

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE ELECTRODOS PARA LA EJECUCION DE SONDEOS ELECTRICOS TIPO SCHLUMBERGER, WENNER Y WENNER OFFSET**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Para optar el Título de:  
Ingeniero Geofísico  
Por el Br. Landaeta A. Peterson G.

Caracas, Octubre de 2001

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE ELECTRODOS PARA LA EJECUCION DE SONDEOS ELECTRICOS TIPO SCHLUMBERGER, WENNER Y WENNER OFFSET**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Eugenio Gallovich  
TUTOR INDUSTRIAL: Lic. Alfonso Benavides

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Para optar el Título de:  
Ingeniero Geofísico  
Por el Br. Landaeta A. Peterson G.

Caracas, Octubre de 2001

## DEDICATORIA

A **Dios**, quien siempre me iluminó en el logro de esta meta.

A mis queridos padres **Ara** y **Pedro**, que siempre me han brindado sus cariños, apoyos, confianzas. Han sido el pilar fundamental de mi vida. Los quiero mucho.

A mi bella esposa **Xiomara**, por su gran amor y por esa manera tan especial de comprenderme. Por apoyarme en los momentos difíciles y por disfrutar mis momentos felices. Por motivarme a seguir estudiando. Por iluminar mi vida. Y por muchas otras cosas. Te amo mucho mi amor, gracias por ser como eres.

A mi segunda madre **Mamerta**, a mi gran amiga **Chela** y a mi sobrino consentido **Jonathan**, que me brindaron sus cariños y una amistad incondicional.

A mis hermanas **Wicelys** y **Maricelys**, por apoyarme durante mis estudios y por compartir mis alegrías.

A mi abuela **Flor** por su amor y por sus palabras de aliento que me ayudaron obtener este triunfo.

A mi **familia Mata** de Araya, en especial a mi pana Cecilio.

A mis tías **Teresa L.**, **Nena** y **Teresa A.** y a mis primos **Merverling**, **Maggi** e **Ingo**, por preocuparse de que terminará satisfactoriamente esta meta.

A las memorias de mis abuelos **Josefina** y **Luís**, y de mi primo **Irwing**, por compartir sus cariños y alegrías. Que Dios los tengan en la gloria.

A mis ahijados **Luismerly**, **Stephany** y **Johnaiquel**.

A todo **mis amigos** que me apoyaron: Lía, Luisito, Ana, Armando, Yasmín, Rubí, José, Carolina, Julio, Emilia, Coromoto, Zory, Nena, Carlos, Dalice, Demises, Liz, Mirella, José A., Fabiola, Leo, Antonio y Asmery.

## AGRADECIMIENTOS

A mi tutor académico, prof. **Eugenio Gallovich**, por su orientación y apoyo durante la realización del presente trabajo.

A mi tutor industrial, prof. **Alfonso Benavides**, por haber confiado en mí, por su gran colaboración y por sus grandes aportes que me orientaron a salir con éxito en la culminación del trabajo. Mil gracias.

A mi compañero **Ramón Cruz** de la escuela de física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, por aportar sus conocimientos en la realización del dispositivo electrónico BLC-6.

Al prof. **Rommel Whilchy**, por apoyarme y por aceptar tan amablemente en acompañarme en calidad de Tutor el día de la defensa del presente trabajo.

A mis panas que siempre me apoyaron en la culminación de mis estudios, además me ayudaron incondicionalmente: **M<sup>a</sup> Alejandra, Frankling, Iris, Javier, Liz, Alex. Mou y Carlitos**. De verdad amigos muchas gracias.

También a **mis compañeros**: Luís, Lizcar, Saba, Moralis, Janckarlos, Antonio, Cheremos, Atiria, Roberto, Marcos, Birbe, Angel, Joel, Eros, Mariela, Eskeila, Ramón, Jeison, Roger, Juan y Natalía.

A los profesores **Ronny, Juan J., Cavada, y Figueroa**. Por cada unos de sus conocimientos impartidos y consejos.

Y sobre todo a la gran casa de estudio, mi gran **Universidad Central de Venezuela** “La casa que vence la sombra”.

“ Todo hombre que piense con seriedad en que el mundo tiene que progresar, en que el progreso se ha hecho a base de heregías, en que la civilización se ha hecho con gente que ha encontrado nuevas verdades o que las han buscado desesperadamente, tiene que admitir que el gran instrumento de cambio y de progreso del hombre es el saber, no es el puño, no es el grito, no es el golpe, no es el arma, es la cabeza, es el saber, es el conocimiento el que ha hecho que el mundo se transforme y es esto y no lo otro lo que ha estado detrás de todas las grandes revoluciones”

**Arturo Uslar Pietri**

**Landaeta A. Peterson G.**

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE ELECTRODOS PARA LA EJECUCION DE SONDEOS ELECTRICOS TIPO SCHLUMBERGER, WENNER Y WENNER OFFSET**

**Tutor Académico: Prof. Eugenio Gallovich. Tutor Industrial: Lic. Alfonso Benavides. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2001, 148 p.**

**Palabras Claves:** Sondeos, Resistividad, Wenner, Schlumberger, Calicata, Tomografía.

**Resumen.** El presente trabajo tiene como propósito el diseño, desarrollo e implementación de una plataforma amigable de control PAR-UCV para ser utilizado en una computadora portátil, con arquitectura abierta que permita la optimización y configuración de acuerdo a las necesidades del operador. Y un dispositivo electrónico BLC-6, que conformen un sistema multielectrónico que permita la ejecución de sondeos eléctricos verticales (SEV) utilizando configuraciones Wenner, Wenner offset y Schlumberger.

Con el sistema multielectrónico se reducirá la mano de obra, ya que el equipo podrá ser manipulado por pocas personas. Se incrementará la productividad, debido que se podrán realizar mas levantamientos en menos tiempo que con el método convencional. Se eliminarán los errores en los resultados que se obtengan, debido a equivocaciones al conectar los electrodos, obteniéndose datos de mayor calidad. Se tendrá mayor control del levantamiento.

## INDICE GENERAL

• Dedicatoria.	iii
• Agradecimientos.	iv
• Resumen.	v
• Indice general.	vi
• Indice de tablas.	ix
• Indice de figuras.	x

### CAPITULO 1

Introducción.	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Objetivos.	2
1.3 Antecedentes de la investigación.	3

### CAPITULO 2

Propiedades eléctricas de los materiales geológicos.	5
2.1 Conducción electrolítica en roca.	5
2.1.1 Parámetros macroscópicos.	6
2.1.2 Tectura, porosidad y resistividad.	8
2.1.3 Presencia de arcilla.	8
2.1.4 Saturación de fluidos y permeabilidad.	11
2.2 Procesos de conducción eléctrica en minerales.	12
2.2.1 Dieléctricos.	12
2.2.2 Semiconductores.	12
2.2.3 Metales.	15
2.3 Conducción eléctrica en roca.	16

### CAPITULO 3

Conceptos y dispositivos fundamentales en la prospección eléctrica Por corriente continua.	20
3.1 Introducción.	20

3.2	Ecuaciones elementales.	21
3.3	Efecto de medios inhomogéneos.	26
3.3.1	Distorsión del flujo de corriente en un plano de interfase.	26
3.3.2	Distorsión del potencial en un plano de interfase.	27
3.3.3	Superficie potencial debido a capas horizontales.	30
3.3.4	Potencial debido a esfera enterrada.	32
3.4	Resistividad aparente.	34
3.5	Arreglos electródicos.	35
3.6	Sondeos eléctricos verticales(SEV).	48
3.7	Medios estratificados.	53
3.8	Morfología de las curvas del SEV.	60
3.9	Parámetro y ecuaciones de Dar Zarrouk(Ecuaciones de Maillet).	63
3.10	Levantamiento en campo utilizando SEV.	67
3.11	Calicatas eléctricas.	74
3.12	Tomografías 2-D eléctricas.	77
3.13	Aplicaciones de las técnicas de resistividad.	83

## **CAPITULO 4**

	Diseño del programa PAR-UCV.	85
4.1	LabVIEW, programación gráfica.	85
4.1.1	Estructuras.	88
4.1.2	Tipos de datos y conversión.	91
4.1.3	Archivos.	92
4.1.4	Puerto serial.	92
4.2	Descripción general del programa.	96
4.2.1	Descripción del diagrama del programa PAR-UCV.	97
4.3	Descripción de los subprogramas del programa PAR-UCV.	98
4.3.1	Programa Arreglo Schlumberger.	99
4.3.1.1	Descripción del panel frontal.	100
4.3.1.2	Descripción del diagrama.	103
4.3.2	Programa Arreglo Wenner.	107
4.3.2.1	Descripción del panel frontal.	108



4.3.2.2 Descripción del diagrama.	110
4.3.3 Programa Arreglo Wenner Offset.	115
4.3.3.1 Descripción del panel frontal.	116
4.3.3.2 Descripción del diagrama.	119
4.3.4 Programa Calicata-Tomografía2D.	124
4.3.4.1 Descripción del panel frontal.	125
4.3.4.2 descripción del diagrama.	127

## **CAPITULO 5**

Diseño del dispositivo electrónico BLC-6.	131
5.1 Descripción del dispositivo electrónico BLC-6.	132
5.2 Constitución del sistema multielectrónico.	134
5.3 Pruebas realizadas con el dispositivo electrónico BLC-6 y el programa PAR-UCV.	135

## **CAPITULO 6**

Conclusiones y recomendaciones.	138
6.1 Conclusiones.	138
6.2 Recomendaciones.	139
• Referencias.	140

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1, Diferentes valores del factor geométrico K, para algunos arreglos electródicos.	47
Tabla 2, Código (número binario) utilizado para la enumeración de los electrodos.	134
Tabla 3, Prueba del dispositivo <b>BLC-6</b> , utilizando una fuente de 400 voltios.	135
Tabla 4, Prueba del dispositivo <b>BLC-6</b> , utilizando una fuente de 600 voltios.	135
Tabla 5, Prueba del dispositivo <b>BLC-6</b> , utilizando una fuente de 800 voltios	135

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1,	Diferentes texturas en rocas.	7
Figura 2.2,	Idealización de la doble capa de cationes adyacente a una partícula de arcilla y en una superficie mineral diferente. En este último caso, el efecto por impurezas paramagnéticas y campo eléctricos.	9
Figura 2.3,	Diagramas de banda de energías de sólidos metálicos (a) y semiconductores (b).	14
Figura 2.4,	Rasgos típicos de resistividades para rocas y suelos.	18
Figura 3.1,	Fuente de corriente en la superficie de un medio homogéneo	20
Figura 3.2,	Vista cenital de un arreglo de electrodos genérico.	26
Figura 3.3,	Distorsión del flujo de corriente en un plano limite donde $\rho_1 < \rho_2$ .	27
Figura 3.4,	Distorsión de las líneas equipotenciales y de flujos de corriente en un límite entre dos medios de diferentes resistividad.	28
Figura 3.5,	Disposición general de la fuente e imágenes.	30
Figura 3.6,	Esfera conductiva enterrada en campo uniforme	30
Figura 3.7,	Líneas equipotenciales y de flujo de corriente de una esfera conductora enterrada.	34
Figura 3.8,	Esquema de algunos arreglos electródicos mas usados.	38
Figura 3.9,	Arreglo Wenner Offset	39
Figura 3.10,	Disposición de los electrodos con Wenner offset y las resistencias que se determinan.	40
Figura 3.11,	Efecto del cambio de espaciamiento MN al realizarun SEV con arreglo Schlumberger.	42

Figura 3.12,	Diferentes tipos de arreglos dipolares y nomenclatura asociada a cada uno.	45
Figura 3.13,	Determinación de la densidad de corriente en un semiespacio homogéneo.	50
Figura 3.14,	Corte geoelectrico estratificado.	53
Figura 3.15,	Cortes de dos capas (H, K, Q, A)	55
Figura 3.16,	Cortes de tres capas.	57
Figura 3.17,	Sección geoelectrica unitaria.	64
Figura 3.18,	Calicata Wenner a través un contacto vertical.	76
Figura 3.19,	(a)Construcción de una pseudosección utilizando arreglo Dipolo-Dipolo. (b)Construcción de una pseudosección utilizando arreglo Wenner.	78
Figura 3.20,	Discretización de la sección 2-D y las relaciones de un bloque i, j y sus vecinos.	81
Figura 4.1,	(a)Panel frontal del programa IIR Filter Desing. vi. (b)diagrama del programa IIR Filter Desing. vi.	87
Figura 4.2,	Icono Serial Port Init y sus conexiones.	93
Figura 4.3,	Ejemplo de la configuración del puerto serial	95
Figura 4.4,	Panel frontal del programa PAR-UCV.	96
Figura 4.5,	Diagrama principal del programa PAR-UCV.	97
Figura 4.6,	Las diferentes secuencias de la estructura <i>sequence</i> .	98
Figura 4.7,	Panel frontal del programa Arreglo schlumberger.	99
Figura 4.8,	Secuencia 0 de la estructura <i>sequence</i> .	103
Figura 4.9,	Secuencia 1, ventana 0.	104
Figura 4.10,	Secuencia 1, ventana 1.	105
Figura 4.11,	Secuencia 1, ventana 2.	106
Figura 4.12,	Panel frontal del Arreglo Wenner.	107
Figura 4.13,	Estructura <i>sequence</i> , secuencia 0.	111
Figura 4.14,	Secuencia 1, ventana 0.	112

Figura 4.15,	Secuencia 1, ventana 1.	113
Figura 4.16,	Secuencia 1, ventana 2.	114
Figura 4.17,	Panel frontal.	115
Figura 4.18,	Panel frontal del graficador.	116
Figura 4.19,	Estructura <i>sequence</i> , ventana 0.	120
Figura 4.20,	Secuencia 1, ventana 0.	121
Figura 4.21,	Secuencia 1, ventana 1.	122
Figura 4.22,	Secuencia 1, ventana 2.	123
Figura 4.23,	Panel frontal	124
Figura 4.24,	Estructura <i>sequence</i> , secuencia 0.	128
Figura 4.25,	Secuencia 1,ventana 0.	129
Figura 4.26,	Secuencia 1, ventana 1.	130
Figura 5.1,	Diagrama circuital del dispositivo electrónico BLC-6.	131
Figura 5.2,	Diagrama de bloque del dispositivo electrónico BLC-6.	132
Figura 5.3,	Sistema BLC-6 contenido en una tarjeta.	133
Figura 5.4,	Sistema multielectrónico.	135

# **CAPITULO 1**

## **INTRODUCCION**

### **1.1 Introducción:**

Las técnicas de resistividades eléctricas (ER) y polarización inducida (IP) han venido utilizándose durante décadas para la búsqueda de recursos minerales, aguas subterráneas, mapeo litológico a nivel local, y desde una década se han venido implementando para la evaluación de las condiciones del subsuelo en presencia de materiales de desecho y potenciales sustancias contaminantes. Adicionalmente, estas técnicas han sido exitosas para evaluaciones geotécnicas, investigaciones arqueológicas y forenses, abarcando un amplio espectro de aplicaciones con pertinencias social, industrial, históricas y económicas.

Parte de este éxito se debe al desarrollo de herramientas numéricas para el procesamiento de los datos, el cual ha permitido pasar del clásico enfoque de los sondeos eléctricos verticales o a las calicatas eléctricas, o la generación de imágenes tomográficas de resistividades en dos y tres dimensiones. Otro aspecto favorable está relacionado con desarrollo de transmisores y receptores multidipolares, los cuales permiten reducir el número de movilizaciones de las conexiones a los electrodos, reduciendo así el tiempo de adquisición de los datos (Baker, 1983). Este último aspecto es uno de las principales ventajas que presentan las técnicas de ER e IP.

Durante los últimos ocho años, han venido apareciendo versiones comerciales de sistemas lineales de electrodos interconectados por un cableado común, el cual transporta los cuatro cables de los dipolos emisores y receptores y otros adicionales para el control de las conexiones. Estas versiones consisten en cajas negras donde el control está centralizado en una computadora portátil que son utilizados en equipos

de medición de resistividades comunes que no sobrepasan los 250 mW. Estos sistemas (de electrodos inteligentes) comenzaron con la aparición del MTR de la Campus (Canadá), utilizando el equipo Geopulse (125-250 mW). Actualmente la compañía Advance Geosciences (AGI, USA) ofrece un sistema lineal de electrodos, el cual puede ser utilizado con el Sting R1 o el Sting Plus (250 mW). Existen dos versiones europeas de estos arreglos lineales de electrodos: La Casa Sueca ABEM (125 a 250 mW) y la francesa IRIS.

El principal inconveniente es que dichos sistemas multielectródicos son sumamente costosos y están diseñados para equipos específicos, cuyas potencias están muy por debajo de la que se necesitan en zonas tropicales en donde los profundos procesos de meteorización hacen que las coberturas superficiales sean, en promedio, mas conductoras impidiendo la efectiva penetración de la corriente eléctrica y disminuyendo la profundidad efectiva de penetración. Otro aspecto desfavorable es que estos sistemas están limitados en el número de electrodos que pueden manejar.

## **1.2 Objetivos:**

Considerando el nivel que debe tener un trabajo especial de grado (TEG) y teniendo como uno de los objetivos principales generar una contribución del tipo aplicado, la propuesta de trabajo está enfocada hacia el diseño, desarrollo e implementación de:

1. Una plataforma amigable de control utilizando una computadora portátil, con arquitectura abierta que permita su optimización y configuración de acuerdo a las necesidades del operador.
2. Un sistema de electrodo automatizado que permita la ejecución de sondeos eléctricos verticales (SEV) utilizando configuraciones Wenner, Wenner offset y Schlumberger.

### 1.3 Metodología del trabajo.

La metodología se dividió en tres etapas las cuales se describen a continuación:

#### Etapa I, Diseño del programa **PAR-UCV**:

El diseño del programa estuvo basado en la aplicación de un programa bajo el ambiente Windows, por lo que se utilizó el programa LabView® de la casa National Instrument. Este es una programación gráfica que simula en forma virtual equipos de instrumentaciones, tales como voltímetro, amperímetro, osciloscopio, etc.

Primero se diseñó el panel principal del programa **PAR-UCV**, en el cual se puede colocar la identificación completa del SEV, tal como: El nombre del archivo, el nombre del operador, fecha y lugar del SEV, además se puede seleccionar el tipo de arreglo electrónico.

Luego se diseñó los cuatro subprogramas que lo conforman, siendo estos los programas Arreglo Schlumberger, Arreglo Wenner, Arreglo Wenner Offset y por último el programa Calicata-Tomografía 2-D.

#### Etapa II, Diseño del dispositivo electrónico **BLC-6**:

Se construyó un sistema analógico-digital, el cual se conecta al puerto serial de la computadora y es controlado con el programa PAR-UCV.

Para su diseño primero se construyó un diagrama Circuital inicial, el cual se fue modificando a medida que se realizaron las pruebas de ajustes (consumo de corriente, frecuencia de oscilación, velocidad de viaje de los pulsos, respuesta de los reles, etc.).

Una vez que se obtuvo el diagrama circuital final, se procedió a montarse en tarjetas, para reducir al mínimo el tamaño del circuito.

#### Etapa III, Realización de pruebas con el sistema multielectrónico:



En esta etapa se verificó el acoplamiento del programa **PAR-UCV** con el dispositivo electrónico **BLC-6** y se realizaron algunos ajustes.

#### **1.4 Antecedentes de la investigación:**

En el año de 1999, el profesor Alfonso Benavides de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, presentó el trabajo de ascenso titulado: “Desarrollo y aplicación de técnicas de resistividades D.C. en Geofísica somera”. El cual consistió en el desarrollo del equipo receptor, la construcción de una fuente DC simple de 1Kw y un programa basado en la plataforma LabVIEW de modelado directo para ajustar los datos y refinar los modelos generados por el programa Atowen del USGS.

Por lo que el profesor Alfonso Benavides me propuso desarrollar un sistema de automatización de electrodos para realizar sondeos eléctricos, utilizando el programa LabVIEW para obtener una interfaz grafica .

## **CAPITULO 2**

### **PROPIEDADES ELECTRICAS DE LOS MATERIALES GEOLOGICOS**

A diferencia de los parámetros físicos determinados mediante técnicas de gravimetría, sismología y magnetometría, la determinación de los valores de resistividad o su inversa, la conductividad, puede presentarse dentro de un rango que abarca hasta 23 órdenes de magnitud si se consideran especies minerales, rocas y fluidos de manera individual. Cuando se consideran las rocas y sus asociaciones con zonas mineralizadas, ciertos minerales conductores, aislantes o saturados con agua salada, el rango de valores disminuye hasta unos 7 órdenes de magnitud.

En este capítulo introductorio, se presentarán los aspectos fenomenológicos de la conducción eléctrica y los factores que la determinan en los materiales geológicos. Los procesos y magnitudes a los que hará referencia pueden ser válidos desde el orden de decenas de centímetros hasta unos 15 Km. [Benavides, 1999].

#### **2.1 Conducción electrolítica en rocas:**

Los procesos de conducción eléctrica en rocas cercanas a la superficie son principalmente de naturaleza electrolítica, esta se lleva a cabo a través de los sistemas de poros interconectados, fracturas a diversas escalas, intersticios entre granos minerales, fallas, superficies generadas por procesos metamórficos [Ward, 1997]. Los iones y cationes que permiten el establecimiento de corrientes eléctricas son el resultado de la disociación de sales en presencia de agua. Cuanto mayor la cantidad de iones y cationes en solución, mayor puede ser la carga que puede ser movilizadada y la conductividad eléctrica de la solución será mayor. Dentro de un medio geológico, estas soluciones ocuparán total o parcialmente los espacios disponibles, caracterizándola con un valor determinado de conductividad eléctrica  $\sigma$  (unidades de siemens/metro) u su inversa, la resistividad  $\rho$  (unidades ohms.metro).

### 2.1.1 Parámetros Macroscópicos:

Para medios porosos saturados por una solución se tiene experimentalmente una relación potencial entre las resistividades del medio, la solución y la porosidad del primero. La conocida Ley de Archie escrita en su forma general[Archie, 1942] que establece que:

$$F = \frac{r_r}{r_e} = a f^{-m} \quad 2.1$$

Donde **F** es el factor de formación, los subíndices **r** y **e** se refieren a las resistividades de la roca y fluido, respectivamente, **a** y **m** son “constantes” empíricas que caracterizan el medio poroso y **f** es la porosidad: El volumen fraccional de fluido en la roca saturada ( $V_e/V_r$ , donde **V** son los volúmenes respectivos).

La ley de Archie ha sido empleada intensivamente en hidrología y perfilaje de pozos para describir rocas sedimentarias. La constante **m** se denomina factor de cementación y presenta valores entre 1.40 y 2.20 mientras que **a** se conoce como coeficiente de saturación y generalmente sus valores están entre 0.6 y 1.0. A mayor grado de cementación, mayor el valor de **m**. Cuando se describen areniscas, la ecuación 2.1 es denominada fórmula de Humble ( $a = 0.62$ ;  $m = -2.15$ ) mientras que para carbonatos de baja porosidad se emplea la fórmula de Shell ( $a = 1$ ;  $m = 1.87 + 0.019\phi^{-1}$ ).

Suponiendo que el espacio de poros está mayoritariamente interconectado, el volumen de poros  $V_e$  puede reescribirse como el producto de una longitud característica  $L_e$  por la sección transversal característica  $A_e$  del camino electrolítico. Utilizando la definición de porosidad, se puede establecer que:

$$l_e A_e = f V_r \quad 2.2$$

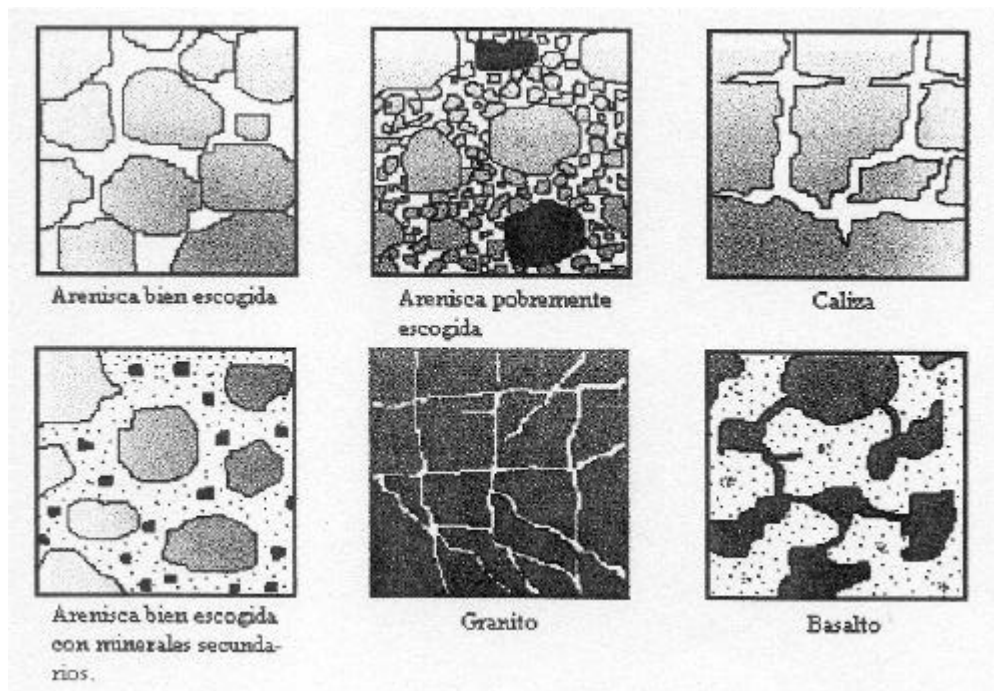
Utilizando la definición de resistencia y suponiendo también que el volumen sólido de la roca es perfectamente aislante, se puede decir que la resistencia de la muestra saturada es:

$$R = \frac{r_e l_e}{A_e} \quad 2.3$$

Las ecuaciones 2.2 y 2.3 permite estimar la longitud efectiva del sistema de poros a partir de parámetros que pueden ser determinados experimentalmente:

$$l_e = \sqrt{\frac{fR V_r}{r_e}} \quad 2.4$$

Si se compara esta longitud característica  $L_e$  con la longitud de la muestra  $L_r$ , se obtiene un coeficiente de tortuosidad del camino de conducción [Pirson, 1958]. La definición de este coeficiente permite una estimación de la geometría del espacio de poro y por ende, de su textura [Bear, 1988].



**Fig.2.1,** Diferentes texturas en rocas.

### 2.1.2 Textura, porosidad y resistividad:

La textura en muestras de rocas está estrechamente relacionada con las características de conducción eléctrica. En líneas generales, se encuentra que:

- Una arenisca con buen escogimiento presenta espacios de poros cercanos al máximo posible, buena interconectividad y exhibe por lo general baja resistividad.

- Una arenisca de baja escogimiento tendrá menor porosidad, menor interconectividad entre poros y ofrecerá mayor resistividad.

- La disolución a lo largo de fracturas en calizas incrementa la porosidad y las posibilidades de interconexión entre espacios de poros, reduciendo la resistividad de la muestra.

- La precipitación de algunos minerales debidos a fenómenos post-diagénesis, metamorfismo o actividad hidrotermal puede reducir la porosidad e incrementar el porcentaje de poros no conectados, aumentando así la resistividad.

- En rocas félsicas faneríticas la conducción estará gobernada principalmente por la conducción electrolítica a lo largo de fisuras, diaclasas y las superficies intergranulares, la porosidad es normalmente baja, de manera que las resistividades son altas.

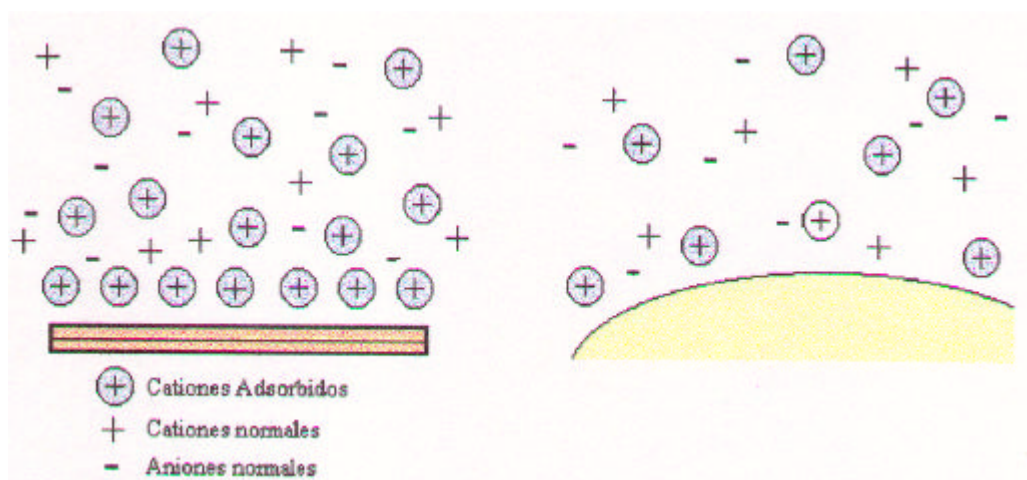
- En rocas máficas afaníticas se presentan espacios de poros no conectados y baja permeabilidad lo que implica que las resistividades serán normalmente altas, aún en presencia de porosidades altas. Esto se restringe a los casos de rocas que no están afectadas por procesos de meteorización incipiente ya que, la presencia de arcillas afecta notablemente los fenómenos de conducción eléctrica.

### 2.1.3 Presencia de Arcillas:

Una partícula de arcilla dentro del espacio de poro actúa como un camino de conducción eléctrica adicional de baja resistividad. Debido a los gradientes de campo eléctrico que presentan este tipo de minerales como consecuencia de su desbalance de carga, se produce una doble capa de cationes de intercambio (fig.2.2). Los cationes

más cercanos son absorbidos a la partícula de arcilla para balancear carga debido a sustituciones en la red y para deshacer enlaces entre los planos de silicatos. Esta primera capa no es uniforme y está bastante ligada a la estructura del mineral arcilla de manera que su movilidad está restringida, denominándose capa fija. A continuación se tiene una difusa de cationes, que interactúan débilmente con la partícula de arcilla y cuya densidad disminuye exponencialmente con la distancia. Estos cationes tienen libertad de moverse en presencia de campos eléctricos externos y contribuyen con la densidad de portadores de carga [Ward, 1997].

De esta manera, se puede decir que existen dos procesos de conducción: La conducción volumétrica debido a los iones en solución y la conducción superficial, debido a la capa difusa de cationes. A pesar de que todos los minerales presentan algo de conducción superficial (por el simple hecho de tener caras o límites en su red cristalina, se presentan gradientes de campo eléctrico que interactúan con iones y cationes en solución), son las arcillas quienes la tienen en grado superlativo.



**Fig. 2.2,** Idealización de la doble capa de cationes adyacente a una partícula de arcilla y en una superficie mineral diferente. En este último caso, el efecto es producido por impurezas paramagnéticas y campos eléctricos.

Las rocas que contienen arcillas presentan un porcentaje importante de conducción superficial, que se incrementa a medida que la conducción a través de poros interconectados disminuye. La meteorización en rocas félsicas transforma los feldespatos y plagioclasas en minerales de arcilla (p.e. caolinita, montmorillonita), las micas, aunque son más resistentes, pueden transformarse en clorita e illita. En rocas máficas, la meteorización resulta efectiva debido a la textura y estilo de fracturamiento. Los minerales ferromagnesianos en rocas máficas son normalmente convertidos en arcillas y óxidos de hierro [Hamblin, 1992]. Los procesos hidrotermales y metamórficos pueden afectar en grado diverso la textura, mineralogía y propiedades eléctricas de las rocas, pueden producir nuevos ensamblajes minerales (p.e. clorita, serpentina, talco) e importantes cristalizaciones de sílice, sulfuros y minerales metálicos transportados por fluidos a altas temperaturas [Ward, 1997].

En términos cuantitativos, la conductividad total de una roca viene dada por las contribuciones electrolítica o normal  $\mathbf{s}_n$  y la conductividad superficial  $\mathbf{s}_s$ :

$$\mathbf{s}_r = \mathbf{s}_n + \mathbf{s}_s \quad 2.5$$

Para una roca con arcilla en su espacio de poro, la resistividad viene dada por la siguiente ecuación [Waxman y Smits, 1968]:

$$\mathbf{r}_r = \frac{\mathbf{r}_w F_T}{1 + \mathbf{r}_w BQ} \quad 2.6$$

Donde  $\mathbf{r}_w$  es la resistividad del fluido en los poros,  $\mathbf{B}$  es un parámetro relacionado con la movilidad de los cationes de intercambio,  $\mathbf{Q}$  es la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla presente y  $\mathbf{F}_T$  es el factor de formación real de la roca.

#### 2.1.4 Saturación de fluidos y permeabilidad:

La saturación viene dada por la razón entre el volumen de fluido en el espacio de poro y el volumen de poro total. Normalmente, la resistividad de una roca varía inversamente con la saturación del fluido. La relación empírica que la describe se conoce como ecuación de saturación de Archie:

$$S_w^n = \frac{a r_w}{f^m r_r} \quad 2.7$$

Siendo **n** el exponente de saturación, con un valor cercano a 2. Nótese que si se puede determinar la resistividad del fluido y de la roca y su porosidad (por ejemplo a través de un pozo) y estimando razonablemente las constantes de Archie, es posible estimar el coeficiente de saturación de un acuífero utilizando levantamientos de resistividades.

Por otro lado, los resultados experimentales muestran que para un mismo tipo de roca o sedimento de un área dada, existe una cierta correlación entre porosidad y permeabilidad al fluido. Esto establece la posibilidad de relacionar permeabilidad **k** con la resistividad, ya que estos se relacionan con transporte de fluido (conductividad hidráulica) y el transporte de iones, respectivamente. En perfilaje de pozos se emplea una relación empírica que relaciona saturación y porosidad con permeabilidad [Timur, 1968]:

$$k = \frac{0.136 f^{4.4}}{S_{iw}^2} \quad 2.8$$

Donde **k** se mide en milidarcys, y **Siw** es la saturación irreducible de agua (fracción de agua residual, no extraíble).



También, se han realizado trabajos de sondeos de resistividades conjuntamente con la información de pozos de agua que arrojan correlaciones positivas entre la conductividad hidráulica y la resistividad normalizada del acuífero y la resistencia transversal normalizada con la transmisibilidad del mismo[Yadav y Abolfazli, 1998].

## **2.2 Procesos de conducción eléctrica en minerales:**

Cuando se estudian las propiedades eléctricas de los minerales que constituyen la roca misma, se encuentra que su contribución relativa a la conductividad total de la muestra es pequeña. Esto se debe a que la totalidad de los minerales formadores de roca presentan propiedades dieléctricas o semiconductoras. Si se hace una clasificación general de los procesos que contribuyen a la conducción eléctrica, se puede decir que [Benavides, 1999]:

- La conducción iónica se lleva a cabo a través de electrolitos líquidos (ya tratado en el apartado anterior) o de dieléctricos(que pueden clasificarse como electrolitos sólidos).
- la conducción electrónica se lleva a cabo a través de minerales metálicos y semiconductores.

En lo que resta de este apartado, se describirán las características generales y los minerales más importantes que entran dentro de cada una de estas clasificaciones.

### **2.2.1 Dieléctricos:**

Los minerales dieléctricos en su forma más pura constituyen aislantes debido a las fuertes ligaduras a las que están sometidos los electrones. En algunos casos, los electrones están formando enlaces covalentes y en la mayoría de los minerales, iones de carga residual opuesta forman un enlace iónico. En ambos casos, la alta energía de ligadura hace que la banda de valencia y la conducción estén muy separadas, de manera que aún incrementando la temperatura del mineral, no se logran excitar

suficientes electrones para lograr una conducción apreciable antes de alcanzar el punto de fusión. En los electrolitos sólidos o dieléctricos, no es posible obtener conducción electrónica pero si se puede llegar a tener una débil conducción iónica debida a impurezas o defectos en la red. La migración iónica se puede producir por agitación térmica lo que implica que a mayor temperatura, la disponibilidad de iones móviles  $n_t$  se incrementa. Para una red de  $n$  iones por unidad de volumen se tiene que:

$$n_i = Cn \exp\left(\frac{-E}{KT}\right) \quad 2.9$$

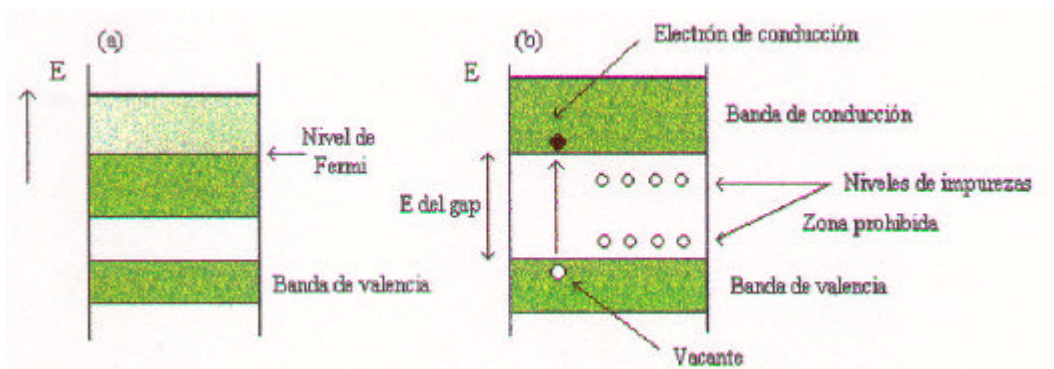
Donde  $E$  es la energía de disociación,  $K$  es la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura absoluta. Los dieléctricos presentan resistividades muy altas, por encima de  $10^7$  ohm-m, en este grupo entran tanto minerales formadores de roca como minerales de mena. Entre ellos se pueden citar [Orellana, 1972]: feldespatos, feldespatoides, hornblenda, micas, olivinos, piroxenos, cuarzo, hematita, halita, anhidrita, blenda, cinabrio, calcita, azufre, fluorita, etc. [Judd y Roy, 1978].

### 2.2.2 Semiconductores:

En este tipo de minerales, las bandas de valencia y conducción están separadas por una zona prohibida o gap del orden de electrovoltios, la banda de valencia está totalmente llena, de manera que a bajas temperaturas y sin exposición a radiación visible, resulta difícil obtener los electrones en la banda de conducción. La cantidad de electrones de conducción del mineral viene también descrita por una relación similar a la ecuación 2.9, pero el argumento de la exponencial vale  $-E/KT$ . La presencia de impurezas dentro de la red de un semiconductor con valencias diferentes a las del elemento constituyente, puede establecer niveles de energía adicionales dentro del gap cercano al borde superior de la banda de valencia o el inferior de la banda de conducción (fig. 2.3). Así, un campo eléctrico externo o la absorción de fotones puede hacer pasar fácilmente un electrón a la banda de conducción o al

nuevo nivel desde la banda de valencia. Para el primer caso, tenemos conducción por electrones y en el segundo conducción por huecos [Eisberg y Resnick, 1988].

La lista de minerales semiconductores es amplia y los valores de resistividad tabulados presentan rangos de variación asociados al gran efecto que produce la presencia de impurezas sobre la conductividad eléctrica. A continuación se presenta una tabla donde se incluyen algunos de los minerales semiconductores agrupados por rango de resistividades [Orellana 1972].



**Fig.2.3,** Diagramas de banda de energías de sólidos metálicos (a) y semiconductores (b). En verde oscuro se representan niveles llenos. Nótese que el gap en un semiconductor es mayor que en un metal.

Resistividad entre  $10^{-6}$  y  $10^{-3} \Omega.m$ :

Pirita, niquelina, pirrotita, silvanita, skutterudita, metacinnabrio, magnetita, esmaltina, covelina, calcosina, calaverita, bornita, arsenopirita.

Resistividad entre  $10^{-3}$  y  $1 \Omega.m$ :

Bornita, calcopirita, casiterita, galena, hollandita, ilmenita, magnetita, manganita, marcasita, molibdenita, oligisto, pirita, pirolusita, psilomelana.

Resistividad entre  $1$  y  $10^3 \Omega.m$ :

Bismutina, cromita, cuprita, franckeita, molibdenita, pirolusita, rutilo, siderita, tetraedita, uranita, wolframita, wurzita.

Se observa que varios minerales están presentes dentro de mas de un rango de resistividades, lo cual habla de las dificultades experimentales que conlleva la escogencia, preparación y medición de las muestras. Cuando se ubican estos minerales dentro del contexto geológico, la situación se hace más compleja ya que estos no se presentan en forma individual. Sus asociaciones, distribución tipo de roca caja y texturas determinan la resistividad conjunta de una mineralización.

Cuando la asociación mineral se presenta diseminada dentro de la roca caja y otros minerales dieléctricos de origen hidrotermal (que por lo general son prácticamente aislantes) la resistividad conjunta de la mineralización será elevada mientras que cuando se presentan texturas dendríticas muy interconectadas, se puede observar una disminución en los valores de resistividad.

### 2.2.3 Metales:

En el caso de minerales metálicos, la banda de conducción está parcialmente llena y la presencia de un campo eléctrico externo puede hacer que una gran densidad de electrones ( del orden de  $10^{22}$ ) puede movilizarse con gran libertad a través de la red, constituyendo una especie de gas electrónico (fig. 2.3). La presencia de defectos y vibraciones en la red e impurezas hace que la resistividad se incrementa con la temperatura, la cual a condiciones normales oscila entre  $10^{-8}$  y  $10^{-7}$   $\Omega$ .m.

Existen pocos minerales que presentan conductividad electrónica tan elevada en la corteza terrestre. Los más característicos son los metales nativos oro, plata, cobre, estaño y platino y uno que otro mineral exótico como la ullmanita (NiSbS). El grafito, a pesar de estar considerado dentro del grupo de los semiconductores, presenta interesantes propiedades eléctricas; su resistividad, paralela a los planos de exfoliación es de l orden de  $10^{-2}$   $\Omega$ .m. Estos valores corresponden a monocristales pero en circunstancias geológicas, su resistividad es del orden de  $5 \times 10^{-4}$   $\Omega$ .m y la

razón entre las resistividades paralelas y perpendiculares a su plano de exfoliación está alrededor de 2. Su presencia en rocas metamórficas reduce notablemente los valores de resistividad y su hábito micáceo le da propiedades eléctricas algo parecidas a las arcillas.

### **2.3 Conducción eléctrica en rocas:**

Cuando nuestro sistema geológico es escalado al nivel de un levantamiento geofísico, las propiedades a determinar representan la respuesta promedio del medio y en ella están incluidos todos los procesos de conducción eléctrica posibles. Aunque la presencia de fluidos determina en sumo grado la conducción presente estarán condicionados por los tipos de materiales, textura, y ambiente geológico-estructural. Esto es particularmente cierto en zonas mineralizadas, donde se presentan asociaciones minerales de muy variadas conductividades y modos de conducción, lo que genera anomalías eléctricas que han servido como herramientas en las actividades de prospección.

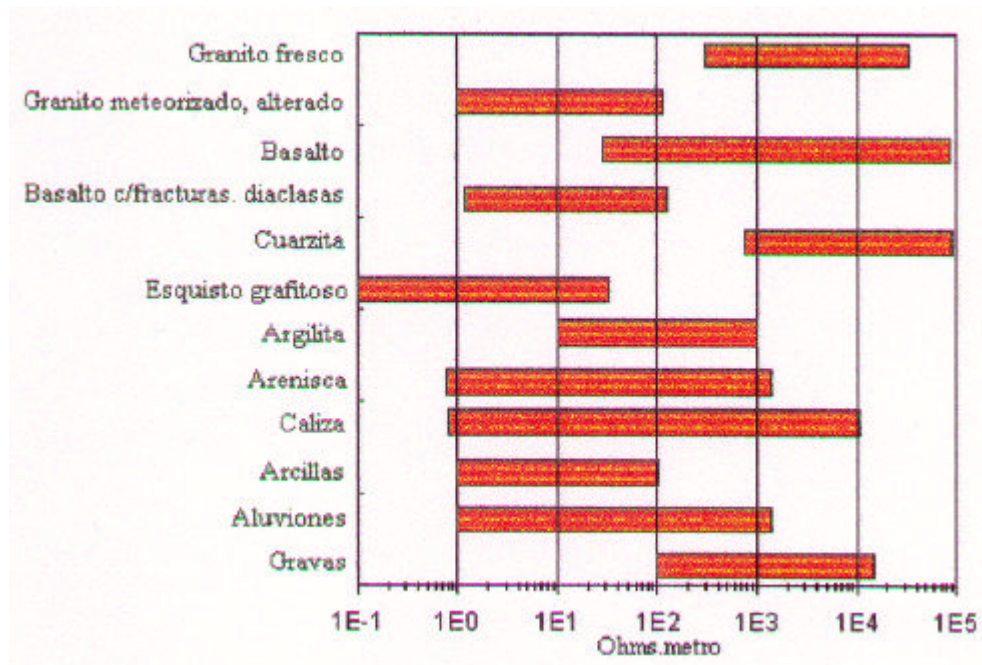
Cuando se tienen rocas que contienen arcillas, minerales conductores y/o buenos semiconductores en forma masiva o dispersa, se presentan otros fenómenos de conducción eléctrica que caracterizan adicionalmente el área de estudio. En presencia de arcillas, el flujo de iones es parcialmente bloqueado debido a la capa difusa de cationes, produciéndose un fenómeno de conducción eléctrica que caracteriza adicionalmente el área de estudio. En presencia de arcillas, el flujo de iones es parcialmente bloqueado debido a la capa difusa de cationes, produciéndose un fenómeno denominado polarización de membrana [Orellana, 1982]. Cuando se tienen cambios en el modo se movilizan las cargas (de electrónico a iónico o viceversa), se presentan dos alternativas de hacer pasar corriente a través de la interfase entre el electrolito y el metal o semiconductor. La alternativa farádica consiste en el intercambio de cargas por medio de reacciones electroquímicas sobre aniones y cationes, lo que produce transferencia de electrones a través de los dos

medio. En la alternativa no-farádica, las cargas no atraviesan la interfase sino que la corriente es establecida mediante la carga y descarga de la doble capa. Esto equivale a decir que el sistema conductor del medio debe expresarse en función de impedancias eléctricas y por lo tanto, se puede observar desfasajes entre la corriente y el voltaje aplicado [Ward, 1997].

Los procesos mencionados previamente dan origen a los métodos de resistividad compleja y polarización inducida y la polarización inducida espectral [Luo y Zang, 1998], los cuales están fuera del alcance de este trabajo.

Debido a los factores hasta ahora citados y los procesos geológicos a los que fueron o están siendo objeto, los valores de resistividad para los diferentes tipos de rocas y suelos muestran rangos de variabilidad de 1 a 3 órdenes de magnitud y con frecuencia se solapan, haciendo muy difícil la identificación del tipo de roca a partir de valores de resistividad que se recopilan de forma estadística y que abarcan muestras de diferentes áreas. La figura 2.4 resume de forma gráfica los resultados de una recopilación estadística de muchos tipos de roca y sedimento obtenidas de diferentes lugares.

Aunque la naturaleza de la roca sea la misma desde el punto de vista composicional y textural, las condiciones locales de contenido de agua y su conductividad, porosidad, metamorfismo o efectos tectónicos influyen fuertemente y amplían el margen de variabilidad cuando se agrupan rocas similares de diferentes sitios. Sin embargo, dentro de la extensión de terreno abarcada por una determinada campaña geofísica, el margen de variación es mucho más reducido y en general, pueden identificarse las rocas por su resistividad aunque pueden originarse algunas sorpresas [Orellana, 1972]. Esto implica la recolección de muestras en afloramientos, determinaciones en pozos cercanos a los sitios de obtención de datos y levantamientos geológicos.



**Fig. 2.4,** Rasgos típicos de resistividades para rocas y suelos.

Los procesos geológicos ejercen un efecto importante en la resistividad característica de las rocas, los cuales en la mayoría de los casos, la reduce. Entre los procesos típicos que provocan una reducción de la resistividad se cuentan [Ward, 1977; Orellana, 1972]:

- Fallamiento
- Cizallamiento
- Disolución
- Alteración de arcillas
- Intrusión de aguas saladas
- Meteorización.

Los procesos que normalmente aumentan la resistividad son:

- Induración

- Precipitación de carbonatos
- Silicificación
- Pérdida de saturación de fluidos

Los procesos de metamorfismo no producen una variación específica de la resistividad, ya que depende del tipo de roca que está siendo sometida a nuevas condiciones fisico-químicas, los nuevos niveles de presión, temperatura y la presencia de fluidos, nuevos elementos en solución y el estilo tectónico particular del área.

En conclusión, la resistividad eléctrica constituye el parámetro físico que abarca el mayor rango de valores posibles en los materiales geológicos, el principal modo de conducción eléctrica es a través de iones y cationes en solución y por lo tanto, los aspectos texturales, estilo de fracturamiento y meteorización resultan importantes en la caracterización eléctrica de una roca. En la mayoría de las rocas, la contribución a la conducción eléctrica por parte de los minerales constituyentes no es significativa pero debe tomarse en consideración en ciertas situaciones (p.e. en zonas que fueron o están siendo sometidas a procesos de alteración hidrotermal, zonas con mineralizaciones masivas o dispersas y algunos tipos de acumulaciones de origen sedimentario) si se desea obtener una interpretación adecuada de los valores de resistividad a la escala de los levantamientos en superficie [Benavides, 1999].

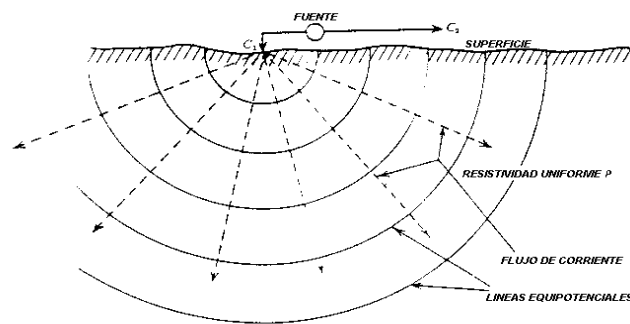


## CAPITULO 3

### CONCEPTOS Y ARREGLOS FUNDAMENTALES EN LA PROSPECCION ELECTRICA POR CORRIENTE CONTINUA

#### 3.1 Introducción:

Todos los métodos de resistividad eléctrica (ER) emplean fuente de corriente artificial, siendo esta de corriente continua o alterna de baja frecuencia, la cual se introduce en el terreno a través de electrodos, creando así un campo eléctrico y se determina una diferencia de potencial entre otros dos puntos (electrodos de potenciales), (fig. 3.1). Las variaciones en la resistencia por el flujo de corriente en profundidad causan variaciones en la diferencia de potencial medida, lo cual se utiliza para inferir de manera cualitativa y cuantitativa la distribución de materiales y estructuras del subsuelo. A continuación se estudiarán los principios básicos de electricidad necesarios para derivar las ecuaciones que servirán de apoyo para el procesamiento y la interpretación de los datos.



**Fig. 3.1,** Fuente de corriente en la superficie de un medio homogéneo.[Telford, 1997]

### 3.2 Ecuaciones elementales:

Consideremos un flujo continuo de corriente a través de un medio homogéneo e isotrópico compuesto por un semiespacio de resistividad  $\rho$ .

Para establecer las leyes del fenómeno considerado, partiremos de las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \mathbf{3.1a} \quad \text{y} \quad \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \mathbf{3.1.b}$$

Donde, por tratarse de un campo estacionario, habrán de anularse las derivadas temporales, y tendremos:

$$\nabla \times E = 0 \quad \mathbf{3.2} \quad \nabla \times H = J \quad \mathbf{3.3}$$

Consideremos la ec.3.2, esta nos dice que el campo eléctrico  $E$  es conservativo e irrotacional, por lo que deriva de un potencial escalar  $V$ . Es decir que:

$$E = -\nabla V \quad \mathbf{3.4}$$

Donde se incluye el signo menos de acuerdo con la convención comúnmente aceptada.

Por otra parte, el flujo de corriente a través de un medio es descrito por el principio de conservación de la carga y es expresado por la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad \mathbf{3.5}$$

Donde  $J$  representa la densidad de corriente ( $A/m^2$ ) y  $q$  es la densidad de carga ( $C/m^3$ ).

En un medio resistividad  $\mathbf{r}$  ( $\Omega \cdot \text{m}$ ), la densidad de corriente y la intensidad de campo eléctrico  $E$  (V/m) están relacionados mediante la ley de Ohm:

$$J = \frac{1}{\mathbf{r}} E \quad 3.6$$

Donde  $1/\mathbf{r}$  es la conductividad  $\mathbf{s}$  (S/m):

$$J = \mathbf{s}E \quad 3.7$$

El campo eléctrico es un gradiente de potencial escalar:

$$E = -\nabla V \quad 3.8$$

Teniéndose entonces:

$$J = -\mathbf{s}\nabla V \quad 3.9$$

Donde para un medio isotrópico,  $\mathbf{r}$  es una función escalar del punto de observación y  $\mathbf{J}$  está en la misma dirección de  $\mathbf{E}$ . Sin embargo, en un medio anisotrópico  $\mathbf{J}$  no está necesariamente orientado en la dirección del campo eléctrico, lo cual implica que la ley de Ohm debe reescribirse. Para un sistema de coordenadas rectangular utilizando el tensor conductividad eléctrica  $\mathbf{s}$  ( $= 1/\rho$ ):

$$J_i = \sum_k \mathbf{s}_k E_k \quad 3.10$$

Donde para cada dirección independiente  $i, k$  ( $=x, y, z$ ) tenemos tres términos a considerar. Las componentes de  $\sigma_{ik}$  se pueden definir como la intensidad de campo eléctrico en la dirección de  $k$  cuando circula una densidad de corriente unitaria en la dirección de  $i$ . Del principio de conservación se tiene que  $\sigma_{ik} = \sigma_{ki}$  de manera que

en un medio anisotrópico la conductividad eléctrica es un tensor simétrico de seis componentes. Sustituyendo la ecuación 3.6 en la 3.5 y considerando una corriente estacionaria obtenemos que:

$$\nabla \cdot (\mathbf{s} \nabla V) = \nabla(\mathbf{s}) \nabla V + \mathbf{s} \nabla^2 V \quad 3.11$$

La cual constituye la ecuación fundamental de la prospección eléctrica con corriente continua. Si el medio es homogéneo,  $\rho$  es independiente de los ejes coordenadas y la ecuación 3.8 se reduce a la llamada ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad 3.12$$

Hay dos condiciones de borde que debe cumplirse en algún contacto entre dos regiones de diferente conductividad, donde pueden ser escrita en la forma siguiente:  $E_{x1} = E_{x2}$  y  $\sigma_1 E_{z1} = \sigma_2 E_{z2}$ , donde “x” y “z” son los ejes tangencial y normal respectivamente, para la interfase  $E_{x1}$ .

Si se introduce una corriente I (A) a un medio homogéneo e infinito en un punto de coordenadas PA, el potencial presentará simetría esférica y por lo tanto, el valor del potencial a cualquier distancia r de PA, será una función que dependerá solamente de r. En coordenadas esféricas la ecuación de Laplace y su solución general se escriben como sigue:

$$\frac{d^2 V}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dV}{dr} = 0 \quad 3.13$$

Multiplicando por  $r^2$  e integrando se obtiene:

$$\frac{dV}{dr} = \frac{C_2}{r^2} \quad 3.14$$

Integrando de nuevo:

$$V(r) = C_1 + \frac{C_2}{r} \quad 3.15$$

Se toma  $C_1 = 0$ , para hacer que el potencial tienda a cero a medida que  $r$  se incrementa. Esta solución demuestra que las superficies equipotenciales son esferas y, por lo tanto, las líneas de campo eléctrico son radiales. Entonces se obtiene que la densidad de corriente a una distancia  $r$  de la fuente se expresa como:

$$J = -\frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{C_2}{r^2} \quad 3.16$$

Integrando ambos miembros de 3.16 sobre la superficie esférica de radio  $r$ , se obtiene que la corriente total  $I$  que se introduce en  $p$  puede escribirse como:

$$I = 4\pi r^2 J = \frac{4\pi}{r} C_2 \quad 3.17$$

De donde se obtiene el valor de  $C_2 = Ip/4\pi$ . Pero considerando un semiespacio infinito, de frontera límite en  $z = 0$  sobre la cual se introduce la corriente  $I$  a través del punto  $P_A$ , la integración de las variables angulares vale  $2\pi$  y la constante  $C_2 = Ip/2\pi$ , ya que para aplicaciones geofísicas se debe restringir. De esta manera, la solución de la ecuación de Laplace (2.9) para el semiespacio, considerado una fuente de corriente sobre la superficie del plano  $z = 0$  tiene la forma:

$$V(r) = \frac{Ir}{2\pi r} \quad 3.18$$

La expresión 3.18 debe extenderse para considerar el efecto total de un arreglo bipolar, debido ha que desde el punto de vista práctico se hace necesario emplear una fuente para establecer un circuito cerrado entonces:

$$V(r) = \frac{Ir}{2\rho} \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad 3.19$$

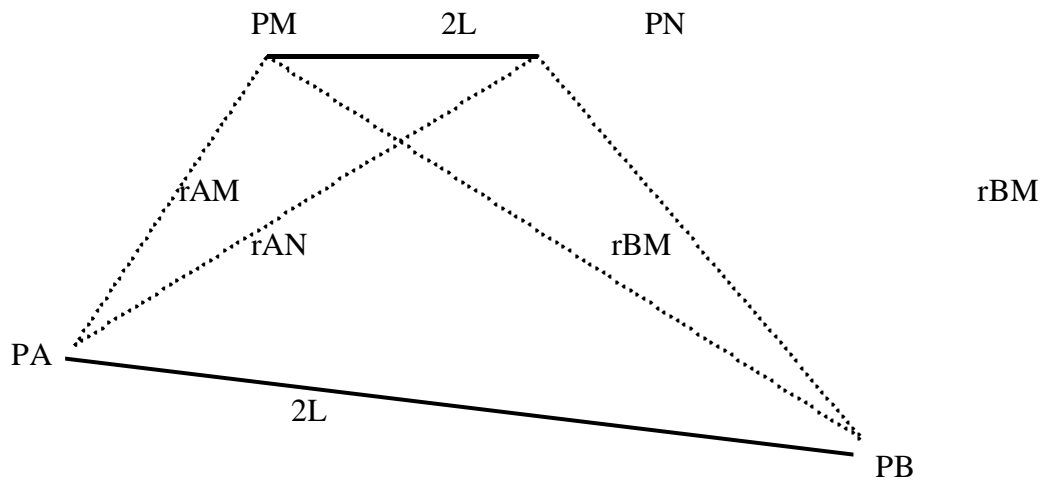
Donde  $r_A$  y  $r_B$  representan las distancias existentes entre el punto de observación  $P_M$  y los puntos donde se introduce ( $P_A$ ) y por donde se extrae ( $P_B$ ) la corriente  $I$ , respectivamente (fig. 3.2). Pero si se utilizan dos puntos de observación  $P_M$  y  $P_N$ , y aplicando la ecuación 3.19, entonces se tendrá que la diferencia de potencial eléctrico entre ellos es:

$$\Delta V = V_{MN} = \frac{Ir}{2\rho} \left[ \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \left( \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \right] \quad 3.20$$

De esta manera, se puede determinar que el valor de la resistividad de un semiespacio homogéneo puede ser determinada con mediciones desde su frontera. En este caso, una determinación de las posiciones relativas de los dipolos de corriente y de potencial eléctrico, el conocimiento de la magnitud de  $I$  y la medición de la diferencia de potencial permite establecer de manera directa la resistividad del semiespacio. Rescribiendo la Ec. 3.20 como:

$$r = K \frac{\Delta V}{I} \quad 3.21$$

Donde  $K$  tiene unidades de longitud y es un parámetro netamente geométrico.



**Fig. 3.2,** Vista cenital de un arreglo de electrodos genérico.

### 3.3 Efecto de medios inhomogéneos:

#### 3.3.1 Distorsión del flujo de corriente en un plano de interfase:

Sean dos medios homogéneos de resistividad  $\rho_1$  y  $\rho_2$  separados por un plano límite. Suponiendo que la densidad de corriente  $J_1$  fluye en el medio (1) e intercepta al plano límite con un ángulo  $\theta_1$ . Para determinar la dirección de la corriente en el medio (2), se utilizan las condiciones de borde dadas, usando la ley de Ohm para expresar el resultado en términos de densidad de corriente. Se obtiene:

$$J_{x1}r_1 = J_{x2}r_2 \quad \text{y} \quad J_{z1} = J_{z2} \quad 3.22$$

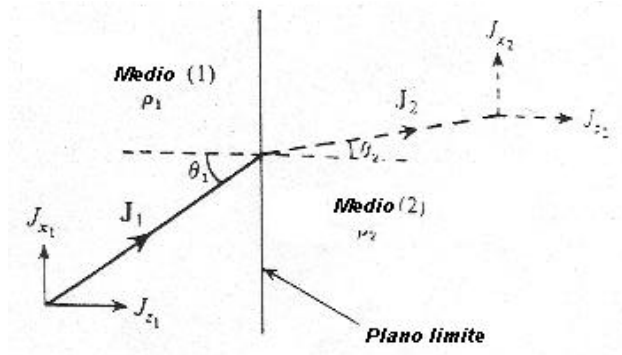
Dividiendo esa expresión se tiene.

$$r_1 \left( \frac{J_{x1}}{J_{z1}} \right) = r_2 \left( \frac{J_{x2}}{J_{z2}} \right) \quad \text{o} \quad r_1 \tan \alpha_1 = r_2 \tan \alpha_2 \quad 3.23$$

Tal que

$$\frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1} = \frac{r_1}{r_2} \quad 3.24$$

Así las líneas de corriente son curvadas en el cruce con el plano limite. Si  $\rho_1 < \rho_2$ , ellas serán curvadas hacia la normal y viceversa, (Fig.3.3).



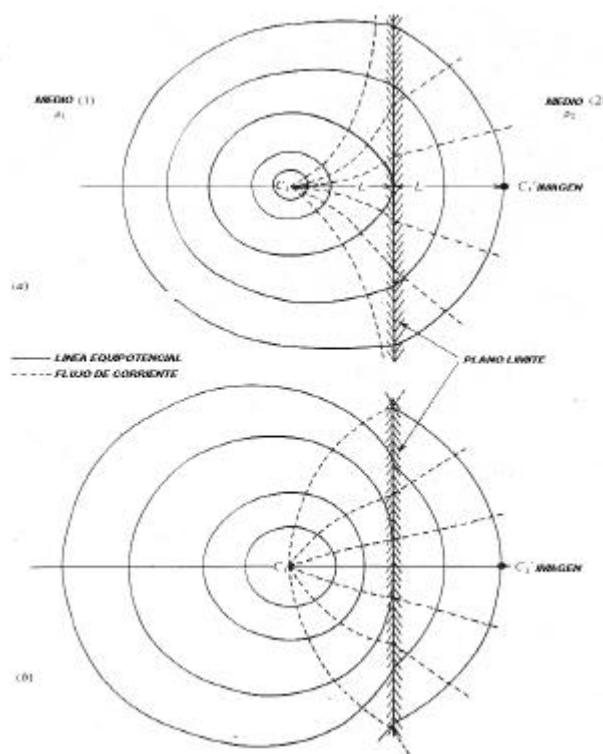
**Fig. 3.3,** Distorsión del flujo de corriente en un plano límite donde  $\rho_1 < \rho_2$ . [Telford, 1997]



### 3.3.2 Distorsión del potencial en un plano de interfase:

Claramente si la corriente es distorsionada al pasar de un medio de una resistividad a otro, las líneas equipotenciales también se distorsionaran. Es posible determinar el campo potencial matemáticamente resolviendo la ecuación de Laplace para unas condiciones de limite apropiada o integrándola directamente. Ambos métodos requieren de considerable matemática. Mucho mas sencillo es emplear imágenes eléctricas con analogía óptica.

La analogía entre la situación eléctrica y óptica es basada en que la densidad de corriente semeja la intensidad del rayo de luz, ya que decrece con el inverso del cuadrado de la distancia desde un fuente puntual en un medio de resistividad  $\rho_1$ ,



**Figura 3.4,** Distorsión de las líneas equipotenciales y de flujos de corriente en un limite entre dos medios de diferentes resistividad.[Telford, 1997]

separado de un medio adyacente  $\rho_2$ , por un plano limite.

En óptica el caso análogo podría ser, una fuente puntual de luz en un medio separado de otro por un espejo semitransparente teniendo coeficientes de reflexión y de transmisión  $K$  y  $1-K$ . Entonces la intensidad de luz en un punto en el primer medio es

en parte debido al punto fuente y a su imagen en el segundo medio, el ultimo efecto disminuye por reflexión desde el espejo(Fig.3.4). En la otra mitad, la intensidad en un punto por potencial, el problema es ahora en el dominio eléctrico.

Siendo el potencial en  $p$  en el primer medio:

$$V = \frac{Ir_2}{4p} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad 3.25$$

Y el segundo medio en  $p'$  es:

$$V' = \frac{Ir_2}{4p} \left( \frac{1-k}{r_3} \right) \quad 3.26$$

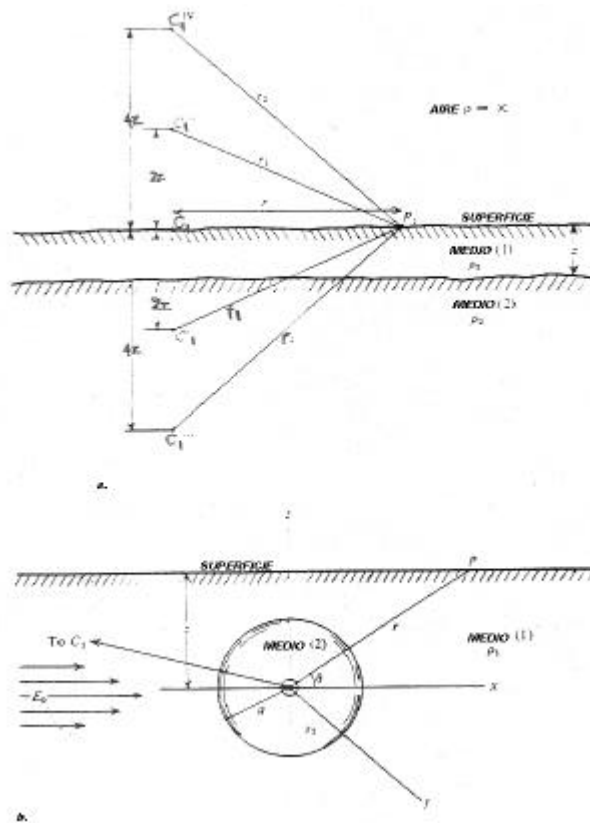
Aplicando la condición de limite, este potencial debe ser igual en la interfase, cuando  $r_1 = r_2 = r_3$ . Así se tiene:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{1-k}{1+k} \quad \text{O} \quad k = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} \quad 3.27$$

En esta expresión  $k$  es un coeficiente de reflexión cuyo valor esta situado entre  $\pm 1$ , dependiendo de la resistividad relativa del segundo medio.

### 3.3.3 Superficie potencial debido a capas horizontales:

Si la fuente de corriente y el punto potencial están localizados en la superficie, sobre un límite horizontal, el cual separa dos medios, el superior de resistividad  $\rho_1$  y el inferior de resistividad  $\rho_2$ , entonces el análisis es más complicado, debido a que en la superficie ahora hay tres medios, separados por dos interfaces. Como un resultado hay un conjunto infinito de imágenes por encima y por debajo de los electrodos de corriente, Fig 3.5.



Arriba, **fig.3.5**, Disposición general de la fuente e imágenes. Abajo, **fig.3.6**, esfera conductiva enterrada en campo uniforme.[Telford, 1997]

La imagen original  $C_1'$ , debajo la superficie con una profundidad  $2z$ , es reflejada en el limite de la superficie para dar la imagen  $C_1''$  a una distancia  $2z$  por encima de  $C_1$ . Esta segunda imagen reflejada en el limite inferior y produce una tercera  $C_1'''$  en una profundidad  $4z$ , y así sucesivamente.

El efecto de cada sucesiva imagen en el potencial  $P$  es reducido por el coeficiente de reflexión entre los limites. Para la fuente de corriente y para su primera imagen debajo de la tierra, el potencial es:

$$V' = \frac{I r_1}{2p} \left( \frac{1}{r} - \frac{k}{r_1} \right) \quad 3.28$$

El efecto de la segunda imagen en  $C_1''$ ,  $2z$  por arriba de la tierra, es:

$$V'' = \frac{I r_1}{2p} \left( \frac{k \times k_a}{r_1} \right) \quad 3.29$$

Donde  $k_a$  es el coeficiente de reflexión en el limite de la superficie. Porque  $\rho_a$  es esencialmente infinito este coeficiente es la unidad, entonces:

$$V' + V'' = \frac{I r_1}{2p} \left( \frac{1}{r} - \frac{2k}{r_1} \right) \quad 3.30$$

El potencial debido a la tercera imagen  $C_1'''$ ,  $4z$  por debajo de la tierra, seria además reducida a su imagen de  $4z$  por arriba de la tierra, siendo esta:

$$V''' + V^{IV} = \frac{I r_1}{2p} \left( \frac{k \times k}{r_2} - \frac{k \times k \times k_a}{r_2} \right) = \frac{I r_1}{2p} \left( \frac{2k^2}{r_2} \right) \quad 3.31$$

La resultante del potencial total en P, puede ser expresada como una serie infinita de la forma:

$$V = \frac{I r_1}{2p} \left\{ \frac{1}{r} + \frac{2k}{r_1} + \frac{2k^2}{r_2} + \dots + \frac{2k^m}{r_m} + \dots \right\} \quad 3.32$$

Donde 
$$r_1 = \left\{ r^2 + (2z)^2 \right\}^{1/2}$$

$$r_2 = \left\{ r^2 + (4z)^2 \right\}^{1/2}$$

$$r_m = \left\{ r^2 + (2mz)^2 \right\}^{1/2} \quad 3.33$$

Esta serie puede ser escrita en forma compacta

$$V = \frac{I r}{2p} \left[ \frac{1}{r} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{k^m}{\left\{ r^2 + (2mz)^2 \right\}^{1/2}} \right] = \frac{I r_1}{2pr} \left[ 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{k^m}{\left\{ 1 + (2mz/r)^2 \right\}^{1/2}} \right] \quad 3.34$$

Esta serie es convergente, porque  $|k| < 1$ , por cuanto el denominador incrementa indefinidamente.

### 3.3.4 Potencial debido a esfera enterrada:

Un cuerpo tridimensional para el cual el potencial externo puede ser desarrollado es la esfera. La fig.3.6, ilustra este caso, en el cual se usará coordenadas esféricas con el centro de la esfera como origen y el eje polar paralelo al eje x. El problema es para encontrar la solución de la ecuación de Laplace para condiciones de borde particular. Para simplificar se asume que la esfera este en un campo uniforme  $E_0$ , paralelo al eje

x. Esto es equivalente para tener el electrodo de corriente a una distancia considerable desde la esfera.

Usando coordenadas esféricas y aplicando las condiciones de borde, se puede resolver la ecuación en la forma de una serie de polinomio de Legendre, satisfaciendo la relación potencial interior y exterior de la esfera. Para  $r >$  se obtiene:

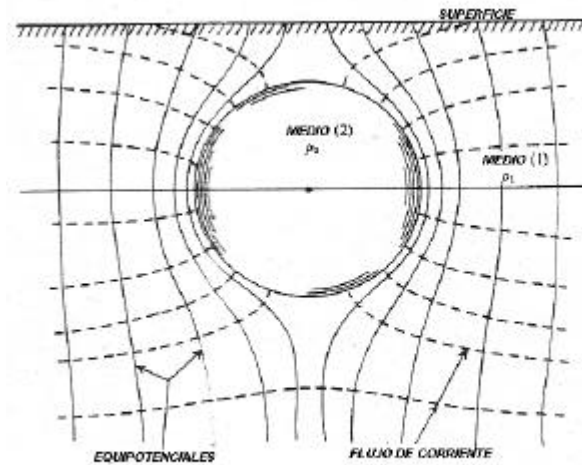
$$V_1 = -E_0 r \cos \mathbf{q} \left\{ 1 - \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)}{(\mathbf{r}_1 + 2\mathbf{r}_2)} \left( \frac{a}{r} \right)^3 \right\} \quad 3.35$$

Si el potencial es medido en la superficie de la tierra, la esfera tendrá una imagen que sería el doble del segundo termino. Además, si se considera el campo generado por una fuente de corriente  $C_1$  en una distancia  $R$  desde el origen, se tendrá:

$$V_1 = -\frac{I r_1}{2pR^2} \left\{ 1 - 2 \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)}{(\mathbf{r}_1 + 2\mathbf{r}_2)} \left( \frac{a}{r} \right)^3 \right\} r \cos \mathbf{q} \quad 3.36$$

Como en la ecuación 3.34, se tiene dos termino, el primero será el potencial normal, el segundo es la causa que perturba al potencial. las líneas equipotenciales y del flujo de corriente son ilustradas en la fig.3.7.

Se han hecho dos superposiciones que no son válidas, primero que el campo externo o normal es uniforme y segundo que no hay iteracción entre la esfera y su imagen. Ambas son estrictamente válida solo cuando la esfera esta a una gran distancia, de la fuente de corriente y la superficie, en tal caso la anomalía no podría ser detectada de ningún modo.



**Fig.3.7,** Líneas equipotenciales y de flujo de corriente de una esfera conductiva enterrada.[Telford,1997]

### 3.4 Resistividad aparente

Partiendo de la ecuación 3.20:

$$\Delta V = V_{MN} = \frac{I\rho}{2p} \left[ \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \left( \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \right]$$

Se puede obtener la resistividad de un semiespacio homogéneo e isotrópico:

$$\rho = \frac{2p\Delta V}{I} \frac{1}{\left\{ \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) - \left( \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BN}} \right) \right\}} = \left( \frac{\Delta V}{I} \right) K \quad 3.37$$

Los factores  $r_{AM}$ ,  $r_{BM}$ ,  $r_{AN}$ ,  $r_{BN}$  no son afectados por los intercambios de los electrodos de voltaje y corriente, pero el espaciamiento de los electrodos de voltaje es mantenido normalmente pequeño para minimizar los efectos de los potenciales naturales.

$$r = \frac{\Delta V}{I} K \quad 3.38$$

Donde el parámetro K depende de la geometría de los electrodos.

Para un medio heterogéneo donde la distribución de resistividades puede ser arbitraria, cada medición que se efectúe dará como resultado un valor ficticio de resistividad que en general no será igual a cualquiera de las resistividades asociadas a los electrodos de corriente o potencial, o a alguno de los volúmenes restantes del semiespacio. El valor de resistividad a obtenerse dependerá de los valores individuales de cada uno de los volúmenes y de las distancias características del arreglo de electrodos.

Se define la variable resistividad aparente ( $\rho_a$ ), al valor de resistividad ficticia que se obtiene aplicando a los datos obtenidos sobre un medio heterogéneo la expresión correspondiente al medio homogéneo [Orellana, 1972].

Para un mismo medio heterogéneo, la forma de la curva de resistividad aparente dependerá de la disposición geométrica de los electrodos. La diversidad de condiciones geológicas y respuestas eléctricas de los materiales corticales es tan variada que un enfoque universalmente válido resultaría matemáticamente complicado y la aplicación práctica de los resultados dependería de múltiples parámetros que deben considerar las diferentes geometrías electródicas.

### 3.5 Arreglos electródicos

La disposición de los electrodos sobre el terreno representa un punto de importancia para la determinación de las resistividades del subsuelo. Uno de los requerimientos de



mayor peso lo constituye la facilidad de implementación durante los trabajos de campo, ya que independientemente del interés científico o económico de la actividad, la relación información obtenida/tiempo de adquisición debe mantenerse lo mas alta posible. Otro requerimiento de peso lo constituye la calidad del voltaje a ser medido. El hecho que las mediciones se realicen en espacios abiertos y no controlados hace que la presencia de “ruido” de origen natural (en adelante identificado como ruido geológico), por actividades humanas y hasta debido al mismo equipo de medición puedan ser comparables a la amplitud de la señal de manera que el escoger un arreglo permita lecturas aceptables de voltaje y minimice la influencia del equipo de medición es un paso importante durante la etapa de planificación del trabajo de campo [Benavides, 1999].

Los arreglos se denominan axiales, si la totalidad de los electrodos se encuentran sobre una misma línea o no-lineales, si los electrodos están dispuestos de una manera mas general. Respecto a la distribución de los electrodos de corriente y potencial se tienen los llamados simétricos o acoplados, cuando estos presentan una distribución especular respecto al punto central del arreglo y asimétricos o desacoplados para todas las restantes configuraciones donde no se presenta la distribución antes citada. Ward hace una revisión exhaustiva de la literatura y reconoce hasta 17 diferentes tipos de arreglos electródicos [Ward, 1997], incluyendo versiones experimentales de arreglos enfocados (focused arrays) que demuestran ofrecer interesantes respuestas. Aunque esta cantidad pareciese indicar que su diseño está concebido para fines muy específicos, la respuesta de los arreglos en situaciones geológicas es conocida pobremente y los datos obtenidos con los arreglos en situaciones geológicas es conocida pobremente y los datos obtenidos con los arreglos más populares frecuentemente no son controlados, inadecuados o pobremente ajustados a los problemas geológicos de manera que resulta conveniente y necesario profundizar mas en la evaluación de la respuesta de dichos dispositivos frente a diversas situaciones geológicas de interés práctico [Whiteley, 1973].

A continuación se describirán los arreglos electródicos más comunes para actividades en superficie(Fig.3.8):

**a)- Arreglo Wenner**

Ampliamente utilizado en los países de habla inglesa. Es un sistema de electrodos alineados y simétrico en el cual la distancia entre electrodos adyacentes  $a$ , se mantienen constante. Debido a que la separación entre los electrodos de potencial es  $1/3$  de los de corrientes, se tiene que:  $r_{AM} = r_{BM} = a$  y  $r_{AN} = r_{BN} = 2a$ , (Fig.2.8). Sustituyendo en la ecuación 3.21 se tiene:

$$r_a = \frac{2p\Delta V}{I} \quad 3.39$$

Siendo  $V_{MN}$ :

$$V_{MN} = \frac{Ir}{2pa} \quad 3.40$$

Resultando la función K :

$$K = \frac{2p}{\left\{ \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \left( \frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) \right\}} = 2pa \quad 3.41$$

Este arreglo presenta algunas ventajas interesantes: La amplitud del voltaje  $V_{MN}$  permanece por encima de los niveles de ruido y por lo tanto no se requiere de voltímetros de alta sensibilidad, la expresión 3.40 para calcular la resistividad resulta muy sencilla y una disposición equiespaciada de electrodos resulta muy fácil de obtener y es muy conveniente en trabajos de perfilaje horizontal (calicateo) y sondeo-perfilaje para obtener secciones 2-D (ver sección 3.12).

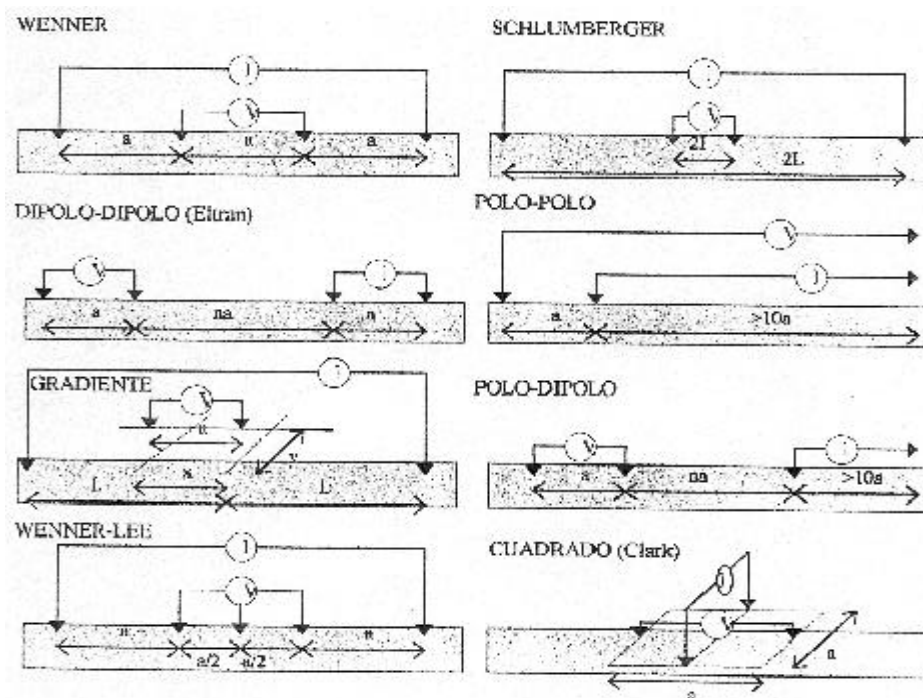
Pero tiene el inconveniente, que todos los electrodos han de moverse en cada medida, lo que requiere mayor cantidad de tiempo para recabar los datos y adicionalmente, se hace muy sensible a variaciones muy superficiales y locales de

resistividad, que pueden atribuirse erróneamente a variaciones de resistividad con la profundidad.

Existen otros 2 arreglos que se derivan del arreglo Wenner:

i. Arreglo Wenner-Lee:

Es similar al arreglo Wenner, con la diferencia de que en este, se sitúa un electrodo en el centro L, para además de medir la diferencia de potencial MN, se miden sus similares ML y LN, cambiando el factor geométrico  $2\Pi$  por  $6\Pi$  ( $K=6\Pi a$ ). Con este arreglo disminuye las variaciones laterales de resistividad. Si las condiciones del terreno, a la derecha y a la izquierda del electrodo central L son idénticas, las dos curvas también lo serán. Si hay un cuerpo conductor en alguno de los dos lados de L, la curva de resistividad de ese lado dará valores inferiores detectándose así la



**Fig. 3.8,** Esquema de algunos de los arreglos electrónicos mas usados.[Benavides,1999]

presencia del cuerpo conductor o de un efecto variaciones laterales. Pero si no se presenta este efecto de variaciones laterales las dos curvas de resistividad usando este arreglo y la curva de resistividad usando el arreglo Wenner deben mostrar el mismo comportamiento.

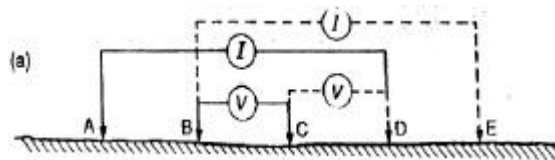
ii Arreglo Wenner offset:

Se basa en un arreglo de 5 electrodos equiespaciados, donde un electrodo permanece fijo en el centro del tendido(Fig.3.8), solo cuatro electrodos(arreglo Wenner) son usados en una lectura. Primero para obtener  $R_{D1}(a)$  y luego cambiando la posición de los electrodos se obtiene  $R_{D2}(a)$ . El promedio de esas dos medidas resulta la resistencia Offset Wenner  $R_w(a)$  (Fig.3.9). Con los valores de resistencia  $R_B(a)$  y  $R_C(a)$  (Fig.3.10), se puede calcular resistencias Wenner que no son medidas directamente[Carpenter, 1955; Baker, 1988]:

$$R_w(2a) = 2[R_C(a) - R_w(a)]$$

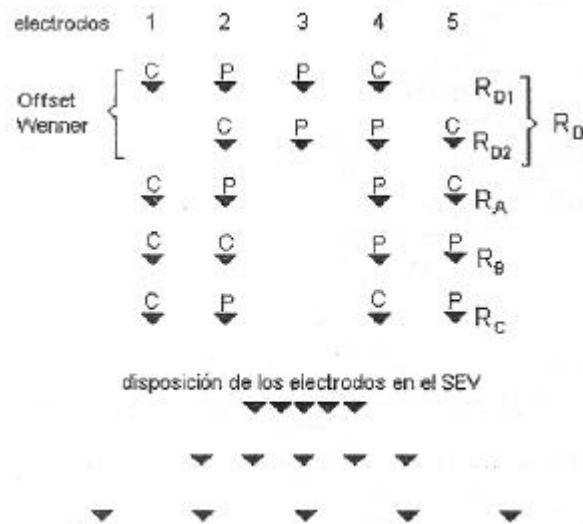
$$R_w(3a) = \frac{1}{2}R_w(2a) + R_B(2a) - R_B(a) + \frac{1}{2}R_w(4a)$$

La primera ecuación permite calcular valores de resistencia a separaciones electrónicas mayores que las empleadas con los electrodos y la segunda permite calcular valores de resistencia a distancias intermedias entre las separaciones electrónicas utilizadas.



**Fig.3.9**, Arreglo Wenner Offset[Orellana,1982]

La ventaja de este arreglo es que reduce los efectos de las variaciones laterales de resistividad y el también reduce el número de electrodos a utilizar en campo(Fig.3.10).



**Fig. 3.10**, Disposición de los electrodos con Wenner Offset y las resistencias que se determinan.

### b)- Arreglo Schlumberger

Este arreglo es del tipo axial simétrico, donde el espaciamiento de los electrodos de corriente es mucho mayor que el espaciamiento de los electrodos de potencial. Donde  $L = \overline{AB}$ ,  $l = \overline{MN} = a$  (fig.3.7), encontrando que:

$$r_{AM} = L - l \quad 3.42a$$

$$r_{BM} = L + l \quad 3.42b$$

$$r_{AN} = L + l \quad 3.42c$$

$$r_{BN} = L - l \quad 3.42d$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 3.20, obtenemos:

$$V_{MN} = \frac{I\rho}{p} \frac{2l}{(L+1)(L-1)} \quad 3.43$$

El hecho de que la distancia  $l$  entre los electrodos de potencial sea bastante menor que la correspondiente a los electrodos de corriente, permite hacer algunas consideraciones. Si  $l$  resulta ser pequeña el cociente  $V_{MN}/l$  de la ecuación 2.44 se aproxima al valor de intensidad de campo eléctrico en el centro del arreglo. Por otro lado, si  $L > 5l$ , se puede aproximar  $L^2 - l^2$  a  $L^2$  con un error menor del 4% [Bathacharya y Patra, 1968]. En la práctica, los arreglos Schlumberger cumplen con esta condición y la resistividad puede calcularse mediante la expresión aproximada:

$$\rho \cong p \frac{L^2}{l} \frac{V_{MN}}{I} \quad 3.44$$

Debido a que se puede aproximar  $E = \frac{V_{MN}}{l}$  la ecuación 3.44 quedará:

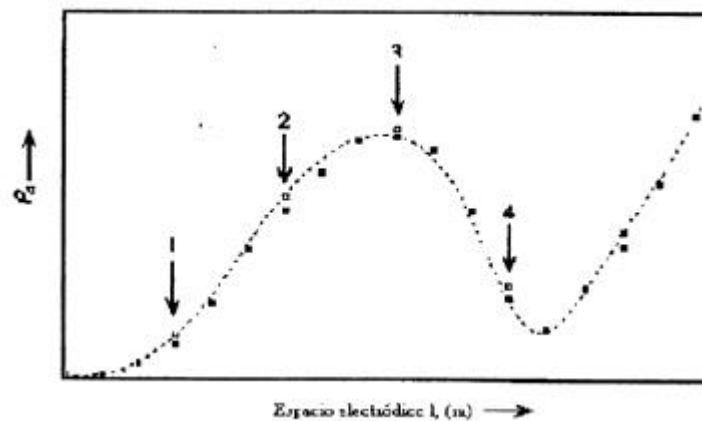
$$\rho \cong p \frac{L^2}{l} E \quad 3.45$$

Esta es la razón por la cual a esta disposición se le denomina a veces arreglo de gradiente, mientras que al Wenner se le llama arreglo de potencial. Este arreglo tiene la ventaja de que está menos influenciado por las inhomogeneidades cercanas a la superficie y mientras la señal de voltaje sea lo suficientemente amplia, solo se necesita movilizar dos electrodos.

La necesidad de aumentar la distancia al disminuir la amplitud de voltaje puede permitir la discriminación entre un efecto superficial y otro debido a la variación de resistividad con la profundidad.

Entre las desventajas se tiene que hay que emplear equipos receptores más sensibles y disminuir en lo posible el ruido geológico e instrumental. También la data obtenida

debe ser preprocesada, debido que al cambiar el espaciado  $2l$  se produce un corrimiento en los nuevos valores de resistividad y esto obliga a hacer por lo menos, dos medidas para la misma separación  $2L$  con el anterior y el nuevo valor  $2l$ , (llamdo clutch) lo que sirve de calibración para generar una curva continua y suave(Fig.3.9).



**Fig.3.11**, Efecto del cambio de espaciamiento MN al realizar un SEV con arreglo Schlumberger. [Benavides, 1999]

En sondeo vertical (Ver sección 3.6) los electrodos de potencial permanecen fijos mientras el espaciado de los electrodos de corriente es simétricamente sobre el centro del tendido. Para largos valores de  $L$ , puede ser necesario incrementar  $l$  también para mantener medible el potencial. Este procedimiento es mas conveniente que el tendido expandido Wenner porque solo se necesita mover dos electrodos. En adición, el efecto de baja variaciones de resistividad es constante con los electrodos de potencial fijos.

### c)- Arreglos Dipolares:

Los arreglos dipolares constituyen una familia muy importante, caracterizada porque en ellos los electrodos de corriente están lo suficientemente próximos entre sí respecto a la distancia a que se miden sus efectos para que puedan considerarse como un dipolo, considerándolos de longitud que tiende a cero, lo que simplifica considerablemente los cálculos.

Sea  $Q$  el centro entre el segmento que forman los electrodos de corriente ( $C_1$  y  $C_2$ ), los cuales se encuentran sobre el eje  $x$  de un sistema de coordenadas cartesianas. Entonces el potencial en un punto cualquiera  $P$  que diste  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente de los electrodos de corriente, será:

$$\Delta V = \frac{I\mathbf{r}}{2p} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad 3.46$$

Sea  $b = C_1C_2$  y  $R = PQ$ ;

Donde

$$R_1 \cong R \left( 1 - \frac{bx}{R^2} + \frac{b^2}{4R^2} \right)^{1/2} \quad \text{y} \quad R_2 \cong R \left( 1 + \frac{bx}{R^2} + \frac{b^2}{4R^2} \right)^{1/2} \quad 3.47 \text{ a, b}$$

Se despreciaran los términos:  $b^2/4R^2$  de ambas ecuaciones debido a que  $C_2$  es muy pequeña frente a las demás longitudes consideradas. Quedando la ecuación:

$$\Delta V = \frac{I\mathbf{r}}{2pR} \left[ \left( 1 - \frac{bx}{R^2} \right)^{-1/2} - \left( 1 + \frac{bx}{R^2} \right)^{-1/2} \right] \quad 3.48$$



Realizando un desarrollo de serie de Taylor, obtenemos lo siguiente:

$$\Delta V \cong \frac{I r}{2pR} \frac{bx}{R^2} \cong \frac{I r b \cos q}{2pR^2} \quad 3.49$$

Es preferible en muchos casos el estudio del campo E, por lo que a partir de la ecuación 3.49, se tienen 4 direcciones de interés para las cuales hay que derivarlo, siendo estas:

Radial ( $E_r$ ), azimutal( $E_\theta$ ), paralelo( $E_x$ ) y perpendicular( $E_y$ ).

La disposición de los dipolos de corriente y voltaje permite definir seis posibles arreglos dipolares, los cuales son: Arreglo paralelo, Arreglo perpendicular, Arreglo radial, Arreglo radial, Arreglo azimutal, Arreglo ecuatorial y Arreglo dipolo-dipolo o Eltran (fig.3.10).

Siendo este ultimo él mas utilizado, por lo que se describirá a continuación:

i. Arreglo dipolo-dipolo:

Los electrodos de potencial estan aproximados uno con respecto al otro, pero estan alejados con respecto a los electrodos de corriente, en la cual ambos estan próximos

Los valores son:

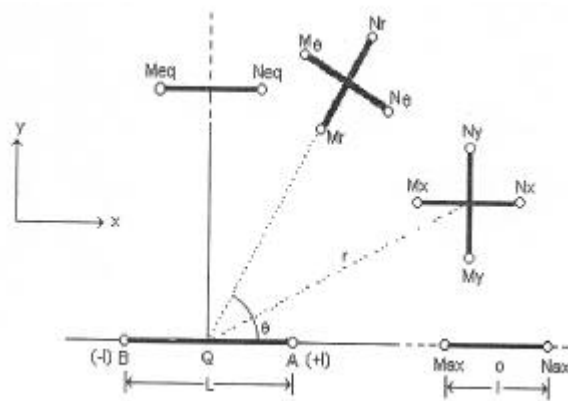
$$r_1 = r_4 = 2nl$$

$$r_2 = 2l(n - 1)$$

$$r_3 = 2l(n + 1) \text{ donde } n \gg 1$$

$$r_a = \frac{2p(n-1)n(n+1)l\Delta V}{I} \quad 3.50$$

Este es el tendido comúnmente usado en los trabajos de polarización inducida, con n no mayor de 5.



**Fig.3.12**, Diferentes tipos de arreglos dipolares y nomenclatura asociada a cada uno

Cuando los dipolos son ampliamente separados,  $n \gg 1$  y se tiene:

$$r_a = \frac{2pn^3 l \Delta V}{I} \quad 3.51$$

Esta aproximación usualmente es aplicada en sondeos de resistividad. Los dipolos pueden también estar bisectados por una línea cruzada. En este caso:

$$r_1 = r_4 = 2nl$$

$$r_2 = r_3 = 2\{(nl)^2 + l^2\}^{1/2} \cong 2ni(1 + 1/2n^2) \text{ y}$$

$$r_a = \frac{4pn^3 l \Delta V}{I} \quad 3.52$$

ii. Arreglo Polo-dipolo:

Uno de los electrodos de corriente es fijado a una gran distancia de los otros tres electrodos, de las cuales todos pueden tener distintos espaciamentos. Donde los valores son:

$$r_1 = a$$

$$r_3 = b$$

$$r_2 = r_4 = \infty$$

Tal que

$$r_a = \frac{2pab}{b-a} \left( \frac{\Delta V}{I} \right) \quad 3.53$$

Cuando  $b = 2a$  entonces:

$$r_a = 4pa \left( \frac{\Delta V}{I} \right) \quad 3.54$$

O el doble del radio en el arreglo Wenner (Ec.3.39).

Cuando el espaciamento de uno de los electrodo de potencial es muy pequeño comparado a la distancia del otro electrodo potencial desde  $C_1$  ( $C_2$  esta inmóvil en él  $\infty$ ), escribiendo  $r_1 = a - \delta a/2$ ,  $r_3 = a + \delta a/2$  y la resistividad aparente vendría da por:

$$r_a = \frac{2pa^2}{I} \left( \frac{\partial V}{\partial a} \right) \quad 3.55$$

Este arreglo es equivalente a la mitad de un arreglo Schlumberger (Ec 3.45).

Con  $a = L$ ,  $\partial a = \Delta r$ . Ambas configuraciones electrónicas miden el gradiente potencial.

Porque el electrodo  $C_2$  está lejos y no necesita estar en línea con los otros tres electrodos.

Esto permite una exploración lateral en líneas radiales desde una posición fija de  $C_1$ , moviendo uno o ambos electrodos de potencial.

Una variación adicional en este arreglo es obtenida moviendo uno de los electrodos de potencial, suponiendo  $P_2$ , a una distancia  $b$  la cual está también lejos de  $c_2$ . En este caso también  $r_3 = b = \infty$ , y la ecuación

$$r_a = \frac{2\pi a b D V}{(b - a)} \quad 3.56$$

Por lo tanto este arreglo es igual a la mitad del arreglo Wenner.

En el trabajo de campo la localización de un electrodo en el infinito, tiene poca influencia sobre el resto del arreglo.

La siguiente tabla recopila los diferentes valores que toma el factor geométrico  $K$  para algunos de los dispositivos electrónicos de uso standard (tabla 1).

**Tabla 1,** Diferentes valores el factor geométrico K para algunos arreglos

ARREGLO ELECTRÓDICO	FACTOR GEOMÉTRICO
Schlumberger	$K = \pi(L^2 - l^2)/2l$
Wenner	$K = 2\pi a$
Dipolo-dipolo (Eltran)	$K = \pi n(n+1)(n+2)a$
Dipolar Ecuatorial	$K = 2\pi r^3/Ll$
Dipolar Paralelo	$K = 2\pi r^3/Ll(3\cos^2\theta - 1)$
Dipolar Radial	$K = \pi r^3/Ll\cos\theta$
Dipolar Azimutal	$K = 2\pi r^3/Ll\sin\theta$
Dipolar Transversal	$K = 2\pi r^3/3Ll\sin\theta\cos\theta$
Gradiente X=x/L ; Y=y/L	$\frac{2pL^2}{a} \left[ \frac{1-X}{(Y^2 + (1-X)^2)^{3/2}} + \frac{1+X}{(Y^2 + (1+X)^2)^{3/2}} \right]^{-1}$
Polo-dipolo	$K = 2\pi n(n+1)a$
Cuadrado	Clark (dipolos cruzados): $K = 1$ Dipolos paralelos: $K = 2\pi a/(2-\sqrt{2})$

eléctricos.

### 3.6 Sondeos eléctricos verticales:

Se llama sondeo eléctrico a una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuada con el mismo tipo de arreglo y separación creciente entre los electrodos de potencial y corriente. Cuando el arreglo empleado es simétrico, o asimétrico con un electrodo en el "infinito", y durante la medición permanecen fijos el azimut del arreglo y el centro del cemento P<sub>1</sub>P<sub>2</sub> o MN, suele denominarse Sondeo Eléctrico Vertical(SEV) [Orellana, 1972].

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada SEV se representan por medio de una curva, en función de las distancias entre electrodos. Para que ello sea posible,

es necesario que estas distancias puedan expresarse por una sola variable. Esta condición puede cumplirse de dos modos:

Por el empleo de un arreglo en el que la configuración de electrodos permanezca siempre geoméricamente semejante a sí misma, que es el caso del arreglo Wenner.

Por la utilización de arreglos en lo que sólo influya una distancia. Esto último es lo que ocurre con el arreglo Schlumberger, en el que la distancia MN se considera nula frente a  $C_1C_2$  o AB.

Cuando se utiliza este arreglo, las resistividades aparentes  $\rho_a$  se llevan en ordenadas, y en abscisas las distancias  $OA = AB/2$ . Para el dispositivo Wenner, se llevan en abscisas los valores sucesivos a la distancia "a". Las escalas sobre ambos ejes han de ser logarítmicas, por razones teórica y práctica. La curva así obtenida, se denominada curva de SEV, curva de campo o curva de resistividad aparente(CRA).

La finalidad del SEV es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado. La mayor eficacia del método corresponde al caso en que los SEV se efectúan sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad, y limitadas por planos paralelos a la superficie del terreno(medio estratificado).

Para el cálculo de la penetración obtenida realizando un SEV, se supondrá lo siguiente:

Sean los electrodos de corriente (A, B) situado en la superficie plana del subsuelo homogéneo de resistividad  $\rho$ , donde se calculara la variación de la densidad de corriente, en función de la profundidad z, a lo largo de la línea recta, perpendicular a la superficie que pasa por el centro O del segmento AB (fig.3.13)

Sea  $l = AB/2$ .

El módulo del campo eléctrico E debido al electrodo A, valdrá en el punto P de profundidad z

$$E_A = \frac{I r}{2p} \frac{1}{r^2} = \frac{I r}{2p} \frac{1}{(l^2 + z^2)} \quad 3.57$$

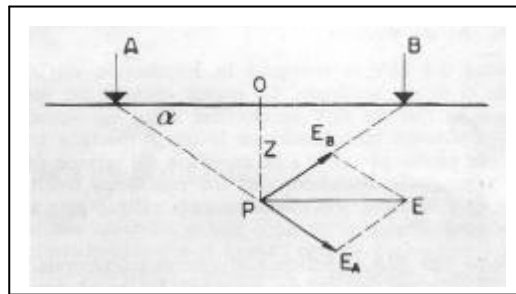


Fig. 3.13, **Determinación de la densidad de corriente en un semiespacio homogéneo**

Análogamente,

$$E_B = \frac{I r}{2p} \frac{1}{(l^2 + z^2)} = E_A \quad 3.58$$

Por razón de simetría, las dos componentes verticales del campo son iguales y opuestas, mientras que las horizontales son iguales y del mismo sentido, por ser A y B de distinta polaridad. Por lo tanto, el campo total E será:

$$E = 2 E_A \cos a = \frac{I r}{p} \frac{\cos a}{(l^2 + z^2)} \quad 3.59$$

Y de aquí, por ser:

$$\cos \mathbf{a} = \frac{l}{(l^2 + z^2)^{1/2}} \quad \mathbf{3.60}$$

La densidad de corriente a la profundidad z, es:

$$J_z = \frac{E}{\mathbf{r}} = \frac{I}{\mathbf{p}} \frac{l}{(l^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{I}{\mathbf{p}} \frac{1}{l^2 \left(1 + \frac{z^2}{l^2}\right)^{3/2}} \quad \mathbf{3.61}$$

Que nos dice que la profundidad de corriente disminuye gradualmente con la profundidad, según la ley indicada, en el eje vertical del dispositivo de dos electrodos.

Supongamos ahora que el punto P desplaza una distancia "y" perpendicularmente al plano. Entonces valdrán las formulas y los razonamientos anteriores, sin más que sustituir  $z^2$  por  $z^2 + y^2$ . Se tendrá:

$$J_{z,y} = \frac{I}{\mathbf{p}} \frac{1}{l^2 \left(1 + \frac{z^2 + y^2}{l^2}\right)^{3/2}} \quad \mathbf{3.62}$$

Se puede ahora calcular la fracción F de la corriente total que circula por encima de una profundidad cualquiera  $z_0$ , para lo cual habrá que efectuar una doble integración:

$$F = \frac{1}{\mathbf{p}} \int_0^{z_0} \int_{-\infty}^{\infty} J_{z,y} dy dz = \frac{1}{\mathbf{p}l^2} \int_0^{z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy dz}{\left(1 + \frac{z^2 + y^2}{l^2}\right)^{3/2}} \quad \mathbf{3.63}$$



Para mayor comodidad se toma I como unidad de longitud poniendo  $z' = z/l$ ;  
 $y' = y/l$ . Entonces:

$$F = \frac{1}{\rho} \int_0^{z'_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy' dz'}{(1 + z'^2 + y'^2)^{3/2}} = \frac{2}{\rho} \int_0^{z'_0} \frac{dz'}{(1 + z'^2)} = \frac{2}{\rho} \operatorname{tg}^{-1} z'_0 = \frac{2}{\rho} \operatorname{tg}^{-1} \frac{z_0}{l} \quad \mathbf{3.64}$$

De la formula se deduce que la mitad de la corriente I circula por encima de la profundidad  $z = l$  y el 70.6% de I pasa por encima de la profundidad  $z = 2l = AB$

Donde las zonas más profundas no influirán menos en el potencial observado en superficie, al ser menor en ellas la densidad de corriente. No obstante, no es posible fijar una profundidad límite por debajo de la cual el subsuelo no influye en el SEV, ya que la densidad de corriente disminuye de modo suave y gradual, sin anularse nunca, según indica la ecuación 3.61. Al aumentar la separación AB aumenta en la misma proporción la profundidad a que corresponde una determinada densidad de corriente, por lo que podría pensar que la penetración es proporcional a AB. Esto sin embargo, no es cierto en general, puesto que las fórmulas anteriores solo son válidas para subsuelo homogéneo. En un medio estratificado, o simplemente heterogéneo, la densidad de corriente variará según una ley diferente en cada caso por lo que la penetración dependerá de la distribución de resistividades en el subsuelo.

Las resistividades aparentes medidas por un SEV no dependen únicamente de las resistividades verdaderas presentadas por aquellas zonas del subsuelo que se encuentran por debajo del segmento AB sino que están influenciadas por la distribución de resistividades en un cierto volumen del terreno, el cual resulta de difícil evaluación, no solo porque la atenuación con la distancia de la densidad de corriente es gradual, sino porque la perturbación producida por una determinada heterogeneidad varía con el contraste de resistividad que presenta respecto del medio que le rodea y puede hacerse notar a distancias mayores si aumenta dicho contraste.

### 3.7 Medios estratificados:

Un medio estratificado esta compuesto generalmente por dos semiespacios. El primero de ellos, de conductividad nula, representa la atmósfera, el segundo, que representa el terreno, es un medio heterogéneo compuesto de medios parciales homogéneos e isótropos, de extensión lateral indefinida y cuyas superficies de separación son paralelas entre sí y al plano aire-tierra (fig.3.14) [Burger, 1992; Orellana, 1972].

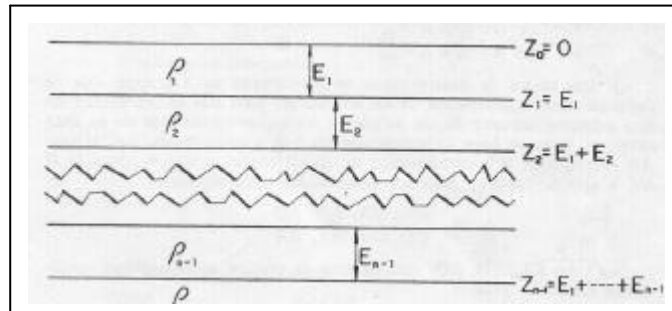


Fig. 3.14, Corte geoelectrico estratificado

Para caracterizar cada medio estratificado, bastará dar el espesor  $E_i$  y la resistividad  $\rho_i$  de cada medio parcial isótropo de índice  $i$ , numerando éstos de arriba abajo, esto es, comenzando por el medio contiguo al semiespacio que representa la atmósfera. Cada uno de estos medios parciales será denominado capa geoelectrica. Las distancias de la superficie límite aire-tierra a cada una de las demás, o sea las profundidades de los "contactos" respectivos se representarán por  $z_1, z_2, z_3$ , etc.

La especificación de espesores y resistividades de cada medio estratificado del tipo descrito, recibe el nombre de corte geoelectrico.

Los cortes geoelectricos pueden clasificarse atendiendo al número de capas que los componen. Los cortes del mismo número de capas pueden subdividirse según el orden en que aparezcan, en los sucesivos contactos, resistividades mayores o menores que en la capa suprayacente(Fig. 3.15).

- a) Los cortes de dos capas, de los cuales existen dos tipos ( $\rho_1 < \rho_2$  y  $\rho_1 > \rho_2$ ), no llevan símbolos especiales.
- b) Los cortes geoelectricos de tres capas, son:
  1. Tipo H:  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$
  2. Tipo K:  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$
  3. Tipo Q:  $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$
  4. Tipo A:  $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$
- c) Los cortes de cuatro capas(Fig 3.16), se distribuyen en 8 que se designan como combinación de los anteriores, para ello se consideran las tres primeras capas y se le asigna la letra correspondiente de la lista anterior. Luego se hace lo propio con las tres ultimas capas. Siendo solo posibles los siguientes tipos:

HK, HA, KH, KQ  
QQ, QH, AK, AA

- d) Los cortes de cinco o más capas se simbolizan siguiendo el mismo método. Se consideran en primer lugar las tres primeras capas y se le asigna la letra correspondiente indicada en la parte b. Luego se hace lo mismo con las capas segunda, tercera y cuarta, después con las tercera, cuarta y quinta, etc(Fig. 3.16).

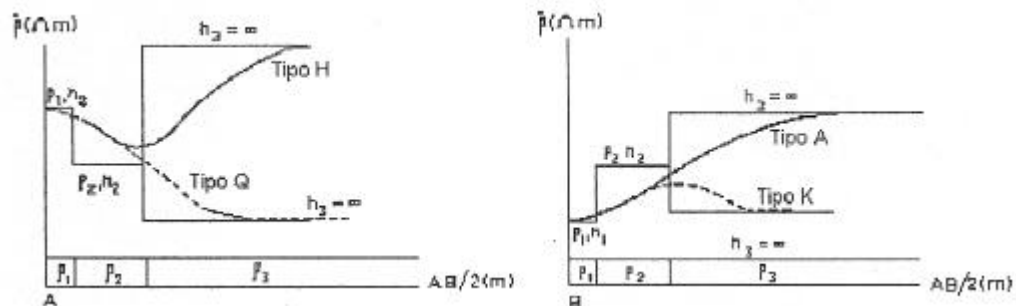
Dado un tipo de corte geoelectrico de n-1 capas, pueden deducirse de él dos tipos diferentes de cortes de n capas, según que la que se añada (por debajo de la última, dando a ésta previamente espesor finito) sea más conductora o más resistiva que la

anterior. Para el caso de dos capas existen dos tipos: Luego, en general, existirán  $2^{n-1}$  tipos de n capas.

Si al representar gráficamente la distribución de resistividades en un corte geoelectrico empleamos escalas logarítmicas en ambos ejes se obtendrá una gráfica escalonada, aunque quedará modificado el tamaño de los escalones. Estos gráficos logarítmicos se llaman curvas de resistividad verdadera(CRV).

Para la determinación del potencial producido en la superficie límite aire-tierra para un medio estratificado, por una fuente puntual de corriente situada en dicha superficie. Existen dos métodos principales que son:

- i. El método de las imágenes: El cual fue desarrollado en la sección 3.3.3
- ii. El método de la integración de la ecuación de Laplace: Como se vio, la ecuación que describe este problema electrostático en ausencia de fuentes es la ecuación de Laplace, la cual se escribirá a continuación en coordenadas cilíndricas:



**Fig. 3.15,** Cortes de dos capas(H, K, Q, A)

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad 3.65$$

La cual presenta una solución general de la forma[Morse y Feshbach, 1953]:

$$V = \int_0^{\infty} [A(I) \exp(-Iz) + B(I) \exp(Iz)] J_0(Ir) dI \quad 3.66$$

Donde  $J_0(Ir)$  es la función de Bessel de primera clase y orden cero,  $A(I)$  y  $B(I)$  son los coeficientes a determinar para cada caso particular y  $\lambda$  es la variable de integración. Si está presente una fuente puntual de corriente, el potencial total puede calcularse como la suma de un potencial en el medio homogéneo y un potencial de perturbación descrito por la ecuación 3.66.

$$V_i = \frac{I r_1}{2p} \frac{1}{(r^2 + z^2)^{1/2}} + \int_0^{\infty} [A_i(I) \exp(-Iz) + B_i(I) \exp(Iz)] J_0(Ir) dI \quad 3.67$$

Donde se mantiene el valor de  $\rho_1$  de la solución del medio homogéneo, y no alguna de sus similares de otras capas, por razones de conveniencia al momento de aplicar las condiciones de contorno. Si se aplica la fórmula integral de Weber-Lipschitz [Tijonov y Samarki, 1983]:

$$\frac{1}{(r^2 + z^2)^{1/2}} = \int_0^{\infty} \exp(-I|z|) J_0(Ir) dI \quad 3.68$$

La solución de la integral 3.67 se puede expresar como la suma de dos integrales con un núcleo o Kernel común; la función de Bessel:

$$V_i = \frac{I r_1}{2p} \int_0^{\infty} [\exp(-I|z|) + A_i(I) \exp(-Iz) + B_i(I) \exp(Iz)] J_0(Ir) dI \quad 3.69$$

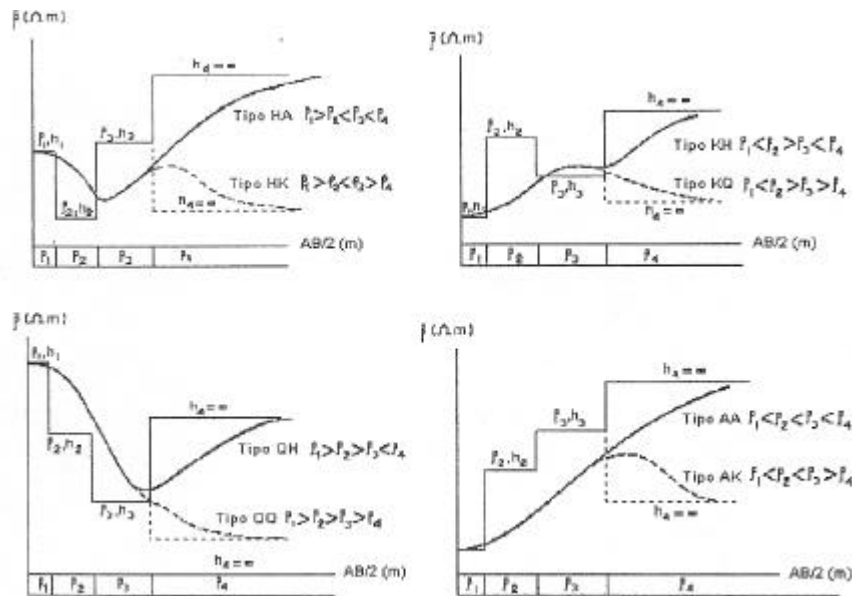


Fig. 3.14, **Cortes de tres capas**

Esta es la forma general de la integral de Stefanescu, aplicada por primera vez por Sabba Stefanescu en colaboración con los Schlumberger, para la interpretación de curvas de resistividad aparente en medios estratificados [Stefanescu et al, 1930]. A esta solución general se le deben aplicar las condiciones de contorno existentes en un semiespacio estratificado. La primera condición corresponde a la interfase aire-tierra, en el cual el campo eléctrico debe ser tangente a la superficie:

$$\frac{1}{r_1} \frac{\partial V_1}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = 0 \quad \mathbf{3.70}$$

En la última capa, para  $z$  tendiendo a infinito, el potencial debe tender a cero:

$$V_n = 0 \quad \text{en } z = \text{infinito} \quad 3.71$$

Finalmente, en cualquier interfase entre capas, el potencial eléctrico y la componente normal de la densidad de corriente deben ser continuas:

$$V_i = V_{i+1} \quad 3.72$$

$$\frac{1}{r_1} \frac{\partial V_i}{\partial z} = \frac{1}{r_{i+1}} \frac{\partial V_{i+1}}{\partial z} \quad 3.73$$

Con lo cual se tienen  $2n$  ecuaciones y  $2n$  parámetros o incógnitas por determinar, de manera que la ecuación analítica de cualquier caso particular se obtiene aplicándole a la ecuación 3.69 las condiciones de contorno arriba mencionadas y una vez determinados los coeficientes, se evalúa la solución para el potencial eléctrico de la primera capa con  $z = 0$  [Battacharya y patra,1968].

La expresión entre corchetes de la ecuación 3.69 define una función que depende del número de capas, sus espesores, resistividades y del parámetro de integración  $\lambda$ . Y es denominada de manera general como transformada de resistividad  $T(\lambda)$ , función característica o también, función Kernel del modelo o corte geoelectrico  $N(\lambda)$ :

$$V = \frac{I r_1}{2p} \int_0^{\infty} T(r_i; h_i; l) J_0(lr) dl \quad 3.74$$

La ecuación 3.74 expresa el potencial eléctrico como una transformada de Hankel de la función  $T(\rho_i; h_i; \lambda)$ . Se han publicado numerosos procedimientos para expresar adecuadamente la transformada de resistividad [Slichter, 1933; Sunde, 1949; VanYan, 1962; Koefoed, 1970], evitando el resolver el sistema resultante de las ecuaciones 3.69 y 3.73. Definida la solución general del potencial eléctrico para un

semiespacio estratificado las siguientes ecuaciones suponen el uso de una transformada de resistividad normalizada ( $\rho_1 = 1$ ).

Para el caso de un arreglo Schlumberger, se calcula la expresión para el campo eléctrico a partir de 3.74 y haciendo uso de las propiedades derivadas de las funciones de Bessel [Tijonov y Samarki, 1983] se tiene que:

$$\mathbf{r}_{aS} = \mathbf{r}_1 r^2 \int_0^{\infty} T(l) J_1(lr) l dl \quad 3.75$$

Donde se omitieron los parámetros de resistividades y espesores en la transformada de resistividad. Para el caso del arreglo Wenner, se debe considerar la diferencia de potencial entre los puntos M y N situados a distancias  $r$  y  $2r$  de los electrodos de corriente:

$$\mathbf{r}_{aW} = 2\mathbf{r}_1 r \left[ \int_0^{\infty} T(l) J_0(lr) dl - \int_0^{\infty} T(l) J_0(l2r) dl \right] \quad 3.76$$

Para el caso de los arreglos dipolares, la expresión resulta algo complicada. Sin embargo es posible utilizar la relación existente entre la resistividad aparente Schlumberger y la correspondiente a un arreglo dipolar cualquiera  $\rho_{aD}$  [Orellana, 1982]:

$$\mathbf{r}_{aD} = \mathbf{r}_{aS} - br \frac{\partial(\mathbf{r}_{aS})}{\partial r} \quad 3.77$$

Aplicando 3.77 a la ecuación 3.75, obtenemos la siguiente expresión [Paul, 1981]:



$$r_{aD} = r_1 \left[ 2r^2(1-b) \int_0^{\infty} T(I) J_1(Ir) I dI - 2br^3 \int_0^{\infty} T(I) J_0(Ir) I^2 dI \right] \quad 3.78$$

Donde  $b = \frac{1}{3}$  para las configuraciones radial y polar,  $b = \frac{2}{3}$  para la configuración perpendicular,  $b = \cos^2\theta/(3 \cos^2\theta-1)$  para la paralela y  $b = 0$  para las configuraciones azimutal y ecuatorial. Este último resultado es relevante por que implica que las curvas que se obtienen al utilizar la ecuación 3.75 (o sus similares obtenidas por otros métodos) para el dispositivo Schlumberger son válidas para interpretar estos dos tipos de sondeos eléctricos dipolares.

El uso de la ecuación 3.74 y los factores geométricos de cada dispositivo electródico permite obtener una expresión analítica útil para el cálculo de las resistividades aparentes y, en consecuencia, la solución del problema directo o interpretación de las curvas de campo.

### 3.8 Morfología de las curvas de SEV:

La curva resistividad aparente (CRA) consiste en una representación logarítmica de los puntos  $(\rho_a, r)$ . Para los arreglos Schlumberger, Wenner, dipolar azimutal y dipolar ecuatorial, la CRA teóricas presentan un conjunto de propiedades generales que son independientes del número de capas y sus resistividades [Zhody, 1989]:

- a) Las resistividades aparentes siempre son positivas.
- b) La forma de la CRA emula la curva de resistividad verdaderas (CRV o función  $\rho=F(\rho_i, z)$ ). Si la resistividad verdadera se incrementa o disminuye con la profundidad, la resistividad aparente aumenta o disminuye con la separación característica de arreglo de electrodos ( $AB/2$  para Schlumberger,  $a$  para el Wenner,  $r$  para el dipolar). esto es particularmente evidente para capas cuyo espesor se incrementa logarítmicamente con la profundidad.

- c) El cambio máximo en resistividad aparente se presenta siempre a una separación electródica mayor que la profundidad a la cual ocurre el cambio de resistividad real. Esto hace que la CRA se encuentren siempre fuera de fase (retrazada) respecto a la CRV.
- d) La amplitud de la CRA es siempre menor o igual a la amplitud de la CRV. La resistividad aparente se aproxima asintóticamente a la resistividad verdadera a separaciones electrodiicas que son muy pequeñas respecto al espesor de la primera capa o muy grandes respecto a la interfase de la última (e infinita) capa.
- e) En un medio estratigráfico (multicapas), si se cambia la resistividad de una capa gruesa, la resistividad aparente se cambiará también y el cambio máximo en resistividad aparente será aproximadamente igual al cambio neto en resistividad verdadera.

Estas propiedades descartan la posibilidad de asociar con la profundidad de los interfaces a los valores extremos o puntos de inflexión de la CRA y los valores de resistividad aparente a los valores reales del subsuelo. Este efecto se debe a que la distribución de la corriente en el subsuelo depende de los valores relativos de resistividad y el porcentaje de penetración de corriente con la profundidad no es simplemente proporcional a la separación entre los electrodos de corriente. Este efecto aparte de justificar la propiedad (c), hace que la CRA, cuando se invierten los valores de resistividad en un corte de dos capas, no resulten simétricas.

Para poder extraer información cuantitativa sobre el corte geoelectrico del subsuelo es necesario llevar a cabo alguno de los siguientes procedimientos:

- a) Calcular la respuesta teórica de lo que se espera debe ser la CRV y comparar con la CRA del sondeo eléctrico vertical (mencionado anteriormente como problema directo). Este procedimiento se puede llevar a cabo de diferentes maneras: comparando visualmente la curva de campo con un juego de curvas teóricas (master curves) y buscando el mejor ajuste posible [Mooney y Wetzel, 1956] o llevar a cabo un procedimiento computacional de optimización por mínimos cuadrados el cual, de manera iterativa, va modificando los parámetros del corte geoelectrico hasta lograr

minimizar el error cuadrático medio entre la respuesta del modelo y los datos de campo [Ward, 1997].

$$S = \sum_{i=1}^m \left[ \mathbf{r}_a^{OBS}(x_i) - \mathbf{r}_a^{CAL}(x_i, \bar{P}) \right]^2 / \text{Var} \left[ \mathbf{r}_a^{OBS}(x_i) \right] \quad 3.79$$

Donde los superíndices de las resistividades aparentes se refieren a los datos observados en campo y los datos calculados,  $\mathbf{r}_a^{CAL}(x_i, \bar{P})$  es la resistividad aparente calculada en  $x_i$  debida al modelo definido por el vector de parámetros P y el término del denominador representa la varianza estadística de las resistividades aparentes observadas. La ecuación 2.80 es una función de los parámetros P, los cuales deben ser modificados iterativamente hasta minimizar el valor de S.

- b) Llevar a cabo un procedimiento de inversión de los datos de campo para obtener la transformada de resistividad y con ella, los parámetros del corte geoelectrico. Este procedimiento implica resolver la ecuación [Koefoed, 1968]:

$$T(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_n; h_1, h_2, \dots, h_n; \mathbf{I}) = \frac{2\mathbf{p}}{I\mathbf{r}_1} \int_0^{\infty} V(r) J_0(Ir) r dr \quad 3.80$$

La cual constituye la transformada inversa de Hankel de la función del potencial eléctrico y por ende, resume en líneas generales el procedimiento real de inversión de los datos de los SEV. Debido a que la determinación del potencial eléctrico en la superficie se lleva a cabo en unos pocos puntos, la evaluación de la integral en 2.80 no es la mas adecuada y el procedimiento de inversión directa no resulta exitoso.

Donde las CRV expresan directamente la resistividad y espesor de cada capa. Y su gráfico logarítmico tiene forma escalonada; la función  $\rho(z)$  y su primera derivada son discontinuas en los valores de z correspondientes a los contactos. A los valores  $\rho_i = 0$

y  $\rho_i = \infty$  corresponden semirectas paralelas al eje de ordenadas. Cumple con la ley de simetría.

Cuando se pudo realizar con rigor el cálculo de curvas de resistividad aparente se observó que la solución del problema inverso del SEV no era en general única, pues cortes en apariencia muy distintos podían dar lugar a curvas que diferían entre sí en menos del error experimental de las mediciones de campo, por lo que habían de considerarse como indistinguibles en la práctica.

Por lo tanto, las posiciones de ciertos puntos característicos de una curva de CRA, no pueden servir para determinar valores únicos de espesores y resistividades. Donde la interpretación de una misma curva de campo puede llevar a cortes geoelectricos dispares entre sí, incluso, en el número de capas.

### **3.9 Parametros y ecuaciones de Dar Zarrouk(Ecuaciones de Maillet):**

La ambigüedad del problema inverso del SEV llevó al geofísico francés Raimnod Maillet al descubrimiento de ciertos parámetros y funciones de importancia fundamental para la teoría de los métodos geoelectricos, propuso para los nuevos parámetros la denominación de parámetros de Dar Zarrouk, que se explicarán a continuación:

Si se considera un medio estratificado y delimitandose en él un prisma recto de sección cuadrada, con eje perpendicular a la orientación de las capas y de lado igual a la unidad de longitud (fig. 3.17). Si suponemos que el prisma es atravesado por una corriente eléctrica que fluye perpendicularmente a la estratificación, las diferentes capas se comportarán como conductores en serie, por lo que sus resistencias se sumarán. La resistencia del tronco de prisma perteneciente a la capa  $i$ , será evidentemente,

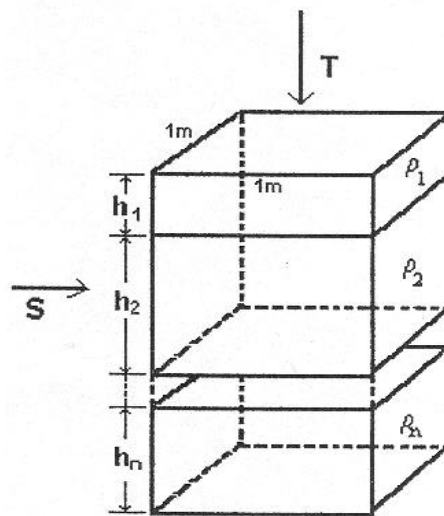
$$T_i = r_i \frac{l}{S} = r_i = \frac{E_i}{1} = r_i E_i \quad 3.81$$

Este producto se llama resistencia transversal unitaria.

Al conjunto de n capas primeras, corresponderá la resistencia total:

$$T = \sum_i E_i r_i \quad 3.82$$

La resistividad promedio en la dirección transversal  $r_t$  que experimenta una corriente que se establezca en la dirección vertical a lo largo de toda la columna se



**Fig. 3.17,** Sección geoelectrica unitaria

puede obtener haciendo el cociente la resistividad transversal dividida por el espesor total de la columna unitaria. Esto puede escribirse como sigue:

$$r_i = \frac{T}{E} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i E_i}{\sum_i E_i} \quad 3.83$$

Si ahora en el prisma se supone que la corriente fluye paralelamente a la estratificación, la resistencia del tronco de prisma que corresponde a la capa  $i$  será ahora,

$$S_i = r_i \frac{l}{s} = r_i \frac{1}{E_i \times 1} = \frac{r_i}{E_i} \quad 3.84$$

Este cociente se llama conductancia longitudinal unitaria.

El conjunto de las  $n$  primeras capas del corte presentará una conductancia total:

$$S = \sum_i \frac{E_i}{r_i} \quad 3.85$$

De igual manera que en el razonamiento anterior, la conductividad longitudinal de la columna  $s_l$  que experimenta una corriente que fluye horizontalmente puede escribirse como sigue:

$$s_l = \frac{1}{r_l} = \frac{S}{E} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{r_i}}{\sum_i E_i} \quad 3.86$$

Donde  $r_l$  es la resistividad longitudinal promedio. El coeficiente de anisotropía del corte geoelectrico viene definido por:

$$I = \sqrt{\frac{r_t}{r_l}} = \sqrt{\frac{ST}{H^2}} \quad 3.87$$

En cualquier medio horizontalmente estratificado siempre existirá anisotropía eléctrica, la resistividad transversal a la estratificación siempre será mayor que la resistividad paralela a la estratificación y el coeficiente de anisotropía siempre resulta mayor que uno. A partir de esto se puede definir la resistividad efectiva  $r_e$  y el espesor equivalente o efectivo  $E_e$  de la sección:

$$r_e = I r_l \quad 3.88 \qquad E_e = I E \quad 3.89$$

Por lo que se puede transformar un corte geoelectrico dado en un medio de resistividad homogénea y respuesta eléctrica equivalente al original, desarrollándose métodos gráficos de reducción de CRA de tres o más capas, a problemas de 2 capas y de esta manera efectuar la interpretación de los SEV sobre bases cuantitativas. Ya que se puede cambiar parámetros de una capa sin que esto altere la CRA, conociéndose como el fenómeno de equivalencia y éste está presente principalmente en dos tipos de curvas: Curvas tipo H (o en aquellas que presentan un mínimo) y en curvas tipo K (o en aquellas que presentan un máximo).

La curva de Dar Zarrouk representa la variación de la resistividad media  $\rho_m$  en función de la pseudo-profundidad  $Az$ . Su gráfico logarítmico se compone de una serie de arcos cuyos puntos de unión son angulosos; la función es continua, pero no su derivada. A los valores  $\rho_i = 0$  y  $\rho_i = \infty$  corresponden semirrectas de pendientes respectivas  $-1$  y  $+1$  cuyas intersecciones con el eje  $\rho_m = 1$  son los valores de la resistencia transversal (T) o la conductancia longitudinal unitaria (S) del conjunto de capas anteriores. Las capas siguientes a la que posee uno de dichos valores límites no

se reflejan en la curva. Cada arco tiende asintóticamente a la resistividad de la capa correspondiente. La posición en el gráfico del punto que corresponde a la profundidad  $z$  no depende de la parte del corte inferior a dicha profundidad. Se aplican el principio de equivalencia y la ley de simetría.

### **3.10 Levantamiento en campo con sondeo eléctrico vertical:**

Las etapas principales de que se compone un levantamiento con sondeo eléctrico vertical son las siguientes[Orellana, 1982]:

0. Planteamiento del problema y recopilación de datos geológicos y de otra índole sobre la zona de trabajo:

El problema cuya resolución se encarga al método eléctrico debe estar claramente planteado en términos geológicos o geotécnicos y deberá existir contraste de resistividades entre la formación que desea estudiarse y las que le rodean.

Otra condición de gran importancia es el relieve topográfico. Si éste es muy acentuado, el levantamiento se hace difícil, y en muchos casos imposible, ya que en general, no pueden aplicarse correcciones por relieve. De lo anterior se deduce la necesidad de disponer de información sobre la zona y problemas que se pretenden estudiar de un modo más concreto y detallado. En general es preciso obtener la siguiente documentación sobre la zona de trabajo:

Cartografía topográfica, fotografía aérea, mapas y cortes geológicos, información sobre el subsuelo (obtenida mediante perforaciones, pozos, labores mineras), informe de la geología de la zona, trabajos geofísicos que se hallan realizado anteriormente, clima, etc.

1. Programación del trabajo de campo:

La programación de un levantamiento utilizando un SEV, incluye aparte de las cuestiones de organización, logística, etc., la elección de la densidad de las mediciones (o sea, en este caso, la distancia entre el centro de cada SEV y el siguiente), de la situación concreta de estos centros y de la orientación de las alas



(línea AB) correspondientes. Otro punto importante es la determinación de la longitud AB final de los SEV.

- a- La densidad de las mediciones, es decir, la distancia entre los centros de SEV contiguos, depende, por una parte, del carácter y fase de la investigación, y por otra, de la estructura geológica de la zona.
- b- La elección de los centros de los SEV y de las orientaciones o azimutes de las alas deben efectuarse con cuidado y minuciosidad, especialmente cuando se trata de zonas de geología complicada.
- c- La determinación de la longitud AB final hasta la que debe llegar cada SEV no es cuestión sencilla. interviene en ella el concepto de penetración práctica o profundidad interpretable, ya que no es posible dar reglas sencillas para determinar “a priori” las longitudes finales de las líneas AB. En la practica se puede seguir alguno de estos procedimientos:
  - i. Si se conocen las resistividades de los materiales del subsuelo y sus espesores probables, pueden trazarse las curvas de resistividad aparentes, preferiblemente para varios casos posibles, y basarse en estos resultados para determinar la distancia AB final de los SEV que van a ejecutarse.
  - ii. Basarse en los resultados obtenidos por el método SEV en la misma zona, o en otras análogas o contiguas, si es que se dispone de tales datos.
  - iii. efectuar algunos SEV de ensayos estratégicos de la zona que va estudiarse.
  - iv. Tomar un valor mínimo razonable de AB y dar instrucciones concretas al operador de campo, del tipo de: “proseguir el SEV hasta obtener cinco puntos en subida”.
  - v. Utilizar la regla de base estadística que consiste en tomar la distancia AB cinco veces mayor que la profundidad que se desea alcanzar, si el

recubrimiento es más resistivo que las rocas subyacentes y diez veces en caso contrario. Este criterio suele fallar muchas veces.

## 2. Instrumentos y accesorios para la ejecución del trabajo de campo:

Para la realización de un SEV, sin exigir una gran exactitud, bastaría con disponer de una fuente de 1000 voltios de corriente continua; un voltímetro; un miliamperímetro que disponga de varias sensibilidades, por ejemplo, 10, 30, 100, 1000 y 3000 mA a fondo de escala; electrodos de acero común o inoxidable, de longitud del orden de un metro, y de 1 a 3 cm de diámetro, y carretes de cables de longitudes suficiente, que presenten reducidas resistencias óhmica, gran aislamiento y elevada resistencia a la tracción y de peso reducido.

## 3. Recopilación y elaboración de los datos obtenidos:

El proceso de medición en campo se comienza por fijar en el terreno el punto elegido para el centro del SEV, en el se coloca una estaca con el número de orden correspondiente y de esta se extienden dos cuerdas de decenas de metros a lo largo de cada ala del arreglo en dirección al rumbo, con señales numeradas que indican las sucesivas posiciones de los electrodos A, B, M y N, donde utilizando los arreglos Schlumberger o Wenner, se adopta un espaciamiento logarítmico de manera que los datos de resistividad aparente queden equiespaciados en la CRA. Para una densidad de 6 puntos por década, las distancias exactas vienen dadas por: 1.00, 1.47, 2.15, 3.16, 4.64 y 6.81. Para el caso del arreglo Schlumberger la separación entre los electrodos de potencia MN, debe mantenerse cercana, pero no exceder la relación  $l > 5MN$ . Colocando en sus posiciones los electrodos de potencia y los de corriente. A pocos metros se coloca la fuente de corriente, el voltímetro y el amperímetro. Luego se conectan los electrodos M y N a la entrada del voltímetro, los A, B a los carretes y éstos al amperímetro. Después de las indicaciones del operador, se desplazan los electrodos A y B, juntos con sus carretes, a las posiciones correspondientes a la segunda estación, prosiguiendo así hasta la última estación. En cada estación debe

compensarse cuidadosamente la tensión entre los electrodos M y N inmediatamente antes de cerrar el circuito de emisión.

El operador debe ir comprobando la calidad de los resultados que va obteniendo, por lo que debe calcular y dibujar la curva de resistividades aparentes.

La correcta anotación de las observaciones de campo es uno de los factores que más influyen en la calidad de los resultados finales. Como es obvio, las lecturas de los instrumentos deben ser registrada fielmente. Ya que debe ponerse el máximo interés en conseguir la mejor calidad posible en las curvas de campo, es decir, debe conseguir la mayor precisión en las mediciones y la adecuada eliminación de las causas perturbadoras. Si las curvas de campo son deficientes, los resultados de la interpretación lo serán también.

Es necesario poner gran cuidado, no sólo en la elección del centro y azimut de cada SEV, sino en todas las circunstancias que puedan influir en la medición, tales como estado de los cables, accesorios e instrumentos, ubicación de los electrodos, medida correcta de las distancias, etc.

También es importante comprobar si las curvas de SEV dibujadas por los operadores concuerdan con los datos de campo, repitiendo el trazado para una cierta fracción del volumen total del trabajo. En las curvas deben señalarse claramente con puntos, círculos o cruces, los valores observados, uniéndolos luego con segmentos o arcos.

#### 4. Interpretación física de los resultados anteriores:

La finalidad de los SEV, es la determinación de la estructura del subsuelo en la zona estudiada. Para llegar a ello es necesario superar dos etapas: en la primera de ella se intenta obtener la distribución de la resistividad en el subsuelo, y en la segunda, se busca el significado geológico de tales resistividades, con lo que se pasa del corte geológico de tales resistividades, con lo que se pasa del corte geoeléctrico a un corte geológico. Ambas etapas no son de fácil ejecución; la primera se basa en leyes físico-matemáticas, mientras que la segunda depende fundamentalmente de correlaciones entre datos físicos y datos geológicos.

Las dificultades de la primera etapa tienen doble origen, por una parte por la complejidad de las relaciones matemáticas que intervienen, y por otra porque la solución de los problemas planteados nunca es única en la práctica.

La distribución de la corriente eléctrica en medios heterogéneos, como el subsuelo, se rige por leyes matemáticas que no son sencillas ni elementales.

i. Interpretación cualitativa:

La interpretación cualitativa tiene por objeto conseguir una primera idea o aproximación a la estructura del subsuelo estudiado. En ella no se determinan espesores ni resistividades en valor absoluto, sino relaciones de desigualdad, tales como zonas de profundidad máxima o mínima de algún horizonte guía, delimitación de áreas de diferentes condiciones geológicas, etc.

La interpretación cualitativa se efectúa por medio del trazado de mapas y cortes que representan la distribución en el semiespacio de alguna característica o parámetro de las curvas de SEV obtenidas en el levantamiento.

En muchos casos es conveniente desarrollar la interpretación cualitativa al mismo tiempo que el trabajo de campo, lo que permite, en caso necesario, y a la vista de los resultados obtenidos, modificar el programa inicial.

A continuación, se exponen los procedimientos más interesantes de interpretación cualitativa.

ii. Mapas de tipos de curvas:

Se comienza por clasificar las curvas de SEV atendiendo, no sólo al número de capas y tipo (H, K, KH, etc.), sino también a la posición de sus extremos, valores absolutos de la resistividad aparente, etc. Luego se escribe al lado del centro de cada SEV, en el mapa de situación de éstos, un símbolo representativo del grupo que le corresponde en la clasificación, y se delimitan las zonas de SEV de características semejantes, las cuales serán zonas de condiciones geológicas aproximadamente homogéneas.

iii. Mapas de la conductancia longitudinal S:

Si el conjunto de capas comprendidas entre la superficie y el sustrato, es lateralmente homogéneo, o conserva la misma resistividad longitudinal media, su conductancia longitudinal S es proporcional a la profundidad Z del techo del sustrato.

El parámetro S puede utilizarse, por consiguiente, como índice de la profundidad del sustrato, si bien muchas veces no existirá proporcionalidad entre ambas magnitudes, por no ser la resistividad longitudinal constante. aun así, un mapa de valores iguales de S permite discernir las zonas donde la profundidad del sustrato es máxima o mínima, la presencia de fallas o cambio rápido de S, etc.

iv. Mapas de la resistencia transversal T:

Cuando existe un sustrato conductor puede determinarse para cada SEV la resistencia transversal T desde la superficie del terreno hasta dicho sustrato. Los valores de T pueden representarse en un mapa análogo al ya descrito de la S. De la curva de campo se deduce la función característica de su corte, por medio del filtro de Ghosh u otro análogo. Sustituyendo cada valor de la función característica por su recíproco se obtiene la f.c. del corte recíproco correspondiente que tendrá por la derecha una asíntota oblicua, la cual determinará un valor de S, igual a la T del corte originario.

v. Mapas de resistividad aparente:

Estos mapas se obtienen uniendo entre sí los puntos que dan igual resistividad aparente para un valor determinado, fijo para cada mapa, de la distancia AB.

Una vez trazado el mapa, puede proceder a su interpretación, en la que debe tenerse en cuenta por una parte, que los resultados que se obtienen son puramente cualitativos, y por otra, que las resistividades expresadas por las isóneas no

corresponden a ninguna profundidad determinada, sino a cierta distancia AB entre los electrodos.

vi. Interpretación Cuantitativa:

La finalidad de la interpretación cuantitativa es determinar la distribución espacial de las resistividades en el subsuelo, partiendo de los datos de resistividad aparente o de potencial observados en la superficie del terreno.

No debe olvidarse que el problema de la interpretación de SEV es ambiguo. Por ello, el interpretador no puede conformarse con hallar una distribución vertical de resistividades que satisfaga la curva de campo que se trata de interpretar, sino que debe buscar entre las soluciones válidas aquellas que amortice más con los SEV contiguos y con los datos geológicos disponibles.

Entre el método de interpretación cuantitativa más utilizados se tienen:

vii. El método del punto auxiliar:

Este método, es el de más amplio uso en la actualidad para el ajuste de curvas de SEV. Es rápido y en general suficientemente exacto, excepto cuando el corte se compone de más de seis o siete capas, o existen en él capas delgadas. Este método consiste fundamentalmente en hallar un punto de coordenadas  $(E', \rho')$  que pudiera tomarse como “cruz” de una curva de dos capas que coincidiera con la rama derecha de la curva de campo.

viii. Métodos numéricos de interpretación:

Debido al gran desarrollo y difusión de las computadoras y de las calculadoras programables, ha llevado a la invención de nuevos métodos de trabajo, que han causado una revolución en el proceso interpretativo de los SEV.

Un criterio importante para ello es el dominio en que se efectúan las operaciones o la comparación entre los datos observados y los resultados de los datos calculados, se realiza en el dominio de Dar Zarrouk.

Por otra parte, los métodos interpretativos numéricos pueden clasificarse en dos grupos: al primero pertenecen los que llegan a un corte geoelectrico solución desde

la curva de campo sin volver atrás para recalcularla. Son los métodos directos. En el segundo grupo se incluyen los métodos de aproximaciones sucesivas. En ellos se parte de una solución aproximada cuya curva de campo se calcula; las diferencias entre ésta y la inicial se van reduciendo sucesivamente por medio de retoques a la solución inicial. Cuando este proceso se efectúa por medio de cálculo matricial, el método se denomina “de inversión”.

En todos los métodos numéricos, las curvas de campo han de ser sometidas previamente a la interpolación y extrapolación. La primera tiene por objeto la obtención de los valores  $\rho_a$  correspondientes a los  $AB/2$  exigidos por el método que se utilice, y que generalmente están separados por intervalos iguales en la escala logarítmica. Conviene eliminar esta operación midiendo en el campo precisamente con dichos  $AB/2$ . La extrapolación se efectúa prolongando los extremos izquierdo y derecho de la curva de campo por medio de sendas curvas de dos capas, hasta que éstas se aproximen suficientemente a su valor asintótico.

Entre los métodos numéricos más utilizados se tienen:

1. Métodos de aproximaciones sucesivas.
2. Métodos de inversiones.
3. Métodos de Koefoed.
4. Métodos de obtención de la CDZ.

### **3.11 Calicatas eléctricas:**

La presencia de variaciones laterales de resistividad, debidas a contactos litológicos, adelgazamiento y desaparición de capas (o el caso opuesto), acñamiento de estratos o sedimentos, presencia de diques o zonas de fractura, estructuras localizadas como cavidades en litologías cársticas (vacías o rellenas con arcillas y limos), canales abandonados de ríos, paleocanales o placeres, depósitos de desperdicios o bidones enterrados producen CRA ambiguas o difíciles de interpretar si la zona es

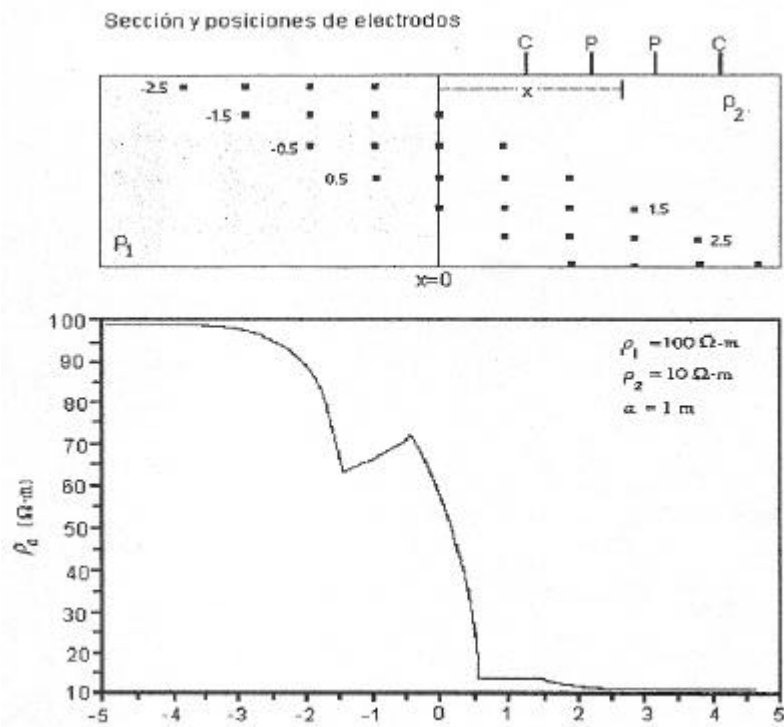
estudiada mediante SEV. Aunque desde el punto de vista teórico, las ecuaciones involucradas

No son mas complicadas que en el caso de la estratificación horizontal, resulta que para cada uno de los ejemplos citados, se deben plantear las condiciones de contorno específicas de cada caso y por ejemplo, la solución del problema de un contacto vertical no sirve para visualizar el caso de un contacto a  $45^\circ$ .

Cuando se desea obtener información sobre la distribución lateral de resistividades para una profundidad efectiva determinada, se acostumbra a utilizar un arreglo particular de electrodos, el cual se va desplazando parcial o totalmente de forma sistemática a lo largo de una línea lo más perpendicular posible al rumbo del cuerpo o estructura de interés. Este procedimiento es denominado calicata eléctrica, mapeo o perfilaje eléctrico(en los textos en lenguaje inglesa se identifica como constant-spread traversing, eléctrica, mapping o resistivity profiling)[Ward,1997].

Cuando el interés se centra en determinar variaciones de resistividad alrededor de un sitio concreto, con el fin de establecer de manera aproximada rumbos, buzamientos, direcciones de esquistosidad o fracturamiento, se hace uso de las calicatas circulares, en las cuales el arreglo se gira en torno a un punto central sin variar sus características geométricas. Existe una gran variedad de arreglos extremo de la línea se conecta el dipolo de corriente o transmisor(Tx) y seguidamente, a una distancia igual al orden n desde donde se quiere adquirir información, se conecta el dipolo de potencial o receptor (Rx). El dipolo Tx permanecerá fijo hasta que se determinen las diferencias de potencial de todos los dipolos necesarios para llegar al orden n máximo. Los puntos adquiridos bajo esta configuración se presentan en la pseudosección, equiespaciados a lo largo de una línea a  $45^\circ$  respecto a la superficie.





**Fig.3.18,** Calicata Wenner a través de un contacto vertical.

electrónicos y procedimientos de campo para llevar a cabo este tipo de trabajo [Orellana, 1982].

A diferencia de los SEV, muchas CRA de las calicatas eléctricas presentan cambios bruscos de pendiente, debido al paso de los electrodos a través de zonas con cambios bruscos de resistividad. El ejemplo más sencillo que puede ilustrar la utilidad del calicateo eléctrico es el contacto vertical. La figura 3.18, donde se visualiza la CRA que se obtiene al movilizar un arreglo Wenner de manera perpendicular a un contacto entre dos cuerpos de resistividades contrastantes. Nótese que mientras la distancia entre el centro del arreglo y el contacto es mayor que la longitud característica del primero, la resistividad aparente es muy cercana a la resistividad del medio. Los cambios de pendiente en la CRA para las posiciones  $-1.5$ ,  $-0.5$ ,  $0.5$  y  $1.5$  se producen cuando un electrodo atraviesa el contacto. Conociendo

esto, es posible determinar la posición del contacto vertical, ubicando el punto medio entre los cambios de pendiente.

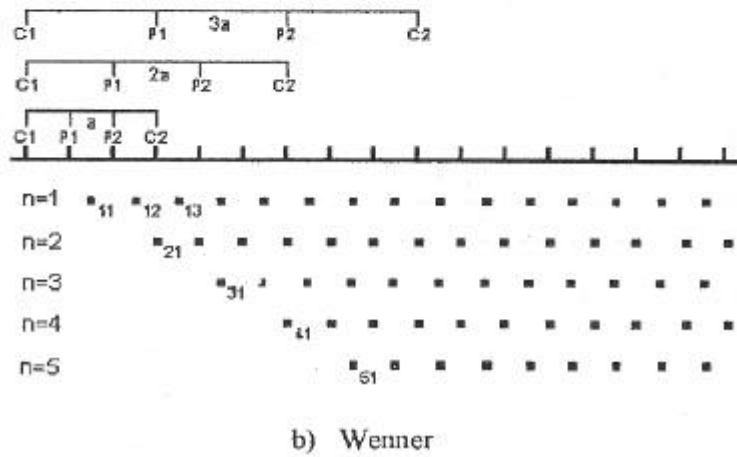
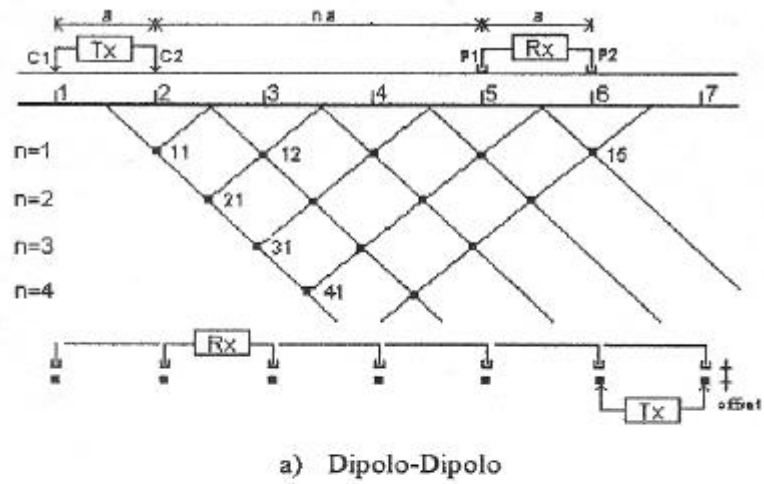
### **3.12 Tomografía 2-D eléctrica:**

Cuando sobre una misma línea en el terreno se realiza de manera combinada sondeo y calicatero, se está extrayendo de manera indirecta las contribuciones promedio de un volumen determinado del subsuelo. Cada contribución promedio es entonces atribuida a una posición específica (x, z) en el plano vertical que pasa por la línea del levantamiento, constituyendo una sección bidimensional de resistividad aparente que se denomina pseudosección de resistividad [Hollof, 1957]. En los casos donde la línea del levantamiento se escoja perpendicular al rumbo de la sección geológica, la pseudosección representará el primer paso para la obtención de una imagen bidimensional de la distribución de resistividades en el área.

En los siguientes párrafos, se explicará brevemente como se obtiene una pseudosección, las ecuaciones básicas que se emplean para la resolución del problema directo y los procedimientos generales que se siguen para obtener una imagen tomográfica de resistividades (inversión de los datos).

Se pueden emplear diferentes tipos de arreglos electródicos para obtener la pseudosección de resistividades. En prospección minera y para objetivos a gran profundidad se utiliza el arreglo dipolo-dipolo y polo-dipolo mientras que para actividades de índole geotécnica, hidrogeológica y arqueológica se viene utilizando cada vez más el arreglo Wenner. La forma como utilizan dos de estos arreglos para obtener las pseudosecciones se ilustra en las figuras 3.19a y 3.19b.

En el caso del arreglo dipolo-dipolo, se establecen dos líneas paralelas de electrodos (p. e. Una línea de estacas de acero o láminas de aluminio enterradas y la otra de electrodos impolarizables), separadas entre sí por una distancia entre 0.3 y 2 metros. La separación entre electrodos es igual a la longitud del dipolo. Desde un



**Fig.3.19,** a) Construcción de una pseudosección utilizando arreglo Dipolo-Dipolo.  
 b) Construcción de una pseudosección utilizando arreglo Wenner.

Cada vez que se miden los  $n$  dipolos de potencial, el dipolo de corriente es desplazado hasta el siguiente electrodo y el proceso se repite hasta completar la línea del levantamiento. Actualmente, con los receptores multicanal y el uso de cables multicomponentes (multicore cable), se pueden medir simultáneamente entre 6 y 8 dipolos, haciendo que el trabajo de campo dure menos tiempo y los costos por kilómetro disminuyan.

Para el caso del arreglo Wenner, la situación es algo más engorrosa ya que, si bien es cierto que las diferencias de potencial a medir son lo suficientemente altas para no tener que utilizar electrodos impolarizables, se requiere realizar tres conexiones de estacas cada vez que se va a determinar un dato y es imposible medir simultáneamente más de uno. Una vez más, con el uso de cables multicomponentes y el empleo de circuitos de conmutado controlados por computadora, es posible llevar a cabo una pseudosección de resistividades utilizando el arreglo Wenner sin tener que realizar manipulación sistemática de conexiones [Griffiths and Turnbull, 1985; [Griffiths and Baker].

Como se observa en la figura 3.19, las posiciones  $(x, z)$  de los datos de resistividad aparente están únicamente en función de las dimensiones del arreglo: la posición  $x$  corresponde al centro del dispositivo y la posición  $z$  vale  $(n+1)a/2$  para el dipolo-dipolo y  $a$  para el Wenner. Los programas comerciales para el modelado directo de secciones 2-D o para la inversión de pseudosecciones aplican coeficientes de corrección para la profundidad efectiva [Edwards, 1977].

Desde el punto de vista teórico, los potenciales eléctricos en cada electrodo del dipolo receptor se deben a las contribuciones de cada elemento volumétrico del semiespacio. Esto implica que para calcular la respuesta de un modelo 2-D, se debe partir nuevamente de la ecuación de continuidad y la definición de densidad de corriente (ecuaciones 3.5 y 3.6). Para un medio donde la resistividad es independiente de la dirección perpendicular a la sección y en presencia de una fuente puntual de corriente en la posición  $(x_s, 0, z_s)$ , la ecuación diferencial general se puede escribir de la siguiente manera [Queralt et al., 1991]:

$$\nabla \cdot [\mathbf{s}(x, z) \nabla V(x, y, z)] = -I \mathbf{d}(x - x_s) \mathbf{d}(y) \mathbf{d}(z - z_s) \quad \mathbf{3.90}$$

Donde  $I$  es la intensidad de corriente de la fuente puntual y  $\delta$  es el funcional delta de Dirac. Las condiciones de contorno para este problema del semiespacio son: La continuidad del potencial y de la componente normal de  $\mathbf{J}$  a través de cada interface de resistividad, que el potencial eléctrico  $V(x, y, z)$  tienda a cero para distancias grandes y que la componente normal sea nula en la superficie  $z = 0$ . Para las dos últimas condiciones, normalmente se aplica una condición de borde general:

$$\mathbf{s}(x, z) \frac{\partial V(x, y, z)}{\partial n} + \mathbf{a}(x, y, z) [V(x, y, z) - V_0] + Q_0 = 0 \quad \mathbf{3.91}$$

Donde  $n$  está en la dirección normal y apunta hacia fuera,  $V_0$  y  $Q_0$  representan los valores del potencial eléctrico y la componente normal de la corriente en los límites del semiespacio considerado, la función  $\alpha$  depende del tipo de condición de contorno (es nula para condiciones tipo Neumann).

Por razones de rapidez computacional y para eliminar la dependencia del potencial eléctrico en la dirección del rumbo, se prefiere trabajar con el potencial transformado  $V(x, k_y, z)$  que se obtiene de la aplicación de la transformada de Fourier coseno. Esta transformada, y su inversa se escriben como:

$$\tilde{V}(x, k_y, z) = \int_0^{\infty} V(x, y, z) \cos(k_y y) dy \quad \mathbf{3.92}$$

$$V(x, y, z) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \tilde{V}(x, k_y, z) \cos(k_y y) dk_y \quad \mathbf{3.93}$$

Donde  $k_y$  es la variable de transformación (definido como número de onda en la dirección  $y$ ). La aplicación de la transformada coseno de Fourier a la ecuación 3.90, genera la llamada ecuación de Helmholtz en el dominio del número de onda. Esta

ecuación y la ecuación para la condición de borde 3.91, se escriben de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot (\mathbf{s} \nabla \tilde{V}) - k_y^2 \mathbf{s} \tilde{V} = -\frac{I}{2} \mathbf{d}(x - x_s) \mathbf{d}(z - z_s) \quad \mathbf{3.94}$$

$$\mathbf{s}(x, z) \frac{\partial \tilde{V}}{\partial n} + \mathbf{b}(x, k_y, z) [\tilde{V} - V_0] + Q_0 = 0 \quad \mathbf{3.95}$$

En la superficie, se impone que  $\beta = 0$  y a distancias grandes se emplea una condición mixta que garantiza que el potencial disminuya como  $r^{-1}$  [Dey and Morrison, 1979]:

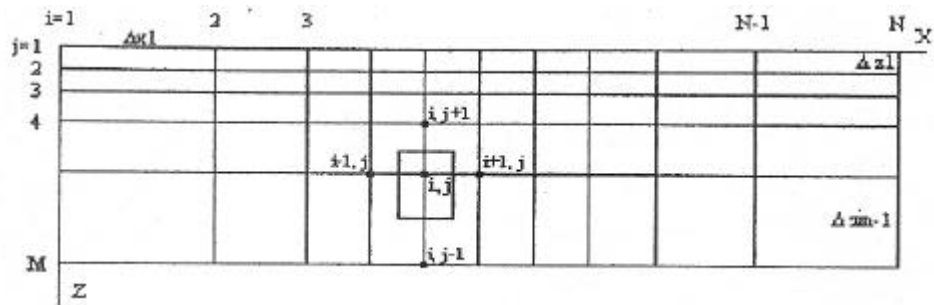
$$\mathbf{b}(x, k_y, z) = \mathbf{s}(x, z) \cos \mathbf{q} \frac{K_1(k_y r)}{K_0(k_y r)} k_y \quad \mathbf{3.96}$$

donde  $K_0$  y  $K_1$  son las funciones modificadas de Bessel de orden cero y uno, respectivamente mientras que  $\theta$  es el ángulo entre la normal a la superficie límite del semiespacio y el radio vector que parte desde la fuente puntual de corriente.

Para la resolución del problema directo, el siguiente paso es la discretización de la ecuación 3.94 (o 3.90) tomando en cuenta las condiciones de borde. La sección 2-D es descompuesta en bloques de resistividad constante, formando una malla no-regular. El tamaño de los bloques se hace mayor en las cercanías de los bordes inferiores (ver figura 3.20).

Mediante un procedimiento de discretización por área o por nodos, se plantea un sistema de ecuaciones para determinar el potencial transformado en cada bloque, cada posición de la fuente puntual de corriente [Dey and Morrison, 1979]:

$$C \tilde{V} = S \quad \mathbf{3.97}$$



**Fig. 3.20,** Discretización de la sección 2-D y las relaciones de un bloque  $i, j$  y sus vecinos.

La matriz  $C$  se denomina matriz de capacitancia, la cual presenta entre tres y cuatro elementos no-nulos por fila, debido a que el potencial eléctrico en un bloque o nodo de la red depende solamente de los potenciales, conductividades eléctricas y áreas de los bloques adyacentes. Este tipo de matriz semillena y bandeada en torno a la diagonal principal, puede resolverse mediante el algoritmo de descomposición simétrica.

La tomografía eléctrica consiste en resolver el problema inverso: se genera un modelo 2-D de bloques que cubra un área similar a la pseudosección y a cada uno de los bloques se les asigna el valor de resistividad aparente más cercano (cada punto de resistividad aparente en la pseudosección se denomina datum). Con este modelo inicial, se aplica un procedimiento iterativo, el cual va modificando los valores de resistividad de cada uno de los bloques de acuerdo hasta lograr que la diferencia cuadrática media entre los datos observados (datos de campo) y los generados por el modelo llegue a ser mínima.

Existen diversos procedimientos para llevar a cabo la inversión de los datos [Oldenburg and Lee, 1994], entre los procedimientos más simples se tiene el publicado por Barker, en el cual se utiliza el procedimiento de Dey y Morrison para calcular la respuesta de cada uno de los modelos. Después de cada iteración, la resistividad de cada bloque es modificada de acuerdo al procedimiento empleado por

Zhody [Zhody, 1989] para interpretar automáticamente las curvas de resistividad aparente de los SEV [Barker, 1992]:

$$\mathbf{r}_{k+1}(i, j) = \mathbf{r}_k(i, j) \frac{\mathbf{r}_0(i, j)}{\mathbf{r}_{ci}(i, j)} \quad \mathbf{3.98}$$

Donde  $k$  es el número de la última iteración realizada,  $\rho_k(i, j)$  es la resistividad del bloque en la posición  $(i, j)$  después de la iteración  $k$ ,  $\rho_0(i, j)$  es la resistividad aparente obtenida en campo y  $\rho_{ci}(i, j)$  es la resistividad aparente calculada para la iteración  $k$ . Aunque la convergencia no es rápida, los errores RMS no sobrepasan el 5% en datos de buena calidad.

Actualmente se encuentran disponibles versiones de programas que calculan de manera aproximada la respuesta volumétrica de un semiespacio en el cual la conductividad eléctrica depende de las tres direcciones independientes. Al igual que otras técnicas geofísicas, el procesamiento de los datos de resistividades va en la dirección de generar imágenes en tres dimensiones.

### **3.13 Aplicaciones de las técnicas de resistividad:**

Las técnicas de resistividad presentan un amplio espectro de aplicaciones. Las áreas de aplicación van desde la geofísica básica, cuencas petroleras y minería hasta la geofísica ambiental y la geotecnia. Aunque la interpretación no es particularmente directa y unívoca, como puede resultar con los métodos potenciales y la sísmica, los levantamientos de resistividades pueden ser ampliamente valiosos. En muchos casos, donde se tiene precisada la zona de estudio y se requiere información más detallada, es el método que finalmente se escoge sobre la base de consideraciones de costo [Burger, 1992].

Entre las aplicaciones en ambientes y geotecnia se pueden citar:

- Delineación de minas subterráneas abandonadas.



- Delineación de sitios arqueológicos.
- Ubicación de sitios para depósitos de desechos químicos y nucleares.
- Salinización y desalinización de zonas cultivadas en espacio y tiempo.
- Estado de las fundaciones y detección de fugas en diques.
- Evaluación de riesgo sísmico, movimiento de fallas.
- Mapeo geológico con fines geotécnicos.
- Integridad de fundaciones en estructuras e interfase suelo-roca.
- Delineación, evaluación monitoreo y control de contaminantes en aguas subterráneas.
- Determinación de la interfase suelo-roca en ambientes cársticos.
- Delineación, detección de fugas y barriles en lagunas y depósitos de desechos.
- Delineación y evaluación del contenido de agua en zonas de deslizamiento.
- Detección y delineación de materiales estériles para agregados: Arenas, gravas, calizas.
- Delineación de capas activas y lentes de hielo en zonas con permafrost.
- Delimitación de áreas con actividad geotérmica.
- Detección de sitios potenciales de deslizamiento, capa meteorizada.
- Ubicación de carreteras, interfase suelo-roca.
- Detección y delineación de cavidades.
- Evaluación de potencial de corrosión de suelos para la ubicación de tuberías.

## CAPITULO 4

### DISEÑO DEL PROGRAMA PAR-UCV.

#### 4.1 LabVIEW, programación gráfica:

Los instrumentos convencionales consisten en un conjunto de perillas, switches e indicadores que se encuentran en el exterior de una caja que alberga los componentes eléctricos y/o electrónicos que constituyen los circuitos que procesan, controlan y monitorean señales de entrada, o que pueden generar señales de excitación o control. Esto constituye un instrumento clásico, ya que está diseñado para realizar ciertas funciones y no puede ser configurado para que lleve a cabo otras tareas. Si se desea llevar a cabo una modificación, se debe contar con un especialista que diseñe, desarrolle, pruebe e implemente a nivel del hardware los nuevos circuitos, resultando una inversión costosa y no justificada. En este caso resulta más ventajoso adquirir un equipo lo suficientemente flexible como para poder mejorar funciones, incluir otras o simplemente plantear un nuevo tipo de instrumento de medición [Benavides, 1999].

El concepto de instrumento virtual se introduce al mercado en octubre de 1986 con la aparición del software de análisis e instrumentación LabVIEW® de la compañía norteamericana National Instruments. Un instrumento virtual es un módulo de software que simula el panel frontal de un equipo y que se apoya en elementos de hardware accesibles por la computadora (tarjetas de adquisición de datos, tarjetas DSP, GPIB, VIX, RS-232) para llevar a cabo una serie de medidas, generar señales o realizar procesos de control, como si se tratase de un instrumento real.

De este modo, cuando se ejecuta un programa que funciona como instrumento virtual (en adelante se designará como vi, acrónimo de *virtual instrument*) el usuario ve en la pantalla de la computadora un panel de control y monitoreo. A partir de los datos

reflejados en el panel frontal, el vi debe actuar recogiendo o generando señales, como la haría su homólogo real.

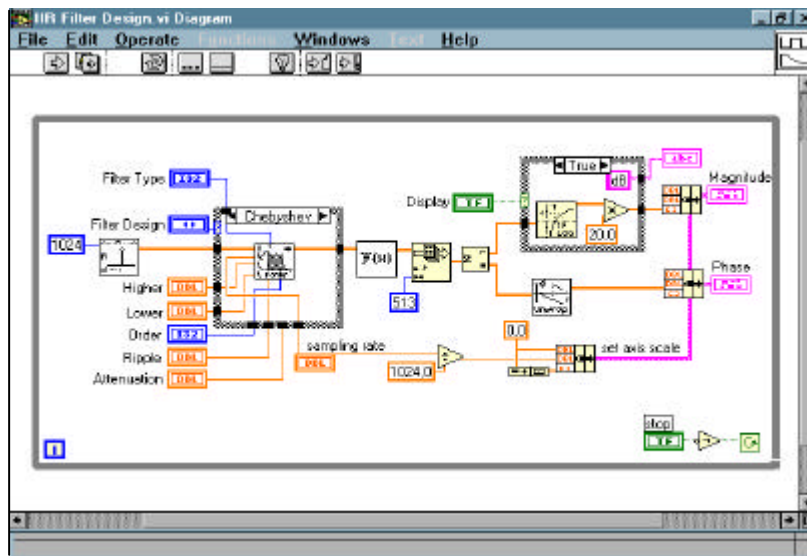
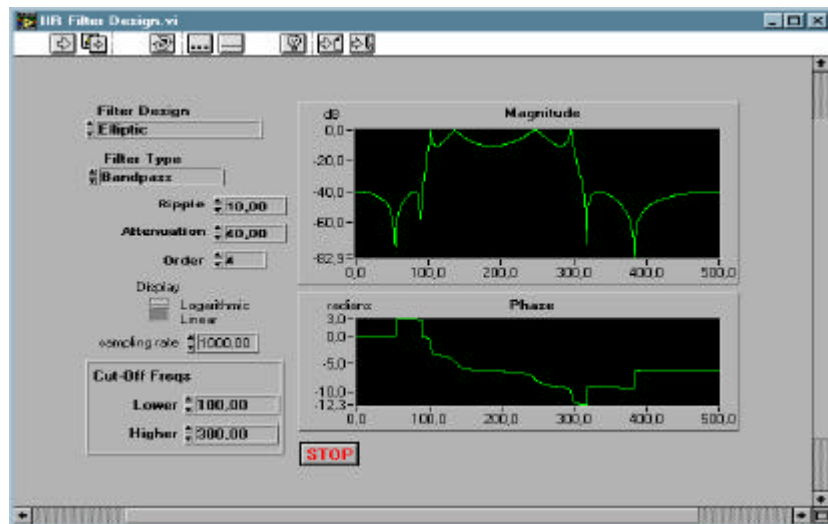
Aparte de la ventana que constituye el panel frontal del vi, existe otra que soporta el programa en lenguaje gráfico, el cual se denomina *diagrama*. Cada panel presenta una librería de funciones, en el caso del panel frontal, cualquier control que sea “pegado” en él, instantáneamente define una nueva variable cuyos valores vendrán determinados por lo que el usuario ajuste desde el panel (controles) o por los valores que genere el programa mismo (indicadores). Cada control o indicador en el panel frontal tiene asociado un objeto o *terminal* en el diagrama.

La programación de un vi consistirá en conectar estos terminales a *bloques funcionales*, que se encuentran en la librería de funciones(o puede ser elaborados por el programador), los cuales presentan puntos de entradas y salidas de datos. La conexión de estos objetos se lleva a cabo mediante cables ficticios por donde fluyen los datos.

La figura 4.1(a) muestra el panel frontal de un programa de diseño de filtro de respuesta impulsiva infinita (IIR Filter Desing), sus controladores que permiten escoger el diseño y tipo de filtro, atenuación, orden y los límites de las frecuencias bajas y altas. Oprimiendo el botón con una flecha(botón run), el programa se ejecuta. La función de los botones restantes es con fines de edición/compilación, hilado de los objetos, rotulación ejecución paso a paso, etc [LabVIEW Tutorial; LabVIEW User Manual, Johnson, 1994]. La figura 4.1(b) muestra el diagrama del vi. Los terminales y los bloques funcionales (en este caso los generadores del filtro) conectados apropiadamente mediante cables. El color de los cables indica el tipo de dato que “fluye” entre controles y bloques funcionales.

Los tipos de datos en LabVIEW son tan variados como los de cualquier lenguaje de programación. Se tiene datos booleanos (identificado con las siglas TF, verde claro) de 16 bits, datos numéricos de precisión extendida(EXT, naranja) de 80 bits (en la plataforma Windows), doble precisión con coma flotante (DBL, naranja) de 64 bits, precisión simple (SGL, naranja) de 32 bits, enteros de 32, 16 y 8 bits (I32, I16 e I8 en azul, respectivamente y números complejos a precisión extendida, doble y sencilla

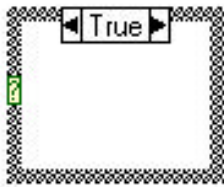
(CXT, CDB y CSG en naranja, respectivamente). Se cuenta con arreglos multidimensionales de números y booleanos, strings (conjunto de letras), paths (direcciones de ubicación de archivos, en verde) y clusters (agrupación de varios tipos de datos, en marrón).



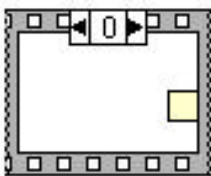
**Fig.4.1,** a) Arriba, *panel frontal del programa IIR Filter Desing.vi.*  
b) Abajo, *diagrama del programa IIR Filter Desing.vi.*

## Estructuras:

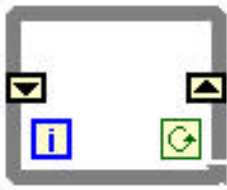
Unos de los mayores logros de la programación en G son las *cajas* que pueden contener diagramas y otras cajas en su interior. La información entra y sale a través de *túneles* de datos y las condiciones de operación se encapsulan en sus bordes y en objetos no removibles en su interior. Se puede hacer uso de un tipo de estructura condicional, una secuencial, dos iterativas, y una para realizar operaciones algebraicas [Benavides, 1999].



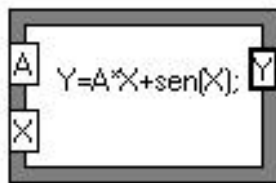
La estructura *Case* presenta dos cuadros: el true (visible al lado) y el false. Si se conecta un booleano o una cantidad mayor si el usuario los define y conecta un control enumerado. El cuadro amarillo de interrogación es el conector lógico que permite la sección de alguno de los dos cuadros. Dependiendo del estado booleano o control enumerado del conector lógico, uno de los cuadros será ejecutado. Puede usarse entradas diferentes para cada cuadro pero las salidas deben ser comunes a todos.



La estructura *Sequence* contiene superpuestos tantos cuadros como sea necesario, la información entra por el #0 y sale por el último cuadro. Mediante las secuencias locales (cuadro amarillo) se hace pasar la información de un cuadro al otro. Muy útiles para forzar un orden de ejecución en un programa, se puede llevar a cabo operaciones, llamado y escritura de datos en un orden explícito. Cada vez que sea estrictamente necesario, el uso de la estructura *sequence* permite una efectiva programación de flujo de datos: una operación dada del programa no se llevará a cabo hasta que todos los datos de entrada necesarios en un *nodo* estén disponibles.



La estructura *While loop* permite ejecutar iterativamente un procedimiento, contar el número de iteraciones (cuadro azul), iniciar o detener el procedimiento (terminal condicional, cuadro amarillo dentro de él) y pasar información de una iteración a la otra, utilizando *shift registers* (cuadro con flechas en sus bordes). Equivalente a la intrucción *DO WHILE*, permite realizar fácilmente filtrado digital, modelado de sistemas discretos, transformada Z y muchas otros procedimientos [AN008]. Los shift registers operan entregando datos desde el cuadro del borde izquierdo y recibiendo el mismo tipo de dato en el cuadro derecho. Para la iteración siguiente, la información recibida en el lado derecho se transferirá al izquierdo y podrá ser utilizado en los cálculos. Los *shift registers* pueden manejar cualquier tipo de datos (booleanos, string, números, arreglos n-dimensionales, etc. y pueden ser inicializados antes de ser utilizados por primera vez.



La estructura *Nodo de fórmula* permite definir variables de entrada (números o booleanos) y generar una salida en función de las relaciones matemáticas que se establezcan en su interior. El nodo de fórmula emplea la notación de Backus-Naur y resulta muy útil para realizar cálculos complejos donde estén presentes funciones trigonométricas, logaritmos, exponenciales y muchas otras funciones.

Otra cualidad de la programación con LabView es la posibilidad de manejar el mismo conjunto de datos entre varios programas que corren en paralelo. En lenguaje G, una variable es conectada entre dos objetos del diagrama. Por definición, esto es una variable local. Sin embargo, uno puede utilizar una función denominada *variable global*, que consiste en un panel frontal en el cual se pueden colocar cualquier tipo de controles pueden ser llamados y utilizados en los diagramas de cualquier otro programa, compartiendo así la información. Un riesgo que se corre con las variables globales es que si no se establece con claridad la secuencia del flujo de datos, puede

ocurrir una *condición de carrera*. Esto sucede cuando uno o más eventos pueden suceder en cualquier orden pero el programador está contando con que ocurran en un orden específico. Leer una variable global antes de guardar en ella la información que queremos es un ejemplo de esta condición.

Respecto a las variables locales, con LabVIEW es posible leerlo escribir datos a los controles del panel frontal sin conectarlos a su respectivo terminal indicador. Su uso puede simplificar mucho la distribución de los objetos en el diagrama del programa pero puede traer confusión si se usan extensivamente o si no se documenta adecuadamente el programa.



La construcción y operación sobre arreglos de números resulta muy sencilla y poderosa. Se puede definir un arreglo bien sea para mostrar resultados (indicador) o para introducir datos (control). La figura de la izquierda muestra un ejemplo de un control para un arreglo de 3 dimensiones. La columna de la izquierda son los controles de los índices del arreglo, los cuales son ordenados de arriba hacia abajo como fila, columna y, plano. obviamente, la dimensión del arreglo puede ser mayor a 3. Desde el diagrama, el programador puede inicializar, extraer reemplazar números del arreglo, extraer o reemplazar filas columnas o planos del arreglo, trasponer, rotar, invertir, fraccionar y otras operaciones mas específicas sin la necesidad de desarrollar el programa [LabVIEW Function Reference Masnual].

Otro elemento importante para identificar archivos, escribir caminos (paths) para su lectura o grabación, comunicación con instrumentos de medición o control son los *strings*. Uno puede disponer de controles o indicadores de strings en el panel frontal y desde el diagrama uno puede formatear, leer, escribir, indexar, etc. También, se puede convertir un arreglo de strings en un arreglo numérico y viceversa, permitiendo leer o escribir en el formato de hoja de cálculo.

Otra posibilidad muy práctica es que se pueden reunir diferentes tipos de controles o indicadores en una unidad más simple y manejable denominada *Cluster*. Su función



es conceptualmente la misma que un *récord* en *Pascal* o una estructura en *C*. Un cluster en el diagrama reduce la cantidad de cables de conexión. La figura de la izquierda ilustra un cluster que contiene un arreglo 1-D, un control numérico y un switch booleano. los clusters pueden ser leídos utilizando la función *unbundle* o *unbundle by name* (desagrupar o desagrupar por nombre) o pueden ser construidos o reescritos usando la función *bundle* o *bundle by name* (agrupar o agrupar por nombre). Las primeras funciones requieren conservar el orden establecido dentro del cluster en el panel frontal, mientras que las segundas (por nombre) pueden ser seleccionadas de acuerdo al nombre dado (p.e. arreglo 1-D, switch, etc.). Las posibilidades de los clusters van mucho mas allá de lo anteriormente citado: utilizando estructuras iterativas (el for loop o while loop) se pueden ensamblar arreglos de clusters pudiéndose almacenar, manejar y leer información sobre configuración de programas de control, asignación de tareas, recopilar la información proveniente de varios procesos del programa, etc.

#### 4.1.1 Tipos de datos y conversión:

La programación en lenguaje gráfico con LabVIEW ofrece soporte para todo tipo de datos. Los números pueden ser de punto flotante o entero, con varios grados de precisión, los booleanos, bytes, strings y numéricos pueden ser combinados libremente en las diferentes estructuras que ofrece la plataforma, dando libertad total para hacer que el tipo de dato se adapte al problema. Otro detalle muy útil es que muchas de las funciones originales que ofrece la plataforma son *polimórficas*. El polimorfismo es la habilidad de ajustar datos de entrada que son de diferentes tipos y realizar una(s) operacion(es), por ejemplo, se puede sumar un arreglo de enteros de 32 bits con un número a doble precisión sin tener que efectuar ninguna conversión previa, en este caso particular, el arreglo de números enteros es convertido en números del tipo punto flotante. Se pueden realizar muchas operaciones de este tipo,



sin llegar a extremos de querer obtener un resultado sumando un booleano a un string. El polimorfismo ha resultado ser un concepto útil de la programación orientada a objetos[Johnson, 1994].

#### **4.1.2 Archivos:**

Unos de los productos finales que cualquier aplicación computacional debe ofrecer es el leer y guardar los datos en un formato adecuado. LabVIEW ofrece una librería de funciones que permite abrir, crear, leer, escribir y cerrar archivos de diferentes tipos. El *formato ASCII*, tiene los datos en forma de texto, lo que implica que los datos deben ser convertidos a strings antes de guardarse. Una ventaja es que pueden ser leídos en un procesador de palabras pero su lectura y escritura implica realizar conversiones de formato, lo que significa mayor tiempo de ejecución.

Los archivos en *formato binario* contienen una imagen bit a bit de los datos, lo cual permite su visualización en procesadores de palabras ni puede ser recuperado sin conocer en detalle la forma como fue construido. La ventaja del formato binario reside en que no se necesita realizar ningún tipo de conversión para leer o guardar, la velocidad de procesamiento es superior y los archivos son mucho más pequeños que los ASCII.

Finalmente, LabVIEW ofrece el *formato Datalog*. Son también de tipo binario pero los datos se guardan como una secuencia de registros en la forma de un solo tipo de dato arbitrario que se especifica cuando se crea el archivo. Estos registros pueden ser complejos, p.e. clusters, arreglos, etc. [Apéndice A de LabVIEW, User manual].

#### **4.1.3 Puerto serial:**

La comunicación serial es un popular medio de transmitir y/o recibir datos entre una computadora y un periférico. LabVIEW proporciona herramientas de gran utilidad

para el manejo del puerto serial. Todas las funciones necesarias se encuentran ya programadas en forma de instrumentos virtuales.

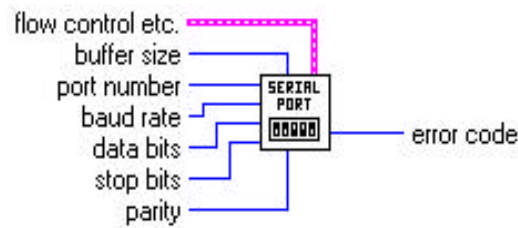
Es importante tener en cuenta que los pasos a seguir al utilizar el puerto serie son los siguientes:

- Realizar la configuración del puerto serial, inicializándolo según las características que se deseen para la comunicación. Ya no será necesario volver a configurar el puerto mientras no se varien las condiciones de comunicación.
- Acceder al puerto serial para recibir o enviar datos tantas veces como desee.

En una comunicación serie es conveniente realizar un control sobre la transmisión y la recepción de datos a fin de que ésta se lleve a cabo de forma correcta, es decir, que no se pierda información. Uno de los principales problemas que se presentan es la vigilancia de los buffers que destina el puerto serie para la recepción y transmisión de datos. Estos buffers son zonas de memoria reservada donde una de sus funciones es de guardar los datos que van llegando por el puerto serial desde el periférico. Estos datos se mantienen almacenados hasta que son leídos por el programa que gestiona el puerto serial. Es posible que la llegada reiterada de información sin que ésta sea leída acabe por llenar la capacidad del buffer de recepción. En este caso, los nuevos, primero se han de leer algunos de los datos almacenados en el buffer, con lo que en éste se dejará espacio libre que podrá ocuparse con la nueva información que se reciba.

Por otra parte, en el buffer de emisión se almacenan los datos que se desean enviar al periférico, en espera de que la transmisión sea posible, es decir, en espera de que el periférico se encuentre preparado para recibir. El usuario sólo ha de leer del buffer de entrada los nuevos datos recibidos y escribir en el buffer de salida los datos que desee enviar, despreocupándose de cómo se llenan o vacían estos datos.

El icono que ha de utilizar para la configuración del puerto serial es el llamado *Serial Port Init.vi*, ejecutando este icono se eligen las características de comunicación que se desean para el puerto serial, es decir, el tipo de protocolo a utilizar, la velocidad de transmisión, la paridad, etc. En la fig.4.2 se muestra el icono y sus conexiones.



**Fig.4.2,** Muestra el icono *Serial Port Init* y sus conexiones.

A continuación se describen las diferentes conexiones del icono, su función y el tipo de dato que se la ha de introducir, en el caso de que se trate de una conexión de entrada, o el tipo de dato que entrega, si se trata de una conexión de salida.

***Flow Control etc (Control de flujo. etc):*** Esta es una conexión de entrada del tipo “cluster”. Los parámetros que se introducen por esta conexión son relativos a los protocolos de comunicación, *Hardware* y *Software Handshaking*.

***Buffer Size(Tamaño de Buffer):*** En esta conexión se le indicará al puerto el tamaño que se desea que tengan los buffers de entrada y salida que se utilizarán en la transmisión y recepción de mensajes. El tamaño de estos buffers es de 1024 bytes como mínimo.

***Port Number(Número del puerto):*** En esta entrada se ha de introducir un valor entero entre 0 y 13. Con este valor se indica al PC cuál de sus puertos serial se desea configurar.

***Baud Rate(Velocidad de transmisión):*** El valor que se introduzca en esta entrada se tomará como la velocidad de transferencia de datos, en baudios, con la que se configurará el puerto serial. A esta velocidad se realizarán todas las transferencias, tanto el envío como la recepción de datos. Valores típicos de velocidad de transferencia son los 1200, 2400, 4800, y los 9600 baudios.

***Data Bits(Bits de datos):*** En esta conexión se ha de indicar el número de bits de los bytes recibidos que se considerarán como bits de datos. Es decir, cuántos bits han de ser

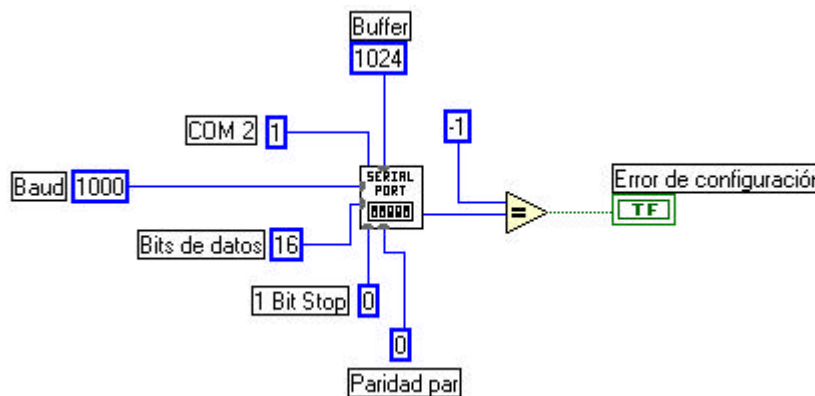
tomados como bits de datos en cada byte recibido. Los valores que puede tomar esta entrada van de 5 a 8 bits de datos.

**Stop Bits**(Bits de parada): En esta entrada se han de introducir los bits de stop que se deseen utilizar en las transferencias. Los valores que puede tomar son: **0** para 1 bit de stop o **1** para 2 bits de stop.

**Parity**(Paridad): En esta conexión se ha de indicar el tipo de paridad que se desea utilizar en la comunicación. Se introducirá un **0** en el caso de no querer emplear ningún tipo de paridad, un **1** para utilizar paridad impar o un **2** en el caso de querer paridad par.

**Error Code**(Codigo de error): Esta es la unica conexión de salida que presenta el icono de configuración del puerto serial, indicando si la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de stop, la paridad o el número del puerto serial se encuentren fuera de rango.

A continuación se muestra un ejemplo de configuración del puerto serial (fig.4.3).



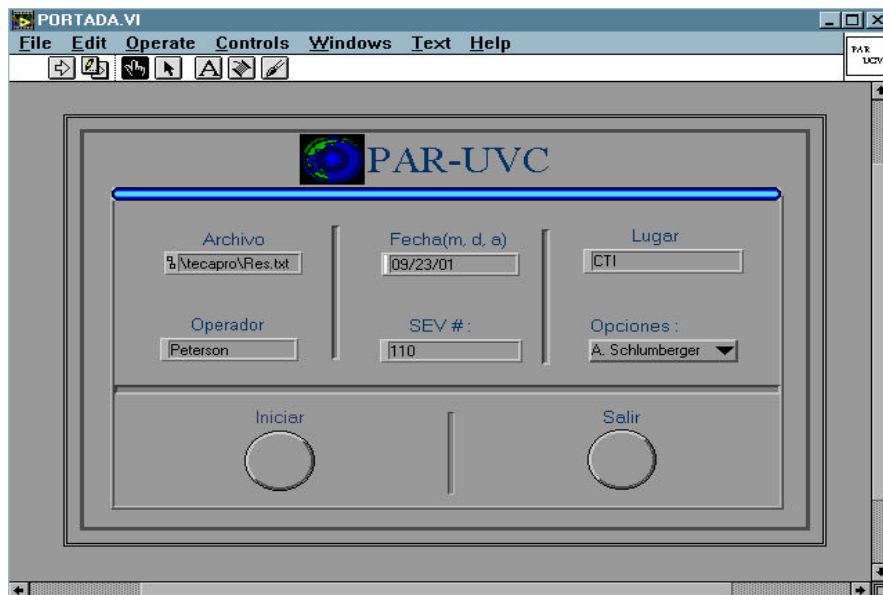
**Fig.4.3,** Ejemplo de la configuración del puerto serial.

## 4.2 Descripción general del programa PAR-UCV:

El siguiente capítulo, está enfocado en presentar una descripción detallada del programa **PAR-UCV** y de cada uno de los subprogramas y módulos que lo conforman.

El programa **PAR-UCV** tiene por finalidad controlar el dispositivo electrónico **BLC-6**, para realizar la automatización de los electrodos, para la ejecución de un sondeo eléctrico vertical, de una calicata y/o de una tomografía 2-D.

A su vez este programa está compuesto por un panel frontal principal, el cual tiene la opción de guardar en un archivo tipo texto los datos del sondeo eléctrico vertical. Estos datos se introducen a través de cinco indicadores de caracteres (Fecha, lugar donde se realizó el SEV, nombre del operador, el número del SEV) y de un control en el cual se podrá escoger el tipo de arreglo a utilizar, (Fig.4.4).

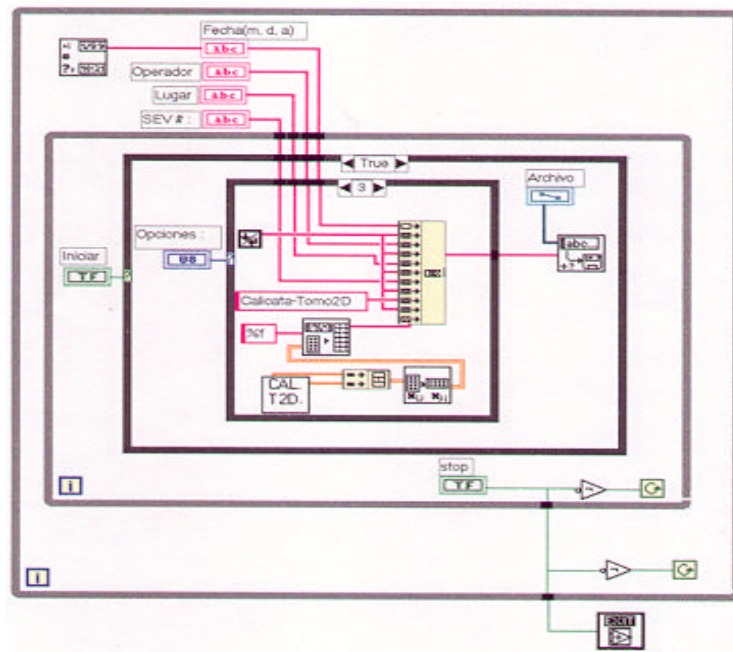


**Fig.4.4,** *Panel frontal del programa PAR-UCV.*

El sistema **PAR-UCV** consta de cuatro subprogramas: Arreglo Schlumberger, Arreglo Wenner, Arreglo Wenner Offset y Arreglo Calicata-Tomografia2D.

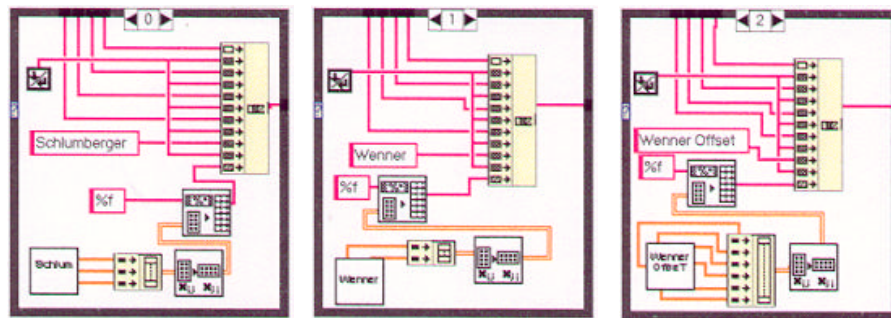
#### 4.2.1 Descripción del diagrama del programa PAR-UCV

El diagrama posee dos estructuras *While loop*. La estructura *While loop* mas interna permite la ejecución de los subprogramas (Arreglo Schlumberger, Arreglo Wenner, Arreglo Wenner Offset y Arreglo Calicata-Tomografía2D). Y una vez que alguno de los subprogramas haya sido ejecutado, lo mantiene activado hasta que se aborte. Mientras que la estructura mas externa mantiene funcionando al programa **PAR-UCV** hasta que se elija una de las opciones o se apriete el botón *stop*, fig.4.5.



**Fig.4.5**, diagrama principal del programa **PAR-UCV**.

En el diagrama de bloques se encuentran otras estructuras, como la estructura de *case* donde la pantalla *true*(verdadero) se ejecutará cuando se oprima el botón *iniciar*, dentro de esta se encuentra la estructura *sequence*. La secuencia 0 contiene al subprograma *Arreglo Schlumberger*, la secuencia 1 contiene al subprograma *Arreglo Wenner*, la secuencia 2 contiene al subprograma *Arreglo Wenner Offset* y la secuencia 3 contiene al subprograma *Arreglo Calicata-Tomografia2D*, (Fig. 4.6).



**Fig. 4.6,** Las diferentes secuencias de la estructura *sequence*.

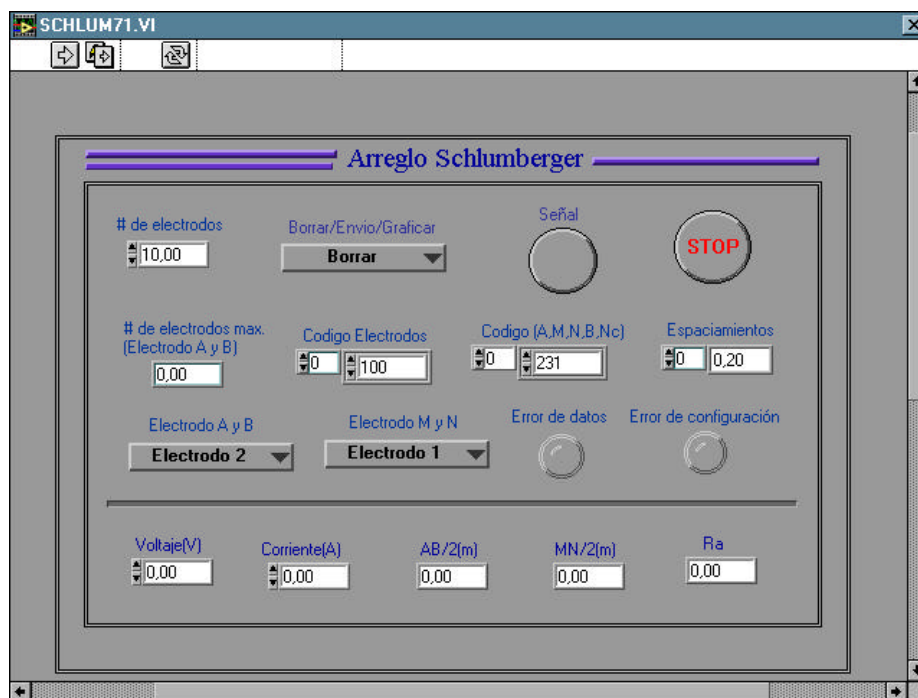
### 4.3 Descripción de los subprogramas del programa PAR-UCV:

A continuación se realizará una descripción de cada uno de los subprogramas y módulos del software **PAR-UCV**.

### 4.3.1 Programa Arreglo Schlumberger:

Este programa realiza exclusivamente la automatización de los electrodos para realizar sondeo eléctrico vertical tipo Schlumberger y de graficar la curva de resistividad aparente, para llevar un mejor control en campo.

El panel frontal de este programa consta de 5 controles, 10 indicadores numéricos, 2 indicadores tipo LEDS y un gráfico logarítmico( fig.4.7).



**Fig.4.7,** Panel frontal del programa arreglo Schlumberger



#### 4.3.1.1 Descripción del panel frontal:



Este indicador numérico, permite colocar el número de electrodos que se utilizará en el sondeo, donde el mínimo número de electrodos que se puede colocar es 4 y el máximo 32.



Este control permite seleccionar la acción a realizar, siendo esta:

**Borrar:** Aquí el programa desactivará a todos los electrodos, no permitirá circulación de corriente por el sistema **BLC-6**.

**Envío:** El programa enviará los códigos de acción (A, B, M, N o no conectar) que se le asignarán a los electrodos.

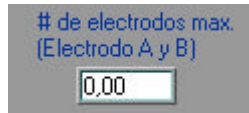
**Gráficoar:** Esta acción debe ser realizada después de enviar los datos, ya que se deberá obtener primero los datos del voltaje y de la corriente de la medición correspondiente.



Este botón permite ejecutar la acción de: Borrar, envío o gráficoar. Realizando una acción a la vez.



Permite detener el programa y regresar al panel frontal principal del programa **PAR-UCV**.



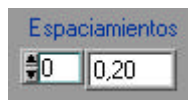
El siguiente indicador permitirá visualizar el número máximo del electrodo en que se puede medir A, B. Este valor corresponde desde el centro del tendido (Una sola ala del tendido debido que es simétrico).



El indicador de códigos de electrodos, se utilizará para asignarle un código a los electrodos que se utilizarán. La enumeración irá desde 100 hasta 132, comenzando por uno de los extremos del tendido.



Este indicador le asignará una acción a cada electrodo, ya que serán A, B, M, N y los restantes estarán desconectados. La acción para el electrodo A estará asignado con el número 231, para el electrodo M estará asignado con el número 247, para N con el número 175, B con número 183, y la acción de no conectar estará asignada con el número 167. Estos números provienen de la codificación binaria de los relés del dispositivo electrónico **BLC-6**.



El siguiente indicador contiene los espaciamientos que se utilizarán en el SEV, estos van desde 0.20 hasta 128m. Estos espaciamientos fueron obtenidos utilizando una progresión geométrica de  $3 \times 2^{n-1}$ , lo que reduce el número de electrodos utilizados en el SEV (32 electrodos)[Baker].



Este control aumenta el espaciamiento de los electrodos de corriente, comenzando con el electrodo 2, desde el centro del tendido hasta el electrodo 16 (Solo un ala el tendido debido a que el arreglo es simétrico).



Con este control se irá aumentando el espaciamiento de los electrodos de potencial, comenzando desde el centro del arreglo con el electrodo 1 hasta el electrodo 15 (Por la simetría del arreglo).



Este indicador tipo LED se encenderá cuando se produzca un error de datos. Este error se producirá cuando la cadena de caracteres sobrepasen en extensión al tamaño configurado para el buffer de escritura.

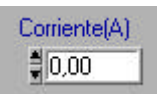


El indicador tipo LED se encenderá, cuando se esté produciendo un error en la configuración del puerto serial.

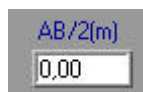
Por lo que se tendrá que revisar de que no se encuentren fuera de rango: El tamaño del buffer, el número del puerto, la velocidad de transmisión, el bit de parada y el tipo de paridad.



Con este indicador se introducirá el valor del voltaje(en voltios), que se obtenga durante la medida correspondiente del SEV para así, obtener la resistividad aparente.



Este indicador servirá para introducir los valores de la corriente(en amper), que sea obtenida en la medida correspondiente del SEV, para poder obtener la resistividad aparente.



El siguiente indicador permitirá visualizar el valor de  $AB/2$ , que se obtenga en la respectiva medición del SEV.



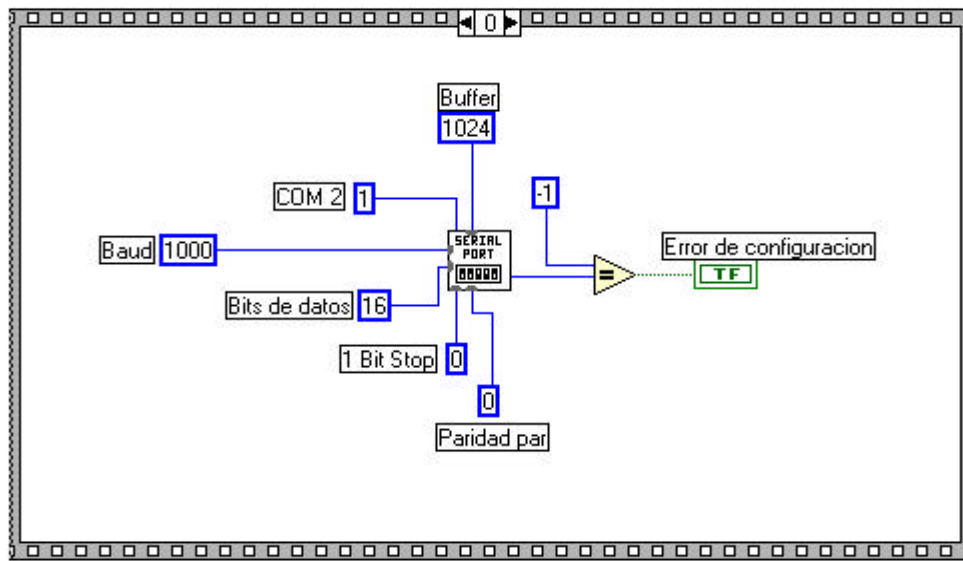
Este indicador permitirá visualizar el valor de  $MN/2$  que se obtenga en la respectiva medición del SEV.



Con este indicador se permitirá visualizar el valor de resistividad aparente que se obtenga en la respectiva medición del SEV.

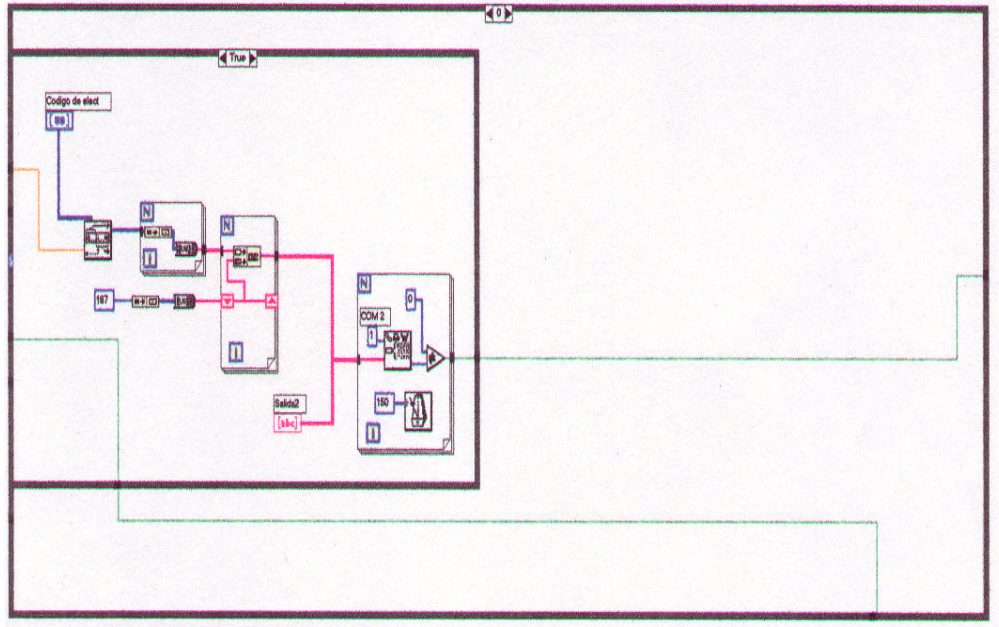
#### 4.3.1.2 Descripción del diagrama:

La estructura principal del programa consta de una estructura *sequence* de dos secuencias. En la secuencia 0 se llevará a cabo la configuración del puerto serial de acuerdo a las características del dispositivo electrónico (Fig.4.8). Una vez configurado el puerto, se pasa a la secuencia 1.



**Fig.4.8,** *Secuencia 0 de la estructura sequence.*

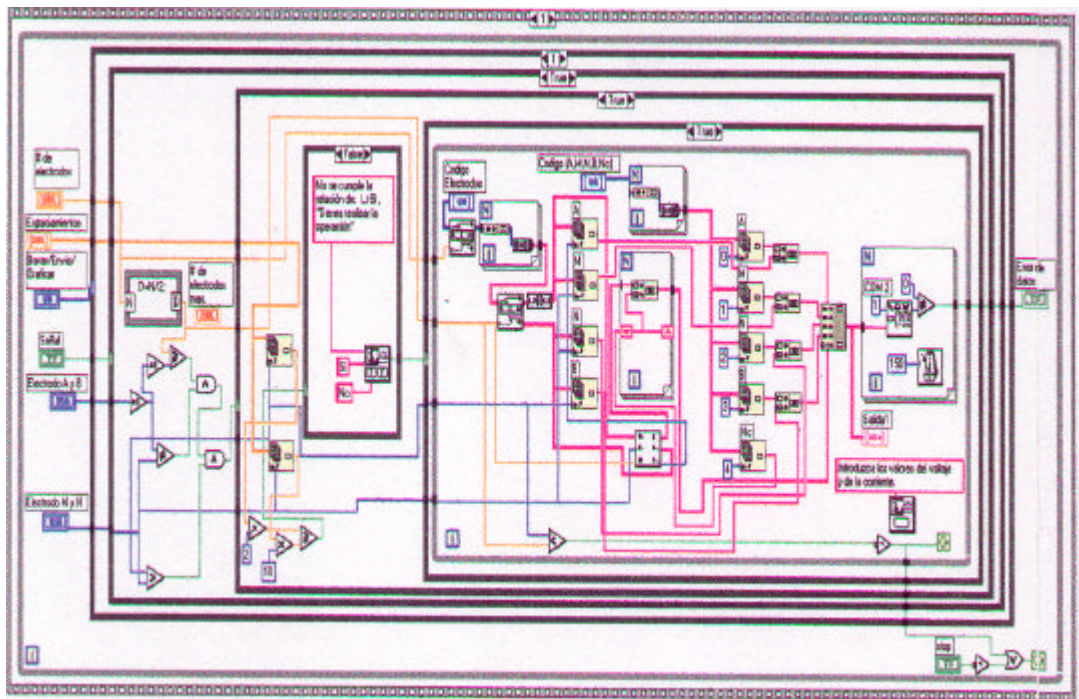
En secuencia 1 se ejecutará la estructura *case*, que posee 3 ventanas. La primera ventana posee una estructura *case*, que se ejecutará cuando esta se le asigne el valor booleano *true*. En esta estructura se le asignarán a todos los electrodos el código de acción 167, por lo que se desconectarán todos los electrodos (Fig.4.9).



**Fig.4.9,** *Secuencia 1, ventana 0.*

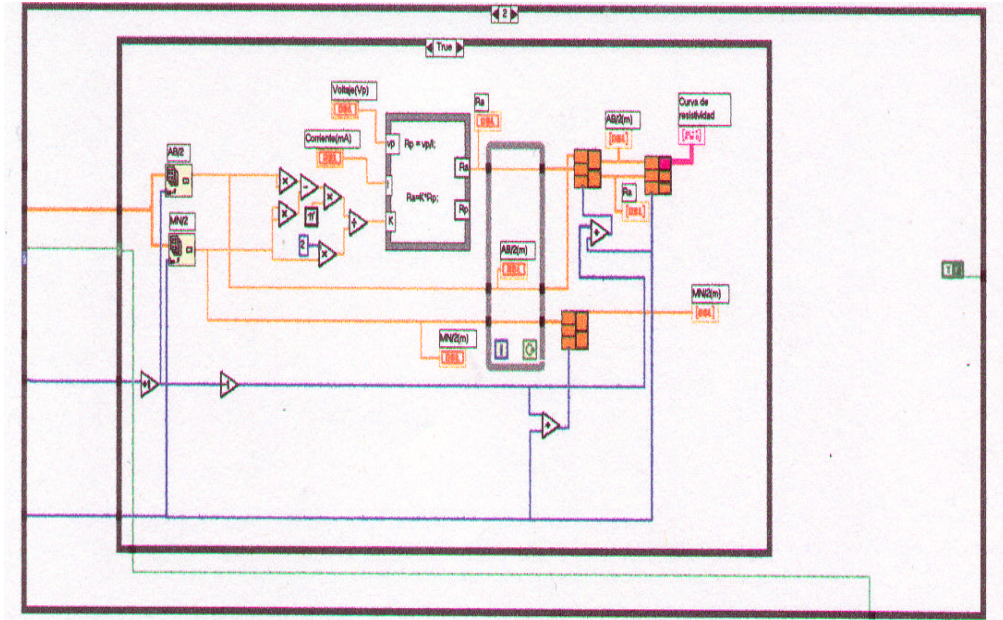
La segunda contiene dos estructura tipo *case*, la más externa se ejecutará cuando se oprima el botón *señal*. En esta se realizará el cálculo dentro de una estructura *nodo de formula* de los electrodos del centro del arreglo. La estructura *case* más interna se ejecutará tomando ciertas restricciones como que el número del control para los electrodos A y B, sea diferente al número del control para los electrodos M y N y que a su vez tienen que ser menores al número máximo de electrodos. Confirmando estos datos se abrirá la ventana *true* de una estructura de *case*. Luego verificará de que se cumpla la relación entre los electrodos de corriente y de potencial, tal como  $L > 5l$ , de no cumplir con esta condición saldrá un recuadro recordando dicha condición. De

cumplirse se ejecutará otra estructura de *case*. En esta estructura se encuentra los arreglos que contiene los códigos que se le asignarán a cada uno de los electrodos del sondeo tanto para enumerarlos como para que realicen las acciones especificadas como de A, B, N, M o Nc (No conectar), esta ultima acción se obtendrá a través del subvi “Nc”. Una vez que se les asignarán los códigos de enumeración y de acción a cada electrodos, estos se enviarán por vía del puerto serial al dispositivo electrónico **BLC-6** como N(número máximo de electrodos) pulsos de 16bits cada uno (Fig.4.10).



**Fig.4.10**, *secuencia 1, ventana 1.*

Mientras la tercera ventana contiene una estructura *case*. Dentro de esta se realizarán los calculos del valor geometrico K, y de su resistividad aparente. Los subvi “graf”, “graf2” y “graf4” realizarán la graficación de la curva de resistividad aparente (Fig.4.11). Para mayores detalles ver programa Arreglo Schlumberger.

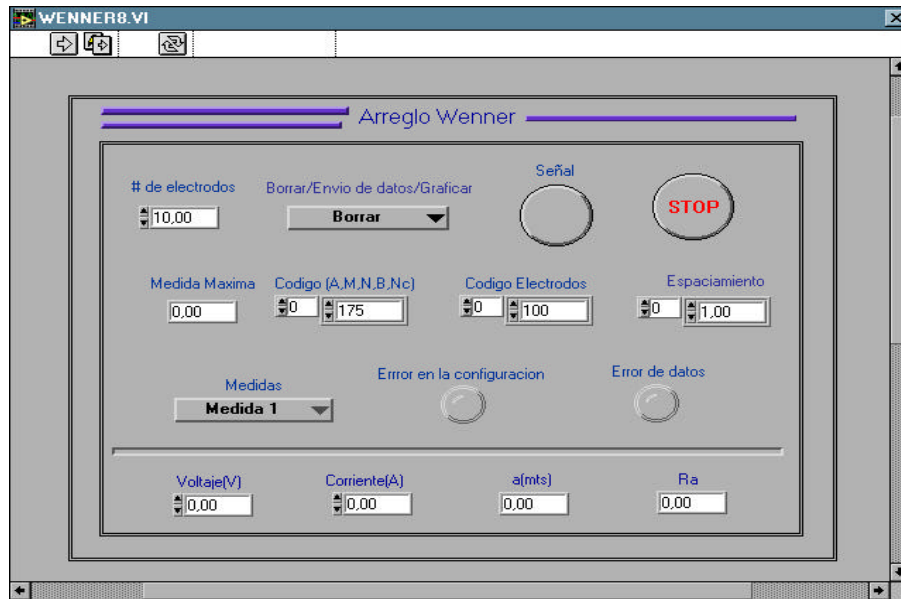


**Fig.4.11,** *Secuencia 1, ventana 2.*

### 4.3.2 Programa Arreglo Wenner.

Este programa tiene la finalidad de realizar la automatización de los electrodos para sondeos eléctricos verticales tipo Wenner. Permite también graficar la curva de resistividad aparente para tener un mejor control en campo.

El panel frontal de este programa consta de 9 indicadores, 4 controles y dos indicadores tipo LEDS y un graficador, (fig.4.12).

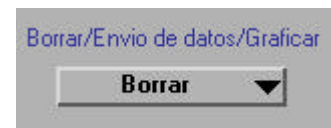


**Fig.4.12,** *Panel frontal del programa Arreglo Wenner.*

#### 4.3.2.1 Descripción del panel frontal:



El siguiente indicador permitirá colocar el número de electrodos que se utilizarán en el levantamiento. El menor número de electrodo que se podrá utilizar es 8, debido al algoritmo del programa.



Este controlador permitirá escoger una de las tres acciones a realizar, como borrar, envío de datos, y/o graficar siendo estas:

**Borrar:** Aquí el programa desactivará a todos los electrodos, no permitirá circulación de corriente por el sistema **BLC-6**.



**Envío:** El programa enviará los códigos de acción (A, B, M, N o no conectar) que realizarán los electrodos.

**Gráficar:** Esta acción debe ser realizada después de enviar los datos, ya que se deberá obtener primero los datos del voltaje y de la corriente.



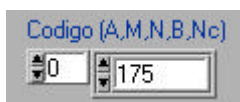
Este control ejecutará la acción seleccionada como: Borrar, envío de datos o gráficar.



Con este control se detendrá la ejecución del programa y regresará al panel frontal principal del programa **PAR-UCV**.



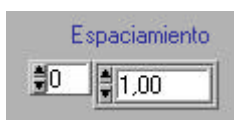
Este indicador permitirá visualizar la medida máxima que será posible realizar. Este valor depende del número de electrodos que se utilice en el SEV.



Este indicador mostrará los códigos que se le asignarán a los relés del dispositivo electrónico **BLC-6**. Los códigos que se le asignarán de acuerdo a las acciones que realicen como: A, M, N, B o no conectar serán 231, 247, 175, 183, 167 respectivamente.



Estos códigos que se encuentran en este indicador se le asignarán a los electrodos que se utilicen en el SEV. Estos códigos se le comenzará asignar desde uno de los extremos del arreglo.



En este indicador se encuentra almacenado el espaciamento que

será utilizado en el SEV, siendo este espaciamento 1, 1.44, 2.08, 3, ...,  $3^{n/3}$ , ..117m, reduciendo a 17 el número de electrodo por medio tendido (34 electrodos en total).



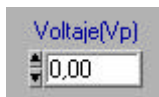
Este control permitirá ir aumentando el espaciamento tanto a los electrodos de corriente como a los de potenciales. La medida irá desde 1 hasta la medida 14.



El siguiente indicador tipo LED, se encenderá cuando se produzca un error en la configuración del puerto serial debido a que la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, la paridad o el número de puerto serie se encuentren fuera de rango.



Este indicador tipo LED, se encenderá cuando se sature el buffer de salida, debido a que la cadena de caracteres sobrepase en extensión el tamaño configurado para el buffer de escritura.



El siguiente indicador permitirá introducir el valor del voltaje(en voltios) obtenido en la medición correspondiente del SEV.



Este indicador permitirá introducir el valor de la corriente(en amper) que se obtenga durante la medición correspondiente del SEV.



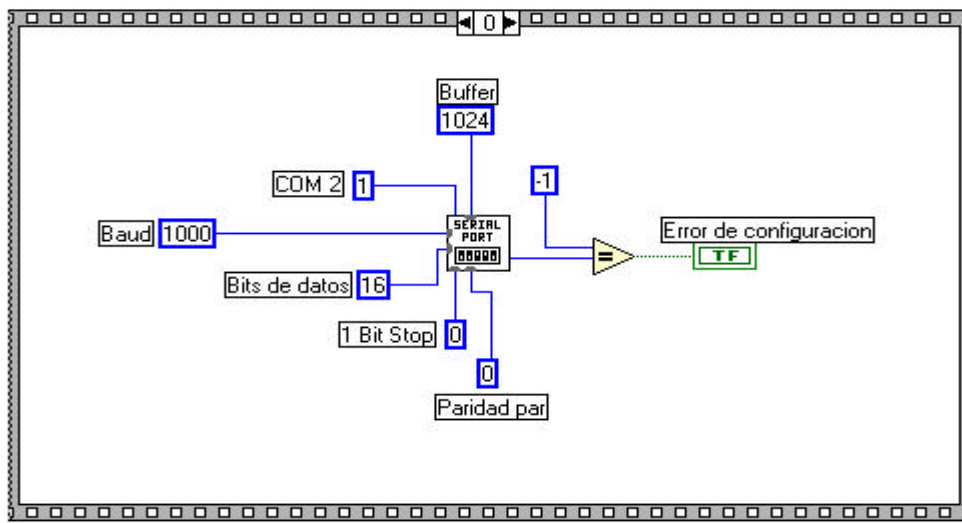
Este indicador permitirá visualizar el valor de “a” en metros.



Con este indicador se podrá obtener el valor de la resistividad aparente de la medición respectiva del SEV. Este valor se irá graficando mediante se vaya realizando las medidas del sondeo eléctrico vertical.

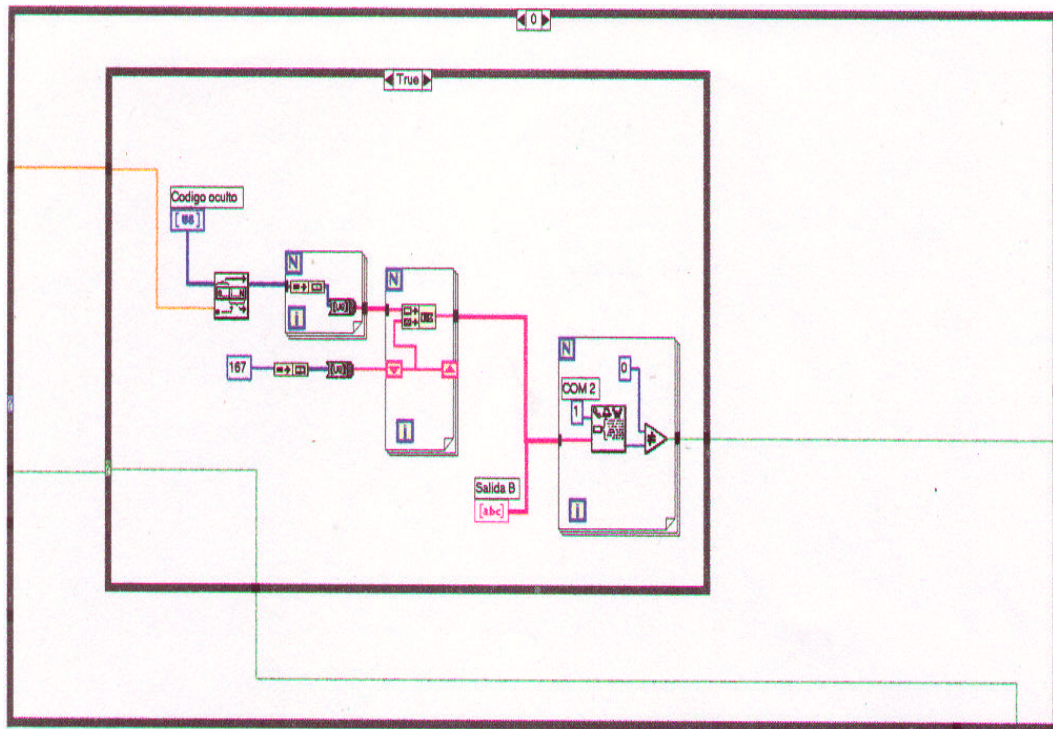
#### 4.3.2.2 Descripción del diagrama:

La estructura principal es una estructura *sequence*, esta posee dos ventana. La primera realizará la configuración del puerto serial de acuerdo a los requerimientos del dispositivo electrónico **BLC-6**,(Fig.4.13).



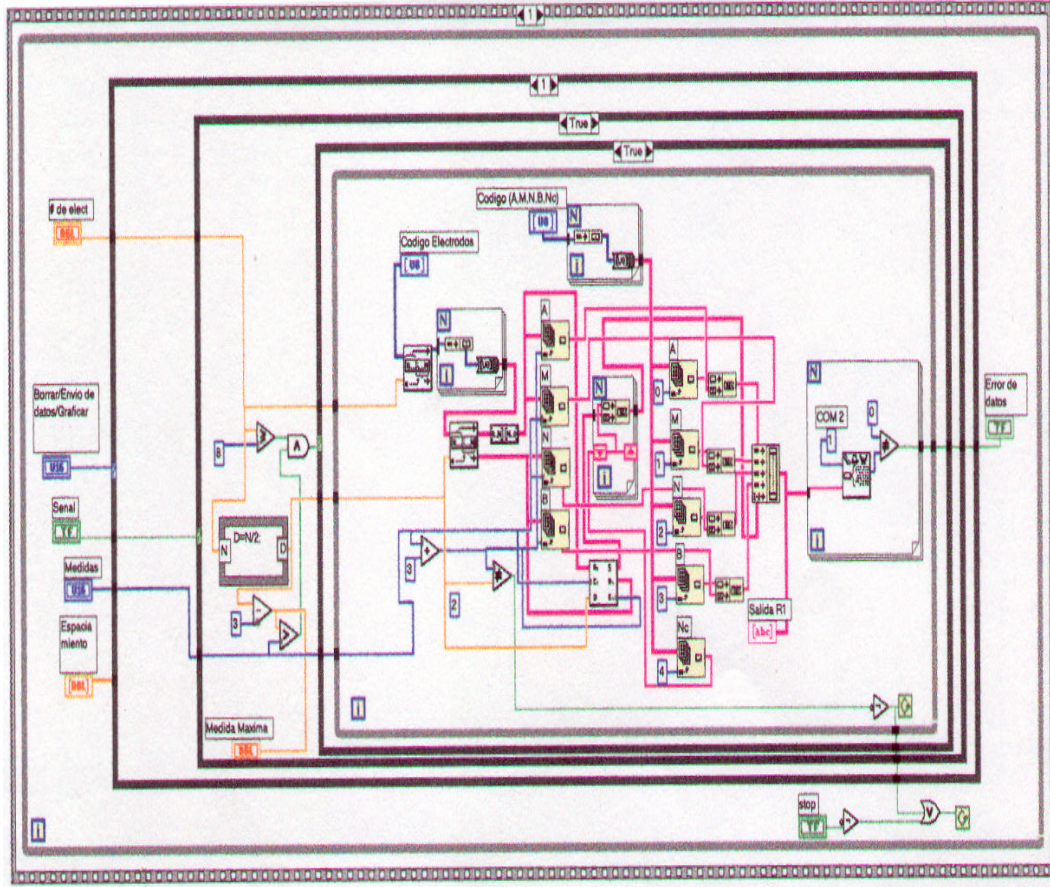
**Fig.4.13**, Estructura *sequence*, secuencia 0.

En la segunda se encuentran varias estructuras siendo la más importante la estructura *case* más externa, la cual posee tres casos. En el caso 1, la ventana posee otra estructura *case*, en donde se le asignarán a todos los electrodos del arreglo el código de acción 167, el cual realizará la desconexión de todos los electrodos (Fig.4.14).



**Fig.4.14**, *secuencia 1, ventana 0.*

En caso 2, contiene dos estructuras *case* y una estructura *while loop*. La estructura tipo *case* mas externa se ejecutará cuando se oprima el botón señal, esto determinará los electros centrales del arreglo. Una de las condiciones que se deberá cumplir para que se pueda correr el programa es que el número de electrodos a utilizar durante el sondeo electrico vertical sea mayor que 8, esto es debido a la programación que se utilizo en el espaciamento de los electrodos, de modo que se utilice la menor cantidad posible, pero abarcando una mayor extensión en el sondeo. Dentro de la estructura *while loop* comenzará asignarle un codigo de enumeración y de acción A, B, M, o N a 4 electrodos. Mientras el subvi “Nc2” se utilizará para asignarle la acción de no conectar (Nc) al resto de los electrodos de acuerdo a la medición correspondiente del sondeo electrico vertical (Fig. 4.15).



**Fig.4.15, Secuencia 1, ventana 1.**

Y el caso 3, posee una estructura *case*, en la cual se realizará el cálculo del valor geométrico  $K$  y el subvi “Graf” realizará la curva de resistividad aparente (Fig. 4.16).

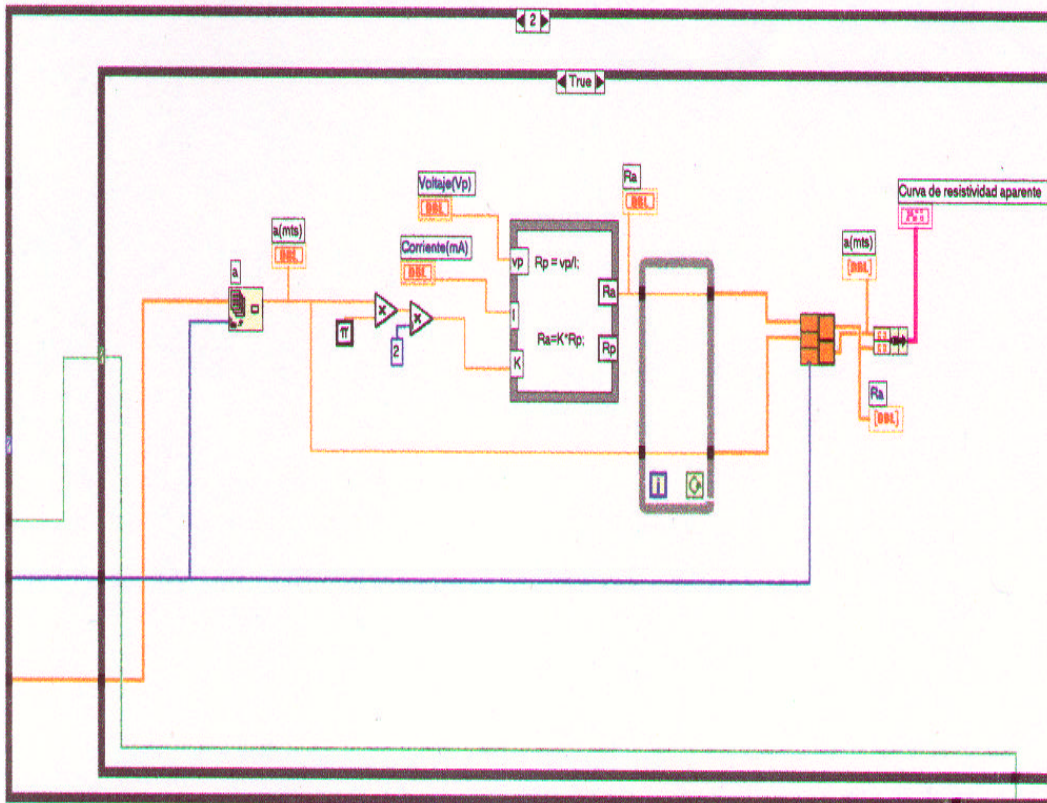
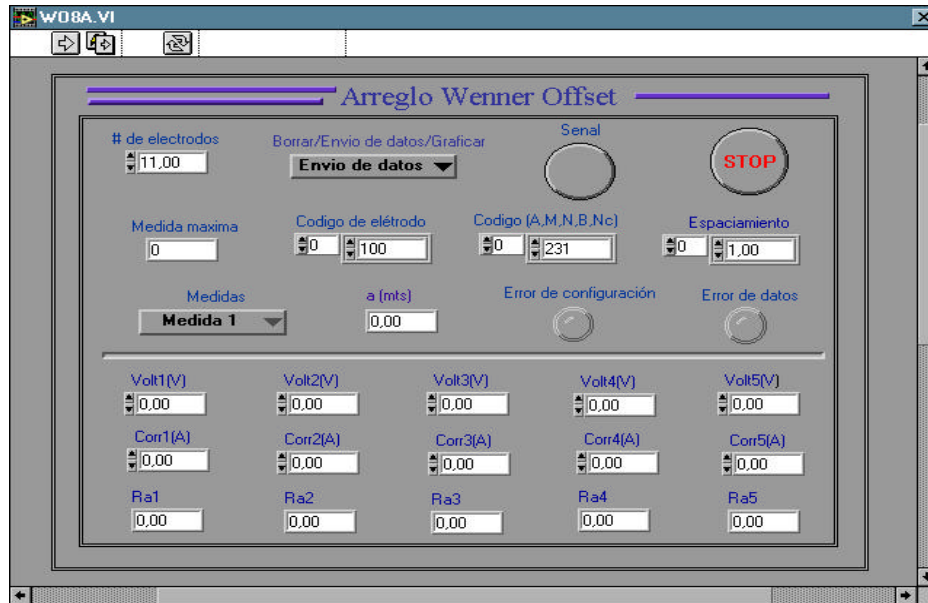


Fig.4.16, secuencia 1, ventana 2.

### 4.3.3 Programa Arreglo Wenner Offset:

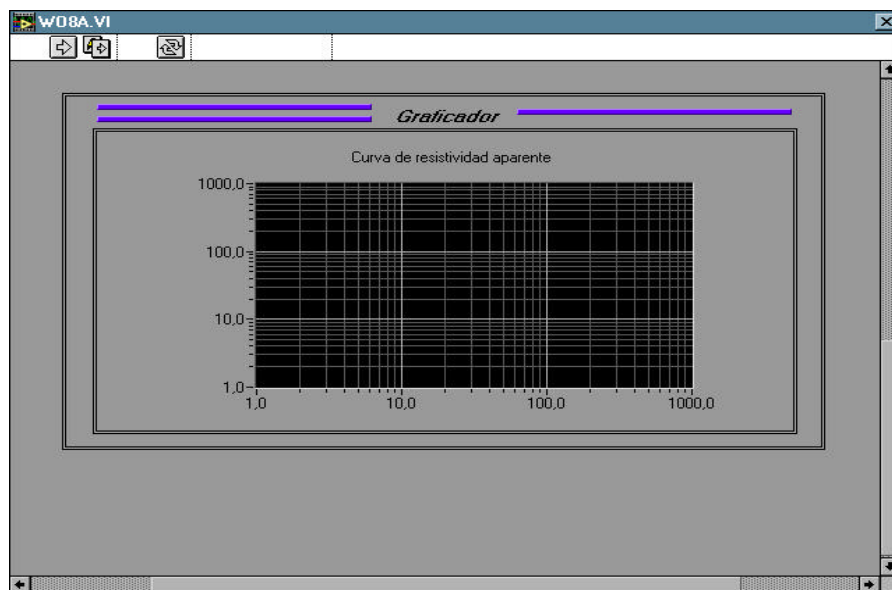
Con este programa se puede controlar el dispositivo electrónico **BLC-6**, para realizar un sondeo eléctrico vertical tipo Wenner offset.

Su panel frontal posee indicadores y controladores de fácil uso para el operador (fig.4.17). También posee un graficador para llevar un confiable control sobre el sondeo eléctrico vertical.



**Fig.4.17, Panel frontal.**

El siguiente graficador(Fig. 4.18), esta anexo a los paneles frontales de los programas Arreglo Schlumberger, Arreglo Wenner y Arreglo Wenner offset. Permitiendo visualizar los valores de las resistividades aparentes para que de este modo poder repetir alguna medición donde se observe algun valor anomalo. Sus ejes se encuentran en escala logaritmica.



**Fig.4.18, Panel frontal del Graficador.**

#### 4.3.3.1 Descripción del panel frontal:



Con este indicador se introducirá el número de electrodos que se utilizarán en el sondeo eléctrico vertical.



Este controlador permitirá escoger el proceso a realizar siendo estos:

**Borrar:** Aquí el programa desactivará a todos los electrodos, no permitirá circulación de corriente por el sistema **LBC-6**.

**Envío de datos:** El programa enviará los códigos de acción (A, B, M, N o no conectar) que realizarán los electrodos.

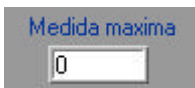
**Gráficar:** Esta acción deberá ser realizada después de enviar los datos, ya que se deberá obtener primero los datos del voltaje y de la corriente.



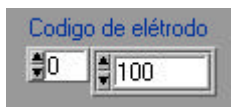
Este boton ejecutará la acción escogida anteriormente, como borrar, envío de datos o graficar la curva de resistividad aparente.



El siguiente boton permitirá detener el programa del arreglo de Wenner Offset y regresar al panel frontal del programa **PAR-UCV**.



Este indicador permitirá visualizar la medida maxima que se podrá realizar con el controlador medida.



En este indicador se encontrarán los códigos que se le asignarán a los electrodos que se utilicen en el levantamiento. Estos códigos



son números decimales que serán codificado en el dispositivo electrónico **LBC-6**, como números binarios.



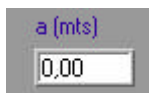
Estos códigos que posee este indicador, se le asignarán a cada uno de los electrodos para que realicen la acción de A, M, N, B, Nc (No conectar) siendo estos 231, 247, 175, 183, 167, respectivamente.



Este indicador contiene los espaciamientos que se utilizarán en los electrodos durante el sondeo eléctrico vertical. Este espaciamiento irá incrementándose de acuerdo a una serie geométrica:  $a = 1, 2, 4, 8, \dots, 2^n$ , ..64m, tal que el número de electrodo sea lo menor posible, siendo este un máximo de 16 electrodos.



Con este control se irá incrementando el espaciamiento de los electrodos durante el sondeo eléctrico vertical. Por lo que el número de medida máxima que se podrá realizar será 7.



Este indicador permitirá visualizar el espaciamiento  $a$  que hay entre los electrodos, a medida que se vaya realizando el SEV.



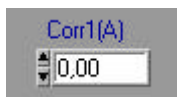
Este indicador LED, se encenderá cuando se produzca un error en la configuración del puerto serial, debido a que algunos de los valores tales como: La velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, la paridad o el número de puerto serial se encuentren fuera de rango.



El siguiente indicador tipo LED se encenderá cuando la cadena de caracteres sobrepase en extensión el tamaño configurado para el buffer de escritura.



Estos indicadores(Volt1(V), Volt2(V), Volt3(V), Volt4(V) y Volt5(V)) permitirán introducir los valores de voltajes obtenidos en las mediciones respectivas del sondeo eléctrico vertical. Volt1(V) y Volt2(V), se utilizarán para obtener las resistividades aparente 1 y 2. Volt3(V), Volt4(V) y Volt5(V), se utilizarán para obtener las resistividades aparentes A, B y C.



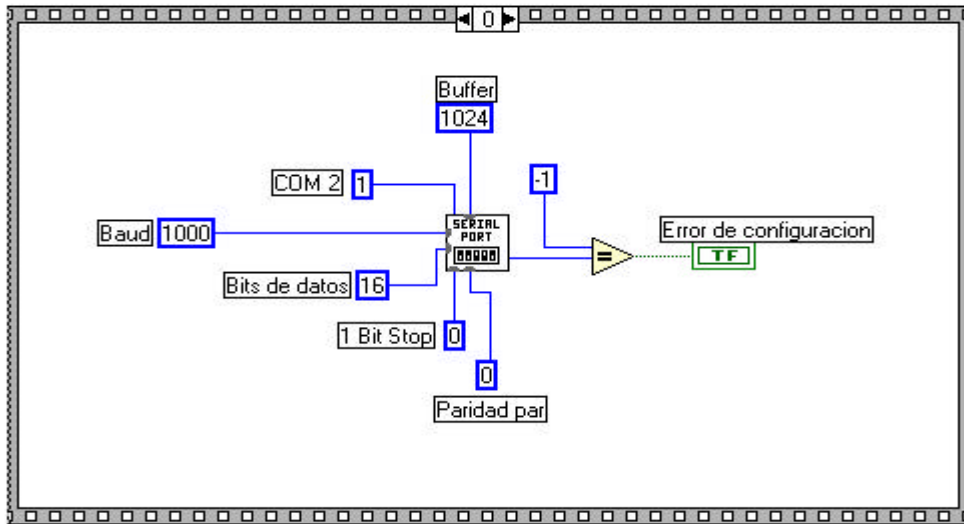
Los siguientes indicadores(Corr1(A), Corr2(A), Corr3(A), Corr4(A) y Corr5(A)), permitirán introducir los valores de corrientes obtenidas durante las mediciones respectivas del SEV. Corr1(A) y Corr2(A) se utilizarán para obtener los valores de las resistividades aparentes 1 y 2. Con Corr3(A), Corr4(A) y Corr5(A) se utilizarán para obtener los valores de las resistividades aparentes A, B y C.



Estos indicadores(Ra1, Ra2, Ra3, Ra4 y Ra5), mostrarán los valores de las resistividades aparentes obtenidas durante las mediciones respectivas del SEV. Los valores de Ra1 y de Ra2 se irán graficando para obtener las curvas de resistividades aparentes.

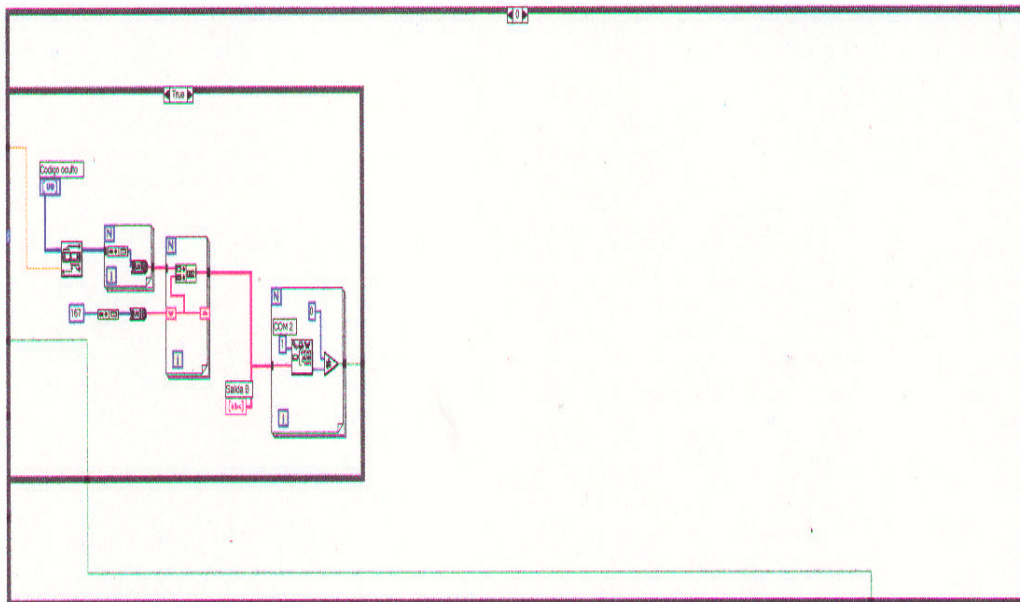
#### 4.3.3.2 Descripción del diagrama:

La estructura principal es del tipo *sequence* con 2 secuencias. En la primera secuencia se encuentra el icono del puerto serial con su configuración de acuerdo al requerimiento del dispositivo electrónico **BLC-6**, (Fig.4.19).



**Fig.4.19,** Estructura sequence, ventana 0.

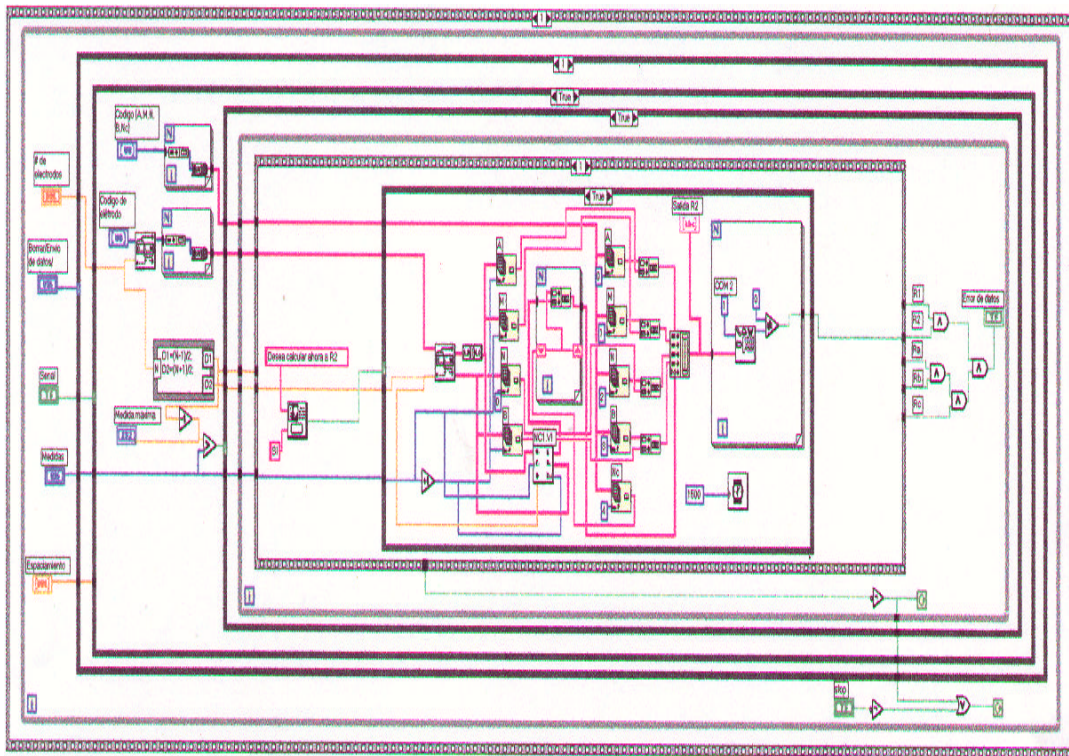
Dentro de la segunda estructura se encuentran varios tipos de estructuras, siendo la más importante la estructura *case* que posee tres ventanas. La primera se encuentra conformada por una estructura *case*, dentro de esta se realizará la asignación del código 167 a todos los electrodos. Este código realizará la desconexión de los mismo (Fig.4.20).



**Fig.4.20, Secuencia 1, ventana 0.**

En la segunda estructura se realizará el calculo de los electrodos centrales, luego en la estructura *sequence* se realizará la asignación de los códigos de enumeración a cada uno de los electrodos que se utilizarán durante el sondeo eléctrico vertical y el código de acción (A, B, M y N). El subvi “Nc” se encargará de realizar la asignación del código de no conectar al resto de los electrodos.

Primero se calculará la corriente  $Corr1(A)$ , luego saldrá un cuadro con un mensaje para calcular a la corriente  $Corr2(A)$ , que será calculada en la segunda ventana. Dentro la tercera ventana se encuentra otra estructura tipo *sequence*, en donde se realizará el calculo de la corriente  $Corr3(A)$  en la secuencia 0,  $Corr4(A)$  en la secuencia 1 y  $Corr5(A)$  en la secuencia 2, (Fig.4.21).



**Fig.4.21, Secuencia 1, ventana 1.**

En la tercera secuencia se encuentra una estructura *case*, en esta se calcularán los valores de las resistividades aparentes  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  y el factor geométrico  $K$ . También se encuentran los subvi “grafc”, “grafc4”, “grafc5”, “grafc6” y “grafc7”, que realizarán la graficación de la curva de resistividad aparente. (Fig.4.22).

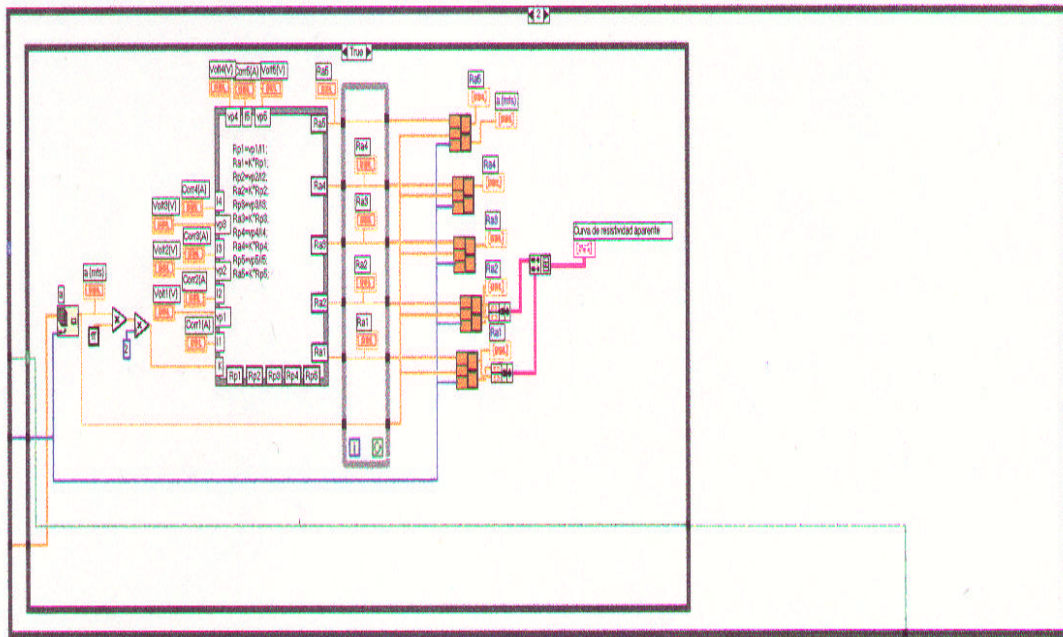


Fig.4.22, Secuencia 1, ventana 2.

#### 4.3.4 Programa Calicata –Tomografía2D:

Este programa permite controlar el dispositivo electrónico **BLC-6** para la automatización de los electrodos para llevar a cabo una calicata con arreglo Wenner o para realizar una tomografía en 2D.

Su panel frontal. posee 8 indicadores, 5 controles, y dos indicadores tipo LEDS para facilitar el uso al operador(fig.4.23)

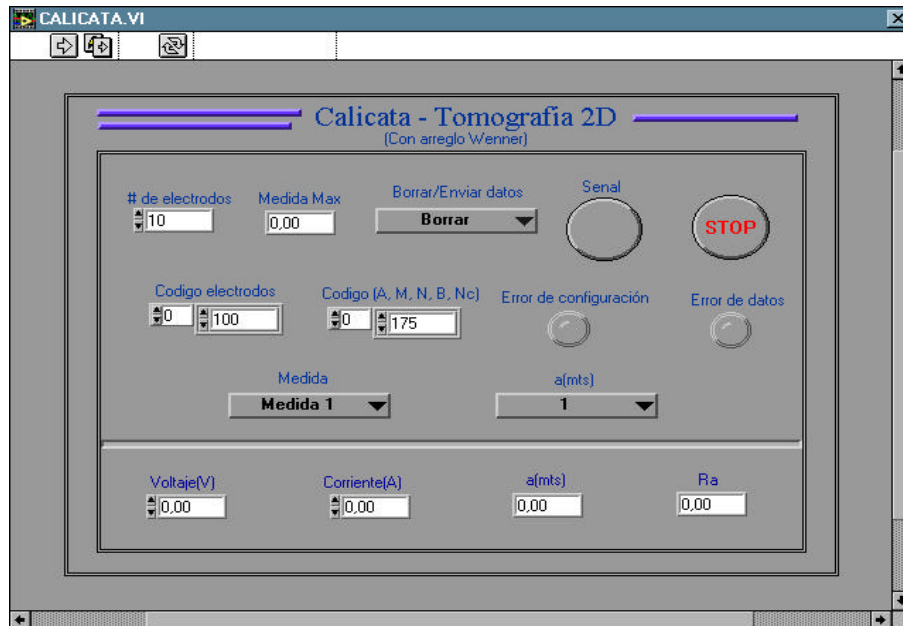


Fig.4.23, Panel Frontal.

#### 4.3.4.1 Descripción del panel frontal:

**# de electrodos** Este indicador permitirá introducir el número de electrodos que se irán ha utilizar en el sondeo eléctrico vertical, siendo el número

**Medida Max** máximo 32. El siguiente indicador proporcionará el número de la máxima medida que se podrá realizar.

**Borrar/Enviar datos** Este controlador permitirá elegir una acción que ejecutará el programa. Las acciones a elegir serán:

*Borrar:* Aquí el programa desactivará a todos los electrodos, no permitirá circulación de corriente por el sistema **BLC-6**.

*Enviar datos:* El programa enviará los códigos de acción (A, B, M, N o no conectar) a los electrodos.



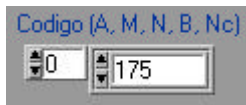
Este botón ejecutará la acción (Borrar o envío de datos) seleccionada anteriormente.



Con este botón se abortará la ejecución del programa calicata-tomografía2D, regresará al panel frontal del programa **PAR-UCV**.



Este indicador contiene almacenado los códigos que se le asignarán a cada electrodo del tendido, comenzará con el primer electrodo hasta llegar al último electrodo del arreglo. Estos códigos son 100, 101, 102, ...,132.



Este indicador contiene los cinco códigos de las acciones que realizarán los electrodos que se utilizarán en el levantamiento. Siendo estos: 231, 247, 175, 183, 167. Códigos que se les asignaran respectivamente al electrodo de corriente A, al electrodo de potencial M, al electrodo de potencial N, al electrodo de corriente B y al resto de los electrodos.



Este indicador se encenderá si existiera un error de configuración del puerto serial, tal como que: La velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, la paridad o el número de puerto serial se encuentren fuera de rango.



Este LED se encenderá cuando la cadena de caracteres que se envíen, sobrepasen en extensión el tamaño configurado para el buffer de escritura.





La función de este controlador será de desplazar el arreglo tipo Wenner a la derecha, manteniendo fijo el espaciamiento “a”.

Por lo que realizará una calicata eléctrica.



Con este controlador se irá aumentando el espaciamiento del arreglo Wenner, por lo que utilizando a la vez el controlador medida se podrá realizar tomografía2D.



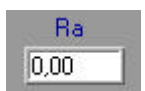
Este indicador permitirá introducir el voltaje que se obtenga durante la medición respectiva del levantamiento.



El siguiente indicador permitirá introducir el valor de la corriente que se obtenga durante la medición respectiva, con lo que se podrá obtener la resistividad aparente de dicha medición.



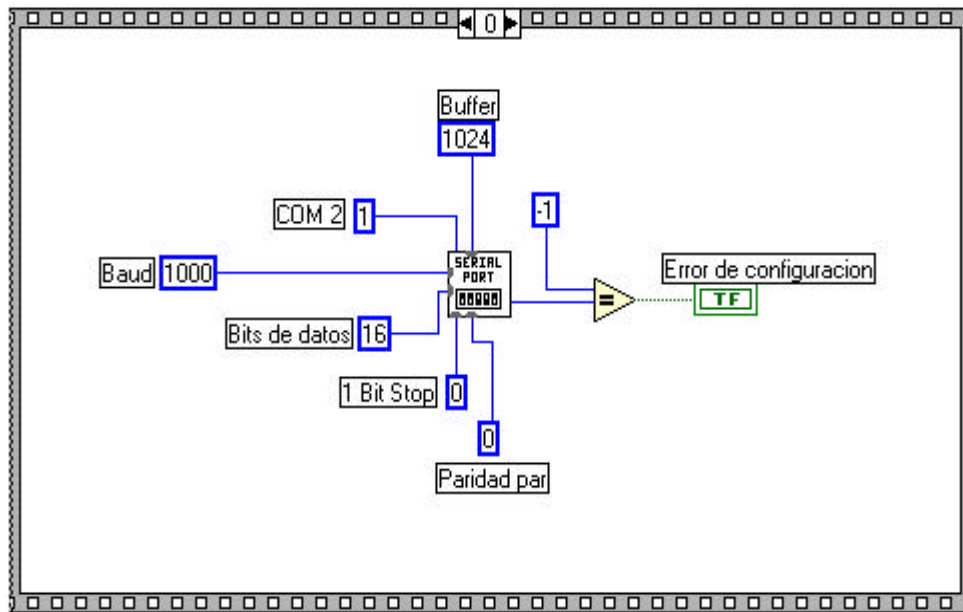
Este indicador permitirá visualizar el valor del espaciamiento que se estará utilizando durante la medición respectiva.



Con este indicador se podrá tener el valor de la resistividad aparente de la medición respectiva.

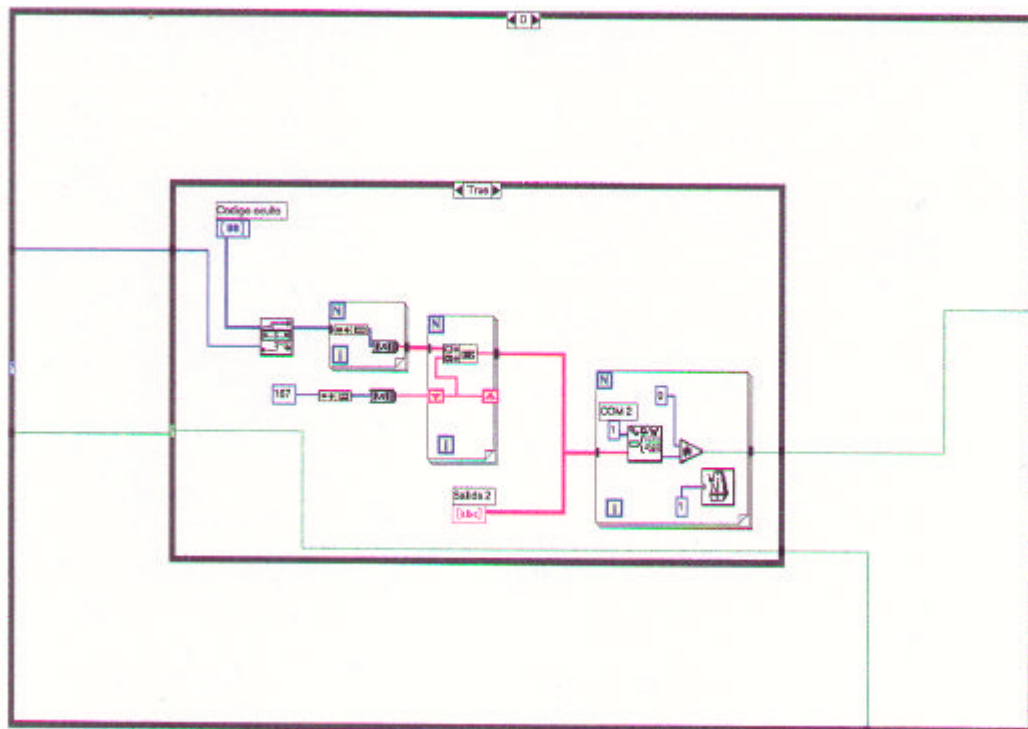
#### 4.3.4.2 Descripción del diagrama:

La estructura principal en el diagrama es una estructura *case*, de dos secuencias (0 y 1). En la secuencia 0 se realizará la configuración del puerto serial de acuerdo a las especificaciones del dispositivo electrónico (fig.4.24).



**Fig.4.24,** Estructura *sequence*, *secuencia 0*.

En *secuencia 1*, *ventana 0* se encuentra una estructura tipo *case*, en donde se le asignará a todos los electrodos que se utilicen en el levantamiento el código 167, el cual hará que todos los electrodos se desconecten (fig.4.25).



**Fig.4.25,** *Secuencia 1, ventana 0.*

En la ventana 1, contiene varios módulos que evitarán que la medida no sobrepase al número de electrodos. De cumplirse estas restricciones se ejecutará la estructura *case*, en la cual se realizarán las asignaciones de los códigos de enumeración a los electrodos. También contiene el subvi “Nc3”, el cual realizará la acción de no conectar al resto de los electrodos que no se les asignen los códigos de acción (A, B, M y N). Se encuentra también una estructura *nodo de formula*, en donde se calculará la resistividad aparente (fig.4.26).

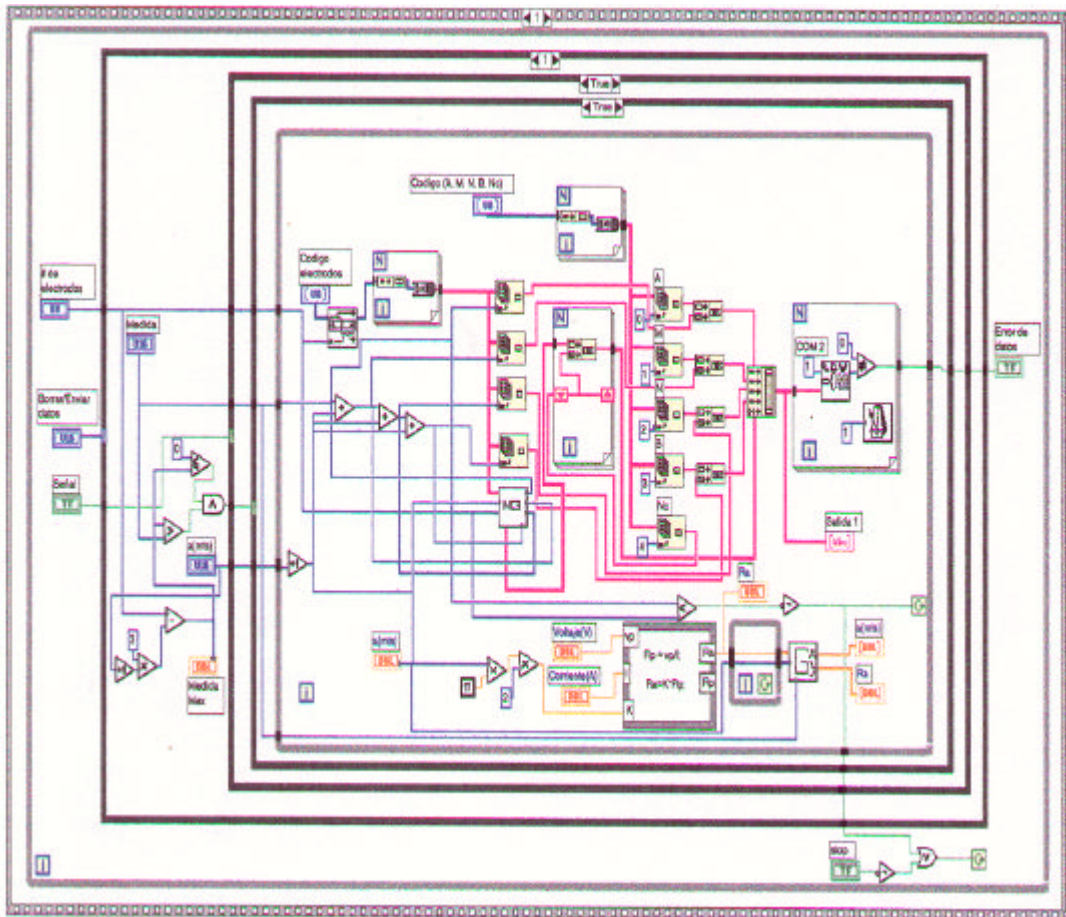
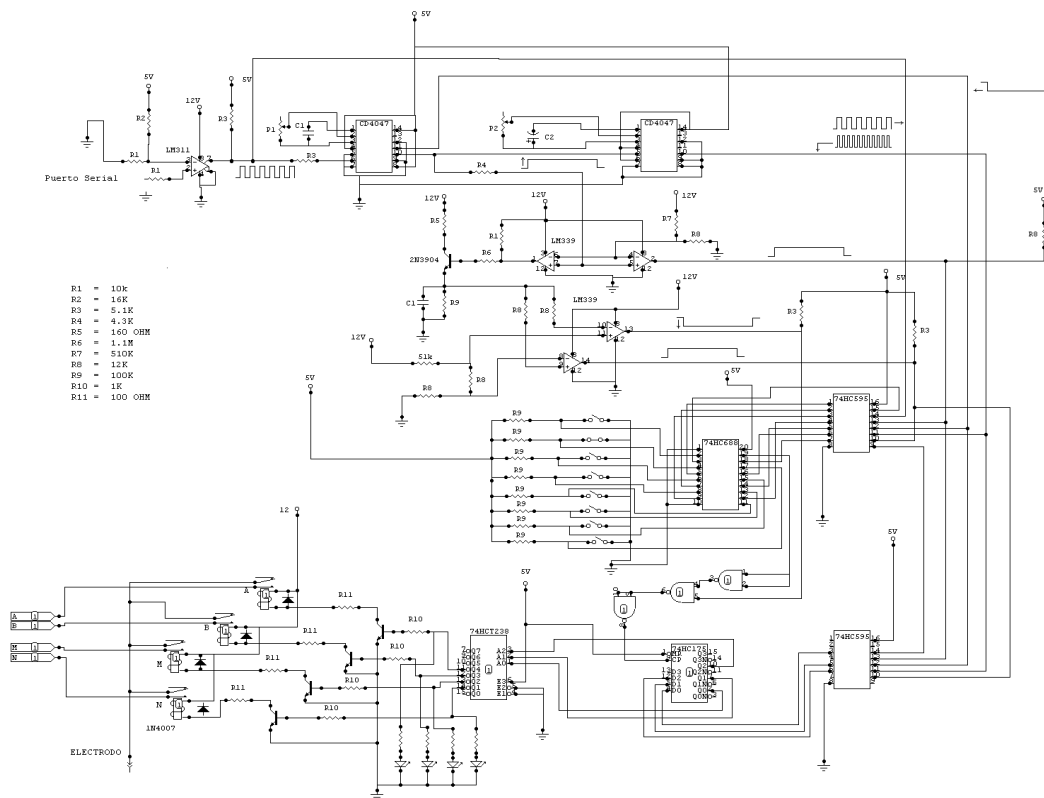


Fig.4.26, secuencia 1, ventana 1.

## CAPITULO 5

### DISEÑO DEL DISPOSITIVO ELECTRONICO BLC-6

El dispositivo electrónico **BLC-6**, es un sistema analogico-digital (Fig.5.1), controlado por el programa **PAR-UCV** (Ver capitulo 3) a través del puerto serial de la computadora para realizar la automatización de los electrodos para la ejecución de sondeos eléctricos verticales tipo Schlumberger, Wenner y Wenner Offset.



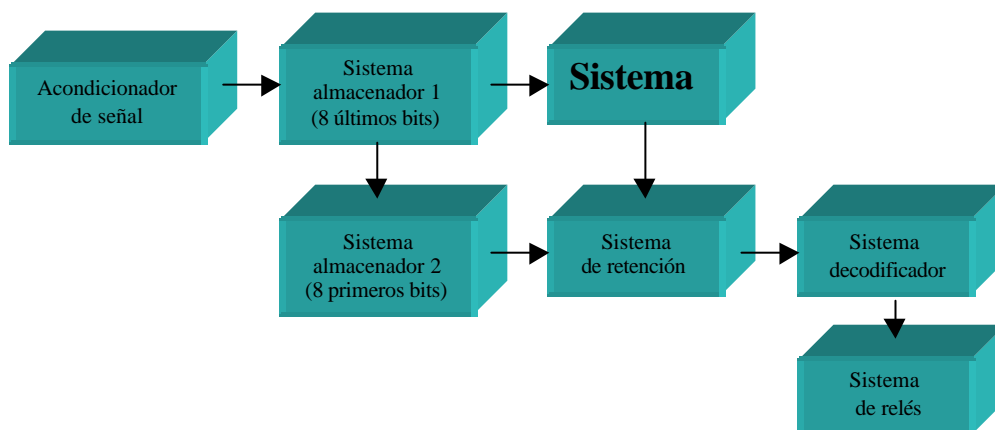
**Fig. 5.1,**Diagrama circuital del dispositivo electrónico **BLC-6**

(diseñado por Ramón Cruz, estudiante de física de la Facultad de Ciencias de la UCV).

## 5.1 Descripción del dispositivo electrónico BLC-6:

El dispositivo electrónico **BLC-6**, esta conformado principalmente por 6 módulos (fig5.2):

El primer modulo realiza el acondicionamiento de la señal, debido que la señal que proviene de la computadora se encuentra en un rango de 0 a -12 voltios, por lo que el circuito la transformará en un rango de 0 a 5 voltios (TTL), pero manteniéndose la señal original (los pulsos de 16 bits).



**Fig.5.2,** Diagrama de bloque del dispositivo electrónico BLC-6.

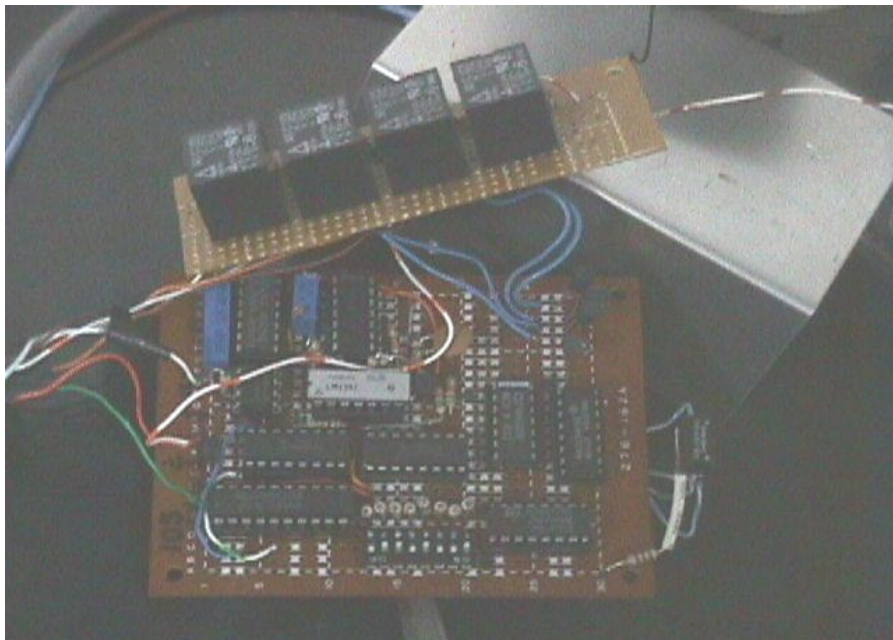
En el siguiente modulo se guardarán los pulsos de 16 bits, en dos sistemas almacenadores (*Shift registers*) que se encuentran conectados en serie. Cada sistema almacenador tendrá capacidad de almacenar solo 8 bits, donde los primeros ocho bits conformarán el código de acción de los electrodos (A, B, M, N, o no conexión) y los 8 bits restantes conformarán el código de enumeración de los electrodos.

El siguiente modulo esta conformada por un sistema comparador. En esta etapa los ultimo 8 bits que se encuentran en el sistema almacenador, serán comparados con una palabra de 8 bits que se encontrará grabada en el circuito (ver tabla,2). De ser iguales ambas palabras, el comparador enviará un pulso que activará al sistema de retención y de no ser iguales no se ejecutará ninguna acción, por lo que comenzará de nuevo el proceso.

En el modulo del sistema de retención (*flip-flop*), los primeros 8 bits que conformen el código de acción serán inmovilizados hasta que el sistema comparador envíe un pulso que lo active, produciéndose el envío del código de acción al modulo del sistema decodificador.

El sistema decodificador transformara la señal eléctrica a mecánica, la cual será enviada a al relé respectivo de acuerdo al código de acción asignado. Estos relés estarán conectado a uno diodos LED que servirán para llevar el control de los mismo.

Un sistema BLC-6, solo controlará a un solo electrodo y estará contenido en una tarjeta (fig.5.3).



**Fig. 5.3,** *Sistema BLC-6 contenido en una tarjeta.*

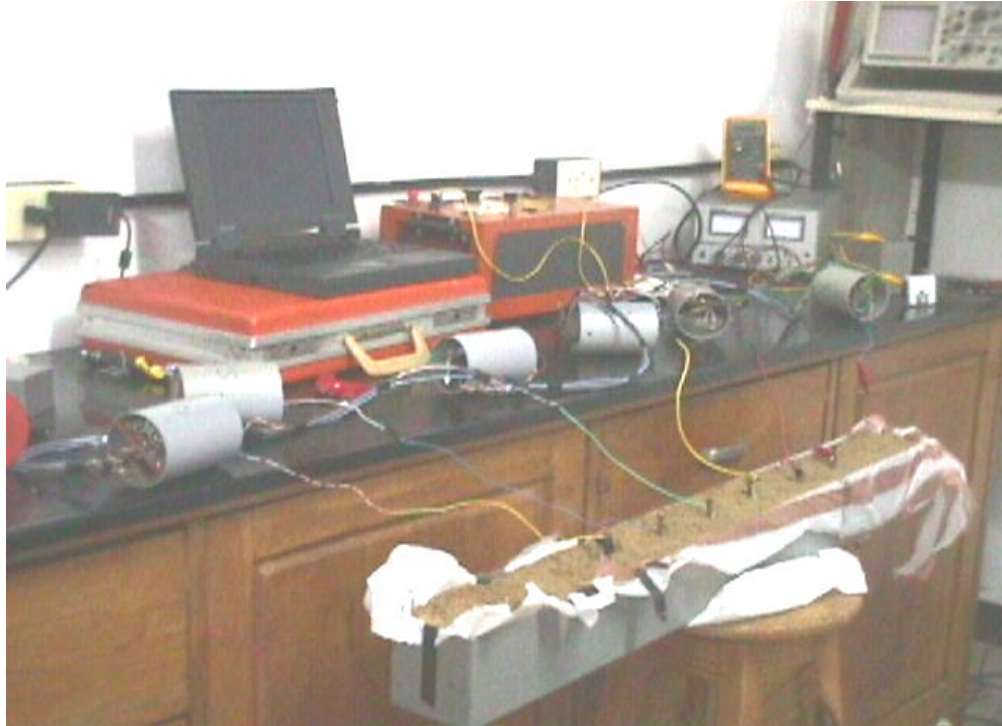
## 5.2 Constitución del sistema multielectrónico:

El sistema multielectrodico estará constituido por:

- 1- Una computadora portatil, que contendra el programa de control **PAR-UCV**, que realizará la configuración de electrodos de acuerdo al tipo de arreglo seleccionado, la secuencia de la adquisición de la curva de resistividades aparentes (CRA) y enviará la información para la selección de electrodos de corriente y de potencial eléctrico (AB y MN respectivamente) o de no conexión, mediante una secuencia serial de datos.
- 2- Una tarjeta con el dispositivo electrónico **BLC-6** para cada electrodo, en la cual se recibirá la información y se generará una conexión a alguna de las 5 posibilidades (conexión con A; B; M; N o no conexión).
- 3- Una caja de distribución principal donde estarán alojados las tarjetas y estas estarán conectadas a cada una de las líneas del cable. y estará también la fuente de alimentación para los circuitos.
- 4- Cableado para la interconexión serial (Rs 232 unidireccional).

En la siguiente imagen (fig.4.3), se muestra un sistema multielectrodo conformado por: Una computadora portatil, una fuente variable de corriente continua, una fuente de 12v que alimenta al sistema BLC-6, un cable para la interconexión serial, 6 tarjetas BLC-6 que se encuentran conectadas a uno clavos.





**Fig.4.4,** *Sistema multielectrónico*

### **5.3 Pruebas realizadas con el dispositivo electrónico BLC-6 y el programa PAR-UCV:**

- Se conecto al dispositivo electrónico **BLC-6**, a un cable de 800 metros de longitud al puerto serial de la computadora y se le enviaron unos pulsos con el programa **PAR-UCV**. Comprobándose que la señal se mantuvo sin distorsión.
- Se realizaron diversas pruebas con el programa **PAR-UCV** y dispositivo electrónico **BLC-6**, las cuales consistieron en simular sondeos a pequeña escala con el arreglo Schlumberger, donde se conecto una fuente de corriente continua de alto voltaje, con tensiones de 400 hasta 800 voltios y corriente de hasta 2 amperes (ver tablas 3, 4 y 5).

**Tabla 2,** *Código (número binario) utilizado para la enumeración de los electrodos.*

<b>Número decimal</b>	<b>Número binario</b>
100	01100100
101	01100101
102	01100110
103	01100111
104	01101000
105	01101001
106	100000110
107	01101011
108	01101100
109	01101101
110	01101110
111	01101111
112	01110000
113	01110001
114	01110010
115	01110011
116	01110100
117	01110101
118	01110110
119	01110111
120	01111000
121	01111001
122	01111010
123	01111011
124	01111100
125	01111101

126	01111110
127	01111111
128	10000000
129	10000001
130	10000010
131	10000011

**Tabla 3,** Prueba del dispositivo BLC-6, utilizándose una fuente de 400v

<b>AB/2 (m)</b>	<b>MN/2 (m)</b>	<b><math>R_a</math> (W/m)</b>
0.15	0.5	3952132.8
0.30	0.5	12856810
0.30	15	7766000

**Tabla 4,** Prueba del dispositivo BLC-6, utilizándose una fuente de 600v

<b>AB/2 (m)</b>	<b>MN/2 (m)</b>	<b><math>R_a</math> (W/m)</b>
0.15	0.5	1478150
0.30	0.5	5175400
0.30	15	2959316.6

**Tabla 5,** Prueba del dispositivo BLC-6, utilizándose una fuente de 800v

<b>AB/2 (m)</b>	<b>MN/2 (m)</b>	<b>R<sub>a</sub> (W/m)</b>
0.15	0.5	723350
0.30	0.5	4355580
0.30	15	970756

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 6.1 Conclusiones:

Es de suma importancia estar conscientes que el diseño de modernos equipos y programas se han vuelto parte integral y relevante para el desarrollo de la Geofísica. Por lo tanto, en este trabajo se diseño un prototipo conformado por un programa de interfaz gráfica **PAR-UCV** y un dispositivo electrónico **BLC-6** para automatizar los electrodos al ejecutar sondeos eléctricos verticales con arreglos tipo Schlumberger, Wenner, Wenner Offset y para realizar calicatas y tomografías 2-D eléctricas.

El programa **PAR-UCV** es una interfaz gráfica sencilla, que brindará una mayor eficiencia y facilidad, en cuanto a uso y aprendizaje del paquete a los usuarios que interactúen con el sistema. Ya que una buena aplicación puede no tener aceptación si su interfaz es pobre (independientemente de que el programa sea correcto, confiable y eficiente).

Con el programa se podrá llevar un mejor control en campo, ya que permitirá visualizar a través de un graficador la curva de resistividad aparente y por lo tanto se podrá eliminar aquellas medidas de resistividad, que estén fuera del rango de medición.

El sistema de relés que contiene el dispositivo electrónico **BLC-6**, puede soportar tensiones de hasta de 800 voltios y corrientes de hasta 2 amperes. Lo que garantiza que se podrá realizar sondeos que ameriten la utilización de fuentes de alto voltaje.

El dispositivo electrónico **BLC-6**, puede ser utilizado para realizar tendidos de hasta 800 m.

El sistema multieléctrodico diseñado es de menor costo que equipos similares comerciales.

Con el sistema multielectrónico se reducirá la mano de obra, ya que el equipo podrá ser manipulado por pocas personas.

Se incrementará la productividad, debido que se podrán realizar mas levantamientos en menos tiempo que con el método convencional.

Se eliminarán los errores en los resultados que se obtengan, debido a equivocaciones al conectar los electrodos, obteniéndose datos de mayor calidad. Se tendrá mayor control del levantamiento.

## 6.2 Recomendaciones:

El programa **PAR-UCV** se recomienda usarse en computadora que contenga como mínimo un procesador Pentium, 16 MB de memoria RAM y 10 MB de espacio libre en el disco duro para que funcione satisfactoriamente.

Es recomendable cambiar los relés a unos que soporten mayor voltaje, si se llegarán a utilizar fuente que generen mas de 800 voltios.

Se recomienda que las próximas tarjetas se fabriquen en circuitos impresos, para obtener una mayor confiabilidad en las conexiones.

## REFERENCIAS

ARCHIE, G. E. (1942): *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some Reservoir Characteristics*. Trans. American Inst. Min. Metal. And Petr. Eng. 146, 54-52.

BARKER, R. D. (1981): *The Offset System of Electrical Resistivity and its Use with a Multicore Cable*. Geophysical Prospecting, 15: p.71-91.

BARKER, R. D. (1988): *Resistivity Sounding in Engineering Investigations with the Offset Wenner Techique*. Geotechnique, 38. No. 3, p.355-365.

BARKER, R. D. (1992): *A Simple Algorithm for Electrical Imaging of the Subsurface*. First Break, 20. No. 2.P. 53-62.

BEAR, J. (1988): *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications, Inc. New York.

BENAVIDES, A. (1999): Trabajo de ascenso titulado: “Desarrollo y aplicación de técnicas de resistividades D.C. en Geofísica somera”. Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, Caracas.

BHATTACHARYA, P. K. y PATRA, H. P. (1968): *Direct Current Geoelectric Sounding, Principles and Interpretation*. Elsevier Publishing Co. Amsterdam.

BIRSDORF, R. J. And ZHODY, A. A. R. (1990): IBM PC Programs for Automatic Processing and Interpretation of Schlumberger Sounding Curves in QuickBasic 4.0. Open-File Report 90-211. U.S.G.S.

CANTONE, M. y WALTER, J.(1980): *Comunicación personal*, Fundación Instituto de Ingeniería.

CARPENTER, E. W. (1995): *Some Notes Concerning the Wenner Configuration*. Geophysical Prospecting, 3, p.388-402.

COOLEY, J. W. And TUKEY, J. W. (1965): *An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series*. Math. Of Comput., Vol XIX. April, 1965. p.297-301.

DATA Acquisition Fundamentals.(1998) Application Note AN007. National Instruments.

DATA Acquisition Specifications, A Glossary.(1998) Application Note AN092. National Instruments.

DATA Acquisition Tutorial.(1997) Instrumentation Reference Catalogue. National Instruments.

DEY, A. and MORRISON, H. F. (1979): *Resistivity Modelling for Arbitrariry Shaped TwoDimensional Structures*. Geophysical Prospecting, 27, p. 106-136.

EDWARDS, L. S., (1977): *A Modified Pseudo section for Resistivity and IP*. Geophysics, 42. No 5, p.1020-1036.



GRIFFITHS, D. H. and TURNBULL, J. (1985): *A Multi-electrode Array for Resistivity Surveying*. Firt Break, 3, p.16-20.

GRIFFITHS, D. H. and BARKER, R. D.: *Electrical Imaging and Examples of its Application*. Scintrex, Technical Information. 8p.

HALLOF, P. G. (1957): *On the Interpretation of Resistivity and Induced Polarization Measurements*. Ph.D. thesis. Massachusetts Institute of Technology.

HAMBLIN, W. K. (1992): *Earth's Dynamic Systems*. Six. Edition. McMillan Publishing Company. New York.

JOHNSON, Gary (1994): *LabVIEW, Graphical Programming*. Practical Applications in Instrumentation and Control. McGraw-Hill Series on Visual Technology. Carl Machover, series editor.

KODOSKY, J. And PEREZ, E. (1993): *Linear Systems in LabVIEW*. Application Note 008. National Instruments.

KOEFOED, O.. (1970): *Direct Method for Determining the Layer Distribution from the Raised Kernel Function in Geoelectrical sounding*. Geophysical Prospecting, 18, 564-570.

LabVIEW for Windows. (1993), Data Acquisition VI Reference Manual. National Instruments, 484p.

LOEWENTEIN, E. B. (1990): *Improving Accuracy with Dither*. National Instruments. Applications Article.

LUO, Y. And ZHANG, G. (1998): *Theory and Application of Spectral Induced Polarization*. Geophysical Monograph Series, Number 8. David V. Fitterman, Editor. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.

MAILET, R. (1947): *The Fundamental Equations of Electrical Prospecting*. *Geophysics*, 12 (4): 529-556.

MORSE, P. M. and FESHBACH, H. (1953): *Methods of Theoretical Physics*. Part II. McGraw-Hill Book Company. New York.

NABIGHIAN, M. N. (1966): *The Application of Finite Forward Differences in the Resistivity Computations over a Layered Earth*. *Geophysics*, 31:p.971-980.

OLAYINKA, A. and BARKER, R. (1990): *Borehole Siting in Crystalline Basement Areas of Nigeria with a Microprocessor-Controlled Resistivity Traversing System*. *Ground Water*, 28; No 2, p.178-182.

OLDERBURG, D. W. and YAOGUO, L. (1994): *Inversion of Induced Polarization Data*. *Geophysics*, 59. No 9. P. 1327-1341.

ORELLANA, E. and MOONEY, H. M. (1996): *Master Tables and Curves for Vertical Electrical sounding over Layered Structures*. Interciencia, Madrid. 34p.

ORELLANA, E. (1982): *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. Editorial Paraninfo. Madrid. 578p.

QUERALT, P., POUS, J. And MARCUELLO, A. (1991): *2-D Resistivity Modeling: An Approach to Arrays Parallel to the Strike Direction*. *Geophysics*, 56 No 7. P.941-950.

SANTINI, R. and ZAMBRANO, R. (1983): *A Generalized Method to Calculate Standard Curves for Geoelectrical Sounding*. Geoexploration, 21:21-103.

SLICHTER, L. B. (1983): *Interpretation of Resistivity Prospecting for Horizontal Structures*. Physics, 4, 307-322.

STEFANESCU, S. S.; SCHLUMBERGER, C.; SCHLUMBERGER, M. (1930): *Sur la Distribution Electrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain a couches horizontals, homogenes et isotropes*. *Jour. Physique que et le Radium*, 1, 132-140.

SUNDE, E. O. (1949): *Earth Conduction Effects in Transmission System*. Van Nostrand, New York.

TELFORD, R.(1997): *Applied Geophysics*. Stanley H. Ward, Editor. Investigations in Geophysics No 5. S.E.G. 750p.

TIJONOV, A. N. Y SAMARSKI, A. A. (1983): *Ecuaciones de la Física Matemática*. Editorial MIR, Moscú. Complemento 2, páginas 702-703.

TIMUR, A. (1968): *An Investigation of Permeability, Porosity and Residual Water Saturation Relationships for Sandstone Reservoirs*. Log Analyst, July-Aug, 8-17.

TRIPP, A. C., HOHMANN, G. W. And SWIFT, Jr. C. M. (1984): *Two Dimensional Resistivity Inversion*. Geophysics, 49, P. 1708-1717.

VAN DAM, J. C. (1967): *Mathematical Denotation of Standard-graphs for Resistivity Prospecting in View of their Calculation by Means of a Digital Computer*. Geophysical Prospecting, 15: p.57-70.

WARD, S. H. (1997): Resistivity and Induced polarization Methods. En: Geotechnical and Enviromental Geophysics. Volume I. Stanley H. Ward, Editor. Investigations in Geophysics No 5. S.E.G. 389p.

WAXMAN, M. H. and Smits, L. J. M. (1968): *Electrical Conductivities in Oil-bearing Shaley Sands*. Trans. Pet. Eng., 243, 107-115.

WHITELEY, (1973). Citado en : Ward, S. H.: Resistivity and Induced Polarization Methods. Geotechnical and Environmental Geophysics. Stanley H. Ward, Editor. Investigations in Geophysics No 5. S.E.G. 1997.

WILCOX, S. W. (1944): *Sand and Gravel Prospecting by Earth Resistivity Method*. Geophysical Prospecting, p.36-46.

YADAV, G. S., ABOLFAZLI, H. (1998): *Geoelectrical Sounding and their Relationship to Hydraulic Parameters in Semiarid Regions of Jalore, Nortwestern India*. Journal of Applied Geophysics, 39. 35-51.

ZHODY A. A. R., Eaton, G.P. and Mabey, D. R. (1974): Application of Surface Geophysics to Ground Water Investigations. Techniques of water-Resources Investigation of the U.S.G.S., book 2.P. 49-50.

ZHODY A. A. R. (1989): *A New Method for the Automatic Interpretation of Schlumberger and Wenner Sounding curves*.Geophysics, 54, No 2. P. 245-253.

*Labview Technical Resources*. Journal especializado en información técnica para desarrolladores de sistemas utilizando programación gráfica. Ubicado en Dallas, Texas. Linda Gruggett, editora. Se puede obtener información a través de la página web: <http://www.natinst.com./hr/hr.htm>