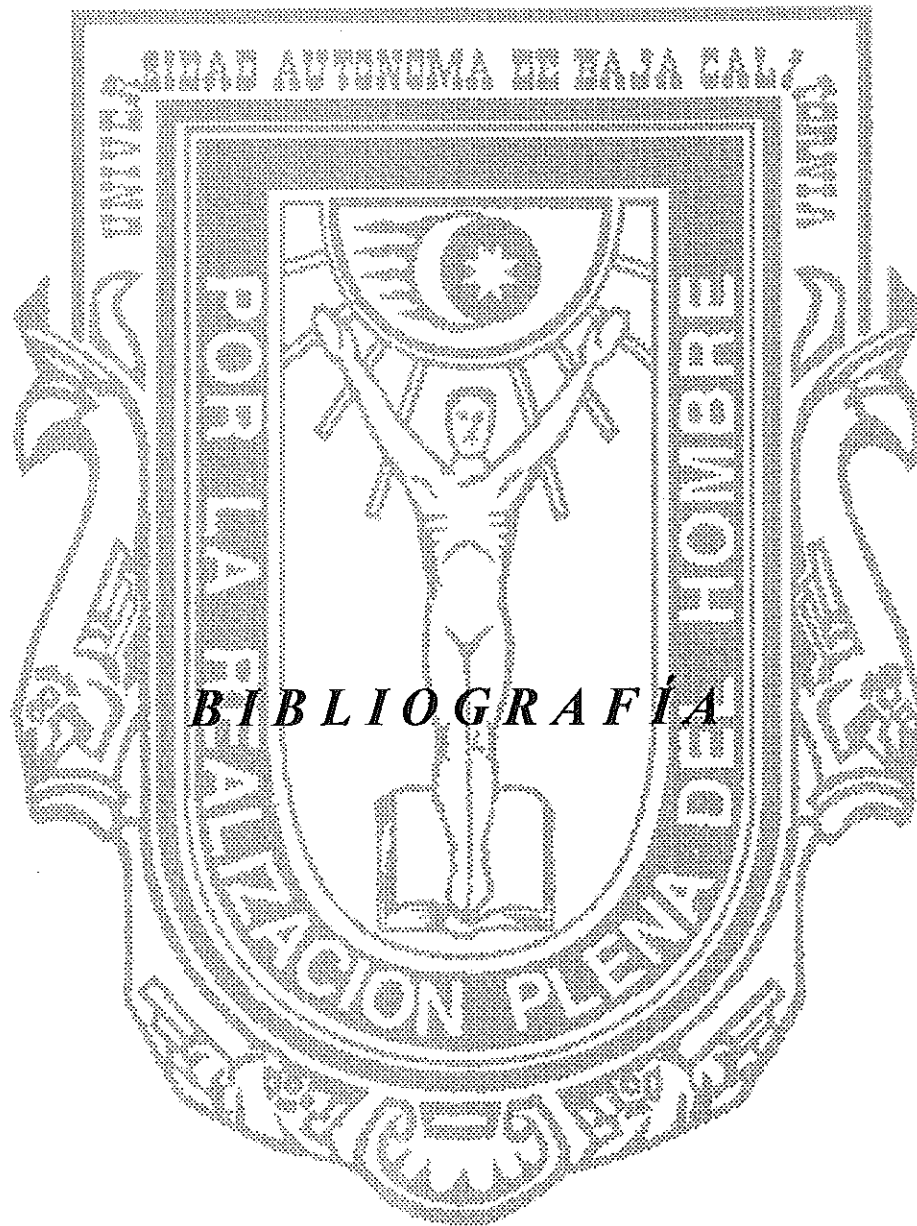
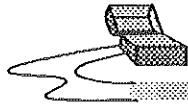
El diagrama está reducido al 61.3% de su tamaño real.



Lado de soldadura.



El diagrama está reducido al 61.3% de su tamaño real.



Equipo de Medición de  
Resistividad Terrestre

Bibliografía



**Rufus P. Turner.**

GRAN DICCIONARIO ILUSTRADO DE ELECTRÓNICA.  
C.E.C.S.A  
Tomos 1 y 2

**H. Robert Burger.**

EXPLORATION GEOPHYSICS OF THE SHALLOW  
SUBSURFACE.  
Prentice Hall, N. J. 1992

**Milton B. Dobrin.**

INTRODUCCIÓN A LA PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.  
Ediciones Omega, S. A.. Barcelona 1975

**C. A. Heiland.**

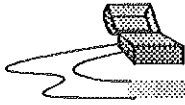
GEOPHYSICAL EXPLORATION  
Prentice Hall, New York 1951.

\*

THE ILLUSTRATED SCIENCE AND INVENTION  
ENCYCLOPEDIA.  
H.S. Stuttman Co., Inc. *publishers*, New York.  
Tomo 9, *gear / inductance*.

**Stanley Wolf.**

GUÍA PARA MEDICIONES ELECTRÓNICAS Y  
PRÁCTICAS DE LABORATORIO.  
Prentice Hall International.



**John P. Bentley.**

SISTEMAS DE MEDICIÓN. PRINCIPIOS Y APLICACIONES.  
C.E.C.S.A, México 1993  
Segunda edición (Primera en español).

\*

DICCIONARIO DE ELECTRÓNICA/INFORMÁTICA.  
NUEVAS TECNOLOGÍAS  
Obis - Marcombo, España 1986.

\*

80C51 - BASED 8-BIT MICROCONTROLLERS. DATA HANDBOOK.  
Signetics.  
Phillips Semiconductors.

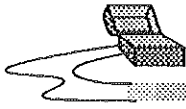
**P. V. Sharma**

GEOPHYSICAL METHODS IN GEOLOGY  
Esevier, New York, NY, 1986  
Second Edition

**Robert Celota/ Judah Levine**  
Editors in chief

METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS.  
'ELECTRICAL METHODS IN GEOPHYSICAL PROSPECTING' - STANLEY H. WARD.  
Academic Press, Inc. USA 1987  
volumen 24, parte b.

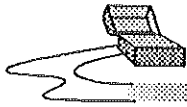




## *Índice por temas.*

Presentación.....	7
Introducción.....	9
Parte Primera: <i>El Área de Estudio</i> .....	15
I. Geofísica.....	17
II. Métodos de exploración geofísica.....	19
III. Método de resistividad.....	22
Parte Segunda: <i>El Diseño</i> .....	26
IV. Planteamiento de la solución.....	28
IV.1. Planteamiento matemático.....	29
IV.2. Planteamiento del sistema de medición.....	33





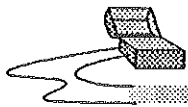
V. Estructura y funcionamiento.....	34
V.1. Estructura.....	35
V.2. Operación y funcionamiento.....	36
Parte Tercera: <i>El Instrumento</i> .....	40
VI. El Circuito.....	42
VII. Pruebas de laboratorio.....	46
VIII. Características eléctricas.....	60
Comentarios, aportaciones y conclusiones.....	65
Apéndices.....	69
Apéndice A: Glosario.....	70
Apéndice B: Manual de operación .....	73
Apéndice C: Programa de control.....	76
Apéndice D: Diagramas esquemáticos.....	88
Apéndice E: Mascarillas para el circuito impreso.....	93
Bibliografía.....	96
Índice temático.....	100
Índice de ilustraciones.....	102
Índice de tablas.....	103



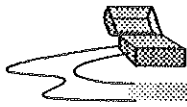
## *ÍNDICE DE ILUSTRACIONES*

i.1	Objetivo de un sistema de medición.....	9
i.2	Estructura de un sistema de medición.....	10
i.3	Par trenzado.....	12
i.4	Amplificador diferencial.....	13
3.1	La resistencia de un material.....	23
3.2	Electrodos para medición.....	24
3.3	Arreglos comúnmente empleados.....	25
4.1	Diagrama de medición.....	29
4.2	Esquema del circuito de medición.....	30
4.3	Diagrama esquemático del circuito de medición.....	30





4.1 Diagrama de medición .....	29
4.2 Esquema del circuito de medición.....	30
4.3 Diagrama esquemático del circuito de medición.....	30
4.4 La corriente suministrada por las baterías tiene diferentes trayectorias en el terreno y solo una parte fluye entre los electrodos .....	32
4.5 Diagrama a bloques del sistema de medición requerido .....	33
5.1 Diagrama a bloques de la estructura del equipo .....	35
5.2 Esquema a bloques de la operación del instrumento .....	37
6.1 Diagrama a bloques de las diferentes etapas del sistema de medición.....	42
6.2 Diagrama del bloque de señales analógicas.....	43
6.3 Etapa de entrada con alta impedancia.....	44
6.4 Etapas de amplificación y conversión analógica a digital.....	45
7.1 Circuitos de prueba .....	47
7.2 Circuito de prueba.....	52
7.3 Circuito de prueba.....	56
B.1 Vista de la carátula del equipo de medición.....	74
B.2 Colocación de los conectores para los cables de los electrodos como para el paquete de baterías.....	74
C.1 Diagrama de flujo del programa de control.....	77
C.2 Diagrama de flujo ...(continuación).....	78
C.3 Diagrama de flujo ...(continuación).....	79
C.4 Diagrama de flujo ...(continuación).....	80
C.5 Diagrama de flujo ...(continuación).....	81
C.6 Diagrama de flujo ...(continuación).....	82
D.1 Bloque de señales analógicas.....	89
D.2 Etapa de acondicionamiento de señal.....	90
D.3 Bloque digital.....	91
D.4 Fuente de alimentación.....	92
E.1 Lado de componentes.....	94
E.2 Lado de soldadura.....	95



## *ÍNDICE DE TABLAS*

Tabla 7.1 Valores obtenidos del circuito de la figura 7.2.....	53
Tabla 7.2 Resultados obtenidos en el circuito de la figura 7.3.....	56