

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional
Unidad Oaxaca

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales
(Ingeniería de Procesos)

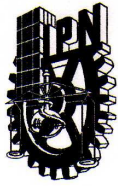
DISEÑO DE UN RESISTIVÍMETRO DE CORRIENTE DIRECTA PARA REALIZAR ESTUDIOS GEOELÉCTRICOS EN LOS VALLES CENTRALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA:

Eberth Luciano Sepúlveda Escalera

Director de tesis: Dr. Andrés Pech Pérez.

Codirector: Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 03 del mes de diciembre del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: **"Diseño de un resistivímetro de corriente directa para realizar estudios geoelectrónicos en los valles centrales"**.

Presentada por el alumno:

Sepúlveda

Escalera

Eberth Luciano

Apellido paterno

materno

nombre(s)

Con registro:

B	0	6	1	9	0	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA
 Director de tesis

Dr. Andrés Pech Pérez

Dr. Juan Alejandro Vásquez Feijoo

Dr. Pedro Montes García

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

Dr. Juan Rodríguez Ramírez



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
 CIIDIR-UNIDAD-OAXACA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 03 del mes diciembre del año 2008, el (la) que suscribe **Sepúlveda Escalera Eberth Luciano** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B061900**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Andrés Pech Pérez y cede los derechos del trabajo titulado: **“Diseño de un resistímetro de corriente directa para realizar estudios geoelectrónicos en los valles centrales”**., al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó seberth_luciano@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Sepúlveda E.

SEPÚLVEDA ESCALERA EBERTH LUCIANO



INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CIIDIR-UNIDAD-OAXACA

Resumen

Se diseñó y construyó un equipo de corriente directa (CD) para mediciones geoeléctricas, que permite obtener datos de potencial y corriente sobre terrenos granulares. Las características del mismo son: diseño sencillo; fácil mantenimiento; sus piezas son de bajo costo y se encuentran en el comercio sin dificultad; consumo de potencia mínimo, lo que significa una mayor vida útil de las baterías; y se emplean multímetros comerciales para la lectura de la corriente inyectada y el potencial inducido. Además se tiene la posibilidad de conectar el resistímetro a un generador externo de voltaje, a una batería de automóvil o a un motor generador de polos permanentes, en el caso de que las pilas se descarguen en campo. El equipo está diseñado con las siguientes especificaciones: voltaje de entrada 12 VCD; voltaje de salida 120 VCD; corriente de salida 0.5 A; potencia de salida a carga máxima 60 W.

Se efectuaron 4 sondeos tipo Schlumberger con una distancia máxima entre electrodos de corriente AB igual a 120 m; las diferencias de potencial fueron obtenidas utilizando un resistímetro comercial y el resistímetro diseñado. Los perfiles de resistividad calculados con ambos equipos mostraron un buen acuerdo.

Se realizó un quinto sondeo para conocer la desviación estándar del equipo diseñado, en cada estación se realizaron 20 mediciones. La dispersión de los datos fue mínima; para la máxima distancia AB= 120 m, se estimó una desviación estándar de 2.1954 Ω -m.

(Palabras clave: equipo, inversor, corriente directa, resistividad)

Abstract

To characterize alluvial valleys composed of a mixture or combination of sand, clay and gravel, I built a resistivimeter. It allowed me to obtain resistivity values by measuring potential differences and current at the surface. The main characteristics of the equipment are: energy efficient; environmentally friendly; affordable; low cost pieces and can be found at any electronic store; labour-intensive. The equipment was designed with the following specifications: input voltage 12 VCD, output voltage 120 VCD, output current 0.5 A, maximum output power 60 W.

Four Schlumberger profiles were acquired; in all cases, the maximum distance between current electrodes (AB) was 120 m. The potential differences were measured using a commercial resistivimeter and the resistivimeter designed. The resistivity curves calculated with both devices showed a good agreement.

To obtain the standard deviation associated with the resistivimeter designed, I performed another Schlumberger survey; at each station, I measured 20 resistivity values; all the values were located close to the mean. For the maximum distance $AB = 120$ m, I estimated a standard deviation equal to 2.1954 Ohm-m.

(Key words: equipment, inverter, direct current, resistivity)

Dedicatorias

A mis padres:

Ruperto Sepúlveda García

Aurora Escalera Almaraz †

Por su amor, confianza y apoyo incondicional.

*A mi sobrina Abril Ruiz Sepúlveda, a mis hermanos,
maestros y amigos.*

A Dios por la oportunidad brindada.

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional por otorgarme las facilidades para la realización de esta tesis.

Al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, por el apoyo y las facilidades brindadas para la realización de este trabajo en sus instalaciones.

A la COFAA (Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del Instituto Politécnico Nacional) por otorgarme la beca PIFI (Programa Institucional de Formación de Investigadores) a través del proyecto de investigación “Modelación matemática de la propagación de ondas sísmicas en medios anisótropos y heterogéneos” clave SIP 20082269.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado durante los estudios de posgrado.

Al Dr. Vladimir Shevnin del Instituto Mexicano del Petróleo por sus valiosos comentarios acerca del tema.

A los Drs. Andrés Pech Pérez y Salvador Isidro Belmonte Jiménez por su apoyo incondicional, dirección y seguimiento de este trabajo.

A la M. en C. María De Los Ángeles Ladrón De Guevara Torres y al ing. Francisco Reyes López por su paciente ayuda y colaboración en el trabajo de campo.

ÍNDICE	Pág.
Relación de figuras.....	iv
Relación de tablas.....	viii
Nomenclatura.....	ix
Introducción.....	1
Planteamiento del problema.....	4
Justificación.....	6
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
Variables.....	7
Hipótesis.....	7
CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS ELECTRÓNICOS DEL EQUIPO PARA PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA.....	8
I.1 Introducción.....	9
I.2 La fuente de alimentación.....	11
I.2.1 Fuentes de tensión.....	12
I.2.2 Fuentes de corriente.....	14
I.3 Indicador de carga de las baterías.....	15
I.4 El oscilador.....	17
I.4.1 Descripción de los pines del Temporizador 555.....	17
I.4.2 Funcionamiento del circuito integrado 555 como multivibrador.....	19
I.4.3 Multivibrador astable.....	19
I.4.4 Multivibrador monoestable.....	21
I.4.5 Ciclo de trabajo del oscilador.....	22
I.5 Circuito inversor.....	24
I.6 Rectificador de voltaje.....	27
I.6.1 Rectificador de media onda.....	27
I.6.2 Rectificador de onda completa.....	30
I.6.3 Rectificador de onda completa en configuración puente.....	31
I.7 Filtrado.....	31
I.8 Compensador de potencial natural.....	35
I.8.1 Corrientes telúricas.....	35
I.8.2 Importancia de la circulación de corriente en el subsuelo.....	36
I.8.3 Circuito compensador de potencial natural.....	37
I.9 Circuito inversor de polaridad del voltaje de salida.....	39
I.10 Circuito para conexión de generador de CA externo.....	40
I.11 Impedancia de entrada en el medidor de potencial.....	41
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE RESISTIVIDAD DE CORRIENTE DIRECTA APLICADO A MEDIOS ESTRATIFICADOS.....	43
II.1 Introducción.....	44
II.2 Resistividad eléctrica de los suelos.....	44

II.3 Medida de la resistividad eléctrica.....	45
II.4 Arreglos electródicos lineales.....	53
II.4.1 Arreglo Schlumberger.....	54
II.4.2 Arreglo Wenner.....	55
II.4.3 Arreglo dipolo-dipolo.....	56
II.5 Arreglos electródicos azimutales.....	56
II.5.1 Arreglo Wenner azimutal.....	57
II.5.2 Arreglo cuadrado.....	57
II.5.3 Arreglo dipolo ecuatorial.....	58
II.5.4 Arreglo tipo flecha.....	58
II.6 Interpretación y procesamiento de datos.....	59
II.7 Modelos para medios estratificados.....	61
II.8 Profundidad de investigación.....	62
CAPÍTULO III. DISEÑO DEL EQUIPO.....	65
III.1 Introducción.....	66
III.2 Proceso de diseño.....	67
III.3 Identificación de la necesidad.....	67
III.4 Investigación de mercado.....	68
III.5 Especificaciones de desempeño.....	73
III.6 Árbol de objetivos.....	75
III.7 Análisis de funciones.....	76
III.8 Carta morfológica.....	77
III.9 Análisis y selección.....	80
III.10 Diseño detallado.....	81
III.10.1 La fuente de alimentación.....	90
III.10.2 Indicador de carga de las baterías.....	90
III.10.3 El oscilador.....	91
III.10.4 Circuito de potencia.....	93
III.10.5 Rectificador de voltaje y filtrado.....	94
III.10.6 Compensador de potencial natural.....	95
III.10.7 Medidor de corriente.....	96
III.10.8 Medidor de potencial inducido.....	97
III.10.9 Electrodo.....	97
III.11 Construcción del prototipo.....	98
III.12 Validación del equipo diseñado.....	110
CAPÍTULO IV. COMPARACIÓN.....	111
IV.1 Desarrollo experimental.....	112
IV.2 Ubicación de los sondeos.....	113
IV.3 Toma de datos.....	114
IV.4 Cálculo de la desviación estándar.....	124
CAPÍTULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE ERRORES.....	128
V.1 Sondeo 1 (S1).....	129
V.2 Sondeo 2 (S2).....	131
V.3 Sondeo 3 (S3).....	135

V.4 Sondeo 4 (S4)	138
V.5 Sondeo 5 (S5)	140
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	142
Referencias.....	144
Anexos.....	149
A. Generador de polos permanentes impulsado por un mecanismo de bicicleta.....	149
B. Diagrama electrónico.....	157
C. Medidas del Acrílico.....	158
D. Vista frontal de la cubierta.....	159
E. Vista lateral izquierda de la cubierta.....	160
F. Costos.....	161
G. Manual de usuario.....	164
H. Problemas y su solución.....	169
I. Estado de los componentes.....	173
J. Medición de la diferencia de potencial.....	179
K. Factor geométrico.....	182

RELACIÓN DE FIGURAS.	Pág.
Figura 1. Bloques que integran el transmisor de C.D.....	11
Figura 2. Símbolos de las fuentes ideales de tensión, a), e intensidad, b)...	12
Figura 3. Símbolo de las fuentes reales de tensión.....	13
Figura 4. Símbolo de las fuentes reales de corriente.....	14
Figura 5. Circuito indicador de carga de batería.....	16
Figura 6. NE555 de Signetics en un dual in line package.....	17
Figura 7. Terminales del temporizador 555.....	18
Figura 8. Esquema de la aplicación de multivibrador astable del 555.....	20
Figura 9. Esquema de la aplicación de multivibrador monoestable del 555..	21
Figura 10. Onda cuadrada con ciclo de trabajo del 66 %.....	22
Figura 11. Circuito oscilador astable con ciclo de trabajo del 50%.....	23
Figura 12. Onda cuadrada con ciclo de trabajo del 50%.....	23
Figura 13. Diagrama a bloques del circuito inversor.....	25
Figura 14. Diagrama electrónico del circuito inversor completo.....	26
Figura 15. Forma de onda a la salida del transformador.....	26
Figura 16. Circuito rectificador de media onda.....	27
Figura 17. Forma de onda senoidal que se alimenta al ánodo del diodo.....	28
Figura 18. Forma de onda del voltaje a la salida del diodo.....	28
Figura 19. Rectificador de onda completa.....	30
Figura 20. Forma de onda de salida en un rectificador de onda completa...	30
Figura 21. Rectificador de onda completa tipo puente.....	31
Figura 22. Circuito rectificador de onda completa con filtro a la entrada.....	32
Figura 23. Forma de onda con un capacitor de $10 \mu F$	32
Figura 24. Rectificador de onda completa tipo puente con capacitor de $100 \mu F$	33
Figura 25. Forma de onda con un capacitor de $100 \mu F$	33
Figura 26. Forma de onda con un capacitor de $1000 \mu F$	34
Figura 27. Sentido de las corrientes telúricas y polaridades en puntos MN.	37
Figura 28. Fuentes de potencial natural y potencial externo.....	38
Figura 29. Circuito compensador de potencial natural.....	38
Figura 30. Circuito compensador de potencial natural con polaridad Invertida.....	39
Figura 31. Circuito inversor de polaridad del voltaje de salida.....	39
Figura 32. Conexión del transformador hacia el rectificador.....	40
Figura 33. Conexión del generador externo hacia el rectificador.....	40
Figura 34. Carga positiva y carga negativa mostrando la dirección del campo eléctrico.....	46
Figura 35. Desplazamiento del campo eléctrico y superficie equipotencial en una carga positiva.....	47
Figura 36. Superficie equipotencial de una carga puntual en el subsuelo....	47
Figura 37. Diferencia de potencial entre dos puntos en el campo eléctrico...	48
Figura 38. Diferencia de potencial entre dos puntos en una misma superficie equipotencial.....	49
Figura 39. Potencial en un punto M debido a dos cargas.....	50
Figura 40. Potencial en un punto N debido a dos cargas.....	51
Figura 41. Arreglo de electrodos de corriente y potencial.....	53
Figura 42. Arreglo Schlumberger.....	54
Figura 43. Arreglo Wenner.....	55

Figura 44. Arreglo Dipolo-dipolo.....	56
Figura 45. Arreglo Wenner Azimutal.....	57
Figura 46. Tipos de arreglos cuadrados.....	57
Figura 47. Arreglo dipolo ecuatorial.....	58
Figura 48. Arreglo tipo flecha.....	59
Figura 49. Profundidad de investigación.....	63
Figura 50. Gráfico bilogarítmico de distancia $AB/2$ vs ρ_a	64
Figura 51. Resistivímetro de 8-Canales del Subsuelo de Memoria y PI.....	68
Figura 52. Terrameter SAS 1000.....	70
Figura 53. Resistivímetro syscal.....	71
Figura 54. Árbol de objetivos.....	75
Figura 55. Diagrama funcional.....	76
Figura 56. Laguna de lixiviados.....	83
Figura 57. Equipo para mediciones geoelectricas utilizado.....	83
Figura 58. Sección del terreno del CIIDIR.....	87
Figura 59. Multímetro utilizado para medir potencial natural.....	87
Figura 60. Electrodo en terreno humedecido con agua y sal.....	88
Figura 61. Medición de potencial natural.....	88
Figura 62. Diagrama de bloques.....	90
Figura 63. Indicador de carga de baterías.....	90
Figura 64. Circuito oscilador.....	92
Figura 65. Circuito de potencia.....	93
Figura 66. Circuito rectificador.....	94
Figura 67. Compensador de potencial natural.....	96
Figura 68. Electrodo de acero para conducir la corriente al subsuelo.....	97
Figura 69. Multímetros utilizados.....	98
Figura 70. Elementos eliminados.....	98
Figura 71. Vista posterior de la tarjeta.....	98
Figura 72. Transformador.....	98
Figura 73. Interruptores.....	99
Figura 74. Resistencias variables.....	99
Figura 75. Conectores.....	99
Figura 76. Cables y accesorios.....	99
Figura 77. Baterías.....	100
Figura 78. Semiconductores.....	100
Figura 79. Resistencias.....	100
Figura 80. Capacitores.....	100
Figura 81. Portafusibles y fusibles.....	101
Figura 82. Accesorios de la cubierta.....	101
Figura 83. Acrílico taladrado.....	101
Figura 84. Limado de bordes.....	101
Figura 85. Plantilla de papel.....	102
Figura 86. Acrílico terminado.....	102
Figura 87. Circuito oscilador.....	102
Figura 88. Plantilla del circuito.....	102
Figura 89. Plantilla de pistas.....	103
Figura 90. Construcción de la tarjeta.....	103
Figura 91. Tarjeta terminada.....	103
Figura 92. Montaje de elementos.....	103
Figura 93. Circuito completo.....	104

Figura 94. Medición de corriente.....	104
Figura 95. Construcción de la cubierta.....	104
Figura 96. Cubierta terminada.....	104
Figura 97. Sujeción de baterías.....	105
Figura 98. Portafusibles terminado.....	105
Figura 99. Multímetros en el acrílico.....	105
Figura 100. Soporte de los multímetros.....	105
Figura 101. Vista posterior del tablero.....	106
Figura 102. Conexión de cables.....	106
Figura 103. Instalación de conectores.....	106
Figura 104. Compensador de potencial.....	106
Figura 105. Cableado de interruptores.....	107
Figura 106. Instalación de diodos led.....	107
Figura 107. Cableado de la tarjeta.....	107
Figura 108. Equipo finalizado.....	107
Figura 109. Cargador de baterías.....	108
Figura 110. Carretes para el cable.....	108
Figura 111. Cale instalado en carretes.....	108
Figura 112. Cables caimán–banana.....	108
Figura 113. Fotografía del prototipo.....	109
Figura 114. Fotografía de los carretes con cable.....	109
Figura 115. Localización de los sondeos realizados en el CIIDIR y el banco de arena en Santa Cruz Xoxocotlán.....	114
Figura 116. Equipo marca ERA que se utilizó como patrón.....	115
Figura 117. Orientación del sondeo S1.....	115
Figura 118. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S1; equipo diseñado.....	116
Figura 119. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S1; equipo marca ERA.....	117
Figura 120. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S2; equipo diseñado.....	118
Figura 121. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S2; equipo marca ERA.....	119
Figura 122. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S3; equipo diseñado.....	120
Figura 123. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S3; equipo marca ERA.....	121
Figura 124. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S4; equipo diseñado.....	122
Figura 125. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S4; equipo marca ERA.....	123
Figura 126. Orientación del sondeo S4.....	124
Figura 127. Banco de arena donde se realizó el sondeo S4.....	124
Figura 128. Resistividades en AB=3 m.....	125
Figura 129. Resistividades en AB=5 m.....	125
Figura 130. Resistividades en AB=7 m.....	125
Figura 131. Resistividades en AB=12 m.....	125
Figura 132. Resistividades en AB=16 m.....	125
Figura 133. Resistividades en AB=30 m.....	125
Figura 134. Resistividades en AB=50 m.....	126

Figura 135. Resistividades en AB=90 m.....	126
Figura 136. Resistividades en AB=120 m.....	126
Figura 137. Gráficas del sondeo S1 considerando ambos equipos.....	129
Figura 138. Gráficas del sondeo S2 considerando ambos equipos.....	132
Figura 139. Gráficas del sondeo S3 considerando ambos equipos.....	135
Figura 140. Gráficas del sondeo S4 considerando ambos equipos.....	138
Figura A.1. Generador de C.D. de imanes permanentes.....	149
Figura A.2. Generador acoplado a una bicicleta.....	150
Figura A.3. Imagen del circuito regulador.....	151
Figura A.4. Circuito electrónico del regulador de voltaje.....	151
Figura A.5. Sistema de poleas compuesto.....	152
Figura A.6. La fuente mecánica que proporciona el voltaje de entrada....	153
Figura A.7. Carátula que muestra el voltaje regulado a la salida del generador.....	154
Figura A.8. Comparativo de las resistividades obtenidas.....	156
Figura G.1. Controles del equipo.....	165
Figura I.1. Simbología del fusible.....	173
Figura I.2. Símbolos para resistencias.....	173
Figura I.3. Símbolos y forma física de diodos.....	176
Figura I.4. Símbolos y forma física de los capacitores.....	177
Figura I.5. Pruebas al transformador.....	177
Figura I.6. Forma física del transistor.....	178
Figura J.1. Datos tomados de la Tabla 11, lectura 1.....	179
Figura J.2. Datos tomados de la Tabla 13, lectura 1.....	179
Figura J.3. Datos tomados de la Tabla 15, lectura 12.....	180
Figura J.4. Datos tomados de la Tabla 15, lectura 1.....	181
Figura K.1. Superficies equipotenciales que corresponden a un electrodo cilíndrico.....	183
Figura K.2. Parámetros correspondientes a un electrodo cilíndrico.....	183
Figura K.3. Variables que intervienen en un cono.....	184
Figura K.4. Gráfica de resistividades del sondeo 1, empleando los dos factores geométricos.....	187
Figura K.5. Gráfica de resistividades del sondeo 2, empleando los dos factores geométricos.....	188

RELACIÓN DE TABLAS.	Pág.
Tabla 1. Especificaciones del Resistivímetro marca AGI.....	69
Tabla 2. Especificaciones del Resistivímetro marca GISCO.....	70
Tabla 3. Especificaciones del Resistivímetro marca SYSCAL.....	72
Tabla 4. Distribución de atributos.....	74
Tabla 5. Carta morfológica.....	77
Tabla 6. Resistividades de materiales que integran un aluvión.....	82
Tabla 7. Sondeo 1 tipo Schlumberger desarrollado en la laguna de lixiviados en Zaachila.....	84
Tabla 8. Sondeo 2 tipo Schlumberger desarrollado en la laguna de lixiviados en Zaachila.....	85
Tabla 9. Sondeo 3 tipo Schlumberger desarrollado en la laguna de lixiviados en Zaachila.....	86
Tabla 10. Resultados obtenidos en la medición de potencial natural.....	89
Tabla 11. Datos del sondeo S1 tomados con el equipo diseñado.....	116
Tabla 12. Datos del sondeo S1 tomados con el equipo Marca ERA.....	117
Tabla 13. Datos del sondeo S2 tomados con el equipo diseñado.....	118
Tabla 14. Datos del sondeo S2 tomados con el equipo Marca ERA.....	119
Tabla 15. Datos del sondeo S3 tomados con el equipo diseñado.....	120
Tabla 16. Datos del sondeo S3 tomados con el equipo Marca ERA.....	121
Tabla 17. Datos del sondeo S4 tomados con el equipo diseñado.....	122
Tabla 18. Datos del sondeo S4 tomados con el equipo Marca ERA.....	123
Tabla 19. Datos del sondeo para calcular la desviación estándar del Equipo diseñado.....	127
Tabla 20. Diferencia de los datos tomados en sondeo S1.....	129
Tabla 21. Diferencia de los datos tomados en sondeo S2.....	132
Tabla 22. Diferencia de los datos tomados en sondeo S3.....	135
Tabla 23. Diferencia de los datos tomados en sondeo S4.....	139
Tabla A.1. Datos obtenidos alimentando el equipo diseñado con baterías...	154
Tabla A.2. Datos obtenidos alimentando el equipo diseñado con el generador.....	155
Tabla A.3. Resistividades obtenidas en el sondeo.....	155
Tabla H.1. Problemas comunes y su posible solución.....	169
Tabla I.1. Código de colores para resistencias de carbón.....	174
Tabla K.1. Datos del primer sondeo tipo Schlumberger.....	186
Tabla K.2. Datos del segundo sondeo tipo Schlumberger.....	187

NOMENCLATURA:

VARIABLES.

C	Capacitancia.
E, E	Tensión o voltaje.
E_S	Voltaje de fuente.
f	Frecuencia.
I, I	Corriente eléctrica.
I_F	Corriente máxima promedio.
I_L	Corriente en la carga.
I_S	Corriente en la fuente.
k	Factor geométrico.
ℓ	Longitud.
P	Potencia eléctrica.
P_{RV}	Voltaje pico inverso máximo.
r	Radio.
R, R	Resistencia eléctrica.
R_L	Resistencia eléctrica de la carga.
R_S	Resistencia eléctrica de la fuente.
s	Sección transversal.
T	Periodo.
V	Voltaje o potencial.
V_m	Potencial en electrodo M.
V_{MN}	Voltaje del punto M al N.
V_{n1}	Potencial en electrodo N1.
V_{n2}	Potencial en electrodo N2.
V_{pp}	Tensión pico a pico.
VR_L	Voltaje en la resistencia de carga.
V_{RMS}	Voltaje eficaz.
$V_s,$	Voltaje de fuente.
W	Ancho del pulso.

VARIABLES GRIEGAS.

ΔV	Diferencia de potencial.
ρ	Resistividad.
ρ_a	Resistividad aparente.
ρ_l	Resistividad longitudinal.
ρ_m	Resistividad media.
ρ_t	Resistividad transversal.
σ	Conductividad.
τ	Constante de tiempo.

UNIDADES.

A	Ampere.
A-h	Ampere-hora.

dB	<i>Decibel.</i>
Hz	<i>Hertz.</i>
kHz	<i>Kilohertz.</i>
kg	<i>Kilogramo.</i>
k Ω	<i>Kilo Ohm.</i>
m	<i>Metro.</i>
mA	<i>Miliampere.</i>
mm	<i>Milímetro.</i>
ms	<i>Milisegundo.</i>
mV	<i>Milivoltio.</i>
M	<i>Mega.</i>
M Ω	<i>Mega Ohm.</i>
nV	<i>Nanovoltio.</i>
s	<i>Segundo.</i>
W	<i>Watt.</i>
μ F	<i>Microfaradio.</i>
μ V	<i>Microvoltio.</i>
Ω	<i>Ohm.</i>
Ω -m.	<i>Ohm-m.</i>

ABREVIATURAS.

AB	<i>Distancia entre electrodos de corriente.</i>
AB/2	<i>Profundidad teórica de investigación.</i>
CA	<i>Corriente alterna.</i>
CD	<i>Corriente directa.</i>
c.d.	<i>Corriente directa.</i>
C.I.	<i>Circuito integrado.</i>
d.d.p.	<i>Diferencia de potencial.</i>
f.e.m.	<i>Fuerza electromotriz.</i>
LCD	<i>Pantalla de cristal líquido.</i>
ln	<i>Logaritmo natural.</i>
min.	<i>Minuto.</i>
MN	<i>Distancia entre electrodos de potencial.</i>
NaCl	<i>Cloruro de sodio.</i>
PC	<i>Computadora personal.</i>
P.Ind.	<i>Potencial inducido.</i>
P.Nat.	<i>Potencial natural.</i>
r.p.m.	<i>Revoluciones por minuto.</i>
r.p.s.	<i>Revoluciones por segundo.</i>
RV	<i>Resistencia variable.</i>
SCR	<i>Rectificador Controlado de Silicio.</i>
SEV	<i>Sondeo eléctrico vertical.</i>
SW	<i>Interruptor.</i>
VCA	<i>Voltaje de corriente alterna.</i>
Vcc	<i>Voltaje de corriente directa (alimentación).</i>
VCD	<i>Voltaje de corriente directa.</i>

Introducción.

La localización de recursos naturales y estructuras geológicas inmersas en el subsuelo utilizando técnicas geofísicas, se basa en medir variaciones de alguna propiedad física de dichos recursos o estructuras que los haga diferentes del medio que los rodea. Por ejemplo, en prospección sísmica, se utiliza la velocidad de transmisión de las ondas, y en prospección eléctrica la resistividad.

El estudio de la diferencia entre las propiedades de los materiales de interés y el resto del subsuelo es común en la exploración de petróleo, aguas subterráneas y minerales. También se realizan prospecciones de soporte a la ingeniería civil, como el estudio de las condiciones de cimentación de presas o edificios, o de los materiales a extraer para la construcción de una nueva carretera. Existen también otras aplicaciones como la orientación de excavaciones arqueológicas o la localización de galerías subterráneas.

De acuerdo con Telford, Geldart & Sheriff (1990) y Sánchez (2004) existen diversas técnicas geofísicas eléctricas y electromagnéticas que miden la resistividad de los materiales o el inverso de ésta, que se conoce como conductividad. Algunas de éstas técnicas son más modernas y más precisas, pero los sondeos eléctricos verticales (SEV), se siguen utilizando debido a que se pueden interpretar suelos estructurados en capas verticales utilizando programas de inversión de datos en una dimensión como el DCINV, basado en el método de inversión lineal (Pirttijärvi, 2005).

Según Orellana (1982) y Boyd (1996) cuando se utiliza el método de resistividad en prospección geofísica, se introduce una corriente eléctrica que puede ser continua o alterna de baja frecuencia en el terreno; esto se realiza por medio de un par de electrodos, y se mide la diferencia de potencial entre otro par de electrodos dispuestos en una configuración ya establecida. La relación de estas dos magnitudes y la distancia entre los electrodos proporciona una resistividad aparente que depende de la resistividad de los materiales presentes en el subsuelo.

Actualmente existen diferentes empresas extranjeras que desarrollan equipos para la medición de la resistividad de las estructuras geológicas; algunos proporcionan los valores de potencial y corriente, mientras que otros más sofisticados calculan mediante circuitos electrónicos el valor de la resistencia o la resistividad correspondientes al punto considerado del sondeo.

Según Milsom (1996) independientemente de la forma en que presenten los datos, todos los equipos que miden la resistividad cuentan con los siguientes elementos:

- a) Un generador o transmisor encargado de controlar y medir la corriente directa que se inyecta en el subsuelo.
- b) Un receptor con el cual se mide la diferencia de potencial existente en dos puntos del terreno, una vez que se ha inyectado la corriente con el transmisor. Los equipos modernos concentran el transmisor y el receptor en un solo módulo.
- c) Cables cuyo grosor está determinado por la necesidad de obtener baja resistencia.
- d) Electrodo metálicos, los cuales se introducen en el suelo para dirigir la corriente eléctrica dentro del mismo.

Tomando en cuenta todo lo anterior, en este trabajo se diseñó y construyó un equipo para mediciones geoeléctricas que funciona mediante un par de pilas recargables de 12 VCD y 7 A-h; este voltaje se eleva mediante un circuito electrónico a 120 VCD, necesarios para energizar al subsuelo y obtener la corriente inyectada y el potencial inducido a distancias horizontales de al menos 120 m, mediante los medidores respectivos. Con este equipo se puede elegir la polaridad de la corriente inyectada; esto con el fin de eliminar las dos fuentes principales de ruido: la polarización de electrodos y las corriente telúricas; además, puede conectarse a una fuente generadora externa en caso de que las pilas se descarguen.

A continuación se describe el contenido de los capítulos que integran este documento:

En el capítulo 1, se analizan los elementos que integran el equipo comenzando por el tipo de fuente; el circuito oscilador encargado de generar un voltaje pulsante; se describe el funcionamiento del circuito inversor necesario para generar el voltaje alterno, el cual es rectificado y filtrado para obtener los 120 VCD en la salida; el circuito encargado de cambiar la polaridad del voltaje de salida para eliminar fuentes de ruido y se concluye con la explicación del circuito que habilita a una fuente externa de 127 VCA.

En el capítulo 2, se explica la teoría que fundamenta al método eléctrico utilizado para calcular la resistividad, se inicia explicando qué es la resistividad para enseguida hacer la deducción matemática de la ecuación utilizada; se describen brevemente los arreglos lineales y no lineales de electrodos, más utilizados; se presentan algunos recursos que diversos autores han utilizado para la interpretación y el proceso de los datos obtenidos, y se finaliza con una discusión sobre la relación entre la resistividad aparente y la profundidad de penetración correspondiente a los arreglos Schlumberger, Wenner y dipolo-dipolo.

El capítulo 3 abarca el proceso de diseño el cual se compone de las siguientes etapas: 1) Identificación de la necesidad, 2) Investigación de mercado, 3) Especificaciones de desempeño, 4) Análisis de funciones, 5) Generación del concepto, 6) Análisis y selección, 7) Diseño detallado y 8) Construcción del prototipo.

En el capítulo 4, se presenta la metodología empleada para realizar comparaciones entre los datos obtenidos con el resistivímetro diseñado y uno comercial, se muestra la ubicación de los sondeos realizados y se presentan los datos obtenidos mediante sondeos tipo Schlumberger.

En el capítulo 5, se realiza un análisis de la información obtenida en el capítulo anterior y se calcula el error de los datos obtenidos con el equipo diseñado respecto al equipo comercial.

En el capítulo 6, se muestran las conclusiones y las recomendaciones.

Planteamiento del problema.

Los equipos utilizados para medir la resistividad, se diseñan de cualquiera de las dos formas siguientes:

1) Existen aquellos equipos que son diseñados para entregar un voltaje o una corriente invariables en el tiempo (CD) a la salida de sus terminales A y B, que deben contar con elementos supresores de ruido para eliminar la interferencia provocada por las corrientes telúricas y la polarización de electrodos, que según Boyd (1996) son dos de las fuentes de ruido más importantes que pueden producir mediciones erróneas; además de alejar los cables de corriente de los de potencial para evitar la inducción de voltajes que afecten las mediciones. Tanto la corriente como el potencial pueden ser obtenidos con multímetros comerciales que cuenten con escalas adecuadas de corriente y voltaje en CD.

2) La otra forma en que se diseñan los equipos que miden la resistividad, es obteniendo un voltaje o una corriente alterna con forma de onda cuadrada a la salida de sus terminales A y B. Según Milsom (1996) los equipos modernos entregan una corriente alterna cuya frecuencia se puede seleccionar desde fracciones de Hz hasta unos cuantos Hz, lo que permite eliminar automáticamente tanto las corrientes telúricas como la polarización de electrodos. Este tipo de equipos son los que predominan por la aparente simplicidad con que eliminan las fuentes de ruido. El problema con estos equipos es que se necesita contar con un medidor de potencial y de corriente que puedan medir señales cuadradas de pequeñas frecuencias, lo que requiere de un diseño propio debido a que los multímetros comerciales están diseñados para medir señales con errores mínimos desde la frecuencia de línea (60 Hz) en adelante. Si se pretende usar este tipo de elementos para medir corrientes o potenciales a 1 Hz, 2Hz, 5Hz ó 10Hz, el error en las mediciones se incrementa a tal grado que se obtendrán valores muy pequeños. Este inconveniente ha contribuido a que estos equipos sean cada día más caros, sin contar el hecho de que las empresas que los diseñan y venden en México son de origen extranjero. Si se piensa en equipos económicos, Gasulla (1999) afirma que existen equipos comerciales denominados Terrameters, los

cuales no permiten mucha flexibilidad en la elección de parámetros como la frecuencia o la forma de la onda inyectada.

Con base en los aspectos relacionados con la adquisición de un equipo comercial para mediciones geofísicas, que se enumeran a continuación:

- a) Su precio es muy elevado,
- b) Su uso y operación es delicada,
- c) Generalmente son de origen extranjero, lo que encarece más el costo del mantenimiento,
- d) El tiempo de envío y entrega al mandarse a reparar es muy largo,
- e) Las empresas no venden diagramas de los equipos que producen,
- f) Los diseñadores borran intencionalmente las matrículas de algunos dispositivos impidiendo su reparación localmente,
- g) La no disponibilidad de algunas piezas en el país,
- h) Piezas discontinuadas o de fabricación exclusiva,

Se diseñó un equipo alimentado por 2 baterías recargables de 12 VCD y 7 A-h que permite energizar el subsuelo con un voltaje de 120 VCD necesarios para abarcar distancias horizontales entre electrodos de corriente $AB=120$ m; esto nos permite investigar profundidades de acuíferos someros o la composición geológica del suelo con fines de caracterización. Cuenta con la opción de cambiar la polaridad del voltaje de salida para eliminar tanto las corrientes telúricas como la magnetización de electrodos. En caso de que la alimentación de las pilas falle, se cuenta con la posibilidad de conectar un generador externo que incluso puede aumentar el voltaje de salida.

Otras ventajas que ofrece este equipo son: su diseño sencillo; su fácil mantenimiento; sus piezas son baratas y se encuentran en el comercio sin dificultad; consumo de potencia mínimo, lo que significa una mayor vida útil de las baterías; pueden eliminarse las fuentes de ruido y se tiene la posibilidad de emplear multímetros comerciales para la lectura de la corriente inyectada y el potencial inducido.

Justificación.

Una de las razones más importantes para contar con un equipo con el que se pueda calcular la resistividad aparente en terrenos aluviales, es el menor costo que representa el uso del mismo en comparación con la perforación de pozos de prueba.

Al estudiar la resistividad del subsuelo mediante métodos eléctricos es posible inferir la dirección del fracturamiento y si existe interconexión entre los poros del mismo, lo que permite conocer mediante estudios más específicos, las áreas donde los acuíferos se recargan. Con esta información, el agua subterránea puede utilizarse de forma sustentable.

En la ciudad de Oaxaca existe una carencia de empresas encargadas de realizar estudios geoeléctricos; el CIIDIR unidad Oaxaca cuenta con un departamento de estudios geofísicos e hidrogeológicos para la exploración de aguas subterráneas, los cuales se realizan con equipos comprados en el extranjero y que no son fáciles de reparar una vez que se dañan.

Tal situación hace necesario contar con un equipo que obtenga los parámetros necesarios para calcular la resistividad sobre terrenos aluviales, y cuyas características principales sean: confiable, económico; que pueda repararse fácilmente y que sus componentes se encuentren disponibles en el mercado nacional.

Objetivo general.

Diseñar, construir y comparar un equipo para mediciones geoelectricas que permita obtener valores de corriente y potencial en corriente directa, para poder calcular la resistividad del subsuelo a una distancia $AB=120$ m, utilizando arreglos de 4 electrodos ya establecidos.

Objetivos específicos.

- ❖ Realizar el diseño conceptual del equipo tomando como referencia los valores de potencial inducido, potencial natural y corriente obtenidos en otros estudios desarrollados en un terreno aluvial cercano a la laguna de lixiviados en Zaachila, Oaxaca.
- ❖ Construir un prototipo una vez terminado el diseño conceptual.
- ❖ Realizar sondeos lineales tipo Schlumberger con el resistivímetro diseñado y con uno comercial en diferentes lugares, para comparar las gráficas de resistividad aparente vs distancia $AB/2$.
- ❖ Calcular la desviación estándar que presenta el resistivímetro diseñado, para establecer la validez de las mediciones.

Variables.

INDEPENDIENTES: Potencial inducido, Potencial natural, Corriente inyectada.

DEPENDIENTE: Resistividad.

Hipótesis.

H1= Mediante las mediciones de potencial natural, potencial inducido y corriente del subsuelo que se obtengan con el resistivímetro diseñado, se podrán obtener curvas de resistividad vs profundidad hasta una distancia $AB =120$ m en diferentes zonas aluviales, y serán comparables a las curvas obtenidas con un equipo comercial.

CAPÍTULO I.

FUNDAMENTOS ELECTRÓNICOS DEL DISEÑO DEL EQUIPO PARA PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA.

I.1 Introducción.

Actualmente existen diferentes empresas extranjeras que desarrollan equipos para la medición de la resistividad de las estructuras geológicas, existiendo 3 tipos principales:

1) El primer tipo se refiere a aquellos equipos que sólo proporcionan los valores de potencial y corriente, por lo que la resistividad la calcula el usuario a partir de las distancias entre los electrodos utilizados. Como ejemplos de esta categoría se encuentran el resistímetro modelo 16gl de la empresa GISCO (<http://www.giscogeo.com>) y el SYSCAL Junior (<http://www.iris-instruments.com>).

2) Un segundo grupo de estos equipos son aquellos que mediante circuitos electrónicos calculan el valor de la resistencia que el equipo obtiene en el punto del sondeo, pero el usuario tiene que calcular el factor geométrico con las distancias entre los electrodos del arreglo utilizado para encontrar la resistividad aparente. Cualquier medidor de resistencia eléctrica corresponde a esta categoría (<http://www.pce-iberica.es>).

3) Los equipos más avanzados calculan la resistividad aparente en Ω -m directamente, una vez que el usuario ha introducido los datos del arreglo utilizado, algunos ejemplos de ellos son: el Terrameter SAS-1000 de la empresa ABEM, el Mini Sting de la empresa AGI y el SYSCAL Pro de la empresa SYSCAL. Existiendo equipos multicanales con los cuales se pueden obtener imágenes en dos o 3 dimensiones. Ejemplos de aplicación de este método los presentan: *Dahlin (2000); Buseli & Kanglin (2001); Hennig, Weller & Canh (2005); Bauer, Supper, Zimmerman & Kinzelbach (2006); Cassiani, Vittorio, Alberto, Nicoletta & Andrew (2006);*

Independientemente de los parámetros que midan los equipos, Milsom (1996) comenta que todos los equipos que miden la resistividad cuentan con los siguientes elementos:

- ❖ Un generador o transmisor encargado de controlar y medir la corriente directa en los sondeos.
- ❖ Un receptor con el cual se mide la diferencia de potencial existente en dos puntos del terreno, una vez que se ha inyectado la corriente con el transmisor. Los equipos modernos concentran el transmisor y el receptor en un solo módulo.
- ❖ Cables cuyo grosor está determinado por la necesidad de obtener baja resistencia.
- ❖ Electrodo metálicos, los cuales se introducen en el suelo para dirigir la corriente eléctrica dentro del mismo.

El bloque más importante del equipo es el transmisor debido a que de él depende la corriente que se inyecta al terreno y el potencial inducido. El transmisor puede proporcionar en sus terminales de salida un voltaje o una corriente establecida que a su vez pueden ser de tipo directo (CD) o de tipo alterno (CA). Ruiz (1993).

Los equipos que entregan un voltaje en sus terminales de salida tienen la característica de que la corriente medida varía en función del terreno abarcado, y en ocasiones se obtienen lecturas muy pequeñas que pueden ser ocasionadas por grandes resistencias de contacto entre el suelo y los electrodos o por que el terreno es muy resistivo; las condiciones se mejoran si al área del terreno donde están los electrodos se agrega agua con NaCl y se entierran los electrodos hasta alcanzar el suelo firme.

Si el equipo entrega una corriente constante, en sus bornes de salida se obtiene una corriente legible mientras las propiedades del terreno, la distancia abarcada del mismo y la resistencia de contacto lo permitan, ya que pueden entregar una corriente constante sólo hasta ciertos límites.

En este capítulo, se estudia la teoría que fundamenta los componentes que integran cada bloque del transmisor, tomando en cuenta el diagrama mostrado en la Figura 1. La fuente de alimentación está integrada por pilas de 12 VCD cuyo nivel de voltaje debe ser monitoreado por un circuito indicador de carga. El

voltaje de las pilas se eleva hasta 120 VCA para después ser rectificado y filtrado para eliminar el rizado; se cuenta con un circuito compensador de potencial y un circuito inversor de polaridad. Al final del capítulo se explica cómo afecta la impedancia de entrada del receptor a la lectura del potencial.

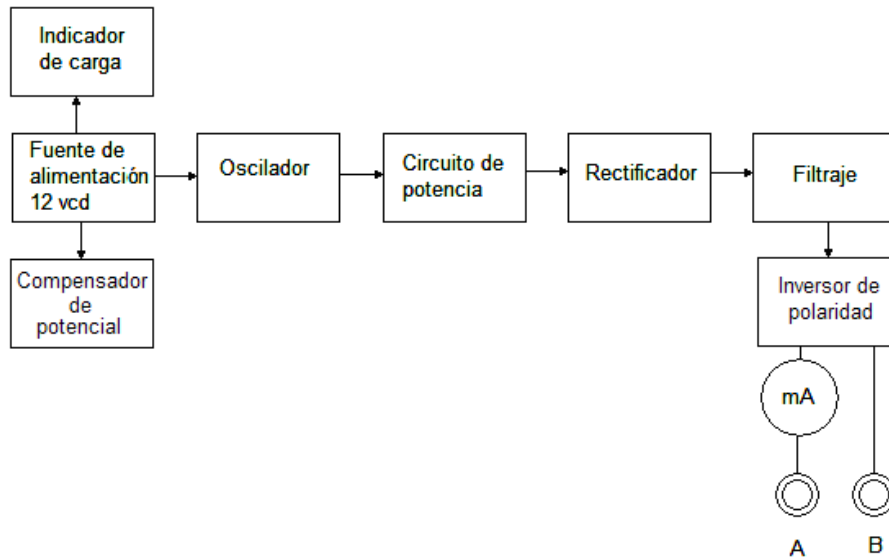


Figura 1. Bloques que integran el transmisor de C.D.

I.2 La fuente de alimentación.

Según Hayt (1988) en electricidad se entiende por fuente al elemento activo que es capaz de generar una diferencia de potencial (d.d.p.) entre sus terminales o proporcionar una corriente eléctrica.

Las fuentes ideales son elementos utilizados en la teoría de circuitos para el análisis y la creación de modelos que permiten analizar el comportamiento de componentes electrónicos o circuitos reales. Pueden ser independientes, si sus magnitudes (tensión o corriente) son siempre constantes, o dependientes en el caso de que dependan de otra magnitud (tensión o corriente). En este punto por su importancia sólo se tratarán las fuentes independientes. Sus símbolos pueden observarse en la Figura 2.

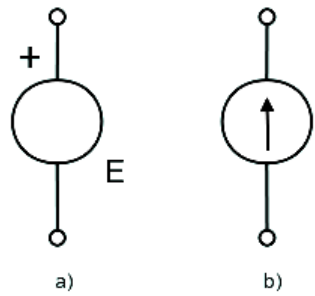


Figura 2. Símbolos de las fuentes ideales de tensión a), e intensidad b).

El signo + en la fuente de tensión, indica el polo positivo o ánodo, siendo el extremo opuesto el cátodo y **E** el valor de su fuerza electromotriz (f.e.m.). En la fuente de intensidad, la dirección de la flecha indica la dirección de la corriente eléctrica e **I** su valor. A continuación se dan sus definiciones:

❖ **Fuente de tensión ideal:** aquella que genera una diferencia de potencial (d.d.p.) entre sus terminales constante e independiente de la carga de entrada. Si la resistencia de carga es infinita se dirá que la fuente está en circuito abierto, y si fuese cero estaríamos en un caso absurdo, ya que según su definición una fuente de tensión ideal no puede estar en cortocircuito.

❖ **Fuente de intensidad ideal:** aquella que proporciona una intensidad de corriente en forma constante y es independiente de la carga de entrada. Si la resistencia de carga es cero se dirá que la fuente está en cortocircuito, y si fuese infinita estaríamos en un caso absurdo, ya que según su definición una fuente de intensidad ideal no puede estar en circuito abierto.

A diferencia de las fuentes ideales, la diferencia de potencial que producen o la corriente que proporcionan fuentes reales, depende de la carga a la que estén conectadas.

1.2.1 Fuentes de voltaje o tensión.

Una fuente de tensión real se puede considerar como una fuente de tensión ideal, E_s en serie con una resistencia R_s , a la que se denomina resistencia interna de la fuente. Esto se observa en la Figura 3.

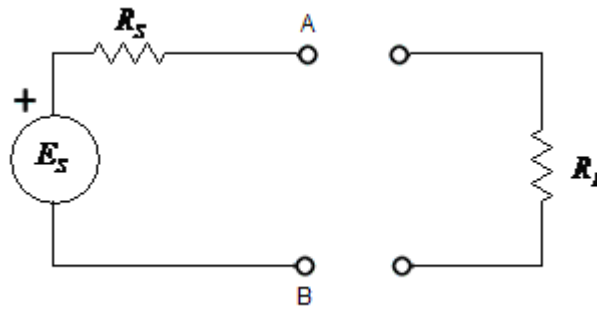


Figura 3. Símbolo de las fuentes reales de tensión.

En circuito abierto, la tensión entre los bornes A y B (V_{AB}) es igual a E_S , ($V_{AB} = E_S$) pero si entre los mencionados bornes se conecta una carga R_L , la tensión pasa a ser:

$$V_{AB} = E_S \cdot \frac{R_L}{R_L + R_S}, \quad (1.1)$$

Que como puede observarse depende de la carga conectada. En la práctica, las cargas deberán ser mucho mayores que la resistencia interna de la fuente (al menos diez veces) para conseguir que el valor en sus bornes no difiera mucho del valor en circuito abierto.

Cuando dos o más fuentes ideales de tensión, se conectan en serie, la fem resultante es igual a la suma algebraica de las fems de cada una de las fuentes. Cuando la conexión se realiza en paralelo, las fems de las fuentes han de ser iguales.

La potencia se determina multiplicando su f.e.m. por la corriente que proporciona. Se considera positiva si la corriente sale por el ánodo y negativa en caso contrario.

Como ejemplos de fuentes de tensión real podemos enumerar los siguientes:

- ❖ Batería.
- ❖ Pila.
- ❖ Fuente de alimentación.

- ❖ Célula fotoeléctrica.
- ❖ Generador impulsado por medios mecánicos.

Las celdas o pilas secas, las pilas húmedas y los generadores son capaces de mantener un flujo constante. Una batería consiste básicamente, de dos o más pilas interconectadas ya sea en configuración serie, paralelo o una combinación de ambas.

Las pilas secas, las pilas húmedas y los generadores suministran energía que permite que las cargas se desplacen. En las pilas secas y en las húmedas la energía que se desprende de una reacción química que se lleva a cabo dentro de la pila, se transforma en energía eléctrica. Los generadores por su parte convierten energía mecánica en energía eléctrica.

La energía potencial eléctrica, sea cual sea el método empleado en su producción, está disponible en las terminales de la pila o generador. El voltaje proporciona la “presión eléctrica” necesaria para desplazar los electrones entre las terminales de un circuito. (Valkenburgh, 1994)

1.2.2 Fuentes de Corriente.

De modo similar al anterior, una fuente de corriente real, la cual se muestra en la Figura 4, se puede considerar como una fuente de intensidad ideal I_S , en paralelo con una resistencia R_S , a la que se denomina resistencia interna de la fuente.

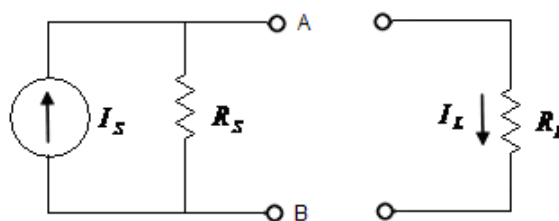


Figura 4. Símbolo de las fuentes reales de corriente.

En cortocircuito, la corriente que proporciona es igual a I_S , pero si se conecta una carga R_L , la corriente proporcionada a la misma, I_L , pasa a ser:

$$I_L = I_S \cdot \frac{R_S}{R_L + R_S}, \quad (1.2)$$

Como puede observarse depende de la carga conectada. En la práctica, las cargas deberán ser mucho menores que la resistencia interna de la fuente (al menos diez veces) para conseguir que la corriente suministrada no difiera considerablemente del valor en cortocircuito. Cuando dos o más fuentes ideales de intensidad se conectan en paralelo, la corriente resultante es igual a la suma algebraica de las corrientes de cada una de las fuentes. Cuando la conexión se realiza en serie, las corrientes de las fuentes han de ser iguales.

Al contrario de la fuente de tensión real, la de intensidad se utiliza como modelo matemático equivalente a determinados componentes o circuitos.

La potencia se determina multiplicando su intensidad por la diferencia de potencial en sus bornes. Se considera positiva, si el punto de mayor potencial está en el terminal de salida de la corriente y negativa en caso contrario.

I.3 Indicador de carga de las baterías.

Es un circuito electrónico capaz de monitorear constantemente el nivel del voltaje DC que lo alimenta, y de hacer destellar o apagar un led normal o de alto rendimiento si el voltaje está por debajo de un nivel previamente ajustado.

Como es sabido, en el mercado se comercializan baterías de procedencia asiática y de dudosa calidad, las cuales pueden agotarse rápidamente en poco tiempo y en el momento menos oportuno. De no contar con un circuito electrónico que funcione como indicador de bajo voltaje, sería complicado destapar el instrumento a cada momento para medir el voltaje de la batería.

El circuito más sencillo para este fin, consta de 1 diodo led conectado a un diodo zener con limitación de corriente mediante una resistencia de carbón, este circuito se observa en la Figura 5.

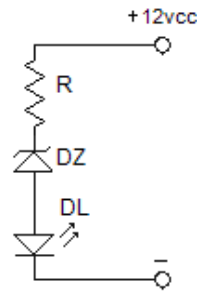


Figura 5. Circuito indicador de carga de las baterías.

El voltaje de alimentación del circuito depende del valor de la fuente de alimentación del equipo a monitorear.

La corriente que limita el diseño del circuito está sustentada en la corriente máxima que soportan los diodos led que se utilicen. En forma práctica, se considera una corriente promedio de 30 mA. Con este dato, se calcula la resistencia que se conecta en serie para limitar la corriente de los diodos, por medio de la ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I}, \quad (1.3)$$

Donde:

R = Valor en Ohms de la resistencia limitadora de corriente,

V = valor del voltaje de alimentación,

I = Corriente del diodo led.

En cuanto a la potencia de disipación de la resistencia se tiene que:

$$P = \frac{V^2}{R}, \quad (1.4)$$

Donde:

P = Potencia de disipación en Watts,

V = Voltaje de alimentación,

R = Valor en Ohms.

I.4 El oscilador.

Un oscilador es un circuito que es capaz de convertir la corriente continua en una corriente que varía de forma periódica en el tiempo; estas oscilaciones pueden ser senoidales, cuadradas, triangulares, etc., dependiendo de la forma que tenga la onda producida. Un oscilador de onda cuadrada suele denominarse multivibrador.

En un oscilador electrónico lo que se pretende es obtener un sistema de oscilación que sea estable y periódico, manteniendo una frecuencia y una forma de onda constante. Para ello se aprovecha el proceso de oscilación que poseen los circuitos compuestos por elementos capacitivos o inductivos.

Estos elementos tienen la capacidad de almacenar carga eléctrica en su interior (cargarse eléctricamente), y descargarse cuando la carga que los alimentaba ha desaparecido. El circuito integrado oscilador más usado es el 555, el cual se muestra en la Figura 6.

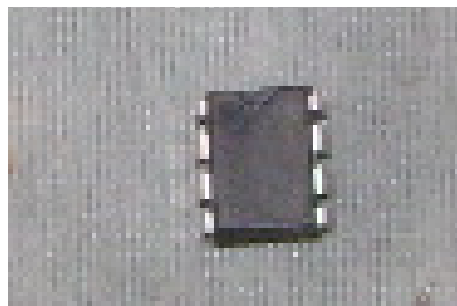


Figura 6. NE555 de Signetics en un dual in line package.

El temporizador 555 fue introducido en el mercado en el año 1972 por Signetics Corp. con el nombre: SE555/NE555 y fue llamado "The IC Time Machine" (*El Circuito Integrado Máquina del Tiempo*). Entre sus aplicaciones principales se encuentran las de multivibrador astable y monoestable, detector de impulsos, etc. Está compuesto internamente por 23 transistores, 2 diodos, y 16 resistores encapsulados en silicio.

I.4.1 Descripción de los pines del Temporizador 555.

La Figura 7 muestra las terminales de este elemento.

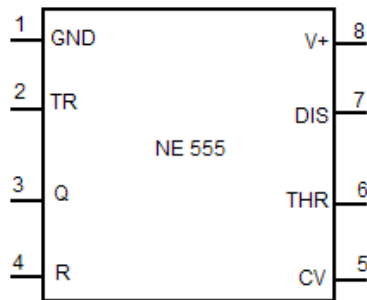


Figura 7. Terminales del temporizador 555.

A continuación se describen cada una de ellas.

1.-GND (normalmente la 1): Es el polo negativo de la alimentación, generalmente tierra.

2.-Disparo (normalmente la 2): Es en esta terminal, donde se establece el inicio del tiempo de retardo. Este pulso debe ser de corta duración, pues si se mantiene bajo por mucho tiempo la salida se quedará en alto hasta que la entrada de disparo pase a alto otra vez.

3.-Salida (normalmente la 3): Aquí veremos el resultado de la operación del temporizador, ya sea que esté conectado como monostable, astable u otro. Cuando la salida es alta, el voltaje será el voltaje de alimentación menos 1.7 Voltios. Esta salida se puede obligar a estar en casi 0 voltios con la ayuda de la terminal de reset (normalmente la 4).

4.-Reset (normalmente la 4): Si se pone a un nivel por debajo de 0.7 Voltios, pone la terminal de salida a nivel bajo. Si por algún motivo esta terminal no se utiliza hay que conectarla a Vcc para evitar que el 555 se apague.

5.-Control de voltaje (normalmente la 5): Cuando el temporizador se utiliza en el modo de controlador de voltaje, el voltaje en esta terminal puede variar casi desde Vcc (en la práctica como Vcc -1 V) hasta casi 0 V. Así es posible modificar los tiempos en que la salida está en alto o en bajo independiente del diseño (establecido por las resistencias y condensadores conectados externamente al 555).

El voltaje aplicado a la terminal de control de voltaje puede variar entre un 45 y un 90 % de V_{cc} en la configuración monostable. Cuando se utiliza la configuración astable, el voltaje puede variar desde 1.7 voltios hasta V_{cc} . Si esta patilla no se utiliza, se recomienda ponerle un condensador de $0.01\mu F$ para evitar las interferencias.

6.-Umbral (normalmente la 6): Es una entrada a un comparador interno que tiene el 555 y se utiliza para poner la salida a nivel bajo.

7.-Descarga (normalmente la 7): Utilizado para descargar con efectividad el condensador externo usado por el temporizador para su funcionamiento.

8.-V+ (normalmente la 8): También llamado V_{cc} , alimentación, es el pin donde se conecta el voltaje de alimentación que va de 4.5 voltios hasta 16 voltios (máximo).

I.4.2 Funcionamiento del Circuito Integrado 555 como multivibrador.

De acuerdo con Vallejo (2003) el temporizador 555 se puede conectar para que funcione de diferentes maneras, entre las más importantes se encuentran: como multivibrador astable y como multivibrador monoestable.

Los circuitos electrónicos y las formas de onda mostrados en lo que resta de este capítulo, se han construido y probado mediante el simulador de circuitos Electronics Workbench © 1996.

A continuación se explican cada una de las dos formas de conectar el C.I. temporizador. Los valores que aparecen en cada uno de los elementos del circuito son arbitrarios y fueron seleccionados con el propósito de mostrar con mayor claridad las gráficas.

I.4.3 Multivibrador astable.

Un multivibrador astable es un oscilador de relajación; su frecuencia de salida depende de la carga y descarga de condensadores. Estas cargas y descargas

son provocadas por la conmutación de transistores internos en el circuito integrado. Este circuito es capaz de generar por sí solo una señal cuadrada a su salida.

En la Figura 8, se muestra el circuito.

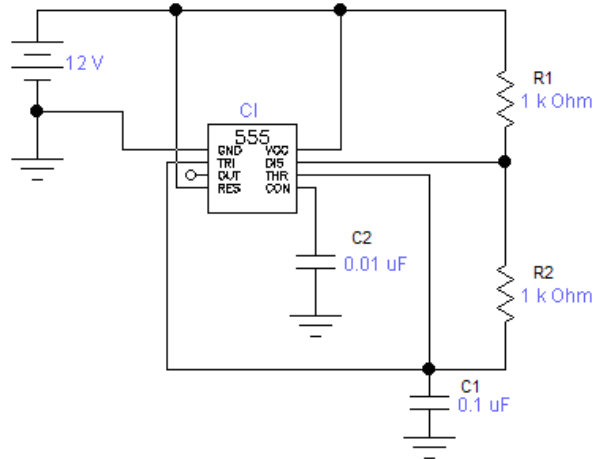


Figura 8. Esquema de la aplicación de un multivibrador astable 555.

Este tipo de funcionamiento, se caracteriza por una salida con forma de onda cuadrada (o rectangular) continua de ancho predefinido por el diseñador del circuito. La señal de salida tiene un nivel alto por un tiempo t_1 y un nivel bajo durante un tiempo t_2 . Los tiempos de duración dependen de los valores de R_1 y R_2 , como se muestra a continuación:

$$t_1 = \ln(2) * (R_1 + R_2) * C_1,$$

$$t_1 = 0.693 * (R_1 + R_2) * C_1, \quad (1.5)$$

$$t_2 = \ln(2) * R_2 * C_1,$$

$$t_2 = 0.693 * R_2 * C_1. \quad (1.6)$$

La frecuencia con que la señal de salida oscila está dada por la siguiente fórmula:

$$f = \frac{1}{0.693 * C_1 * (R_1 + 2 * R_2)} ; \quad (1.7)$$

y el período es simplemente

$$T = \frac{1}{f}. \quad (1.8)$$

I.4.4 Multivibrador monoestable.

El multivibrador monoestable es aquel en el que su salida permanece en un estado determinado mientras no se le aplique una señal exterior que le haga cambiar al estado contrario para, posteriormente, regresar de nuevo al de reposo, y permanecer en él hasta la presencia de un nuevo impulso de excitación. El esquema de conexión es el que se muestra en el circuito de la Figura 9.

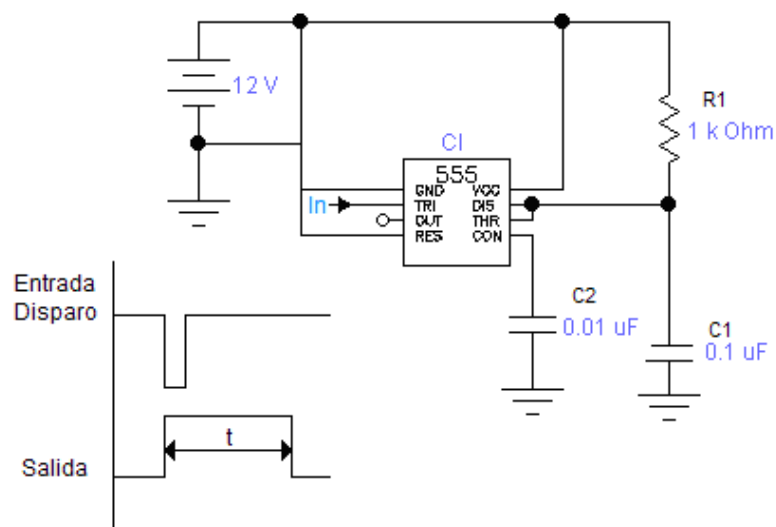


Figura 9. Esquema de la aplicación de un multivibrador monoestable 555.

En este caso, el circuito entrega a su salida únicamente un pulso de un ancho establecido por el diseñador. La fórmula para calcular el tiempo de duración en el que la salida está en nivel alto es

$$T = 1.1 * R_1 * C_1. \quad (1.9).$$

Es necesario que la señal de disparo de la terminal 2 del C.I. sea de nivel bajo y de muy corta duración para iniciar la señal de salida.

I.4.5 Ciclo de trabajo del oscilador.

Es la anchura de un pulso dividida entre el periodo del pulso. Se multiplica por 100 para obtener la respuesta como un porcentaje. En otras palabras, es el porcentaje del ciclo completo de tiempo en que el tren de pulsos se mantiene en estado de encendido, de acuerdo a la fórmula

$$\text{Ciclo de trabajo} = \frac{W}{T} * 100, \quad (1.10)$$

donde

T = periodo,

W = ancho del pulso.

La Figura 10 ejemplifica un tren de pulsos que se suceden con un ciclo de trabajo del 66%; que para algunas aplicaciones esta característica es deseable; por ejemplo, cuando es necesario modular el ancho del pulso.

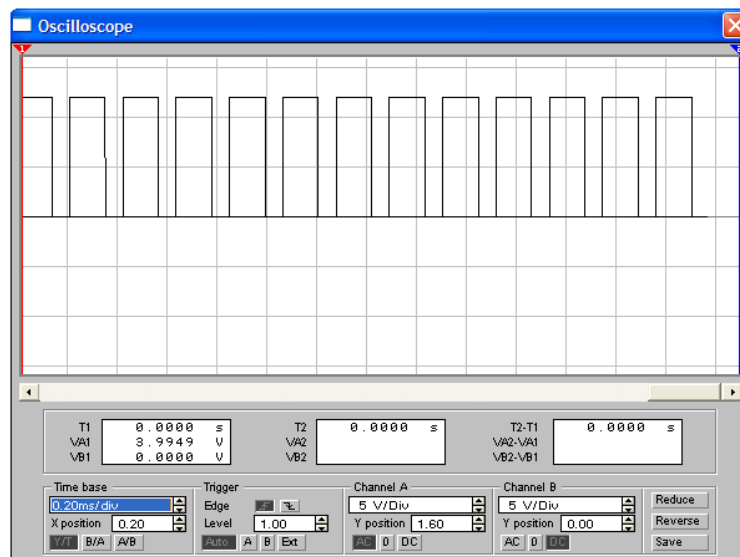


Figura 10. Onda cuadrada con ciclo de trabajo del 66 %.

Observe que la parte del pulso en estado alto es 2/3 mayor que la duración del pulso en estado bajo. El circuito que se muestra en la Figura 11 es una modificación del multivibrador astable, al cual se le ha añadido un diodo rectificador

entre terminales 2 y 7 del C.I., logrando con esto un ciclo de trabajo del 50% (Maloney, 1997).

Esta característica es necesaria para lograr que la señal que alimenta al elevador de voltaje en el inversor, tenga hemiciclos de salida con la misma duración.

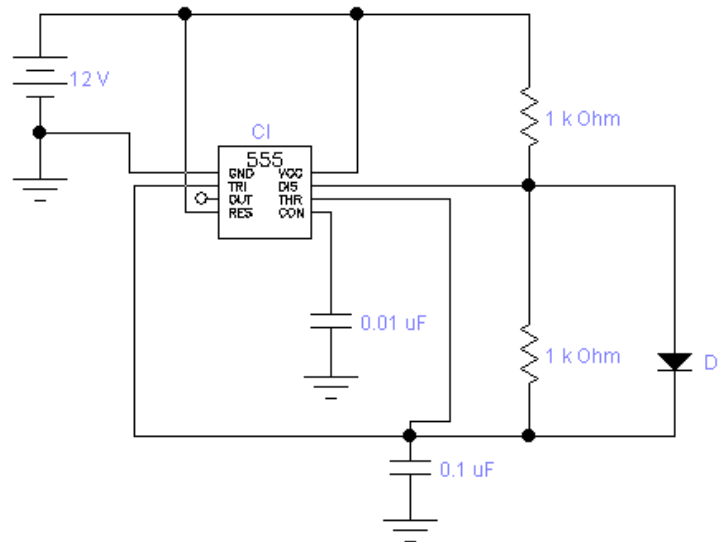


Figura 11. Circuito oscilador astable con ciclo de trabajo del 50%.

La Figura 12 ilustra el tren de pulsos con un ciclo de trabajo del 50% que se producen en el circuito anterior.

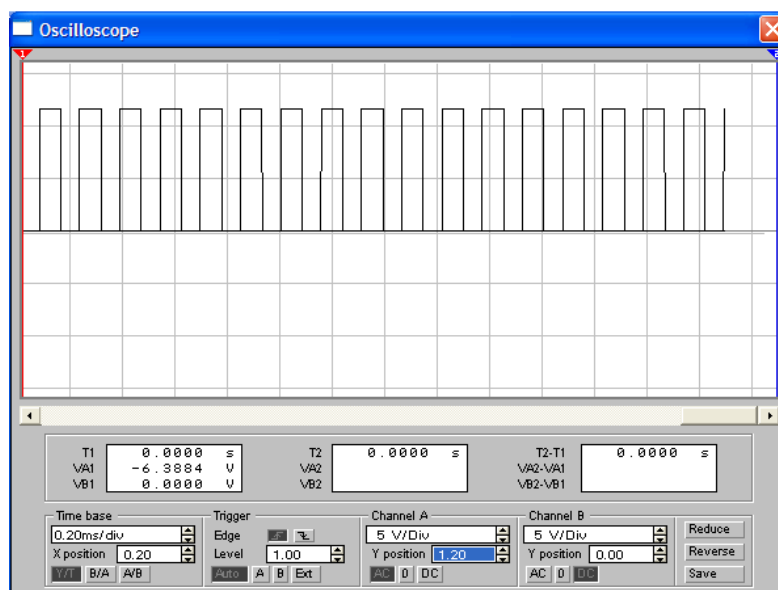


Figura 12. Onda cuadrada con ciclo de trabajo del 50%.

I.5 Circuito inversor.

Un inversor, también llamado ondulator, es un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador. Los inversores son utilizados en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para manejar alta potencia. Los inversores también son utilizados para convertir la corriente continua generada por los paneles solares fotovoltaicos (Haeberlin & Graf, 1998; Ezekoye & Ugha, 2007), o por medio de acumuladores o baterías, en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas.

Existen también los convertidores de potencia que tienen amplias aplicaciones debido a las necesidades crecientes de los sistemas eléctricos de potencia en algunos países, los trabajos de Alepuz (2004), Angulo (2004) y Arteaga (2006) explican a profundidad temas relacionados con los mismos.

Los inversores se pueden clasificar en forma general en dos tipos:

- 1) inversores monofásicos si se alimentan de una fase de voltaje.
- 2) Inversores trifásicos, si son planeados para sistemas de tres fases.

Un inversor monofásico simple consta de un oscilador que controla a un transistor mediante un circuito lógico, el cual es utilizado para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada. Esta onda cuadrada alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario. Vernavá (2005)

Los inversores más modernos han comenzado a utilizar formas más avanzadas de transistores o dispositivos similares, como los tiristores, los triac's o transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), los cuales son utilizados en inversores de alta potencia.

Los inversores más eficientes utilizan varios artificios electrónicos para tratar de llegar a una onda que simule razonablemente a una onda senoidal en la entrada del transformador, en vez de depender de éste para suavizar la onda (Ezekoye & Ugha, 2007). La Figura 13 muestra el diagrama a bloques de un circuito inversor monofásico.

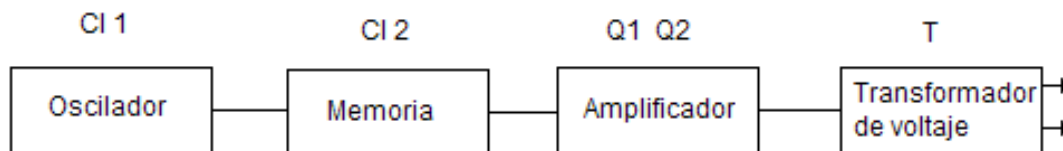


Figura 13. Diagrama de bloques del circuito inversor. Fuente: Ezekoye & Ugha (2007).

En la Figura 14 se muestra el circuito inversor donde cada bloque del diagrama anterior se ha implementado. A continuación se explica brevemente la función de cada parte del diagrama:

- I. El bloque oscilador es el encargado de generar un tren de pulsos, y está compuesto por C.I.1, C1, C2, R1, R2, y D1.
- II. El bloque de memoria lo constituye el C.I.2, el cual recibe el tren de pulsos generado en el bloque anterior y permite obtener dos pulsos de salida que se alternan para alimentar el siguiente bloque.
- III. El amplificador está conformado por un par de transistores denominados Q1 y Q2 conectados para trabajar como switch en forma alternada, el C.I.2 no permite en algún momento que los dos transistores funcionen al mismo tiempo.
- IV. Los pulsos obtenidos en el amplificador, se acoplan al transformador elevador T1 que integra el siguiente bloque, el cual se encarga de elevar los pulsos de tensión de bajo nivel a un nivel mayor. Es necesario que el transformador cuente con derivación central en el primario.

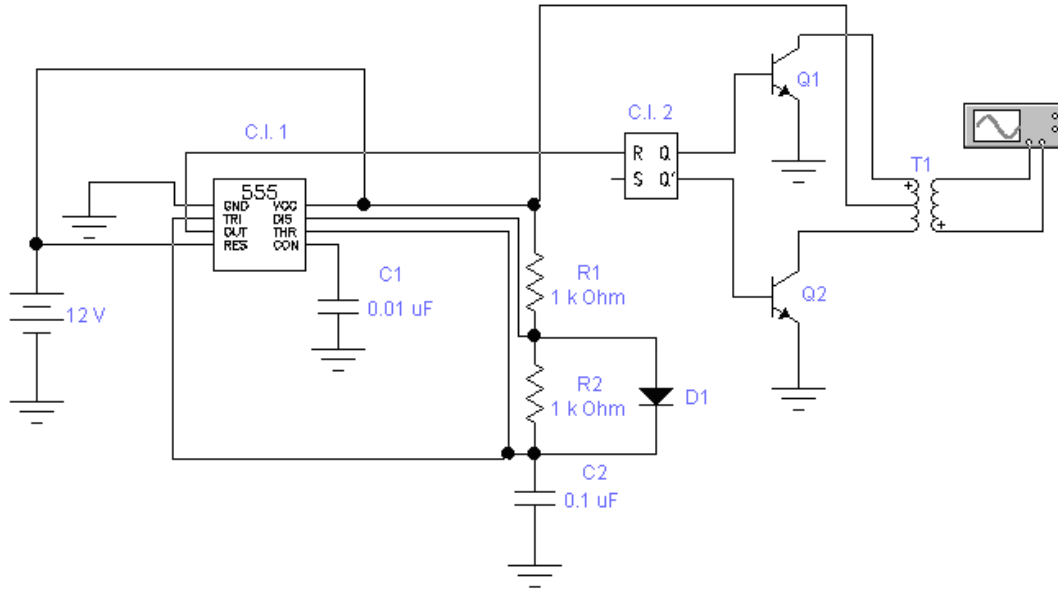


Figura 14. Diagrama electrónico del circuito inversor completo.

En la Figura 15, se muestra la forma de onda de la tensión que se obtiene en la salida del transformador, la cual es una onda cuadrada con 2 semiperiodos de polaridad diferente y con un ciclo de trabajo del 50%.

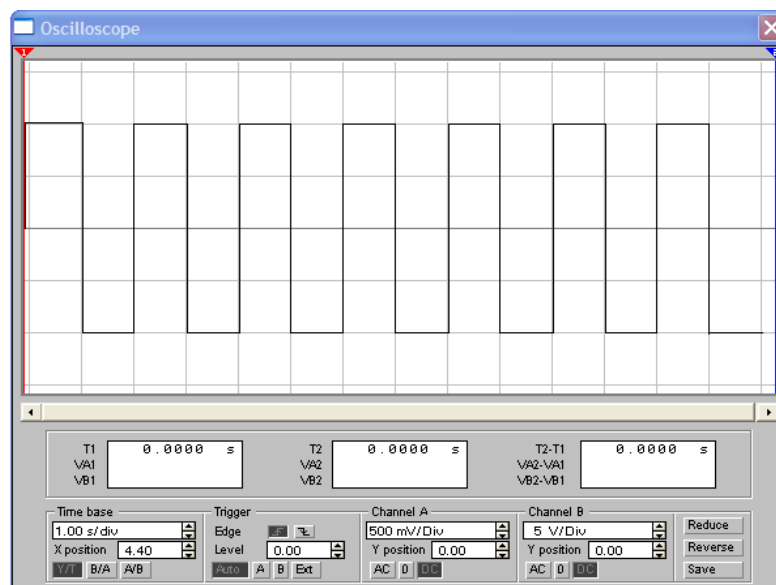


Figura 15. Forma de onda a la salida del transformador.

I.6 Rectificador de voltaje.

Según Malvino (1994) un rectificador es el elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua. Esto se realiza utilizando diodos rectificadores de estado sólido, que tienen la propiedad de conducir la energía eléctrica en un solo sentido. La función de este circuito es eliminar uno de los dos semiperiodos de una señal alterna senoidal, proveniente del secundario de un transformador.

Dependiendo de las características de la alimentación en corriente alterna que emplean, se les clasifica en monofásicos, cuando están alimentados por una fase de la red eléctrica, o trifásicos cuando se alimentan por tres fases.

Atendiendo al tipo de rectificación, pueden ser de media onda, cuando solo se utiliza uno de los semiciclos de la corriente, o de onda completa, donde ambos semiciclos son aprovechados. A continuación se muestran los circuitos y la forma de onda esperada en la salida de los mismos para cada circuito.

I.6.1 Rectificador de media onda.

Este rectificador utiliza para su funcionamiento sólo un diodo conectado en un extremo de la fuente alterna de alimentación, la cual es asociada generalmente a un transformador ya sea utilizado como reductor o como amplificador. El extremo izquierdo A del diodo en la Figura 16 es el ánodo o terminal positiva y el extremo derecho B del diodo es el cátodo o terminal negativa.

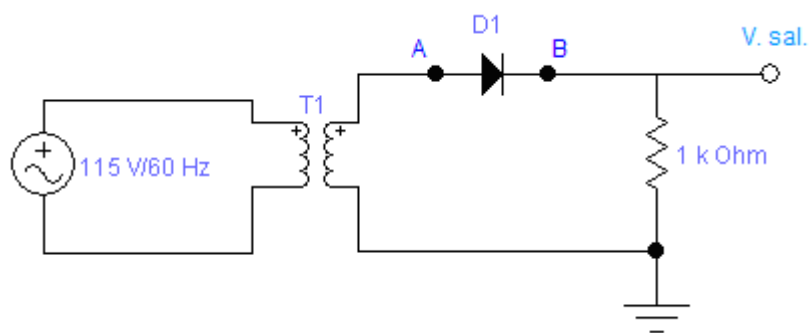


Figura 16. Circuito rectificador de media onda.

La resistencia de 1 k Ω en los extremos representa la carga. El voltaje que entra al diodo es alterno y de forma senoidal cuando se trata de equipos electrónicos que son conectados a la red eléctrica comercial o doméstica. La forma de onda que se encuentra en el ánodo del diodo (punto A de la Figura 16), se muestra en la Figura 17.

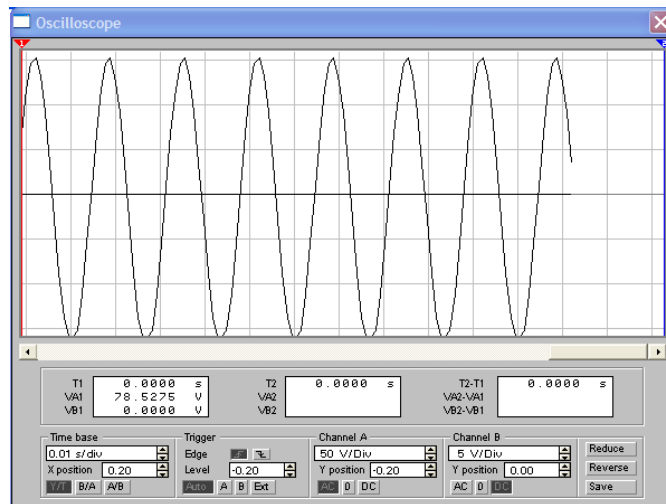


Figura 17. Forma de onda senoidal que se inyecta al ánodo del diodo.

En la Figura 18 se presenta la forma de onda del voltaje que sale por el cátodo del diodo (punto B de la figura 16), observándose que los ciclos negativos han sido anulados debido a la forma en que se conectó el diodo. Se trata de un voltaje pulsante de polaridad positiva.

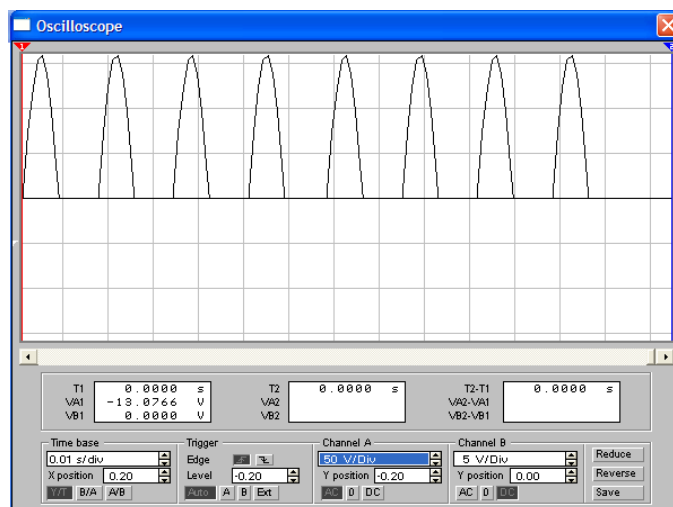


Figura 18. Forma de onda del voltaje a la salida del diodo.

En aplicaciones donde se requieran voltajes de polaridad negativa la posición del diodo se invierte. Este rectificador no es muy eficiente debido a que durante la mitad de cada ciclo la entrada de voltaje se bloquea completamente, perdiendo así la mitad de la tensión de alimentación.

Las consideraciones para el diseño de este de circuito son:

1) El voltaje pico máximo inverso P_{RV} del diodo debe ser mayor al voltaje pico V_p del transformador que alimenta al diodo para evitar que se dañe; lo que significa:

$$P_{RV} > V_p ; \quad (1.13)$$

Si la onda es senoidal:
$$V_p = \frac{V_{rms}}{\sqrt{2}} . \quad (1.14)$$

2) La corriente máxima promedio del diodo I_F debe ser mayor que la corriente de la carga I_C .

$$I_F > I_C . \quad (1.15)$$

3) En cuanto al transformador, se debe considerar la relación que existe entre voltajes y corrientes de entrada y salida:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{V_2}{V_1} ; \quad (1.16)$$

conociendo los voltajes primario V_1 , secundario V_2 y la corriente I_2 que demandará la carga, puede despejarse la corriente del primario, que generalmente es la incógnita a calcular.

4) La frecuencia de entrada es equivalente a la frecuencia de salida.

$$f_{sal} = f_{en} . \quad (1.17)$$

I.6.2 Rectificador de onda completa.

En este circuito rectificador es necesario un transformador con derivación central en el arrollamiento secundario la cual es llevada a tierra, debido a esta conexión central, el circuito es equivalente a dos rectificadores de media onda. Este circuito se muestra en la Figura 19.

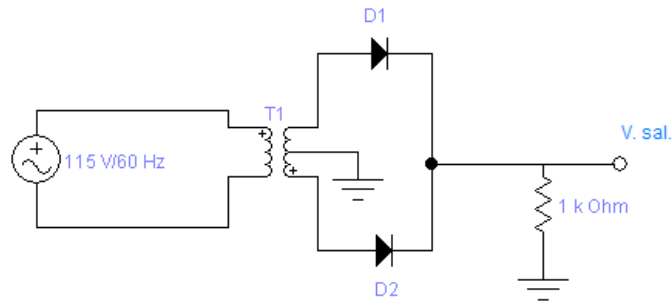


Figura 19. Rectificador de onda completa.

El rectificador superior D_1 funciona con el semiciclo positivo de tensión en el secundario, mientras que el rectificador inferior D_2 funciona con el semiciclo negativo de tensión en el secundario. Es decir D_1 conduce durante el semiciclo positivo y D_2 conduce durante el semiciclo negativo. En forma similar a la configuración del punto anterior, se aplican las fórmulas (1.13) a (1.16) para la selección de los diodos y transformador. Con respecto a la frecuencia obsérvese la Figura 20 donde se muestra la forma de onda del voltaje de salida en la resistencia de carga.

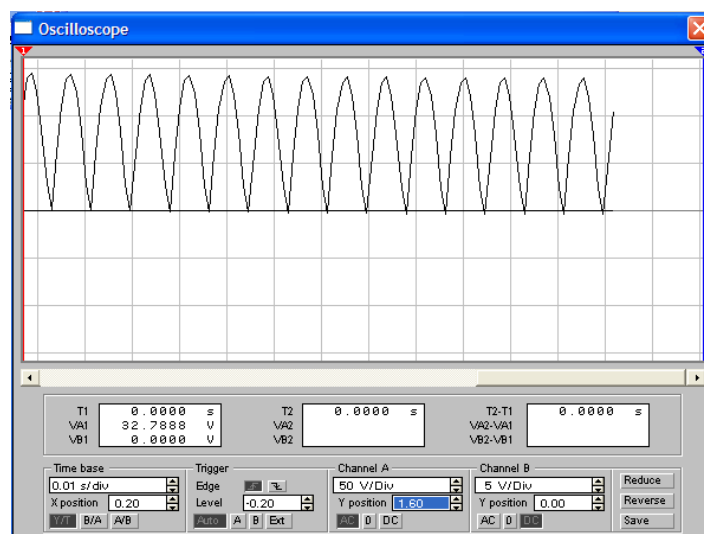


Figura 20. Forma de onda de salida en un rectificador de onda completa.

La frecuencia de la señal de onda completa es el doble de la frecuencia de entrada, la onda rectificada comienza a repetirse después del medio ciclo de la tensión en el primario del transformador, por lo tanto:

$$f_{sal} = 2f_{en} \quad (1.18)$$

I.6.3 Rectificador de onda completa en configuración puente.

La Figura 21 muestra un puente rectificador. Mediante el uso de cuatro diodos en lugar de dos, este diseño elimina la necesidad de la conexión intermedia del secundario del transformador.

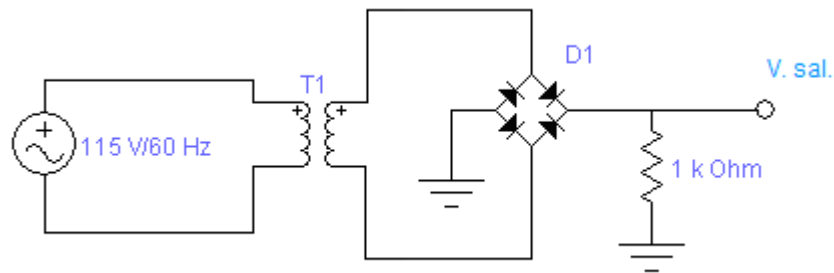


Figura 21. Rectificador de onda completa tipo puente.

Las ventajas que han hecho a este rectificador el más popular son: una salida de onda completa y una tensión de pico ideal igual a la tensión de pico del secundario del transformador. La forma de onda que se obtiene en la carga es igual a la que se muestra en la Figura 20, y para el cálculo de los elementos se aplican las mismas fórmulas que en el punto anterior.

I.7 Filtrado.

Como se puede apreciar en las Figuras 18 y 20 la corriente continua (una sola polaridad) obtenida en la salida de los rectificadores es pulsante, lo que la inutilizaría para la mayoría de las aplicaciones electrónicas, ya que no es la clase de tensión que precisan la mayor parte de los equipos electrónicos. Lo que se necesita es una tensión constante, similar a la que produce una batería. Para

obtener este tipo de tensión rectificada en la carga, es necesario emplear un filtro que elimine el rizado de la señal pulsante rectificada.

Esto se realiza mediante filtros RC (resistencia-capacitancia) o LC (inductancia-capacitancia), o el más común de los filtros conocido como filtro con condensador a la entrada que se muestra en la Figura 22; obteniéndose finalmente a la salida una corriente continua con un rizado que depende del filtro y la carga, de modo que sin carga alguna, no existe rizado. (Malvino, 1994). El tiempo de carga o descarga de un capacitor es:

$$\tau = R * C \tag{1.19}$$

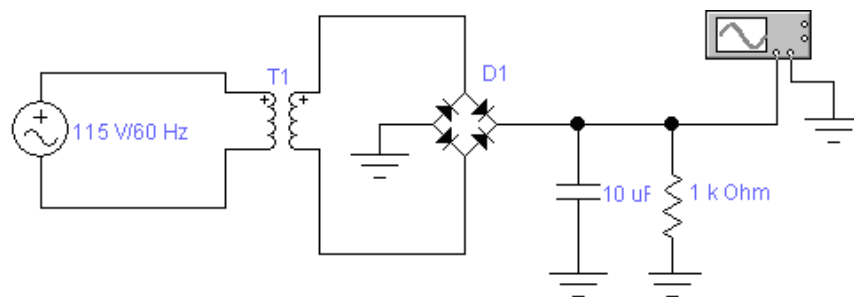


Figura 22. Circuito rectificador de onda completa con filtro a la entrada.

La Figura 23 muestra el rizado del voltaje cuando se utiliza un capacitor de $10 \mu F$. El rizado es grande comparado con el nivel de voltaje de salida, lo que ocasionaría malfuncionamientos en la mayoría de equipos electrónicos.

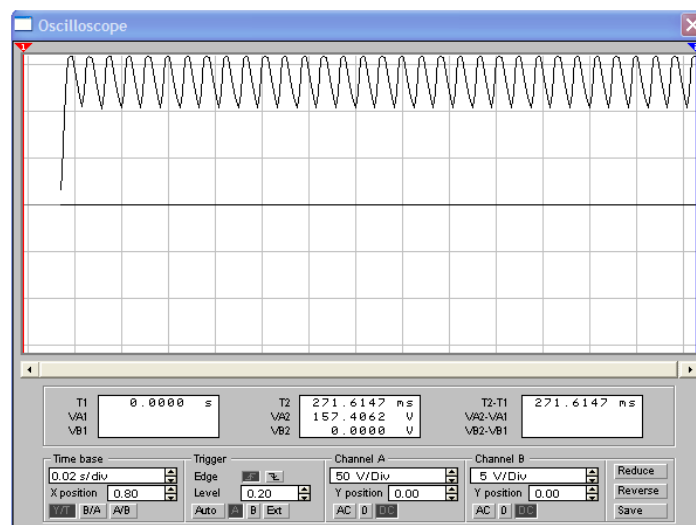


Figura 23. Forma de onda con un capacitor de $10 \mu F$.

La Figura 24 presenta el mismo circuito rectificador de onda completa en el que se ha aumentado a $100 \mu F$ el valor del capacitor.

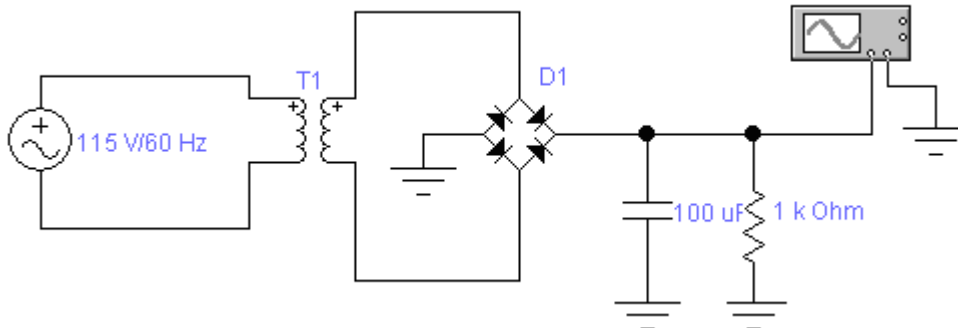


Figura 24. Rectificador de onda completa tipo puente con capacitor de $100 \mu F$.

Con el aumento del valor del filtro, el rizado disminuye. En la Figura 25, se muestra el resultado de este cambio con el osciloscopio virtual del simulador de circuitos Workbench.

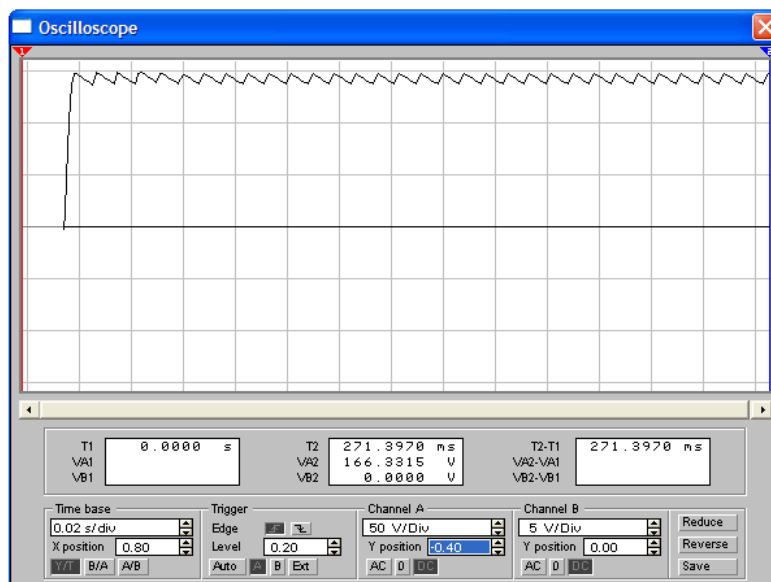


Figura 25. Forma de onda con un capacitor de $100 \mu F$.

Si aumentamos el valor del capacitor a $1000 \mu F$, se observa en la Figura 26 que el rizado se hace casi imperceptible, siendo este comportamiento el resultado

ideal al que se debe llegar cuando se construyen fuentes de voltaje de este tipo. El valor del capacitor en μF depende de la corriente de la carga.

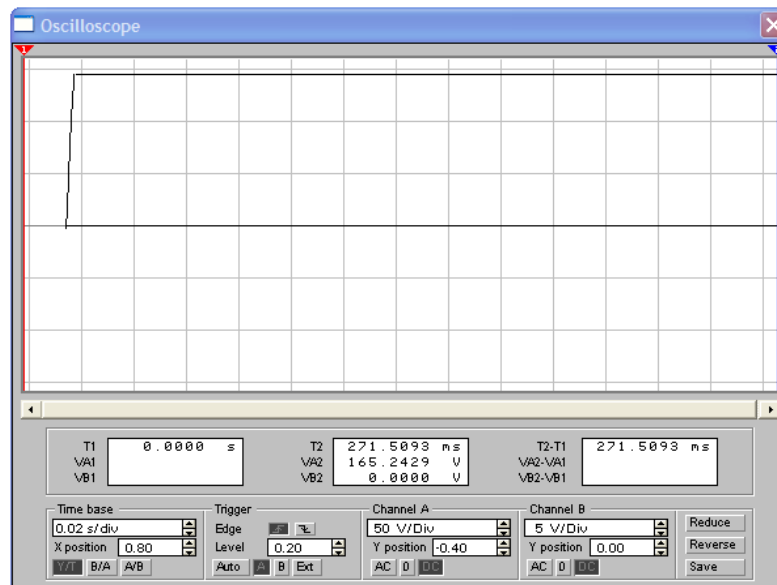


Figura 26. Forma de onda con un capacitor de $1000 \mu F$.

A continuación se muestra la fórmula para calcular el voltaje de rizado en función de elementos del circuito fácilmente medibles:

$$V_R = \frac{I}{f * C}, \quad (1.20)$$

donde:

V_R = Tensión de rizado,

I = Corriente continua en la carga,

f = Frecuencia de salida, si es una fuente de onda completa $f = 120$ Hz,

C = Capacitancia del filtro.

En cuanto al filtro, es importante establecer que su voltaje de trabajo debe ser mayor que el voltaje que entrega la fuente para evitar daños al mismo. El objetivo del capacitor a la entrada es producir una tensión continua, por esta razón se eligen valores que mantengan el rizado menor que el 10% de la tensión de carga (Malvino, 1994).

I.8 Compensador de potencial natural.

Antes de entrar a detalle en la explicación sobre este circuito, es necesario conocer qué son las corrientes telúricas.

I.8.1 Corrientes telúricas.

Según De la Vega (2002) son las corrientes que se propagan a través de la tierra, originadas por fenómenos naturales, o bien por el funcionamiento de ciertos sistemas técnicos creados por el hombre. Dentro de la primera categoría se tienen a las corrientes originadas por campos variables en el tiempo, las causadas por fenómenos naturales meteorológicos transitorios, así como las excitadas de manera natural dentro de la tierra. Debido a las oscilaciones en el tiempo del campo magnético de la tierra, se inducen en su masa corriente parásitas a escala global.

En los límites entre los materiales químicamente diferentes se crean campos eléctricos naturales que originan corrientes telúricas, tanto en la masa de la tierra como en corrientes de agua en la superficie, así como en desembocaduras de un río en el mar al mezclarse agua salada con el agua dulce; incluso las diferencias de temperatura dentro de la masa de la tierra provocan corrientes de calor, las cuales van acompañadas frecuentemente del transporte de electricidad.

Dentro de los sistemas creados por el hombre, en ciertos casos por razones de operación y en otros por circunstancias accidentales, se derivan corrientes eléctricas hacia el suelo, o bien se utilizan como polo eléctrico. Ejemplos de casos de operación son los sistemas de transporte electrificado, tanto en corriente continua como alterna cuando se usa el suelo como conductor de retorno de la corriente eléctrica. Ejemplos del mismo caso dentro de la técnica de las corrientes débiles son la telegrafía, la radioelectricidad y las telecomunicaciones.

En lo que concierne a los casos accidentales se puede mencionar al que se origina debido a un defecto de aislamiento en los medios eléctricos de servicio en

sistemas industriales o en las líneas aéreas de transporte de electricidad, pero también en los no menos importantes sistemas de distribución de energía eléctrica a los diversos usuarios y dentro de sus propias instalaciones.

I.8.2 Importancia de la circulación de corriente en el subsuelo.

La circulación de la corriente eléctrica a través de la tierra es posible debido a su conductividad natural, y su característica eléctrica es la conductividad, que se puede considerar como un índice de la facilidad del transporte de electricidad. Los valores de conductividad que puede alcanzar la tierra en los casos más favorables son aproximadamente cinco millones de veces menor que la de los conductores metálicos. Además la conductividad de la tierra depende de varios factores: la clase de roca, sus propiedades fisicoquímicas y eléctricas, de su contenido de humedad y/o agua, del medio, de la fisiografía, entre otros (Busso y Yermolin, 2007; De La Vega , 2002). En consecuencia, la conductividad de la tierra puede variar entre muy amplios límites, aún tratándose de la misma naturaleza geológica y/o dentro de una zona delimitada de terreno.

El hecho de que la tierra conduzca corriente eléctrica es de suma importancia para los sistemas técnicos que el hombre construye, sin embargo cuando se trata de realizar mediciones de resistividad con equipos que funcionen alimentando el subsuelo con corriente directa, las mediciones de potencial que son necesarias llevar a cabo, se ven influidas por el potencial natural que se crea debido a estas corrientes dentro del suelo; esto ocasiona errores en los cálculos de la resistividad, los cuales deben evitarse.

Cuando en el subsuelo se presenta una corriente eléctrica, se crea una diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera M, N. No importa cuánta distancia de separación haya entre los puntos, ya que siempre se medirá una diferencia de potencial mientras exista una cantidad mínima de suelo que funcione como resistencia entre dichos puntos. La diferencia de potencial se representa en la Figura 27 como una fuente de corriente directa que puede presentar polaridad

positiva o negativa, de acuerdo al sentido de la corriente con respecto a los puntos a medir.

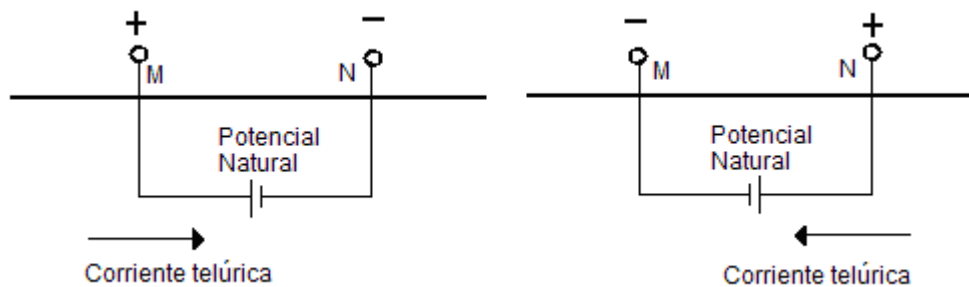


Figura 27. Sentidos de las corrientes telúricas y polaridades en puntos M, N.

En el primer caso el sentido de circulación de la corriente va de izquierda a derecha, con lo que se presenta una fuente de potencial dentro del subsuelo que obliga al punto M a tener polaridad positiva y al punto N polaridad negativa.

En el segundo caso, los puntos de referencia son los mismos, pero ahora la corriente va de derecha a izquierda, lo que ocasiona que los puntos M y N inviertan su polaridad. Cualquiera de los dos casos puede presentarse en la realidad.

1.8.3 Circuito compensador de potencial natural.

Este circuito es el encargado de anular el valor del potencial natural al inyectar al subsuelo un potencial del mismo valor absoluto pero de polaridad inversa al que se presenta en el subsuelo. Es indispensable conocer el valor y polaridad del potencial que se observa en el subsuelo, para poder cancelar su efecto.

En la Figura 28, se ilustran la fuente de potencial que se presenta en forma natural dentro del subsuelo, y la fuente externa que deberá conectarse físicamente para anular dicho potencial.

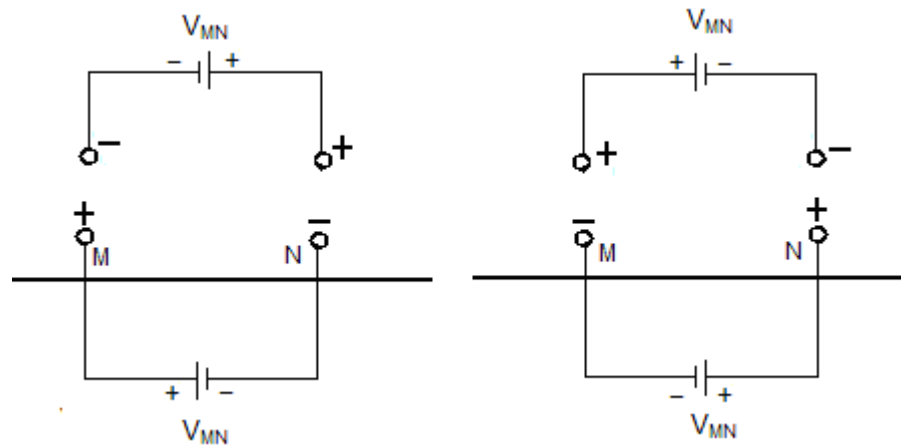


Figura 28. Fuentes de potencial natural y potencial externo.

La Figura 29 muestra un circuito divisor de voltaje diseñado específicamente para generar un valor de potencial variable por medio de la resistencia RV1, al cual se le puede invertir la polaridad en la salida (puntos M, N) por medio de un interruptor deslizable SW de 2 polos / 2 posiciones. Si el interruptor SW se mueve en la posición mostrada en la Figura 29, el sentido de la corriente obliga a que el borne M tenga polaridad positiva y el borne N sea negativo.

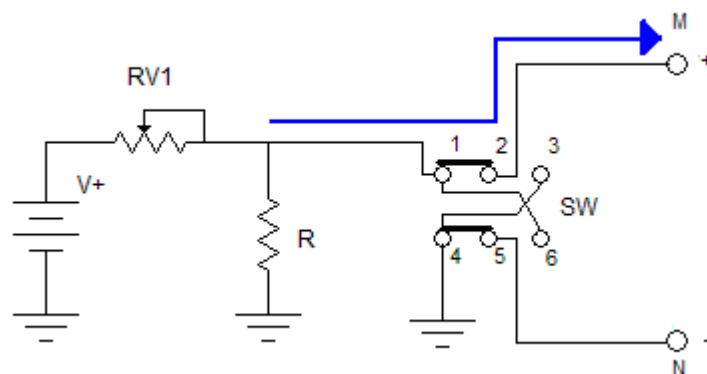


Figura 29. Circuito compensador de potencial natural.

Si el interruptor SW se mueve en la otra posición el sentido de la corriente cambia obligando a que el borne M sea negativo y el borne N sea positivo, esta situación se muestra en la Figura 30.

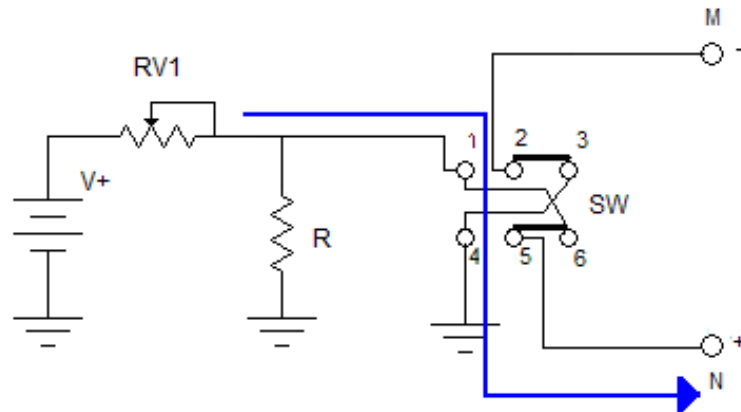


Figura 30. Circuito compensador de potencial natural con polaridad invertida.

I.9 Circuito inversor de polaridad del voltaje de salida.

Este circuito permite cambiar la polaridad en forma automática del voltaje de salida entre los bornes A y B donde se conectan los electrodos de corriente, con la intención de eliminar las corrientes telúricas y la magnetización de electrodos que causan errores en la medición del potencial. La Figura 31 muestra un diagrama de bloques que ejemplifica su funcionamiento de forma automática; el circuito inicia su trabajo al pulsar el botón que alimenta la etapa del oscilador, el cual genera una señal cuadrada con un periodo suficiente para que los medidores tanto de corriente como de potencial en escalas de CD puedan mostrar sus lecturas, la señal generada en el oscilador es enviada a un circuito de memoria para que cuando se active su salida Q permita que el circuito cambiador de polaridad obligue a que el punto A sea positivo con respecto a B, y cuando se active la salida \bar{Q} ocurra el caso contrario, es decir, que B sea positivo con respecto al punto A. En su forma más simple, este circuito puede ser sustituido por un interruptor de 2 polos y 2 tiros, simplificando el diseño.

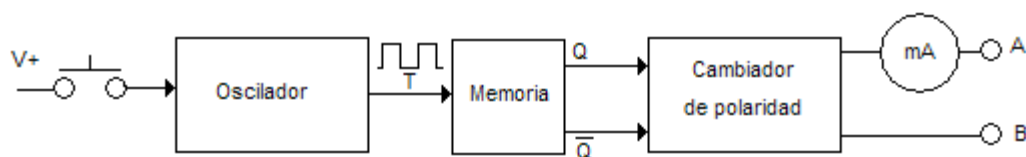


Figura 31. Circuito inversor de polaridad del voltaje de salida.

I.10 Circuito para conexión de generador de CA externo.

La Figura 32 y 33 muestran el circuito que permite conectar al equipo una fuente externa como es el caso de un generador de electricidad que funcione con diesel ó gasolina. Usando un interruptor (SW) de 2 polos / 2 tiros que se conecte como se muestra. En la Figura 32, se ilustra la primera posición del interruptor donde el transformador se conecta al rectificador formado por el puente de diodos D1, el cual es el encargado de polarizar el voltaje pulsante obtenido en la salida del transformador, y mediante el capacitor C1 se logra obtener un voltaje directo. La línea punteada en los contactos del SW significa que las partes se mueven al mismo tiempo.

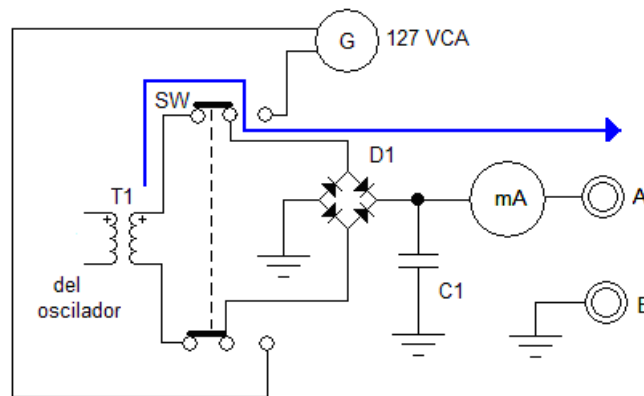


Figura 32. Conexión del transformador hacia el rectificador.

La Figura 33 muestra la posición del SW cuando se desconecta el transformador y se conecta el generador de CA externo al rectificador.

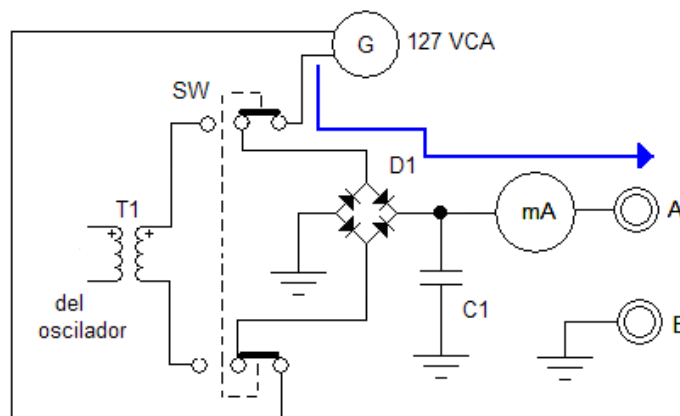


Figura 33. Conexión del generador externo hacia el rectificador.

I.11 Impedancia de entrada en el medidor de potencial.

La impedancia es la relación entre el voltaje y la corriente, se simboliza con la letra Z , y su unidad es el Ω .

En el caso de circuitos de CD sólo los elementos resistivos que existen la determinan. En circuitos de CA. la impedancia ya no es estrictamente resistiva, se toman en cuenta también los capacitores y bobinas existentes que ocasionan un fenómeno denominado reactancia (Wolf y Smith, 1992).

Para explicar el porqué es necesaria la alta impedancia de entrada del voltímetro, retomemos la Figura 3 y su explicación al inicio de este primer capítulo:

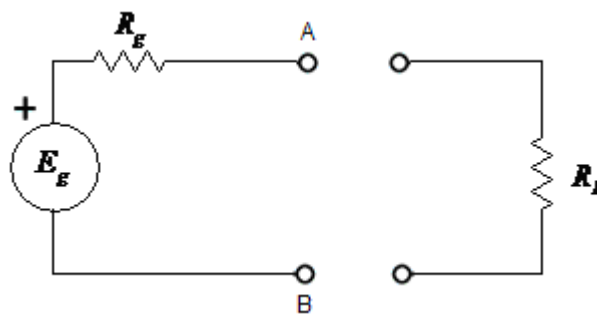


Figura 3. Circuito de fuente y voltímetro.

R_g representa la resistencia de la fuente de voltaje E_g que desea medirse, R_L representa la resistencia del voltímetro que se conectará a la fuente para saber el valor del voltaje en terminales A y B. En el momento en que el voltímetro (representado por una carga R_L) se conecta al circuito, se produce un divisor de voltaje (Hayt, 1988) en el cual, el voltaje entre terminales del voltímetro está representado por la ecuación (1.1).

Suponiendo un valor de R_g fijo de $1\ 0\text{hm}$, y un voltaje de fuente de $12\ V$ observemos que ocurre para diferentes valores de R_L .

Para R_L igual a $1\ \Omega$,

$$V_{AB} = 12V \left(\frac{1\Omega}{1\Omega + 1\Omega} \right) = 6\ V .$$

Para R_L igual a $1\text{K}\Omega$,

$$V_{AB} = 12V \left(\frac{1000\Omega}{1000\Omega + 1\Omega} \right) = 11.98 V .$$

Para R_L igual a $1\text{M}\Omega$,

$$V_{AB} = 12V \left(\frac{1 \times 10^6 \Omega}{1 \times 10^6 \Omega + 1\Omega} \right) = 11.99 V .$$

Para R_L igual a $10\text{M}\Omega$,

$$V_{AB} = 12V \left(\frac{1 \times 10^7 \Omega}{1 \times 10^7 \Omega + 1\Omega} \right) = 11.999 V .$$

Para Wolf y Smith (1992), un circuito abierto es equivalente a una impedancia infinita, el valor de la impedancia de entrada de un instrumento de medición de voltaje determina qué tan estrechamente se acerca al ideal de circuito abierto.

Obsérvese que mientras mayor sea la impedancia de entrada del instrumento de medición (R_L), la lectura obtenida se acerca al valor real, que en este ejemplo es de $12 V$.

CAPÍTULO II.

FUNDAMENTOS DEL MÉTODO DE RESISTIVIDAD DE CORRIENTE DIRECTA APLICADO A MEDIOS ESTRATIFICADOS.

II.1 Introducción.

Una vez que se ha analizado lo referente al diseño del equipo para mediciones geofísicas en el capítulo 1, es necesario conocer cuál es la teoría o modelo matemático que se aplica para que el método eléctrico de medición sea válido y se apege lo más posible a la realidad; en caso contrario, no se tendría ni la más remota idea de lo que se está midiendo y mucho menos se sabría qué tratamiento debe darse a los datos para obtener el parámetro deseado, que en este caso se trata de la resistividad; ésta se puede calcular por medio de parámetros eléctricos como la corriente y el voltaje, los cuales son aplicados al medio bajo estudio.

En este capítulo, se describen las ecuaciones que se aplican al método de resistividad de corriente directa. Se comienza dando una breve explicación sobre el concepto de lo que es la resistividad y algunos datos relacionados con esta propiedad, para después entrar directamente al análisis de las ecuaciones que intervienen en el fenómeno y realizar la deducción de la ecuación que se ha utilizado por años para calcular la resistividad de un medio geológico. Se realiza una pequeña descripción de las características de los arreglos lineales y no lineales de 4 electrodos que se han utilizado con mayor frecuencia y al final del capítulo se describen algunos métodos de interpretación de los datos obtenidos y se comentan algunos detalles que diversos autores han encontrado acerca de la profundidad de investigación.

II.2 Resistividad eléctrica de los suelos.

Según Gasulla (1999) la resistividad ρ es el parámetro fundamental de un material que describe qué tan fácil transmite una corriente eléctrica. Un alto valor de resistividad implica que el material bajo prueba es resistente al flujo de la electricidad. Un bajo valor de resistividad implica que el material transmite la corriente eléctrica fácilmente.

En esencia sólo son conductores todos los materiales metálicos y algunas sales. Un terreno podría ser en general aislante o de resistividad muy elevada, pero en todos los materiales del terreno existen poros saturados con agua.

El agua por presencia de sales disueltas, actúa como un conductor. Si un terreno tiene humedad la resistividad del mismo disminuye, por lo que la resistividad se vincula con la presencia de agua en las rocas. Por otra parte no es posible clasificar los terrenos por la resistividad, ya que esta característica eléctrica está ligada a la porosidad, contenido de agua, permeabilidad, temperatura y humedad.

Los estudios geoeléctricos son especialmente útiles en el análisis del subsuelo con el fin de localizar agua, ya que el contenido de humedad, permeabilidad y porosidad modifican la resistividad del suelo (Steinich, Chavarría & Marín 1997).

II.3 Medida de la resistividad eléctrica.

La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad ρ del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección transversal s y de longitud ℓ , la resistencia eléctrica R , es

$$R = \rho \frac{\ell}{s} . \quad (2.1)$$

De la ley de Ohm se sabe que el potencial o voltaje V está relacionado con la resistencia R y la corriente I de la siguiente forma:

$$V = I R . \quad (2.2)$$

Sustituyendo la ecuación (2.1) en la ecuación (2.2)

$$V = I \rho \frac{\ell}{s} . \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) relaciona todos los parámetros que intervienen en el cálculo de la resistividad de un medio geológico. El voltaje V y la corriente I podrían hallarse sin problemas energizando el subsuelo con una fuente de CD y midiendo tales parámetros con los equipos pertinentes, pero ¿cómo se sabe cuál es la superficie s y la longitud ℓ del terreno que estamos considerando, si la parte del subsuelo estudiada no está separada físicamente del total del terreno? Para contestar esta pregunta es necesario recordar algunos conceptos sobre electricidad:

Una carga eléctrica (positiva o negativa) genera a su alrededor un campo eléctrico que atrae a otras cargas de signo contrario y repele a las cargas con el mismo signo (Sánchez, 2004). La fuerza con la que el campo repele o atrae una carga se denomina intensidad de campo.

El potencial o voltaje de un campo eléctrico en un punto es el trabajo que realiza el campo para repeler o atraer una carga de 1 Coulomb; por lo tanto, mientras más alejado se encuentre un punto del campo eléctrico de la carga, el trabajo realizado por dicho campo será menor.

Una superficie equipotencial es aquella en la que todos los puntos están al mismo potencial, y son perpendiculares a las líneas del campo eléctrico.

En la Figura 34, se observan dos cargas eléctricas puntuales de signos contrarios, las cuales son consideradas como esferas cuyo tamaño es despreciable. Las líneas del campo eléctrico emanan de la carga positiva; mientras que en la carga negativa, las líneas del campo eléctrico apuntan hacia la carga.

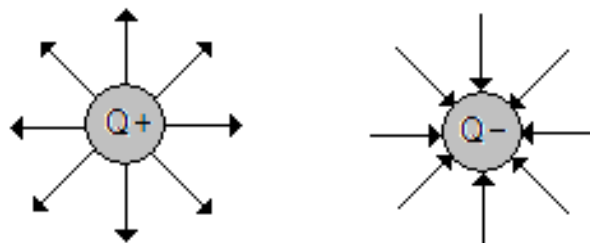


Figura 34. Carga positiva y carga negativa mostrando la dirección del campo eléctrico.

El campo eléctrico toma la geometría que corresponde a la forma de la carga puntual que lo genera, que en este caso es una esfera, como se muestra en la

Figura 35. Cada superficie que se va formando al desplazarse el campo eléctrico se encuentra a diferente nivel de potencial y conforme se alejan de la carga dichas superficies, el potencial va disminuyendo.

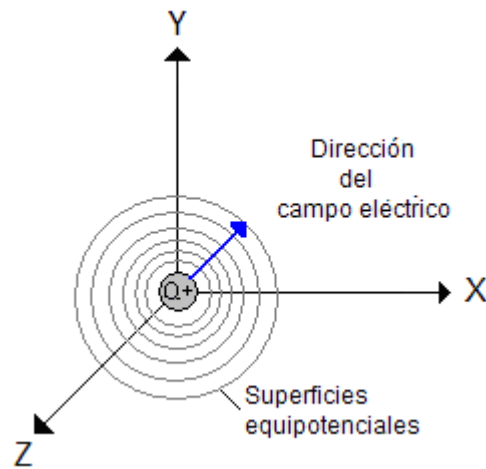


Figura 35. Desplazamiento del campo eléctrico y superficies equipotenciales para una carga positiva.

Por lo tanto, si se considera una fuente puntual A de energía, de polaridad positiva dispuesta en el terreno bajo estudio, el campo eléctrico se desplazará dentro del suelo formando superficies equipotenciales de forma semiesférica (la mitad de una esfera hueca) debido a que se considera que el potencial eléctrico no se transmite en el aire, como se observa en la Figura 36.

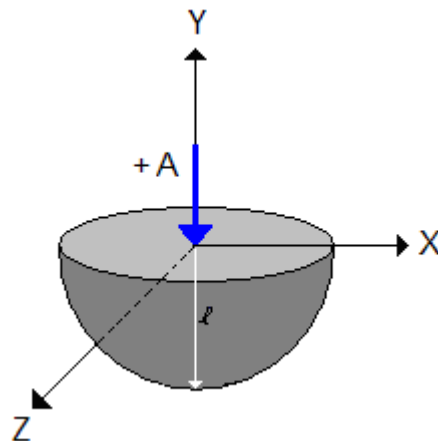


Figura 36. Superficie equipotencial de una carga puntual en el subsuelo.

Respondiendo a la pregunta que se hizo anteriormente tenemos que la superficie s considerada, será la semiesfera del campo eléctrico que se desplaza hacia el infinito, y la longitud ℓ considerada es la distancia que va desde la carga en el punto A hasta cualquier punto de la superficie equipotencial del campo eléctrico, o sea el radio de la semiesfera. Por lo tanto,

$\ell =$ radio de la semiesfera,

$$s = \frac{4\pi r^2}{2} = 2\pi r^2 = \text{superficie de la semiesfera.}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (2.3)

$$V = I \rho \frac{r}{2\pi r^2},$$

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r} . \quad (2.4)$$

Mediante la fórmula (2.4) podemos obtener el potencial o voltaje V en cualquier punto del campo eléctrico, si se conoce la resistividad ρ del medio y la corriente eléctrica I que lo atraviesa; donde r es la distancia que existe entre la fuente puntual y el punto en el que se desea medir el potencial.

La diferencia de potencial que existe entre dos puntos dentro del campo eléctrico es el trabajo por unidad de carga que el campo eléctrico realiza para mover una carga puntual desde un punto a hasta un punto b , o sea entre dos superficies equipotenciales diferentes. Como se observa en la Figura 37.

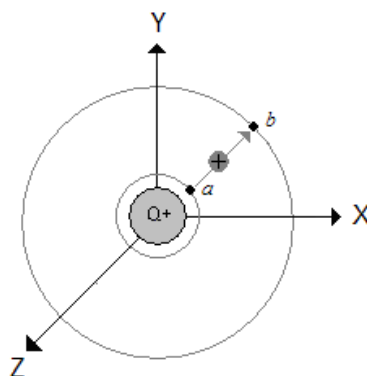


Figura 37. Diferencia de potencial entre dos puntos en el campo eléctrico.

La diferencia de potencial se representa de la siguiente forma:

$$\Delta V = V_a - V_b \quad (2.5)$$

Cuando dos puntos a y b se ubican sobre una misma superficie equipotencial (Figura 38),

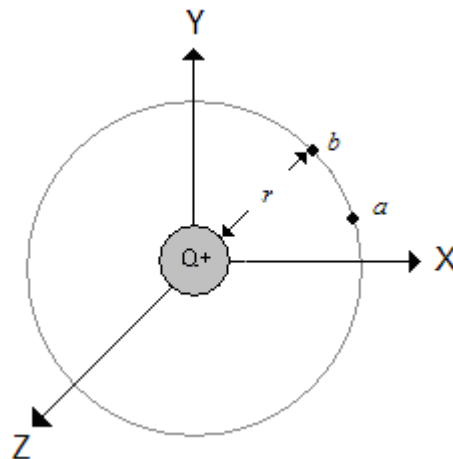


Figura 38. Diferencia de potencial entre dos puntos localizados sobre una misma superficie equipotencial.

se tiene de la ecuación (2.5) que

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_a - V_b, \\ \Delta V &= \frac{I\rho}{2\pi r_1} - \frac{I\rho}{2\pi r_2}, \\ \Delta V &= \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad r_1 = r_2 = r, \end{aligned}$$

y como consecuencia $\Delta V = 0$.

Por esta razón los electrodos M, N que se ocupan para medir la diferencia de potencial en los arreglos establecidos, se ubican a distancias de tal forma que el potencial a medir no se anule.

En una situación real una fuente de corriente directa cuenta con dos polos, uno positivo (+A) y el otro negativo (-B) como se ilustra en la Figura 39. El campo eléctrico se desplaza de la carga positiva a la negativa, lo que se observa

mediante las flechas blancas, y en determinado momento se forman dos superficies equipotenciales que tocan el punto M, el cual no se pone en el centro del arreglo para evitar que las distancias de los puntos A y B al punto M sean iguales y el potencial medido sea cero, como ya se dedujo anteriormente.

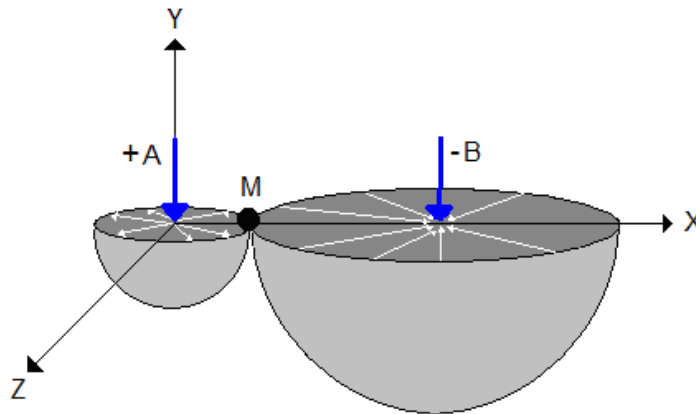


Figura 39. Potencial en un punto M debido a dos cargas.

La diferencia de potencial que existe en el punto M debido a las dos fuentes puntuales A y B, es:

$$\Delta V_M = V_{AM} - V_{BM},$$

$$\Delta V_M = \frac{I\rho}{2\pi r_1} - \frac{I\rho}{2\pi r_2},$$

donde,

r_1 = la distancia que existe entre el punto A y el punto M,

r_2 = la distancia que existe entre el punto B y el punto M;

por lo tanto,

$$\Delta V_M = \frac{I\rho}{2\pi \cdot AM} - \frac{I\rho}{2\pi \cdot BM},$$

$$\Delta V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right). \quad (2.6)$$

En un caso real, la diferencia de potencial se mide entre dos puntos del terreno; la Figura 40 muestra el campo eléctrico que se obtendría en otro punto denominado N.

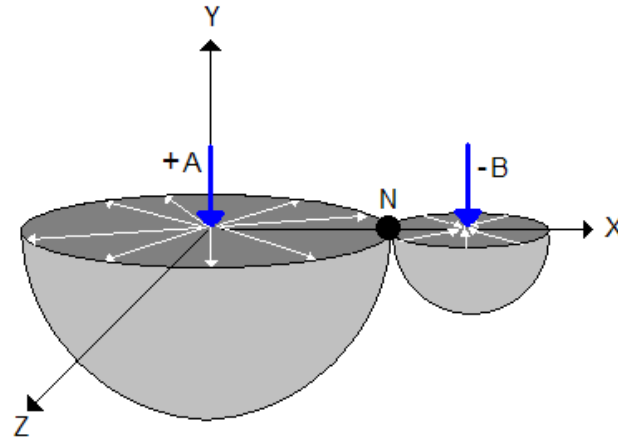


Figura 40. Potencial en un punto N debido a dos cargas.

La diferencia de potencial que existe en el punto N debido a las dos fuentes puntuales A y B, es:

$$\Delta V_N = V_{AN} - V_{BN},$$

$$\Delta V_N = \frac{I\rho}{2\pi r_1} - \frac{I\rho}{2\pi r_2},$$

donde,

r_1 = la distancia que existe entre el punto A y el punto N,

r_2 = la distancia que existe entre el punto B y el punto N,

por lo tanto,

$$\Delta V_N = \frac{I\rho}{2\pi \cdot AN} - \frac{I\rho}{2\pi \cdot BN},$$

$$\Delta V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right). \quad (2.7)$$

Como consecuencia, la diferencia de potencial entre los puntos M y N se encuentra restando el potencial ΔV_N denotado por la ecuación (2.7) al potencial ΔV_M definido por la ecuación (2.6)

$$\Delta V_{MN} = \Delta V_M - \Delta V_N, \quad (2.8)$$

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

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right). \quad (2.9)$$

Esta expresión según Orellana (1982) normalmente se encuentra con la resistividad ρ despejada, como se muestra a continuación:

$$\rho = \frac{\Delta V_{MN}}{I} 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

Es común que la ecuación (2.10) se exprese de la siguiente forma:

$$\rho = k \frac{\Delta V_{MN}}{I}, \quad (2.11)$$

donde k es el factor geométrico que depende exclusivamente de las distancias que existen entre los electrodos de corriente A, B y los de potencial M, N, como se ilustra por la siguiente ecuación

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}. \quad (2.12)$$

Según Koefoed (1968) la interpretación de las mediciones se basa en la suposición de que el subsuelo está constituido por un número finito de capas distintas, separadas por medio de planos horizontales, y cada una de las cuales son isótropas y homogéneas en términos de la resistividad. En una gran mayoría de casos prácticos, esta suposición es una aproximación cercana a la realidad. Cuando el medio no es homogéneo, la ecuación (2.11) da la resistividad aparente ρ_a cuyo valor depende, además del factor geométrico k , de las resistividades de los diferentes materiales.

II.4 Arreglos electródicos lineales.

De acuerdo con Gispert (2005), la prospección eléctrica permite medir determinadas propiedades físicas del subsuelo. Los equipos para aplicar esos métodos funcionan mediante arreglos que ocupan dos electrodos (A y B), que introducen una corriente eléctrica en el terreno y con otros dos (M y N), intercalados, se investiga el campo eléctrico creado por la corriente suministrada al suelo. Una distribución típica de electrodos se observa en la Figura 41.

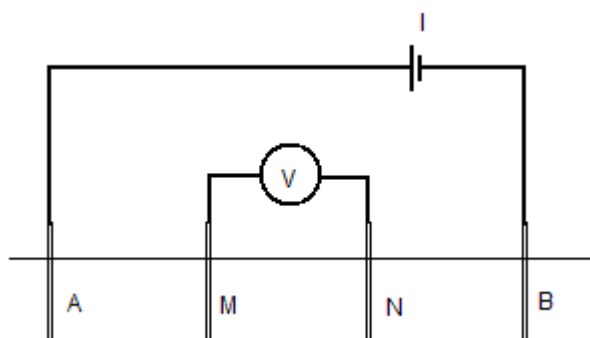


Figura 41. Arreglo de electrodos de corriente y potencial.

Existen arreglos de electrodos lineales y azimutales; los arreglos lineales se usan principalmente para encontrar variaciones de resistividad al realizar Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y los electrodos se disponen en forma lineal; en cuanto a los arreglos azimutales, estos nos ayudan a conocer las variaciones de resistividad que existen en el subsuelo cuando los arreglos se van rotando a diferentes posiciones cardinales. El uso de cada tipo de arreglo depende del objetivo del estudio.

El método usado con más frecuencia es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). El SEV es diseñado para obtener perfiles verticales de resistividad versus profundidad. Esta técnica se basa en la observación de que la corriente penetra más profundo si se aumenta la separación de los electrodos. Se tienen por ejemplo los trabajos de Álvarez (2003); Belmonte, Campos y Alatorre (2003); Abdelhady, Essam, Morsy & Sherif (2004); Mota, Monteiro, Mateus, Marques, Goncalves, Figueiras & Amaral (2004); Belmonte, Campos & Herrera (2005); Auken, Pellerin, Christensen & Sorensen (2006), Rivas (n.d.)

Los arreglos lineales de electrodos más utilizados son: el método Schlumberger, el Wenner y el dipolo-dipolo, los cuales se describen a continuación.

II.4.1 Arreglo Schlumberger.

En el arreglo Schlumberger que se observa en la Figura 42, los electrodos de potencial denominados M y N guardan una distancia “a” entre sí, la distancia entre los electrodos de corriente denominados A y B se va ampliando en función de la distancia “a”, aumentando una cantidad “b” veces según se vaya requiriendo. Boyd (1996) menciona que debido a que el espacio entre electrodos de potencial es pequeño comparado con el espacio entre electrodos de corriente, se necesita un voltímetro muy sensible y que las interpretaciones basadas en c.d. están limitadas a estructuras de capas horizontales.

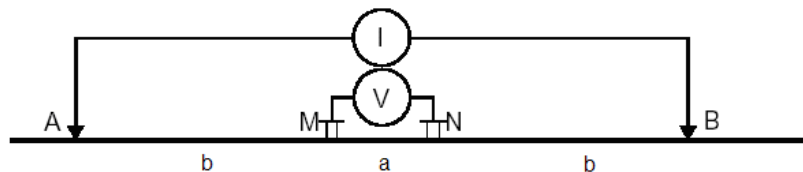


Figura 42. Arreglo Schlumberger.

Añade que al no ser equidistantes los electrodos de potencial y de corriente, en la práctica “a” debe ser menor que $2/5$ “b”, y que tal como los electrodos de corriente se desplazan hacia fuera, la diferencia de potencial llegar a ser tan pequeña que el voltímetro no la puede leer, y será necesario incrementar la distancia “a” para incrementar la diferencia de potencial que se intenta medir.

Una vez que se han establecido las distancias apropiadas según el criterio del investigador, se toman mediciones del potencial natural y del potencial inducido que existen en los puntos M y N , y la corriente que se suministra al suelo entre electrodos A y B. Según la fórmula (2.11) mostrada a continuación, es necesario conocer también las distancias entre electrodos para calcular el factor geométrico.

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

El valor del factor geométrico k se deduce de la ecuación (2.11), entonces

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

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a+b} - \frac{1}{a+b} + \frac{1}{b} \right)^{-1},$$

$$k = \frac{\pi b^2}{a} + \pi b. \quad (2.13)$$

Aunque la mayoría de las configuraciones de los electrodos pueden usarse para el SEV, el tipo Schlumberger ofrece avances importantes en lo que a logística se refiere, ya que sólo dos electrodos son movidos, además de ser más resolutivo en profundidad según Busso y Yermolin (2007).

II.4.2 Arreglo Wenner.

En el Arreglo Wenner los electrodos de corriente A y B guardan una distancia “a” de los electrodos de potencial M y N. Según Boyd (1996) este arreglo es el más utilizado para estudios geoelectrónicos verticales debido a que el espacio entre electrodos de potencial y de corriente se incrementa en igual proporción requiriendo milivoltímetros menos sensibles, además que se reduce el ruido eléctrico inducido por factores externos e internos al terreno, y que afectan las mediciones. Este arreglo se observa en la Figura 43.

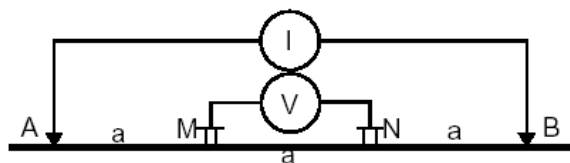


Figura 43. Arreglo Wenner.

El valor del factor geométrico para este arreglo es

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right)^{-1}$$

$$k = 2\pi \left(\frac{2}{a} - \frac{1}{a} \right)^{-1} = 2\pi \left(\frac{1}{a} \right)^{-1}$$

$$k = 2\pi a \tag{2.14}$$

II.4.3 Arreglo dipolo-dipolo.

En la Figura 44, se muestra el arreglo Dipolo-Dipolo, se observa que la separación entre el electrodo de potencial M y el electrodo de corriente A puede variar en múltiplos de la distancia “a” que existe entre los electrodos de potencial M y N, y los de corriente A y B. La desventaja es que se tienen curvas complejas de interpretar, y las señales que se obtienen entre electrodos de potencial son de bajo nivel. (Boyd, 1996)

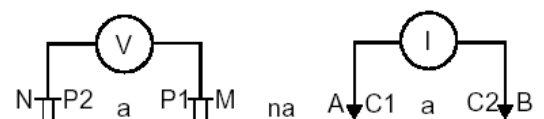


Figura 44. Arreglo Dipolo-dipolo.

El factor geométrico de este arreglo utilizando la Fórmula (3.21) resulta

$$k = \pi n(n+1)(n+2)a \tag{2.15}$$

II.5 Arreglos electródicos azimutales.

Los arreglos lineales descritos anteriormente se pueden utilizar para mediciones azimutales, pero también han surgido otros arreglos que han ayudado a calcular variaciones de resistividad en función del azimuth. Lo que autores como Bolshakok, Modin, Pergavo & Shevnin (1995); Bolshakok, Modin, Pergavo & Shevnin (1998a); Niels (2000); Senos (2002); llaman anisotropía eléctrica.

A continuación se da una breve explicación de los arreglos azimutales más usados.

II.5.1 Arreglo Wenner azimutal.

Se trata del mismo arreglo Wenner lineal donde la primera lectura se toma orientando el arreglo hacia el norte geográfico, después el arreglo se gira una cantidad de grados y se realiza otra medición, hasta completar 180 grados. Si se requiere penetrar más, se incrementa la distancia entre los electrodos del arreglo y se vuelve a medir siguiendo el mismo método. La Figura 45 muestra una vista de planta de este arreglo. Cabe mencionar que también existe el arreglo Schlumberger azimutal.

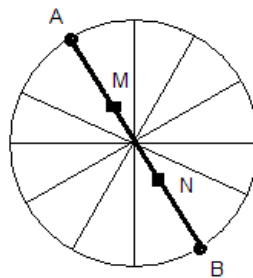


Figura 45. Arreglo Wenner Azimutal.

II.5.2 Arreglo cuadrado.

Busby & Jackson (2006) mencionan que el arreglo cuadrado fué introducido por Habberjam & Watkins (1967), con el fin de minimizar los efectos de la anisotropía o heterogeneidad de un espacio promedio, se tienen tres tipos de arreglos cuadrados: el alfa (α), el beta (β) y el gama (γ), como se ilustra en la Figura 46.

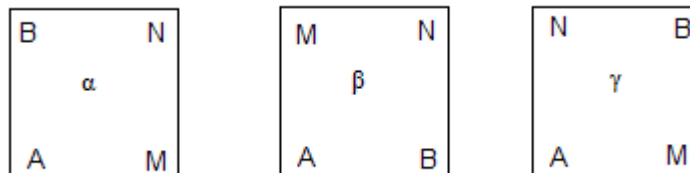


Figura 46. Tipos de arreglos cuadrados.

Se compone de 4 electrodos, dos electrodos que miden potencial llamados M y N, y dos electrodos que inyectan corriente, denominados A y B, los cuales varían en posición dependiendo del tipo de arreglo elegido. Las mediciones se efectúan

girando el arreglo cierta cantidad de grados guardando siempre la forma geométrica mostrada.

II.5.3 Arreglo dipolo ecuatorial.

El arreglo dipolo ecuatorial fué recomendado en 1975 por Semenov, exhibiendo una aparente mayor sensibilidad a formaciones anisotrópicas, comparado con los arreglos lineales como el Wenner o el Schlumberger. La Figura 47 muestra la configuración del arreglo.

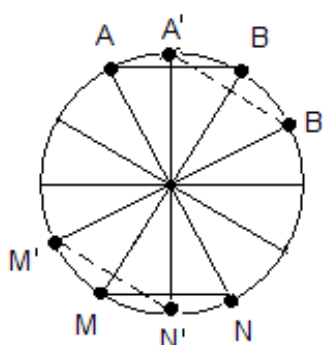


Figura 47. Arreglo ecuatorial.

Se tienen dos electrodos para medir el potencial denominados M y N, opuestos diametralmente a un par de electrodos que inyectan corriente al subsuelo denominados A y B. Las mediciones se van haciendo rotando un determinado número de grados el arreglo alrededor de una circunferencia.

II.5.4 Arreglo tipo flecha.

El arreglo tipo flecha fué propuesto por Bolshakok, Modin, Pervago & Shevnin (1998b), manifestando que muestra gran sensibilidad a la anisotropía. Este arreglo se muestra a continuación en la Figura 48.

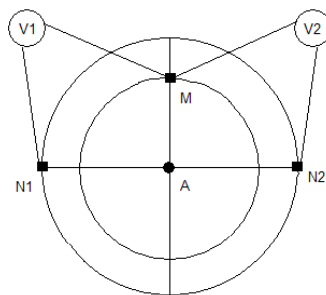


Figura 48. Arreglo tipo flecha.

El procedimiento de medición es el siguiente: A es el electrodo central de transmisión de corriente y B no se ocupa por lo que se considera que está en el infinito. Dos diferencias de potencial son medidas:

$V_M - V_{N1}$ y $V_M - V_{N2}$. El arreglo entonces es rotado en un ángulo de 30° y se aplica el mismo procedimiento de medición. Esto se repite sucesivamente en rotaciones de 30° . La profundidad de penetración es aproximadamente igual a la distancia AM.

Las mediciones de resistividad aparente azimutales son hechas rotando un arreglo de electrodos a través de 180° ó 360° y se toman mediciones a diferentes azimuths para definir cualquier variación de resistividad aparente con la orientación.

II.6 Interpretación y procesamiento de datos.

Al iniciarse la prospección geofísica surgió el problema de cuál era el modo más correcto de interpretar los datos de campo, al principio la interpretación era cualitativa y bastante sencilla, pues en la mayoría de los casos se trataba de encontrar un máximo o un mínimo, tales interpretaciones no requerían conocimientos específicos.

Con el paso del tiempo surgió la necesidad de obtener resultados cuantitativos; por ejemplo la profundidad de un acuífero. La introducción de las computadoras produjo cambios; se pudieron calcular problemas directos usando diversos métodos numéricos.

Para realizar una interpretación correcta, Orellana, Higuera y Merchán (1995) recomiendan conocer con detalle el problema que se trata de resolver, las leyes físicas implicadas y la variación de la respuesta del objeto buscado según sea su disposición en el subsuelo, es preciso coordinar toda la información geofísica obtenida para evitar discordancias y usar la información suplementaria disponible como: sondeos mecánicos, información geológica, etc.

Según Molina (2006), las interpretaciones de los datos de los SEV se basan en la suposición de que en el área de investigación se encuentra un número finito de capas horizontales. Los análisis primarios consisten en comparar las formas de las curvas (logaritmo de la resistividad aparente versus el logaritmo de la distancia que separa los electrodos de corriente) con modelos de curvas de estructuras con resistividades típicas. Como en la mayoría de las técnicas geofísicas, la interpretación de los datos de resistividad no es única; podemos interpretar una curva de resistividad aparente usando varios modelos.

El programa DCINV-1D, es utilizado para modelar e interpretar sondeos de Corriente Directa tipo SEV, utilizando un modelo de un medio estratificado. Este programa nos permite interpretar datos con las configuraciones Wenner, Dipolo – Dipolo y Schlumberger. El programa ajusta la curva por métodos iterativos. Intenta empatar la curva de resistividades de campo con la curva resultante a partir de los datos de entrada de espesor y resistividad de cada capa.

En cuanto al procesamiento de los datos obtenidos azimutalmente, *Bolshakov et al.* (1998a) proponen el análisis espectral azimutal de diagramas polares ya que permiten reconstruir la respuesta de cualquier arreglo lineal como el Wenner o el Schlumberger ayudando a:

- ❖ Obtener un mapa de anomalías en la conductividad.
- ❖ Obtener mapas de asentamientos bajo lugares seleccionados para descubrir características potenciales de importancia.

Shmutz, Andrieux, Bobachev, Montoroi & Nasri (2006) señalaron que actualmente la tomografía eléctrica puede realizarse eficientemente gracias al uso de equipos

multielectrodos, y recomienda la interpretación combinada de los mapas de fracturas y resultados geoelectrónicos.

II.7 Modelos para medios estratificados.

La interpretación de las mediciones se basa en la suposición de que el subsuelo consiste en un número finito de capas distintas, separadas cada una por medio de planos de frontera horizontales, y cada una de las cuales son eléctricamente isotrópicas y homogéneas. En una gran mayoría de casos prácticos esta suposición es una aproximación cercana a la realidad.

Koefoed (1968) muestra un método práctico para determinar las resistividades de las capas y las profundidades de los planos de frontera desde las diferencias de potencial que son medidas en la superficie de la tierra, donde se debe conocer la relación matemática fundamental entre las cantidades medidas y los parámetros que definen la distribución de capa en el subsuelo. Esta relación fundamental ya fué derivada en 1930 por S. Stefanescu & C. and M. Schlumberger.

El campo del potencial derivado por estos autores fue el campo del potencial en la superficie de la tierra que es causado por una fuente puntual individual de la corriente ubicada en la superficie. Cuando la expresión matemática para este campo potencial es conocida, el campo potencial causado por un par de electrodos de corriente también como las diferencias de potencial medidas entre los pares de electrodos de medición, pueden ser obtenidos por adición numérica simple.

El campo del potencial no varía con el tiempo al ser usada corriente directa, por lo que se considera un caso estacionario, y por lo tanto debe satisfacer la ecuación de Laplace, la cual, en coordenadas rectangulares y en tres dimensiones, tiene la forma:

$$\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta z^2} = 0. \quad (2.16)$$

La ecuación para encontrar el potencial inducido, debido a 2 electrodos de corriente para un terreno de dos capas según Koefoed (1968), se muestra en seguida.

$$V_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right]. \quad (2.17)$$

Donde:

k = depende de las resistividades de las dos capas,

r = es la distancia entre el electrodo de corriente y el de potencial,

h = es el espesor de la primera capa,

I = es la corriente inyectada al subsuelo.

II.8 Profundidad de investigación.

El concepto de “profundidad de investigación” en los sondeos de resistividad lo introdujeron Conrad y Marcel Schlumberger en 1932, y ha sido discutido posteriormente por varios autores para diversos arreglos y estructuras.

En la Figura 49, se ilustra uno de los principios básicos de la prospección geoelectrica. El caso (a) de la Figura muestra cómo para separaciones pequeñas de electrodos, la corriente está confinada a la zona (ρ_1) más superficial.

En el caso (b), cuando la distancia entre los electrodos A y B es mayor, la profundidad que alcanza la corriente en el subsuelo se incrementa, proporcionando información sobre (ρ_2).

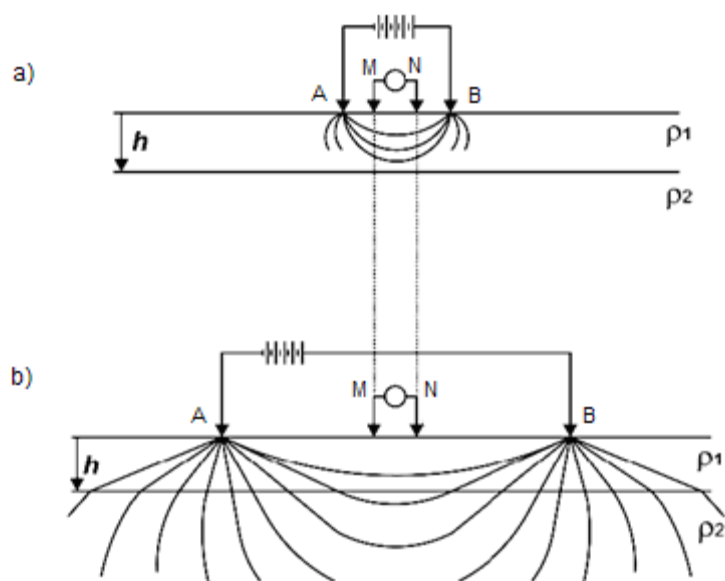


Figura 49. Profundidad de investigación.

Desde el punto de vista de la profundidad de investigación diversos autores han dado su versión sobre el tema de acuerdo al arreglo de electrodos utilizado.

Para los arreglos lineales Schlumberger, Wenner y dipolo-dipolo, Cataldi, Zambrano y Rojas (2006) establecen una relación del orden de 0.1 a 0.3 de la apertura AB sin dejar claro cuál es la relación para cada arreglo, y mencionan que esto depende de las características eléctricas que presente el entorno investigado.

Por otro lado, Steinich *et al.* (1997) comentan que para el arreglo Wenner, el espacio $AB/3$ es representativo de la profundidad de investigación.

Osella, Faveto, Martinelli & Cernadas (1999) obtuvieron una profundidad de penetración para el arreglo Schlumberger de $1/3$ a $1/4$ de la distancia máxima AB. Mientras que Zapata (2001) y Lashkaripour (2003) comentan que la profundidad de penetración para el mismo arreglo es $AB/2$, la cual se ha adoptado como base para generar los gráficos de los datos en una plantilla bilogarítmica como la que se muestra en la Figura 50.

Las abscisas son las distancias $AB/2$ y las ordenadas los valores de resistividad aparente que se van calculando en cada punto del sondeo. La curva final es la que se interpreta para obtener los espesores y resistividades de las formaciones geológicas de la zona en que se ha realizado el SEV.

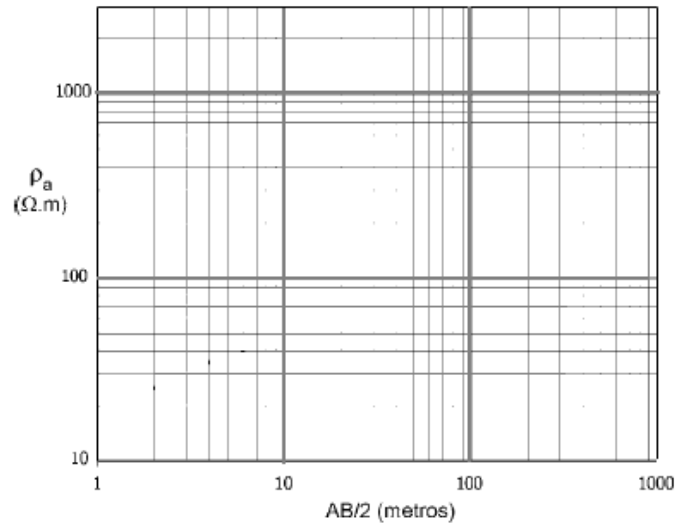


Figura 50. Gráfico bilogarítmico de distancia $AB/2$ vs ρ_a .

CAPÍTULO III.

DISEÑO DEL EQUIPO.

III.1 Introducción.

El principio de funcionamiento del equipo construido se basa en un circuito que convierte una tensión continua de bajo nivel en una tensión alterna de nivel más alto para enseguida volverla a rectificar y así obtener un voltaje continuo.

A este circuito comúnmente se le denomina inversor, y en ciertas aplicaciones también se le denomina ondulator; y funciona enviando pulsos de de 12 VCD de frecuencia fija a un transformador, el cual se encarga de elevar esos pulsos y transmitirlos a su devanado secundario, para posteriormente ser convertidos en voltaje directo mediante un circuito rectificador, teniendo la posibilidad de regular la tensión o la corriente según se desee. (Jesiotr et al., 2005).

Siempre un inversor u ondulator estará alimentado con una tensión continua, ya sea que ésta provenga de un acumulador o directamente desde un rectificador, según la aplicación. En este caso, el equipo funciona como un inversor de frecuencia fija, la cual es obtenida por medio de un circuito oscilante a 1 kHz aproximadamente.

Dado que los inversores deben proveer una salida de corriente alterna, ésta debe tener valor medio nulo y tener los dos semiperíodos de forma idéntica, de igual duración, y una extensión de 180° y de signos opuestos. A su vez cada semiperíodo debe ser simétrico respecto a 90° .

La elección de los elementos adecuados está en función de la potencia, tensión, frecuencia requeridos por la carga y el costo de los mismos. El circuito de control debe estar construido no solo para el correcto funcionamiento del inversor, sino también para cumplir con las condiciones particulares de la aplicación. El equipo consta de una parte que emite corriente directa a través de un par de electrodos y por medio de otro par de electrodos se mide el potencial del terreno, con el fin de obtener datos de corriente y potencial que sirvan para calcular la resistividad.

En mediciones de corriente directa, el potencial natural del subsuelo afecta al potencial inducido; por lo que, fué necesario construir un circuito adicional que anula este (Boyd, 1996).

III.2 Proceso de diseño.

Según Hayk (2003) un diseño exitoso es alcanzado cuando un procedimiento lógico es seguido para conocer una necesidad específica. Este procedimiento llamado proceso de diseño es similar al método científico con respecto a su rutina paso a paso. El proceso de diseño supone las siguientes actividades, las cuales deben ser completadas:

1. identificación de la necesidad.
2. investigación de mercado.
3. Especificaciones de desempeño.
4. Análisis de funciones.
5. Generación del concepto.
6. Análisis y selección.
7. Diseño detallado.
8. Construcción del prototipo.
9. Producción.

Este procedimiento se detalla a continuación quedando fuera del objetivo de este trabajo el punto 9.

III.3 Identificación de la necesidad.

La realización de mediciones geoelectricas para la caracterización de las propiedades resistivas de un medio geológico, con fines de conocer la profundidad de las capas, el tipo de material que las componen, la profundidad del manto freático, la anisotropía eléctrica, la detección de cuevas subterráneas e incluso de zonas arqueológicas entre otros usos, es de relevancia para el

personal que estudia estas áreas y para la sociedad en general. Al inicio de este documento, en la parte de la problemática se mencionan algunos inconvenientes cuando se trata de adquirir un equipo de marca.

III.4 Investigación de mercado.

Existen varias marcas que fabrican y venden equipos para mediciones geoelectricas; por ejemplo, el que se muestra en la Figura 51, de la marca AGI:



Figura 51. Resistivímetro de 8-Canales. Fuente: AGI Advanced Geosciences, Inc.

Especificaciones técnicas:

Las especificaciones más importantes se mencionan en la Tabla 1 que se muestra a continuación.

Tabla 1. Especificaciones del Resistivímetro marca AGI.

Modos de Medidas:	Resistividad aparente, resistencia, polarización inducida (PI), Resolución de medidas: Máx. 30 nV, depende del nivel del voltaje
Resolución de Pantalla:	4 dígitos.
Intensidad de corriente de salida:	1 mA - 2000mA continuo, medido a gran exactitud.
Voltaje de salida:	800 Vpp
Canales de entrada:	Ocho canales.
Impedancia de entrada:	>20 MΩ.
Voltaje de entrada:	Máximo 10 V.
Proceso de señal:	Promedia continuamente después de cada ciclo completo La resistividad se calcula utilizando las distancias de electrodos introducidos por el usuario.
Exactitud:	Mejor que 1% de lectura en la mayoría de los casos
Controles del usuario:	20 teclas táctiles, teclado resistente a las inclemencias con entradas numéricas y teclas de función.
Alimentación de energía:	12 ó 2x12 VCD energía externa (una o dos baterías de 12 VCD),
Peso:	10.2 kg (22.5 lb), solo el instrumento
Dimensiones:	Ancho 184 mm (7.25"), longitud 406 mm (16") y altura 273 mm (10.75").

Otra marca que existe pertenece a la empresa ABEM. En la Figura 52, se muestra el modelo Terrameter Sas 1000.



Figura 52. Terrameter Sas 1000. Fuente: <http://www.abem.se>

Especificaciones técnicas:

Los datos más relevantes de este modelo, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones del Resistivímetro marca GISCO.

Receptor:	
No. de canales de entrada.	1- rango automático.
Impedancia de entrada.	10 MΩ .
Resolución.	30 nV.
Cargabilidad IP.	Hasta 10 ventanas de tiempo, seleccionable por el usuario.
Voltaje Máximo.	400 V.
Intervalo de Integración IP.	20 ms /16.66 ms dependiendo de la frecuencia de la línea alimentadora.
Rango dinámico.	Hasta 140 dB, más 64 dB ganancia automática.
Periodo Máximo de integración.	8 segundos.
Transmisor:	
Corriente de salida.	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500,1000 mA.

Voltaje máximo de salida.	400 V.
Exactitud corriente salida.	Mejor que 0.5% (a 100 mA).
Potencia máxima de salida.	100 W.
General:	
Computador.	PC compatible.
Almacenamiento.	Más de treinta mil lecturas.
Pantalla.	LCD 200 x 64 pixels (8 líneas x 64 caracteres).
Interfase serial.	RS 232.
Alimentación.	12 V externo a través de SAS-EBA.
Peso.	5 kg.
Dimensiones.	105 x 325 x 300 mm.

La marca SYSCAL también cuenta con equipos de este tipo, como se muestra en la Figura 53.



Figura 53. Resistivímetro syscal. Fuente: SYSCAL

Especificaciones técnicas:

Las especificaciones técnicas se muestran a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones del Resistivímetro marca SYSCAL.

Receptor:	
Protección contra sobrevoltaje.	En la entrada.
Impedancia de entrada.	10 M Ω .
Resolución.	1 μ V.
Rango de voltaje de entrada.	-10 V a 10 V.
Exactitud.	0.3 %
Transmisor:	
Corriente de salida.	2500 mA.
Voltaje máximo de salida.	600 V.
Exactitud Corriente salida.	0.3%
Resolución	10 μ A.
General:	
Dimensiones.	31 x 31 x 21 cm.
Alimentación.	12 V, 7 Ah.
Peso.	9.5 kg incluyendo las pilas.
Dimensiones.	105 x 325 x 300 mm.

De las características técnicas con que cada equipo cuenta, caben destacar las que tienen en común y que fueron la base para diseñar el equipo:

- a) La alta impedancia de entrada del receptor.
- b) Corriente máxima de salida del transmisor.
- c) Voltaje de salida.
- d) Voltaje máximo de entrada
- e) La resolución de los medidores de corriente y voltaje.
- f) Alimentación.

Estas características importantes en el diseño y otras no menos importantes se detallan en las especificaciones de desempeño.

III.5 Especificaciones de desempeño.

Las especificaciones o características del equipo construido se enumeran a continuación:

- | | |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1. Voltaje de alimentación 12 VCD. | 17. Construcción con materiales resistentes. |
| 2. Voltaje de salida= 120 VCD. | 18. Bajo costo. |
| 3. Corriente de salida= 0.5 A en CD máximo. | 19. Fácil manejo. |
| 4. Voltaje de entrada = 2 VCD máximo. | 20. Seguro para el usuario. |
| 5. Circuito compensador de potencial natural. | 21. Poco mantenimiento. |
| 6. Circuito intercambiador de polaridad. | 22. Mantenimiento sencillo. |
| 7. Electrodo de acero. | 23. Larga vida útil de los componentes. |
| 8. Carretes y caja de madera. | 24. Peso menor a 10 kg. |
| 9. Conductor para conexión de electrodos del calibre 16. | 25. Amigable con el ambiente. |
| 10. Tamaño aproximado = 30 cm. | 26. Bajo consumo de energía eléctrica. |
| 11. Interruptor momentáneo para el pulso eléctrico. | 27. Color madera natural. |
| 12. Botón para retener las lecturas (HOLD) | 28. Pocas partes. |
| 13. Pilas recargables. | 29. Materiales reciclables. |
| 14. Indicador de estado de las baterías. | 30. Fácil ensamblado. |
| 15. Alimentación con fuente externa a 127 VCA. | 31. Fácil limpieza. |
| 16. Alto rendimiento de las baterías (7Ah.) | 32. Diseño ergonómico |
| | 33. Sin vibración. |
| | 34. No ruidoso. |

En la Tabla 4, se muestra la distribución de atributos de acuerdo a su importancia.

Tabla 4. Distribución de atributos.

ATRIBUTOS PRIMARIOS	ATRIBUTOS SECUNDARIOS	ATRIBUTOS TERCARIOS
Voltaje de alimentación 12 VCD.	Electrodos de acero.	Carretes de madera.
Voltaje de salida: 120 VCD.	Conductor para conexión de electrodos del calibre 16.	Color madera natural.
Corriente de salida 0.5 A máximo.	Tamaño.	Sin vibración.
2 VCD de entrada. máx.	Botón HOLD.	No ruidoso.
Compensador de potencial natural.	Pilas recargables.	
Interruptor momentáneo para el pulso eléctrico.	Indicador de estado de las baterías.	
Alto rendimiento de las baterías (7Ah).	Alimentación con fuente externa a 127 VCA.	
Bajo costo.	Constituido por materiales resistentes.	
Fácil manejo.	Poco mantenimiento.	
Seguro para el usuario.	Mantenimiento sencillo.	
Larga vida útil de los componentes.	Peso menor a 10 kg.	
Amigable con el ambiente	Fácil ensamblado.	
Bajo consumo de energía eléctrica.	Fácil limpieza.	
Materiales reciclables.	Pocas partes.	
Diseño ergonómico.	Circuito intercambiador de polaridad.	

Dentro de los atributos primarios se contempló el aspecto ambiental y la seguridad del usuario principalmente.

A continuación se muestra el árbol de objetivos donde se establecieron 3 temas principales: seguridad, economía y eficiencia.

III.6 Árbol de objetivos.

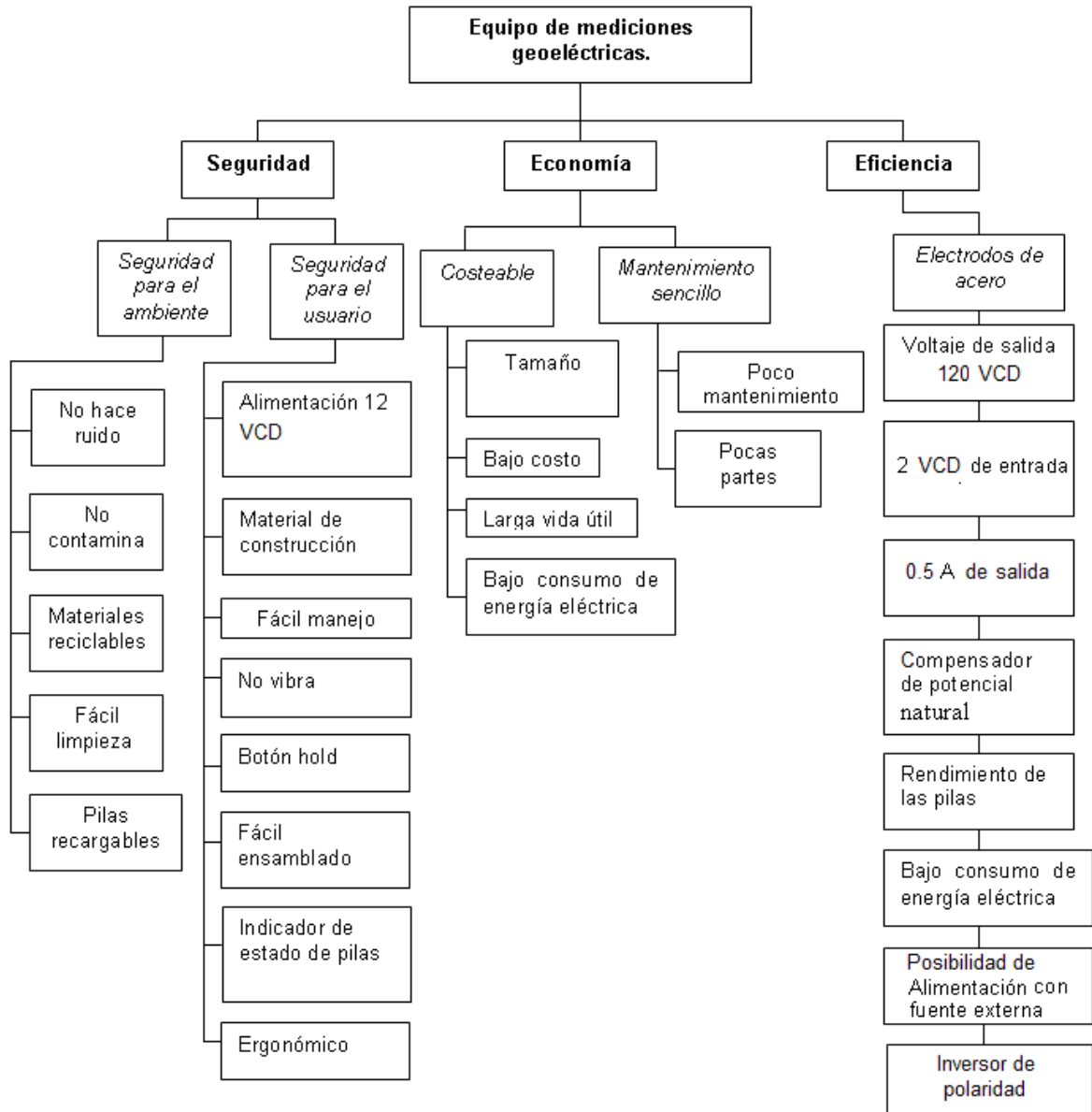


Figura 54. Árbol de objetivos.

III.7 Análisis de funciones.

En el siguiente diagrama funcional se muestran las funciones principales del equipo. Nótese que solo algunas de ellas necesitan del usuario.

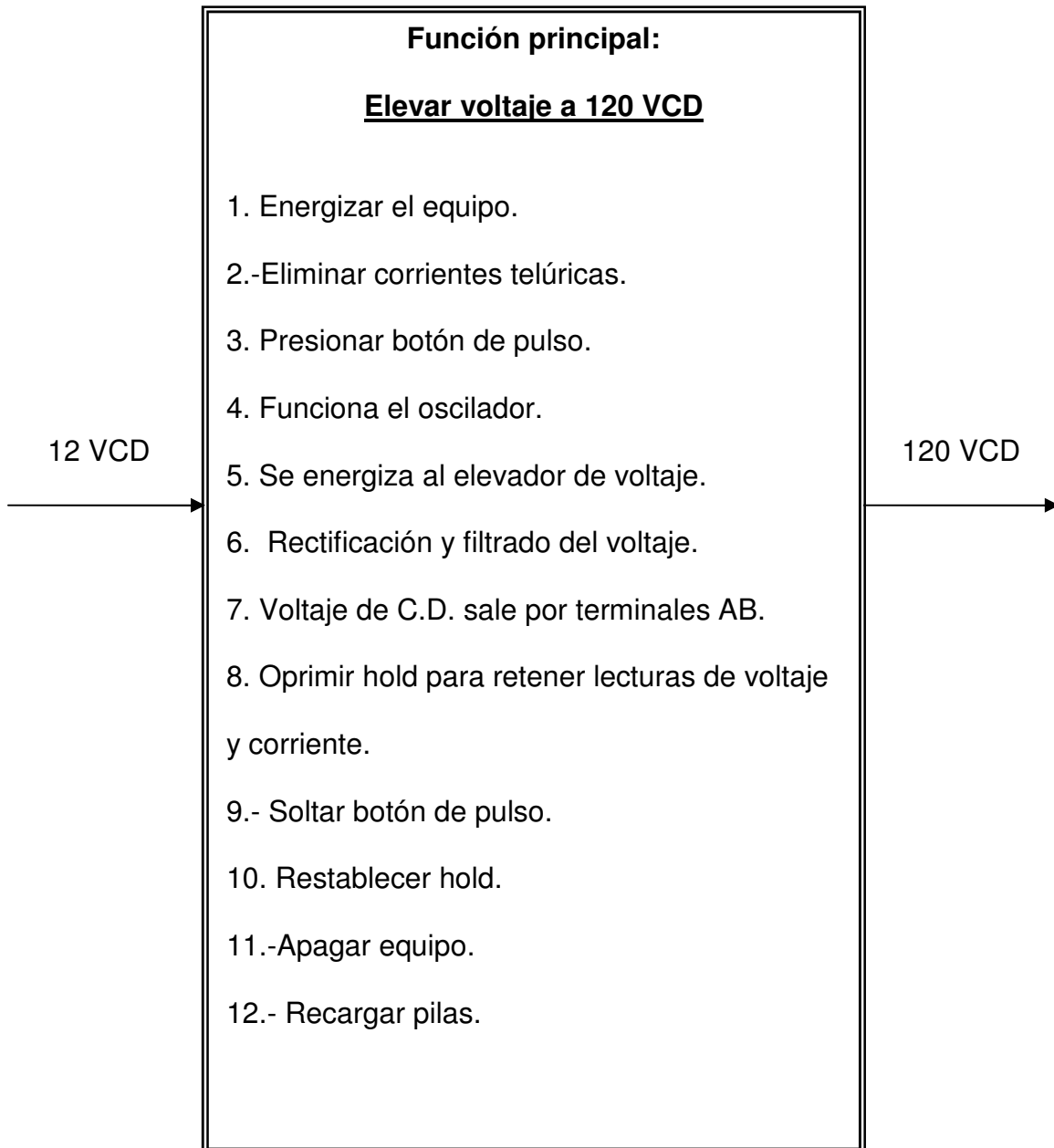



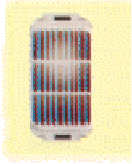









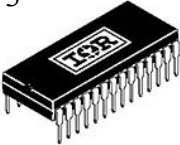
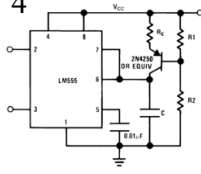






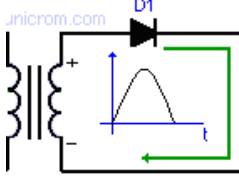
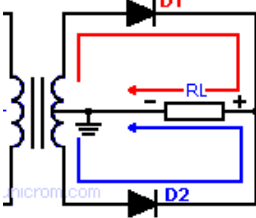
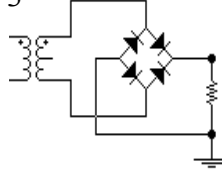








Figura 55. Diagrama funcional.

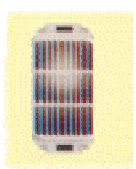

Con la ayuda de este análisis se examinan las diferentes formas en que se pueden lograr cada una de las funciones, las cuales se muestran en la siguiente carta morfológica.

III.8 Carta morfológica.

Tabla 5. Carta morfológica. Fuente: Catálogo STEREN®

<i>Función</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>
1. Energizar el equipo	2  Interruptor Termo magnético	3  Interruptor de fusibles	4  Interruptor sencillo	1  Sensor
2. Eliminar corrientes telúricas	2  Forma automática	3  Forma manual.	1  Combinación de ambos.	
3. Presionar botón de pulso.	3  Forma Permanente	4  Forma momentánea	1  Por medio de Sensor.	2  Temporizador
4. Funciona el oscilador.	2  Basado en transistores	1  Basado en un cristal de cuarzo o cerámico	3  Basado en circuito integrado	4  Combinación de los anteriores.

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
<p>5. Se energiza elevador de voltaje</p>	<p>3</p>  <p>Por medio de transistores</p>	<p>2</p>  <p>Por medio de SCR</p>	<p>1</p>   <p>Acoplamiento directo</p>	
<p>6. Rectificación y filtrado del voltaje.</p>	<p>1</p>  <p>Tipo media onda y capacitor</p>	<p>2</p>  <p>Onda completa y capacitor</p>	<p>3</p>  <p>Tipo puente y capacitor</p>	
<p>7. Voltaje de C.D. sale por terminales A,B.</p>	<p>1</p>  <p>Tipo DB-9, hembra para computadora</p>	<p>2</p>  <p>Caiman Tipo tijera.</p>	<p>3</p>  <p>Por medio de un contacto</p>	<p>4</p>  <p>Conector tipo banana y su hembra</p>
<p>8. Oprimir hold.</p>	<p>3</p>  <p>cola de rata</p>	<p>2</p>  <p>Interruptor momentáneo, 2 terminales</p>	<p>4</p>  <p>deslizable con base para atornillar</p>	<p>1</p>  <p>Operación temporizada.</p>

Función	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
<p>9. Soltar botón de pulso.</p>	<p>3</p>  <p>Forma Permanente</p>	<p>4</p>  <p>Forma momentánea</p>	<p>1</p>  <p>Sensor.</p>	<p>2</p>  <p>Temporizador</p>
<p>10. Restablecer hold.</p>	<p>3</p>  <p>cola de rata</p>	<p>2</p>  <p>Interruptor momentáneo, 2 terminales</p>	<p>4</p>  <p>deslizable con base para atornillar</p>	<p>1</p>  <p>Operación temporizada.</p>
<p>11. Apagar equipo.</p>	<p>2</p>  <p>Interruptor Termo magnético</p>	<p>3</p>  <p>Interruptor de fusibles</p>	<p>4</p>  <p>Interruptor sencillo</p>	<p>1</p>  <p>Sensor</p>
<p>12. Recargar pilas.</p>	<p>3</p>  <p>Cargador externo</p>	<p>2</p>  <p>Cargador interno</p>	<p>1</p>  <p>Cambiar pilas</p>	

Cada opción tiene un número en la parte superior izquierda; la opción con el número mayor corresponde al elemento que mejor cumple la función, tomando

en cuenta la economía, sencillez del equipo y la funcionalidad del mismo. El análisis de cada opción se hace a continuación.

III.9 Análisis y selección.

En la carta morfológica anterior se hizo una previa selección de cada elemento que conforma el equipo. En este punto, se explican las especificaciones de cada componente elegido.

1. Energizar y apagar el equipo (11).

El elemento más adecuado en precio y funcionalidad es un interruptor de dos posiciones de al menos 3 polos para energizar al circuito oscilador y a los medidores de voltaje y corriente en forma individual, ya que manejan voltajes diferentes. La opción 11 del análisis de funciones queda incluida en esta sección.

2.-Eliminar corrientes telúricas.

La opción más sencilla para realizar esta operación es a través de resistencias variables que pueden variarse manualmente. Un circuito automático es más complejo. También, pueden eliminarse cambiando la polaridad de la corriente a determinado tiempo.

3. Presionar y soltar el botón de pulso (9).

La opción más segura para el usuario es un botón de contacto momentáneo que permita soltarlo en caso de recibir una descarga accidental.

4. Funciona el oscilador.

La opción más barata y sencilla es por medio de una combinación de temporizador en circuito integrado que asocia pocos componentes para su funcionamiento, y utilizar transistores de mediana potencia para proporcionar la corriente necesaria al subsuelo, ya que el circuito integrado por sí solo no puede manejar corrientes mayores a 1 Ampere.

5. Se energiza al elevador de voltaje.

El uso de transistores tipo darlington permite manejar varios amperes y son más fáciles de conseguir que los rectificadores controlados de silicio; y más baratos que otros elementos que sirven para controlar corrientes de esa magnitud.

6. Rectificación y filtrado del voltaje.

El rectificador que es más eficiente eléctricamente es el circuito tipo puente que está constituido por 4 diodos independientes, o por un elemento que integra los diodos en un solo encapsulado.

7. Voltaje de C.D. sale por terminales A y B.

La mejor opción para conectar y desconectar el voltaje que alimenta a los electrodos A y B es mediante conectores tipo banana y sus hembras; además de ser la más económica.

8. Oprimir y restablecer hold para retener lecturas de voltaje y corriente (10).

El botón que permite mantener las lecturas de los medidores de potencial y corriente aún después de soltar el botón es deslizable.

12.- Recargar pilas.

Se sugiere el uso de pilas recargables, para evitar un gasto excesivo al intercambiar pilas cada vez que se requiera. Un cargador externo no es excesivamente caro y no interviene en el funcionamiento normal del equipo.

III.10 Diseño detallado.

Las preguntas base del diseño del equipo fueron:

1.- ¿Cuál es la profundidad teórica máxima que se pretende analizar con este equipo?

La profundidad depende del tipo de arreglo usado; así por ejemplo, si el arreglo utilizado es el Schlumberger, la profundidad teórica de investigación es $AB/2$, mientras que si es utilizado el arreglo Wenner, la profundidad teórica es $AB/3$. Donde $A B$ es la distancia entre los electrodos de corriente (Boyd, 1996). Se consideró una distancia máxima AB de 120 m suponiendo el caso de un arreglo Schlumberger. Por lo que la profundidad de exploración teórica es de 60 m, esto dependerá de las características del terreno.

2.- ¿Cuánta corriente de carga, potencial natural y potencial inducido se generarán considerando $AB = 120$ m?

Un terreno aluvial (granular) está compuesto principalmente de mezclas de arena, arcilla y grava, este tipo de materiales se relacionan con la presencia de agua. Las resistividades de estos materiales se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resistividades de materiales que integran un aluvión. Fuente: Custodio y Llamas (2001)

Material	Resistividad
Arcilla	10-100 Ω -m.
Arena	130-1000 Ω -m.
Grava	100-10000 Ω -m.

La resistividad promedio del terreno varía de acuerdo a combinaciones de los materiales y otras variables como: temperatura, presión, humedad, salinidad, etc.

Para tener una referencia de la corriente promedio que puede circular en terrenos aluviales cuando $AB = 120$ m, se realizaron mediciones de corriente y potencial en un terreno granular cercano al basurero municipal de Zaachila, Oaxaca, a un costado de la laguna de lixiviados. Este terreno es de composición granular, predominando zonas arcillosas humedecidas por los lixiviados (Figura 56).



Figura 56. Laguna de lixiviados.

El equipo con el que se hicieron las mediciones fué diseñado en el CICESE y está a cargo del Dr. Salvador Belmonte en el CIIDIR-Unidad Oaxaca.

Se observa en la Figura 57 del lado izquierdo el banco de pilas que abastecen de energía eléctrica al equipo, del lado derecho se tiene al transmisor de corriente con el receptor integrado en el mismo módulo. En la parte posterior al equipo se observan los electrodos enterrados en el suelo.



Figura 57. Equipo para mediciones geoelectricas utilizado.

Los resultados de los 3 sondeos realizados, se muestran en las Tablas 7, 8 y 9 siguientes.

Tabla 7. Sondeo 1 tipo Schlumberger efectuado en la laguna de lixiviados en Zaachila.

Sondeo 1 tipo Schlumberger con distancia máxima A, B de 26 m.							
Fecha del sondeo: 1 de febrero del 2007.							
AB/2	MN	P. Nat.	P. Ind.	I	V/I	k	pa
m	m	mV	mV	mA	Ohms	m	ohm-m
0.5	0.3	-58	-1476	29.077	1,418	2.618	127.7
1	0.3	-54	300	24.6	354	10.472	150.7
1.5	0.3	-51	-152	29.044	101	23.562	81.9
2	0.3	49.86	86	28.117	36.14	41.888	53.8
2.5	0.3	48	66	28.422	18	65.45	41.5
3	0.3	-47	-57	29.441	10	94.248	32
3.5	0.3	43.8	48.9	21.855	5.10	128.282	29.9
4	0.3	43	47.1	26.122	4.10	167.552	26.3
5	0.3	41.2	44.3	32.889	3.10	261.8	24.7
6	0.3	40.7	42.7	34.789	2.00	376.992	21.7
6	1	106	112	34.598	6.00	113.0976	19.6
7	1	102.9	107.6	40.934	4.70	153.9384	17.7
8	1	95.1	98.5	39.168	3.40	201.0624	17.5
9	1	96.6	93.8	46.591	2.80	254.4696	15.3
10	1	88.1	91.2	54.617	3.10	314.16	17.8
11	1	83.8	86	46.872	2.20	380.1336	17.8
13	1	70.8	80.9	56.196	10.10	530.9304	95.4

El potencial natural oscila entre +106 mV y -58 mV.

El potencial inducido oscila entre +300 mV y -1476 mV.

La corriente máxima es de 56.196 mA.

Hay un valor máximo de resistividad de 150 Ω -m, cerca de la superficie, y conforme va aumentando la distancia entre electrodos de corriente la resistividad aparente ρ_a va decreciendo. En $AB/2 = 13m$ existe un cambio drástico en la resistividad ($\rho_a = 95.4 \Omega$ -m), éste puede denotar una variación en la estratigrafía.

Tabla 8. Sondeo 2 tipo Schlumberger efectuado en la laguna de lixiviados en Zaachila.

Sondeo 2 tipo Schlumberger con distancia máxima A,B de 40 m.							
Fecha del sondeo: 8 de febrero del 2007.							
AB/2	MN	P. Nat.	P. Ind.	I	V/I	k	pa
m	m	mV	mV	mA	Ohms	m	ohm-m
1	0.3	14.9	-694	133.76	708.90	10.472	55.5
1.5	0.3	16.5	-265	167.45	281.50	23.562	39.6
2	0.3	18	-79.9	129.79	97.90	41.888	31.6
2.5	0.3	19.8	-28.3	133.31	48.10	65.45	23.6
3	0.3	21.2	1.2	104.8	20	94.248	18.0
3.5	0.3	22.3	9.5	101.11	12.80	128.282	16.2
4	0.3	30.8	26.5	49.555	4.30	167.552	14.5
5	0.3	26.2	19.9	130.82	6.30	261.8	12.6
6	0.3	27.4	23.3	128.52	4.10	376.992	12.0
6	1	-393	-405	127.69	12	113.0976	10.6
7	1	-320	-330	135.79	10	153.9384	11.3
8	1	4	10	88.021	6	201.0624	13.7
9	1	-298	-303	116.26	5	254.4696	10.9
10	1	278	282	92.685	4	314.16	13.6
11	1	273	276	109.21	3	380.1336	10.4
13	1	261	263	148.05	2	530.9304	7.2
15	1	247	249	132.93	2	706.86	10.6
20	1	97.6	99.1	127.42	1.50	1256.64	14.8

En este sondeo se obtuvieron los siguientes valores importantes:

El potencial natural oscila entre +278 mV y -393 mV.

El potencial inducido oscila entre +282 mV y -694 mV.

La corriente máxima es de 167.45 mA.

En este sondeo, las resistividades van decreciendo suavemente, iniciando con 55.5 ohms-m, y finalizando con 14.8 Ω -m.

Tabla 9. Sondeo 3 tipo Schlumberger efectuado en la laguna de lixiviados en Zaachila.

Sondeo 3 tipo Schlumberger con distancia máxima AB de 40 m.							
Fecha del sondeo: 10 de febrero del 2007.							
AB/2	MN	P. nat	P. Ind.	I	V/I	<i>k</i>	pa
m	m	mV	mV	mA	Ohms	m	ohm-m
0.5	0.3	-13	1862	57.064	1,875	2,618	86
1	0.3	-14	512	48.082	526	10.472	114.6
1.5	0.3	-14	222	50.46	236	23.562	110.2
2	0.3	-13	55	39.223	68	41.888	72.6
2.5	0.3	-13	18	34.793	31	65.45	58.3
3	0.3	-13	1	33.541	14	94.248	39.3
3.5	0.3	-12	-1	42.125	11	128.282	33.5
4	0.3	-12	-7	27.667	5	167.552	30.3
5	0.3	-12	-9	36.828	3	261.8	21.3
6	0.3	-12.6	-11.4	26.394	1,20	376.992	17.1
6	1	414	418	26.481	4	113.0976	17.1
7	1	399	401	28.203	2	153.9384	10.9
8	1	70	69	10.31	1	201.0624	19.5
9	1	38	41	52	3	254.4696	14.7
10	1	23	26	75.66	3	314.16	12.5
11	1	301	304	77.81	3	380.1336	14.7
13	1	94	98	148.24	4	530.9304	14.3
15	1	82	85	143.57	3	706.86	14.8
20	1	59	61	134.27	2	1256.64	18.7

En este sondeo se obtuvo que:

El potencial natural oscila entre +414 mV. y -14 mV.

El potencial inducido oscila entre +1862 mV. y -11.4 mV.

La corriente máxima es de 148.24 mA.

La resistividad más alta se encuentra cerca de la superficie y va disminuyendo al incrementar la distancia AB/2, al igual que en los otros sondeos. Esta disminución gradual en la resistividad se debe a que a medida que la distancia

entre electrodos AB se va incrementando, la corriente va penetrando más en el subsuelo hasta detectar la capa que contiene los lixiviados, que es menos resistiva.

Para diseñar el circuito compensador de potencial natural, se realizaron mediciones exclusivamente de potencial natural en un terreno perteneciente al CIIDIR, para observar el comportamiento del mismo en otro lugar.

Este terreno también es una mezcla de arenas y arcilla, como se muestra en la Figura 58.



Figura 58. Sección del terreno del CIIDIR.

Las mediciones de potencial natural se realizaron con un multímetro digital con auto rango modelo MY68 de la marca MASTECH y tiene una exactitud del 1% y una sensibilidad de 1 mV, el cual se muestra en la Figura 59.



Figura 59. Multímetro utilizado para medir potencial natural.

Para disminuir la resistencia de contacto entre el terreno y los electrodos utilizados se agregó una solución de NaCl diluida en agua normal. El electrodo se inserta en el subsuelo, se saca, y en el agujero se vierte la solución salina, después se vuelve a meter el electrodo, esto se observa en la Figura 60. Los electrodos fueron contruidos de varillas de acero para minimizar la polarización de los mismos.



Figura 60. Electrodo en terreno humedecido con agua y NaCl.

Las mediciones se realizaron a 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, y 40 m, a intervalos de 1 minuto hasta llegar a 7 minutos. La conexión del multímetro, se muestra en la Figura 61.



Figura 61. Medición de potencial natural.

Los parámetros calculados de las pruebas se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados obtenidos en la medición del potencial natural.

	5m.	10m.	15m.	20m.	25m.	30m.	40m.
0 min.	30 mv.	-55 mv.	154 mv.	-7.4 mv.	-68.4 mv.	77.2 mv.	-8.5 mv.
1 min.	-2 mv.	-40 mv.	161 mv.	14.2 mv.	-73 mv.	95.6 mv.	-9.2 mv.
2 min.	-20 mv.	-30 mv.	163 mv.	26.6 mv.	-82.4 mv.	104.7 mv.	-5.1 mv.
3 min.	-21 mv.	-27 mv.	167 mv.	33 mv.	-92.3 mv.	107.4 mv.	-3 mv.
4 min.	-22.5 mv.	-24 mv.	170 mv.	36.4 mv.	-96.6 mv.	107.2 mv.	1 mv.
5 min.	-23 mv.	-23.2 mv.	171 mv.	39.3 mv.	-96.5 mv.	107.8 mv.	4 mv.
6 min.	-24 mv.	-23.9 mv.	173 mv.	40.8 mv.	-95.1 mv.	108.4 mv.	5.5 mv.
7 min.	-25 mv.	-24.6 mv.	174 mv.	40.3 mv.	-98.1 mv.	108.6 mv.	7 mv.

Conclusiones correspondientes a las mediciones realizadas en la laguna de lixiviados y el terreno del CIIDIR:

- El valor máximo de corriente medida fué de 167.45 mA que se observó en el sondeo 2.
- El potencial inducido varía entre 1862 mV obtenido en el sondeo 3 y – 1476 en el sondeo 1.
- El potencial natural va de 414 mV en el sondeo 3 hasta -393 mV en el sondeo 2.
- Con respecto al potencial natural medido en el CIIDIR se observa que es una corriente de tipo CD, que a veces mantiene una polaridad fija, cambia de intensidad con el tiempo y en ocasiones de polaridad. En los primeros 4 minutos, se incrementa o decrece relativamente rápido, después del minuto 5 se observaron menores variaciones.

Estos datos, se tomaron en cuenta para el diseño del equipo. En la Figura 62 siguiente se ilustra el diagrama actualizado de bloques, del equipo construido.

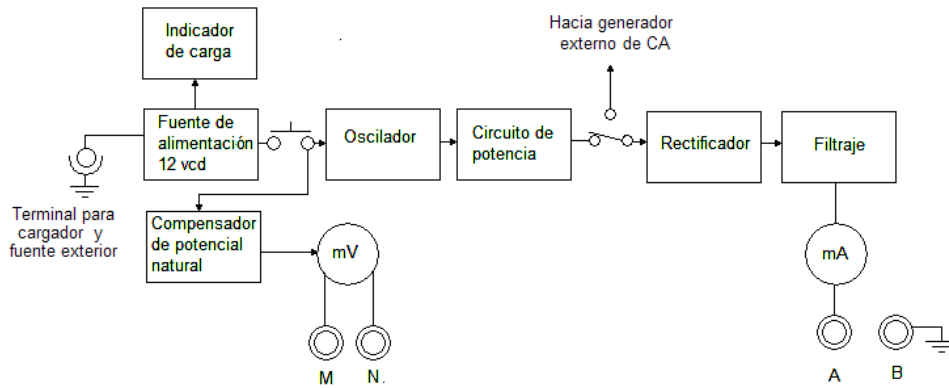


Figura 62. Diagrama de bloques.

A continuación se detalla cada sección:

III.10.1 La fuente de alimentación.

Esta compuesta por dos pilas de 12 VCD con una capacidad de 7 Ah. (Ampere-hora) la cual es una unidad de medición que cuantifica una cantidad de corriente por cantidad de tiempo. Por ejemplo, si 1 ampere es tomado de una batería durante 5 hrs., el consumo será de 5 Ah. Es una medición de carga y consumo eléctrico. En el anexo A se detalla el diseño y aplicación de una fuente de voltaje que suministra 12 VCD, construida a partir de un generador de polos permanentes, que puede sustituir a las pilas de ácido-plomo.

III.10.2 Indicador de carga de las baterías.

El circuito consta de 3 diodos led conectados a un diodo zener de diferente voltaje; este circuito se ilustra en la Figura 63.

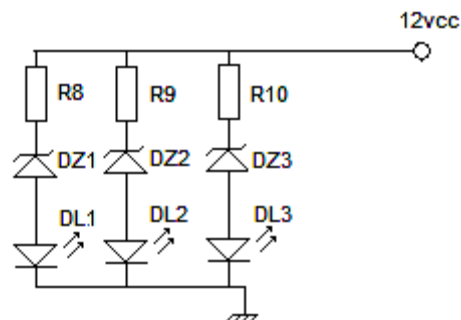


Figura 63. Indicador de carga de baterías.

Cada diodo led consume 30 mA, y el voltaje es de 12 VCD, las resistencias se calcularon con la ecuación (1.3)

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12V}{30mA} = 400 \Omega, \text{ el valor comercial más cercano es de } 470 \Omega.$$

La potencia de disipación de la resistencia es,

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(12V)^2}{470\Omega} = 0.306 \text{ W, cuyo valor nominal arriba de éste es de } 0.5 \text{ W.}$$

Los diodos zener que componen al equipo tienen las siguientes características:

$$DZ1=7.5 \text{ V a } \frac{1}{2} \text{ W,}$$

$$DZ2=4.7 \text{ V a } \frac{1}{2} \text{ W,}$$

$$DZ3=3.3 \text{ V a } \frac{1}{2} \text{ W.}$$

El funcionamiento es el siguiente: Cuando la carga de las baterías está completa, los 3 diodos led brillan, al ir acabándose la carga y llegar a menos de 7.5 V, el diodo DL1 deja de iluminarse indicando que existe la mitad del voltaje aproximadamente.

Si la carga está por debajo de 4.7 V, el diodo DL2 también deja de brillar, quedándose encendido sólo el diodo DL3, el cual se apaga una vez que el voltaje está por debajo de 3.3 V.

III.10.3 El oscilador.

La base del funcionamiento del equipo es un circuito oscilador que se energiza con 12 VCD para generar pulsos de aproximadamente 1 kHz. El circuito integrado utilizado es el LM555 funcionando como oscilador astable; la salida en terminal 3 corresponde a un pulso cuadrado de forma simétrica debido al diodo D en paralelo con R_{T2} . Esta señal de salida se activa por un tiempo y

después de desactiva durante el mismo tiempo que permanece activada, mas no se hace negativo. El circuito ilustra en la Figura 64.

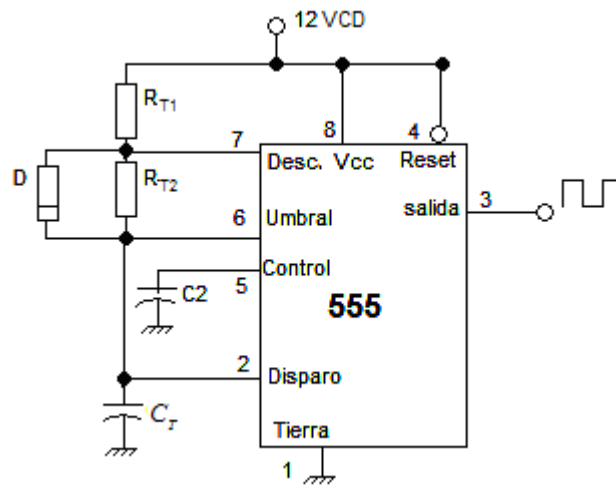


Figura 64. Circuito oscilador.

Los elementos se calcularon de la siguiente forma:

Se requiere una frecuencia de 1 kHz aproximadamente. El periodo o duración total de un ciclo es igual a la suma del tiempo de carga y el tiempo de descarga del capacitor C_T conectado en terminal 2 según ecuaciones (1.5) y (1.6).

Los tiempos de carga y descarga del capacitor C_T son iguales, por lo que $R_{T1} = R_{T2}$.

Se sabe que el periodo está relacionado con la frecuencia conforme a la ecuación (1.8):

$$T = \frac{1}{f}, \text{ por lo que } T = \frac{1}{1000} = 0.001 \text{ s para un ciclo completo.}$$

Considerando sólo el tiempo de carga

$$\frac{0.001\text{s}}{2} = (R_{T1}) (C_T).$$

Calculando R_{T1}

$$\frac{0.0005\text{s}}{C_T} = R_{T1}.$$

Se selecciona un valor conocido de $C_T = 0.1 \text{ uF}$.

Por lo que,

$$R_{T1} = R_{T2} = \frac{0.0005s}{C_T} = \frac{0.0005s}{0.1\mu F} = 5 \text{ k}\Omega.$$

Cuyo valor comercial más cercano es 5.6 k Ω , con este valor de resistencia, la frecuencia de oscilación es aproximadamente de 1.12 KHz. Entonces, los elementos tienen los siguientes valores:

$$R_{T1} = R_{T2} = 5.6 \text{ k}\Omega.$$

$$C_T = 0.1 \mu F.$$

C2= se deja fijo a 0.01 μF .

D=1N4001 o similar

III.10.4 Circuito de potencia.

El voltaje se eleva por la acción del siguiente circuito:

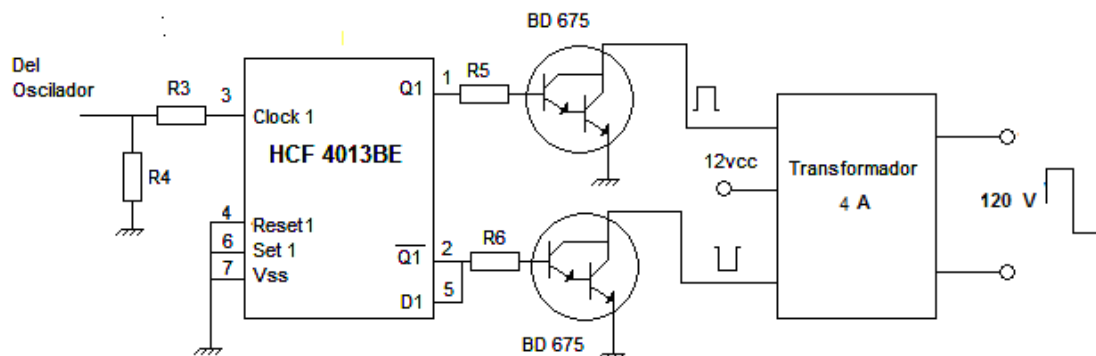


Figura 65. Circuito de potencia.

El circuito integrado HCF 4013BE es un circuito de memoria doble que tiene 2 salidas (terminales 1 y 2) que cambian de estado alternadamente a cada pulso de reloj que entra por terminal 3.

Los transistores son tipo darlington NPN y soportan 4 Amperes en su circuito de colector (NTE electronics, 2005); estos elementos se encuentran conectados para funcionar como switch, por lo que a cada pulso que se recibe en la base, permiten que el transformador amplifique los doce voltios en forma alternada, obteniéndose a la salida del mismo 120 VCA, mientras las pilas tengan la carga completa. Los transistores pueden cambiarse para soportar

mayores corrientes, por ejemplo el TIP 120 o TIP 122 que soportan 5 A en el colector, o el MJ3001 que soporta 10 A (NTE Electronics, 2005). El transformador también debe aumentarse en el amperaje.

El transformador cuenta con 24 VCA en el secundario y 120 VCA en el primario. Se conectó funcionando como elevador, donde el circuito primario es el devanado de 24 VCA. Un valor de 2.5 A para el fusible de entrada es más que suficiente para soportar la corriente máxima de carga de 0.5 A, ya que la relación de transformación es de 5:1, tomando en cuenta el cociente $120 \text{ VCA} / 24 \text{ VCA}$. En este caso, se colocó un fusible de 4 A para tener un margen razonable para la corriente de carga, y las pérdidas que pudieran presentarse.

Las resistencias R3 y R4 de $3.3 \text{ k}\Omega$ son un divisor de voltaje que asegura que a la terminal de clock no entren más de 6 VCD. R5 y R6 limitan la corriente de base de los transistores, siendo éstas de $2.7 \text{ k}\Omega$. Todas las resistencias son de $\frac{1}{2} \text{ W}$.

III.10.5 Rectificador de voltaje y filtrado.

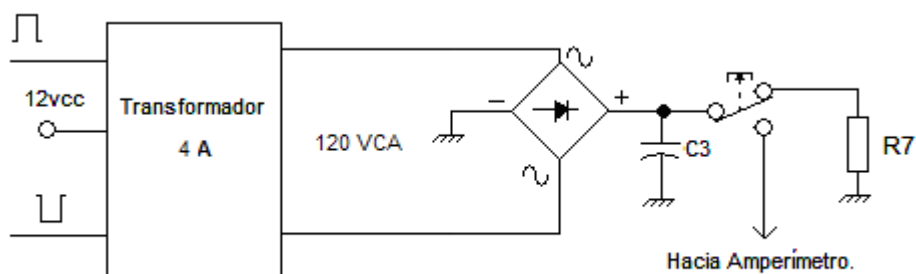


Figura 66. Circuito rectificador.

La corriente máxima que se mide es 0.5 A entre electrodos AB, así que un puente de diodos de 2 A es suficiente, con un voltaje mínimo de 300 VCD.

El capacitor encargado de disminuir el rizado en la salida tiene un voltaje de trabajo de 300 VCD, para soportar el voltaje que entrega el puente de diodos

(recordar que en una onda cuadrada alterna el voltaje pico es equivalente al valor rms), éste se despeja de la ecuación (1.20), tomando en cuenta que, según Malvino (1994) en un rectificador de onda completa la frecuencia de la señal de salida es el doble de la entrada, por lo que la frecuencia teórica de salida para este circuito es igual a 2.24 kHz.

Sustituyendo valores se obtiene:

$$C = \frac{I}{f.V_R} = \frac{0.5A}{(2240Hz)(120VCA)} = 1.86 \mu F.$$

Donde $2.2 \mu F$ es el valor comercial.

La resistencia R7 sirve para descargar el capacitor y no presentar un riesgo de descarga eléctrica en futuras reparaciones en la tarjeta de componentes; si el capacitor debe descargarse en 3 segundos.

$$R7 = \frac{3s}{2.2\mu F} = 1.36 M \Omega, \text{ donde } 2.2 M \Omega \text{ es el valor comercial más cercano.}$$

La potencia de disipación para R7 se calcula con la ecuación (1.4)

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(120V)^2}{2.2M\Omega} = 0.006 W.$$

III.10.6 Compensador de potencial natural.

De los datos obtenidos a partir de la medición de potencial natural en los sondeos de prueba cuyos resultados se muestran en las Tablas 7 a 10, (donde se observan los valores máximos tanto positivos y negativos que se obtuvieron, considerando que el valor absoluto del mismo no sobrepasa 2 VCD), se diseñó el circuito ilustrado en la Figura 67:

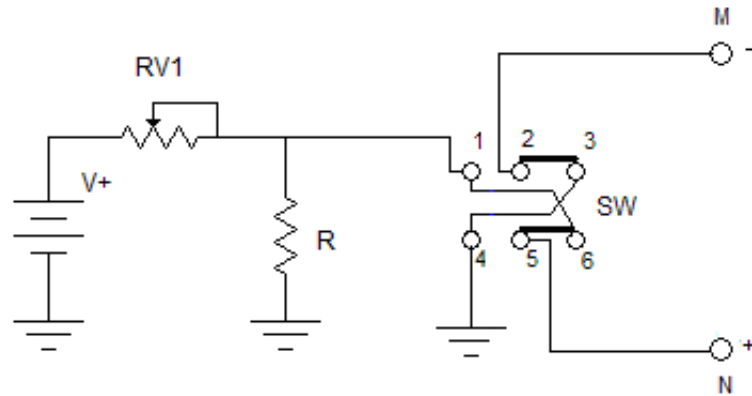


Figura 67. Compensador de potencial natural.

Este circuito consta de una fuente de voltaje que puede ser obtenida de la misma fuente que alimenta al equipo, empleando un diodo zener para obtener el voltaje deseado, este voltaje alimenta un divisor construido por 1 resistencia variable (en su forma más simple) y una resistencia de valor fijo, y mediante un switch se puede invertir la polaridad del voltaje de salida en las terminales de la resistencia R, de tal forma que pueda compensarse un potencial natural (+) mediante un voltaje de fuente (-), y compensar un potencial natural (-) contrarrestándolo con un voltaje de fuente (+).

III.10.7 Medidor de corriente.

La corriente máxima a medir es de 0.5 A, por lo cual el amperímetro tiene una escala que permite medir 1 Ampere, con una resolución de 1 mA y una exactitud muy cercana al 1% o menor. La resolución se refiere a la capacidad del equipo para cambiar su lectura en intervalos de 1 mA, es el significado del dígito menos significativo.

Para Holman y Gajda (1986) la exactitud de un instrumento indica la desviación de la lectura con respecto a una entrada conocida, se presenta en porcentaje de la lectura de la escala completa.

III.10.8 Medidor de potencial inducido.

El voltímetro usado como receptor cuenta con una exactitud igual o menor al 1 %; resolución de 1 mV cuando mide valores de hasta 4 V; y tiene una impedancia de entrada de 10 M Ω .

III.10.9 Electrodo.

Según Boyd (1996) cuando los electrodos se polarizan se genera un potencial entre ellos y el subsuelo que puede interferir en la lectura final (recordar que se obtienen lecturas en milivoltios); debido a esto, los electrodos se construyeron con varillas de acero de 3/8" y 35 cm de largo. El acero es un material poco polarizable.

En la Figura 68, se observan algunos de los electrodos que se construyeron para poder realizar la inyección de corriente y la medición del potencial.

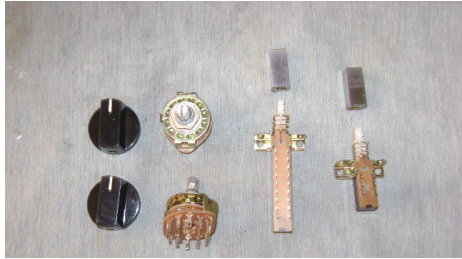

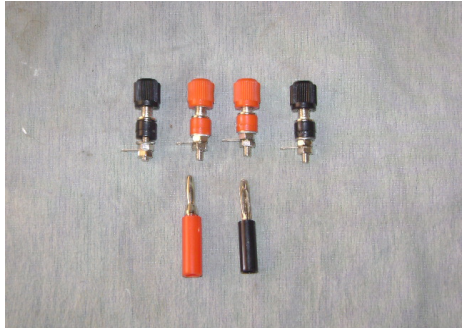



Figura 68. Electrodo de acero para conducir la corriente al subsuelo.

En el anexo B de este documento, se muestra el plano electrónico del equipo completo.

III.11 Construcción del Prototipo.

Procedimiento	Explicación.
 <p data-bbox="173 683 572 716">Figura 69. Multímetros utilizados.</p>	<p data-bbox="683 338 1422 488">En esta fotografía se observan los dos multímetros que son usados, ya sin sus protecciones de plástico, uno en función permanente de voltímetro y otro en función permanente de amperímetro.</p> <p data-bbox="683 521 1422 629">Se dejan fijas las escalas más pequeñas para que la lectura que se obtenga sea lo más exacta posible.</p>
 <p data-bbox="173 1131 582 1164">Figura 70. Elementos eliminados.</p>	<p data-bbox="683 786 1422 893">A cada tarjeta de multímetro se le tuvieron que quitar algunos elementos necesarios para poderse fijar a la base de acrílico.</p> <p data-bbox="683 927 1422 1115">En la fotografía se encuentran dentro de un círculo el botón de encendido (arriba), Un par de resistencias variables que sirven para cambiar la exactitud del multímetro, y el botón de retención de datos (hold).</p>
 <p data-bbox="173 1556 632 1590">Figura 71. Vista posterior de la tarjeta.</p>	<p data-bbox="683 1220 1422 1364">Se observa una vista posterior de la tarjeta de circuitos de un multímetro, en la cual se soldan las dos resistencias variables tipo preset que anteriormente estaban por la parte posterior.</p>
 <p data-bbox="173 1951 488 1984">Figura 72. Transformador.</p>	<p data-bbox="683 1646 1422 1753">El transformador que se utilizó en el proyecto es un transformador de 4 A con 24 VCA en el primario y 120 VCA en el secundario.</p>

 <p>Figura 73. Interruptores.</p>	<p>Esta fotografía muestra de izquierda a derecha las perillas de baquelita que se usaron en los dos selectores de funciones; los cuales son de 3 polos y 4 tiros, enseguida se observa el botón que sirve para energizar el equipo y el botón que alimenta el voltaje al subsuelo.</p>
 <p>Figura 74. Resistencias variables.</p>	<p>Se observan las tres resistencias variables que componen el circuito compensador de potencial natural, y bajo cada una de ellas están las perillas de baquelita.</p>
 <p>Figura 75. Conectores.</p>	<p>Se pueden observar en esta fotografía los conectores hembra y macho que se utilizaron para conectar las terminales de los electrodos de potencial y de corriente.</p>
 <p>Figura 76. Cables y accesorios.</p>	<p>Aquí se encuentran el conector hembra y macho que sirven para conectar el cargador de pilas externo; el cable que sirve para realizar todas las conexiones, las terminales para conectar las baterías y los caimanes que se usan para energizar los electrodos de corriente.</p>

	<p>Se muestran las dos pilas recargables de ácido-plomo que sirven para energizar el equipo.</p> <p>Tienen larga vida útil, ofrecen 12 voltios y una capacidad de 7 Amperes-hora.</p> <p>Se conectaron en paralelo para obtener el doble de corriente, lo que se traduce en mayor tiempo de funcionamiento del equipo.</p>
	<p>En esta imagen se encuentran los elementos semiconductores que componen el circuito: el puente de diodos, los 3 diodos led, los transistores darlington que se usaron para obtener el voltaje alterno en el transformador, el circuito integrado oscilador y el circuito integrado flip-flop, las bases en que se montaron y los diodos zener del circuito indicador de carga de las baterías.</p>
	<p>Estas son las resistencias utilizadas en el circuito, la más grande es de alambre, y se usa para descargar el capacitor encargado de filtrar el voltaje de salida.</p> <p>Todas las resistencias que se encuentran debajo de ella son de carbón y con una potencia de disipación de 1/2 de watt.</p>
	<p>Los 3 capacitores que se usaron se muestran en esta imagen, el más grande es de 470 uF a 250 voltios, es de tipo electrolítico, al igual que el de la izquierda.</p> <p>Los dos más pequeños son los capacitores que necesita el circuito oscilador para funcionar. El de en medio es de cerámica.</p>

 <p>Figura 81. Portafusibles y fusibles.</p>	<p>Aquí se muestran las bases porta fusibles y los fusibles que se emplearon para proteger el circuito contra una sobrecarga o un cortocircuito interno.</p>
 <p>Figura 82. Accesorios de la cubierta</p>	<p>Estos son los accesorios que se utilizaron en la caja; se observan el par de bisagras, los dos broches que mantienen cerrada la puerta y la manija con la que es posible transportar el equipo en forma cómoda.</p>
 <p>Figura 83. Acrílico taladrado.</p>	<p>A continuación el acrílico es taladrado con cuidado para evitar que se quiebre, los bordes de las ranuras por donde se colocaron las carátulas de los multímetros fueron hechas con broca y taladro, después mediante una segueta se quitaron los restos de acrílico, para finalmente con una lima plana alisar los bordes.</p>
 <p>Figura 84. Limado de bordes</p>	<p>Con una lima triangular se suavizan los bordes de los agujeros en donde se colocaron los botones de encendido y pulso.</p>

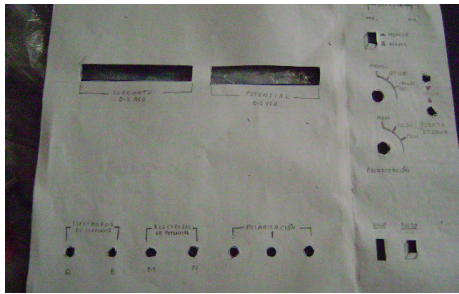


Figura 85. Plantilla de papel.

Fué necesario crear una plantilla en papel con los rótulos que lleva la base de acrílico, para dibujar los elementos a la distancia correcta.

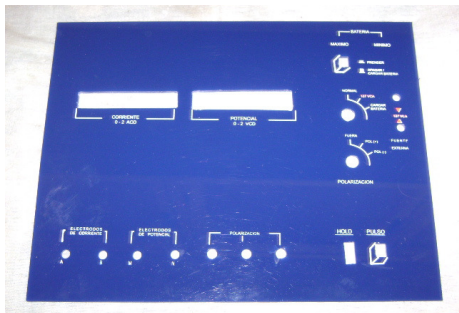


Figura 86. Acrílico terminado.

Finalmente, se muestra el acrílico ya con todos los rótulos de las funciones correspondientes a cada ranura y orificio. En el anexo C se muestran las medidas del acrílico.

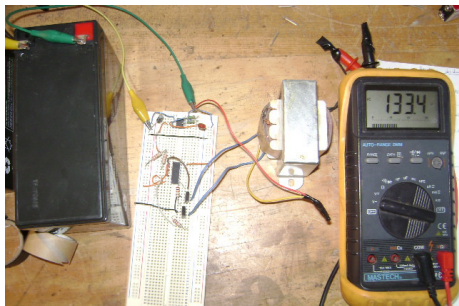


Figura 87. Circuito oscilador.

El circuito oscilador fué probado en un protoboard para observar su funcionamiento, antes de proceder a realizar el circuito sobre la tablilla fenólica.

Se observa que se obtienen 133.4 voltios de corriente alterna en la salida del transformador, posteriormente, con la rectificación y el filtrado este voltaje se incrementó un poco.

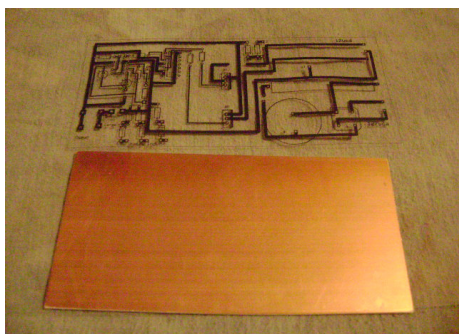
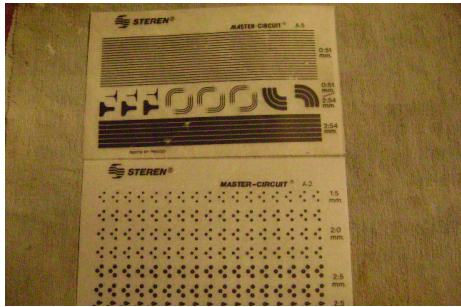
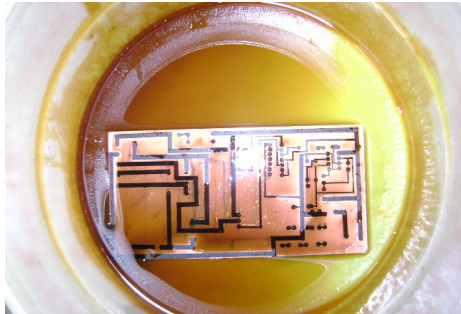
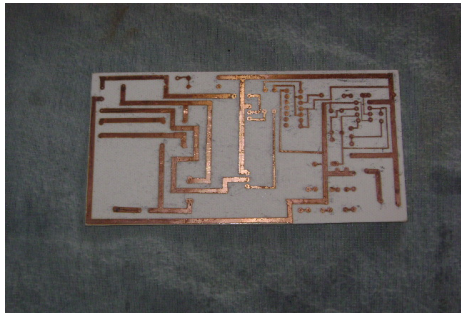
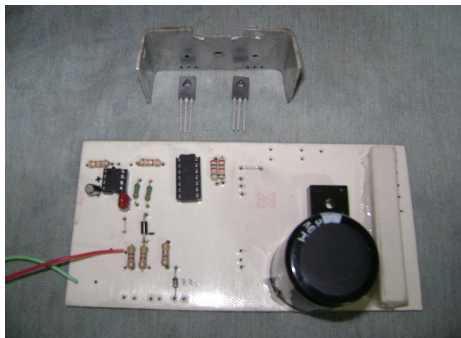


Figura 88. Plantilla del circuito.

Las pistas del circuito fueron obtenidas en un acetato para dibujarlas sobre la tablilla fenólica.

 <p>Figure 89. Plantilla de pistas.</p>	<p>Se muestran en esta imagen las plantillas de símbolos y pistas para prototipos, las cuales se pegaron a presión a la tablilla fenólica para protegerlas del ácido, habiendo dibujado previamente con un lápiz las pistas del circuito</p>
 <p>Figure 90. Construcción de la tarjeta.</p>	<p>Se observa el ácido especial para este tipo de proyectos, las pistas se observan de color negro.</p>
 <p>Figure 91. Tarjeta terminada.</p>	<p>Aquí se observan las pistas de cobre de la tarjeta donde se soldaron los elementos que integran el circuito.</p>
 <p>Figure 92. Montaje de elementos.</p>	<p>En la tarjeta, se muestran la mayoría de los elementos ya montados y soldados a las pistas de cobre.</p> <p>Los transistores darlington se montaron a un disipador de calor para evitar que se dañen por un posible sobrecalentamiento. Se debe poner grasa de silicón entre la base del transistor y el disipador para asegurar una buena transmisión del calor.</p>

 <p>Figura 93. Circuito completo.</p>	<p>El circuito oscilador ya armado y funcionando; se observan los 3 diodos led del indicador de baterías prendidos.</p> <p>El voltaje mostrado en esta imagen es alterno ya que se midió en la salida del transformador.</p>
 <p>Figura 94. Medición de corriente.</p>	<p>Mediante un multímetro en función de amperímetro de CD, se verificó el consumo de corriente del circuito sin carga, siendo de tan sólo 188.3 miliamperes.</p>
 <p>Figura 95. Construcción de la cubierta.</p>	<p>Se muestra la caja donde se colocó el resistímetro; las dimensiones son: 30 cm. de largo x 23 cm. de ancho y 20 cm. de alto.</p> <p>Se prefirió ensamblarla mediante un procedimiento denominado “cola de pato” para obtener la mayor rigidez y durabilidad de la misma.</p>
 <p>Figura 96. Cubierta terminada.</p>	<p>Se observan los broches y la manija ya instalados. En los anexos D y E se muestran las medidas que tiene este elemento.</p>

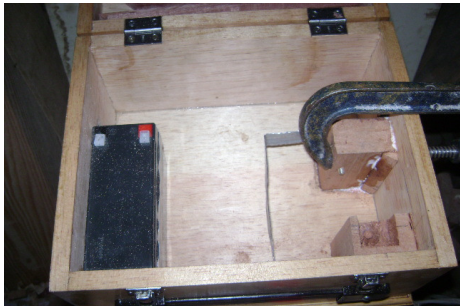


Figura 97. Sujeción de baterías.

Las pilas están firmemente soportadas a la caja para evitar que dañen a la tarjeta de componentes.

En esta foto se observan las laminillas que soportan las pilas al chasis, mediante tornillos.



Figura 98. Portafusibles terminado.

En la parte lateral de la caja se montaron tanto la base portafusibles y el conector macho para el cargador de pilas.



Figura 99. Multímetros en el acrílico.

Se fijan las tarjetas de ambos medidores mediante tornillos

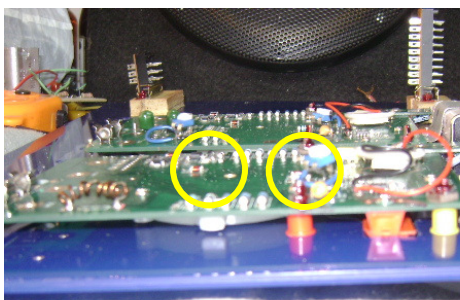


Figura 100. Soporte de los multímetros.

En esta fotografía, se observan las bases de plástico utilizadas para fijar firmemente las tarjetas al acrílico.

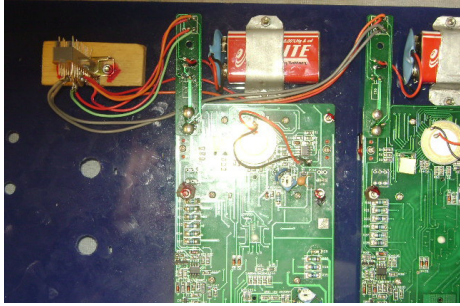


Figura 101. Vista posterior del tablero.

En esta imagen, se observan las pilas ya sujetas a la base; cada medidor tiene una pila independiente de la alimentación general para maximizar el tiempo de funcionamiento del equipo.

Se muestran también las conexiones de los multímetros al interruptor general.

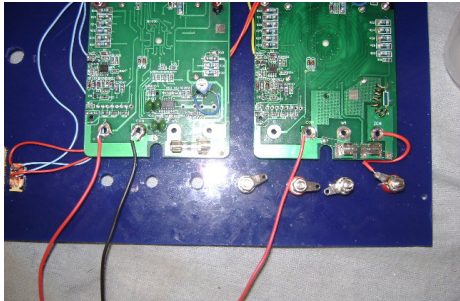


Figura 102. Conexión de cables.

Se muestra a continuación la conexión de las terminales del interruptor para el HOLD (a la izquierda) y las terminales de voltaje y corriente de los medidores que se conectaron posteriormente a los electrodos.

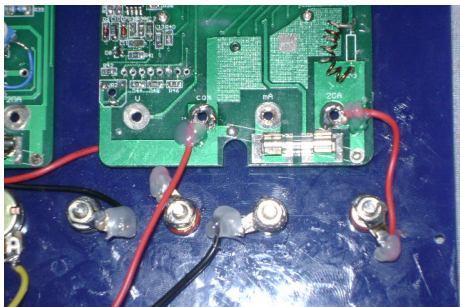


Figura 103. Instalación de conectores.

Se observan las terminales ya conectadas a los bornes de conexión de los medidores.

Se han apretado firmemente las terminales para evitar falsos contactos, y se les ha puesto silicona para evitar que los cables se puedan zafar con el uso.

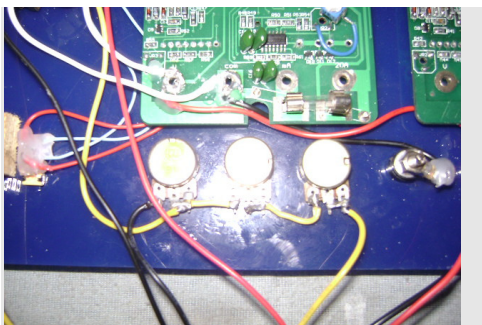
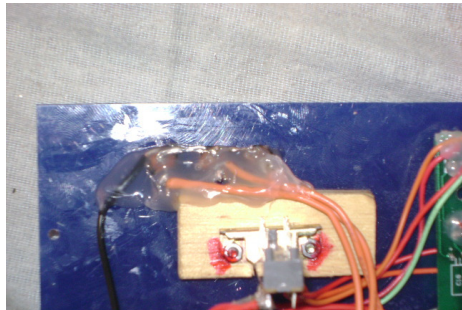
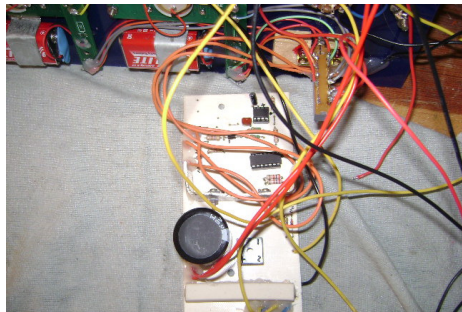


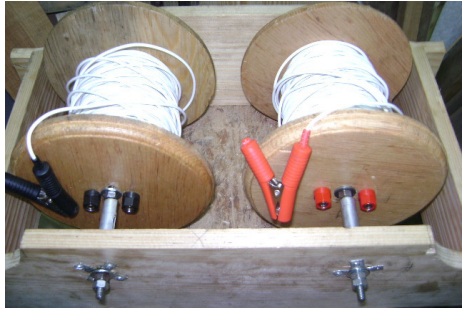


Figura 104. Compensador de potencial.

Cada una de las resistencias variables del circuito compensador de potencial natural son fijadas a la base y conectadas entre sí de acuerdo al diagrama (anexo B).

 <p>Figura 105. Cableado de interruptores.</p>	<p>La conexión de cada interruptor selector debe hacerse siguiendo cuidadosamente el diagrama para evitar confusiones, al terminar de soldar se recomienda poner silicón entre las terminales para que sirva de aislamiento y soporte mecánico para los cables.</p> <p>Se recomienda enumerar cada terminal con plumón indeleble para no cometer errores.</p>
 <p>Figura 106. Instalación de diodos led.</p>	<p>Los diodos indicadores del estado de las pilas se han instalado por medio de bases para diodo led y conectados, además de poner silicón para aislar y fijar los cables.</p>
 <p>Figura 107. Cableado de la tarjeta.</p>	<p>Deben conectarse cada uno de los cables a su lugar correspondiente en el circuito de la tarjeta de componentes.</p> <p>Se deben dejar lo suficientemente largos como para poder quitar el acrílico y recargarlo en la tapa de la caja sin jalar la tarjeta que esta sujeta a la base del cajón.</p>
 <p>Figura 108. Equipo finalizado.</p>	<p>En esta imagen, se muestra el equipo con todos los elementos ya montados en la base, incluidas las perillas de baquelita de cada control y los botones de encendido y retención de datos.</p>

 <p>Figura 109. Cargador de baterías.</p>	<p>Se observa en esta imagen el cargador de baterías utilizado.</p> <p>Se le ha instalado el conector hembra necesario.</p>
 <p>Figura 110. Carretes para el cable.</p>	<p>En esta fotografía, se muestra la base construida con madera que soporta ambos carretes de cable.</p>
 <p>Figura 111. Cable instalado en carretes.</p>	<p>Sobre una tapa de cada carrete se han dispuesto dos conectores hembra tipo phillips para que el cable pueda desconectarse del equipo al terminar cada prueba. En el otro extremo del cable en ambos carretes, se ha instalado un conector tipo caimán para lograr un contacto firme con los electrodos de corriente.</p>
 <p>Figura 112. Cables caimán–banana.</p>	<p>Se construyeron dos cables de 5 metros de longitud donde un extremo tiene un conector tipo banana y en el otro extremo un conector tipo caimán, con la finalidad de poder conectar los electrodos de potencial al equipo. En el anexo F se muestra el costo de cada elemento utilizado.</p>

En la Figura 113, se observa el equipo terminado.



Figura 113. Fotografía del prototipo.

En la Figura 114, se muestra el par de carretes con el conductor necesario para realizar las conexiones del equipo a los electrodos.



Figura 114. Fotografía de los carretes con cable.

Las funciones de cada control se explican en el anexo G; en el anexo H se proporcionan algunas soluciones para los problemas más comunes que pudieran presentarse y en el anexo I se muestra una guía sobre las características que se deben saber de cada elemento que integra el circuito electrónico, cuando se van a sustituir por estar dañados.

III.12 Validación del equipo diseñado.

Una vez que se ha construido el prototipo, es necesario validarlo; a este respecto Holman y Gajda (1986) comentan que los procesos de calibración implican una comparación del instrumento particular con:

- 1) Un patrón primario.
- 2) Un patrón secundario con una mayor exactitud que la del instrumento que se calibra, o
- 3) Con una fuente de entrada conocida.

Si se escoge la opción 1 para realizar la calibración, se necesita contar con un patrón nacional o internacional de alguna resistencia o de un material de resistividad conocida, con el cual podamos saber que la resistividad medida con este equipo se apega a la unidad patrón.

La opción 2, se refiere a comparar la resistividad obtenida mediante el equipo diseñado, y la obtenida con un equipo de marca calibrado para conocer el error de los datos.

La opción 3 supone realizar sondeos en zonas donde se conozca el tipo de material de las capas, los grosores de las mismas y la profundidad a la que se encuentra el manto freático; una vez que se tengan datos suficientes, se interpretan mediante un software especializado y se comparan los datos obtenidos con la realidad física del terreno bajo estudio.

Se utilizó la opción 2 y se calculó la desviación estándar que presenta el equipo; de acuerdo con la metodología que se presenta en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO IV. COMPARACIÓN.

IV.1 Desarrollo experimental.

Este trabajo se ubica en el campo técnico de la electrónica aplicada a la geofísica, y para la calibración del equipo se utilizaron los métodos que a continuación se describen.

a) Utilizando un patrón secundario con una mayor exactitud que la del instrumento que se calibra.

Se realizaron 4 sondeos SEV en arreglo Schlumberger con dirección N-S utilizando el equipo diseñado y un equipo ruso marca ERA, el cual tiene un selector de corriente de 0.5 mA, 1 mA, 2 mA, 5 mA, 10 mA, 20 mA, 50 mA, 100 mA y 200 mA; la frecuencia de operación de este equipo es de 4.8 Hz. Las aberturas entre electrodos de corriente en el arreglo fueron AB = 3m, 4 m, 5 m, 7 m, 9 m, 12 m, 16 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 70 m, 90 m, y 120 m. Los sondeos S1, S2 y S3 se realizaron en el terreno de fútbol perteneciente al CIIDIR Unidad Oaxaca ubicado en Santa Cruz Xoxocotlán, y el sondeo S4 se realizó en un banco de arena ubicado al norte de la institución.

Para comparar los datos se utilizaron gráficos logarítmicos de resistividad contra profundidad realizados en Excel y se calculó el porcentaje de la diferencia entre las resistividades obtenidas con ambos equipos.

b) Cálculo de la Desviación estándar.

Se realizó un sondeo tipo Schlumberger (S5) con el equipo diseñado, en la misma zona de los sondeos S1-S3, con la finalidad de obtener la desviación estándar que presenta el mismo. Se utilizaron distancias arbitrarias AB = 3m, 5m, 7m, 12m, 16m, 30m, 50m, 90 m y 120 m.

Se diseñó una fuente de 12 VCD regulada, consistente en un motor generador con imanes permanentes impulsado por un mecanismo de bicicleta, el cual sirvió para sustituir las baterías que alimentan el equipo diseñado.

Dada la relativa facilidad de construcción del generador mencionado, su importancia radica en ofrecer una alternativa de energía renovable, que no contamina, sus partes se pueden reutilizar, y que puede solucionar la ausencia o descarga de baterías cuando son utilizadas en campo en lugares remotos.

IV.2 Ubicación de los sondeos.

La Figura 115 muestra la localización de los sondeos S1, S2 y S3 realizados en un terreno perteneciente al CIIDIR Unidad Oaxaca, que se ubica en Santa Cruz Xoxocotlán. Estos 3 sondeos junto con S4, sirvieron para obtener una estadística del error que presenta el equipo diseñado, en las mediciones de corriente y potencial. Se observa el río que pasa cerca de la zona donde se hicieron estos sondeos.

En cuanto al sondeo S4, este fue realizado en una zona arenosa ubicada al norte del CIIDIR, donde se extrae arena para comercializar.

El sondeo S5 necesario para calcular la desviación estándar se hizo paralelo al sondeo S1.

Un sondeo S6 se llevó a cabo en un terreno perteneciente al Ejido Guadalupe, al norte de la ciudad para comprobar que se puede hacer uso de fuentes alternativas para alimentar este tipo de equipos. En el anexo A se explica a detalle.

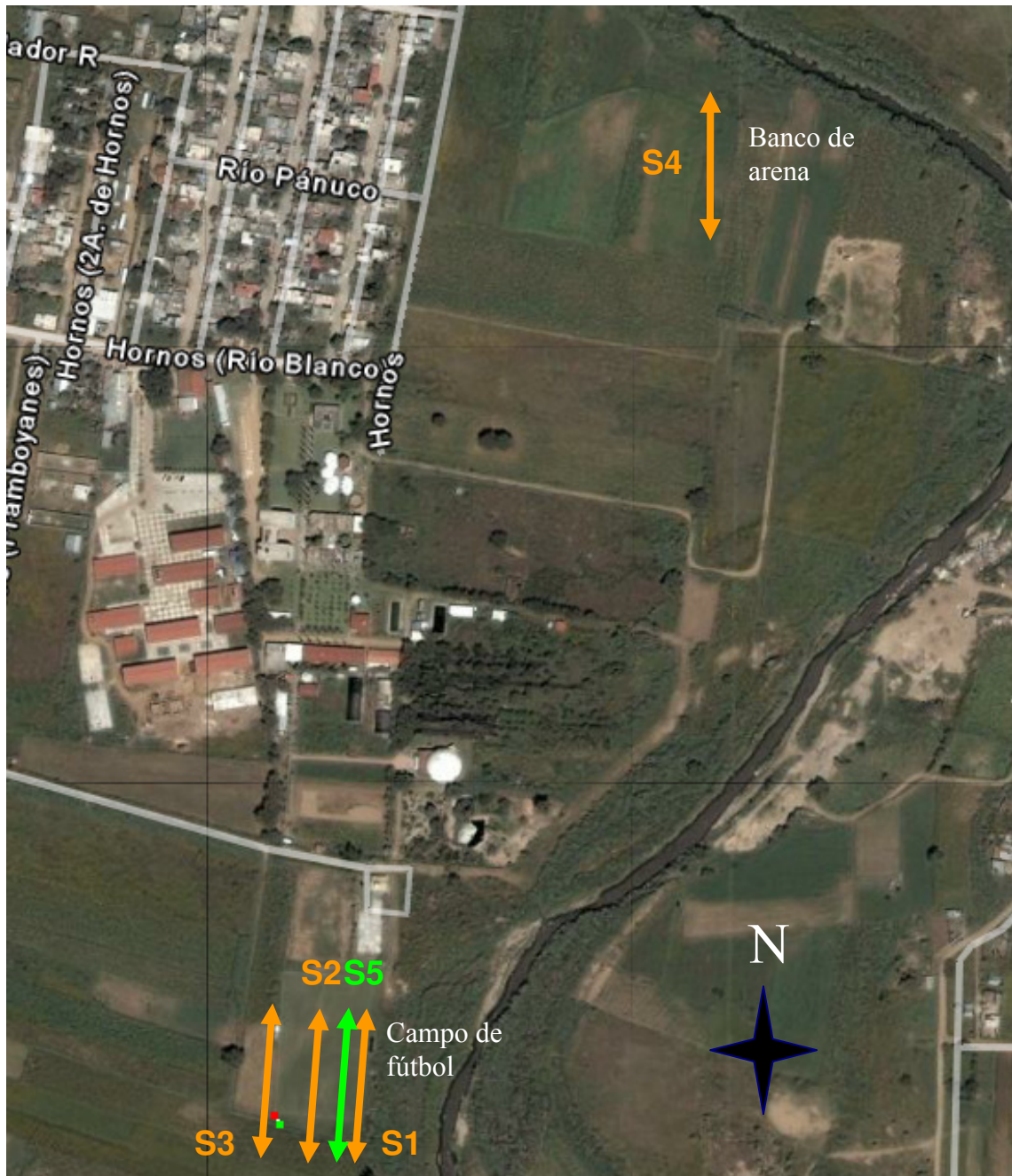


Figura 115. Localización de los sondeos realizados en el CIIDIR y el banco de arena en Santa Cruz Xoxocotlán. Fuente: Google Earth.

IV.3. Toma de datos.

Los sondeos comparativos, se realizaron midiendo la resistividad por cada punto del sondeo primero con el equipo marca ERA que se muestra en la Figura 116 y después con el equipo diseñado.

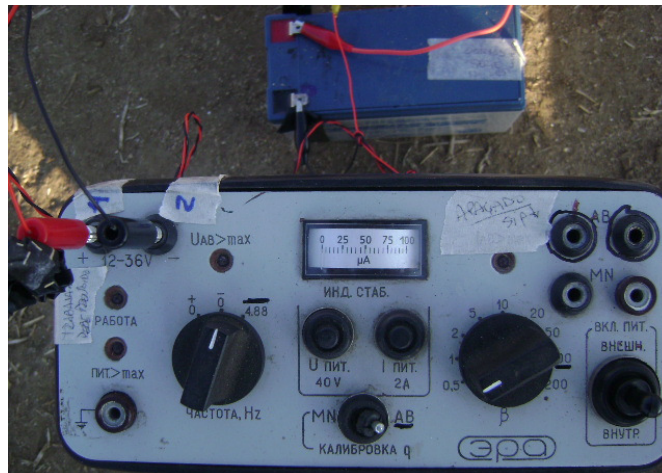


Figura 116. Equipo marca ERA que se utilizó como patrón.

La Figura 117 muestra la ubicación del sondeo S1 localizado en la cancha de fútbol del CIIDIR; los sondeos S2, S3 y S5 se realizaron paralelos a este.



Figura 117. Orientación del sondeo S1.

Los datos tomados para el sondeo S1, se muestran en la Tabla 11 siguiente. La primera columna corresponde a los puntos que se hicieron durante el sondeo. La segunda y tercera columna muestran la separación empleada entre electrodos de corriente y de potencial respectivamente. En cuanto al potencial natural (P. nat.), es el que se mide en el suelo antes de enviar la corriente eléctrica, y el potencial inducido (P. ind.), se mide cuando circula la corriente eléctrica. La diferencia de potencial (ΔV) es obtenida de estas dos lecturas; sumándose ambas si tienen diferente signo y restándose si ambas lecturas tienen signos iguales y se anota en la Tabla el valor absoluto del resultado. En el anexo J se muestra el análisis de esta situación.

La corriente eléctrica (I) es medida durante el sondeo para obtener la relación V/I , y finalmente, k corresponde al factor geométrico, el cual depende de las distancias entre los 4 electrodos empleados. En el anexo K se hace un análisis del factor geométrico si se toma en cuenta la geometría del electrodo.

Tabla 11. Datos del sondeo S1 tomados con el equipo diseñado.

No.	AB	MN	P. nat.	P. ind	I	Dif pot ΔV	k	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mV	mA	mV	m	Ω -m
1	3	0,4	16,3	953	67	936,70	17,6715	247,1
2	4	0,4	17,1	410	65	392,90	31,416	189,9
3	5	0,4	17,2	278	72	260,80	49,0875	177,8
4	7	0,4	17,4	125,1	68	107,70	96,2115	152,4
5	9	0,4	17,8	101	85	83,20	159,0435	155,7
6	12	0,4	17,9	54,7	57	36,80	282,744	182,5
7	16	0,4	18,2	43	57	24,80	502,656	218,7
8	20	0,4	17,9	37,1	58	19,20	785,4	260,0
9	20	1	15,6	54,9	57	39,30	314,16	216,6
10	30	1	15,1	40,4	67	25,30	706,86	266,9
11	40	1	14,8	33,1	81	18,30	1256,64	283,9
12	50	1	14,6	19,8	38	5,20	1963,5	268,7
13	50	2	94,1	103,4	37	9,30	981,75	246,8
14	70	2	93,9	97	35	3,10	1924,23	170,4
15	90	2	94,7	96,1	52	1,40	3180,87	85,6
16	90	4	138	140,7	52	2,70	1590,435	82,6
17	120	4	132,5	135,9	82	3,40	2827,44	117,2

La gráfica de resistividad aparente contra distancia $AB/2$ del sondeo 1 tomado con el equipo diseñado, se muestra a continuación en la Figura 118.

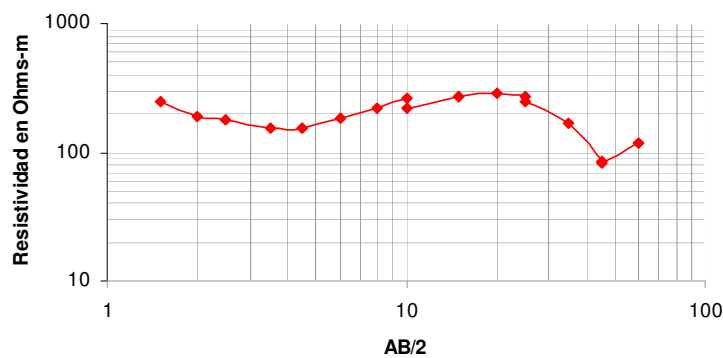


Figura 118. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia $AB/2$ del sondeo S1; equipo diseñado.

A continuación, en la Tabla 12 se muestran los datos obtenidos con el equipo ERA; se observa que el potencial natural no se tomó en cuenta. Esto se debe a que este equipo envía al subsuelo una corriente alterna de baja frecuencia, la cual elimina el potencial natural (Boyd, 1996). La corriente que se envía al subsuelo con este equipo, se supone invariable.

Tabla 12. Datos del sondeo S1 tomados con el equipo Marca ERA.

No.	<i>AB</i>	<i>MN</i>	P. ind	<i>I</i>	<i>k</i>	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mA	m	Ω -m
1	3	0,4	146	10	17,6715	258,0
2	4	0,4	62.5	10	31,416	196,4
3	5	0,4	36.7	10	49,0875	180,2
4	7	0,4	15.9	10	96,2115	153,0
5	9	0,4	49.9	50	159,0435	158,7
6	12	0,4	32.4	50	282,744	183,2
7	16	0,4	21.6	50	502,656	217,1
8	20	0,4	16.2	50	785,4	254,5
9	20	1	33.8	50	314,16	212,4
10	30	1	18.6	50	706,86	263,0
11	40	1	4.36	20	1256,64	273,9
12	50	1	2.50	20	1963,5	245,4
13	50	2	11.9	50	981,75	233,7
14	70	2	4.13	50	1924,23	158,9
15	90	2	1.27	50	3180,87	80,8
16	90	4	2.51	50	1590,435	79,8
17	120	4	1.96	50	2827,44	110,8

Los datos obtenidos con el equipo ERA se muestran en la Figura 119 siguiente. Se observa una curva muy parecida a la obtenida con el equipo diseñado.

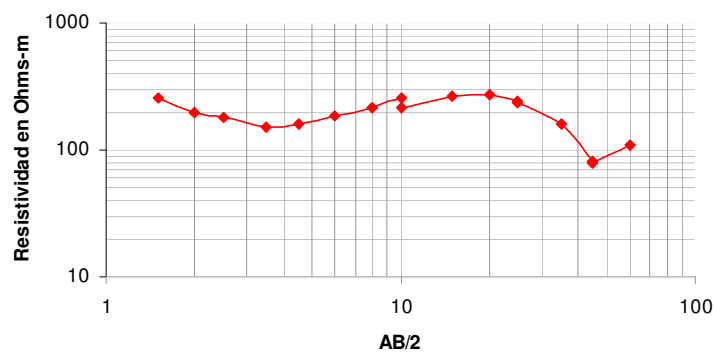


Figura 119. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia $AB/2$ del sondeo S1; equipo marca ERA.

La Tabla 13 siguiente, muestra los datos obtenidos en el segundo sondeo realizado con el equipo diseñado.

Tabla13. Datos del sondeo S2 tomados con el equipo diseñado.

No.	<i>AB</i>	<i>MN</i>	P. nat.	P. ind	<i>I</i>	Dif. Pot. ΔV	<i>k</i>	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mV	mA	mV	m	ohm-m
1	3	0,4	-4,4	1.782	139	1.786,40	17,6715	227,1
2	4	0,4	-3,1	1.015	127	1.018,10	31,416	251,8
3	5	0,4	-0,1	683	132	683,10	49,0875	254,0
4	7	0,4	1,4	420	149	418,60	96,2115	270,3
5	9	0,4	4,1	223,8	120	219,70	159,0435	291,2
6	12	0,4	5,3	118,9	96	113,60	282,744	334,6
7	16	0,4	8,3	86	103	77,70	502,656	379,2
8	20	0,4	9,7	65,7	105	56,00	785,4	418,9
9	20	1	-13,3	112,7	104	126,00	314,16	380,6
10	30	1	-13,1	36,8	85	49,90	706,86	415,0
11	40	1	-12,7	14,4	84	27,10	1256,64	405,4
12	50	1	-12,7	8,8	106	21,50	1963,5	398,3
13	50	2	-2,1	39,3	105	41,40	981,75	387,1
14	70	2	-2	20,2	147	22,20	1924,23	290,6
15	90	2	-2	3,8	100	5,80	3180,87	184,5
16	90	4	83,2	93,7	99	10,50	1590,435	168,7
17	120	4	78,9	81	77	2,10	2827,44	77,1

Los datos de resistividad obtenidos con el equipo diseñado, se muestran graficados en la Figura 120 siguiente. Se presentan valores de resistividad aparente mayores con respecto al sondeo anterior.

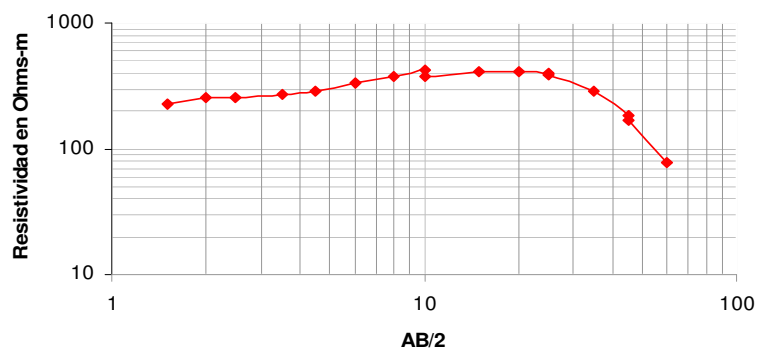


Figura 120. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia $AB/2$ del sondeo S2; equipo diseñado.

Los datos obtenidos con el equipo ERA, para el segundo sondeo, se muestran en seguida, en la Tabla 14.

Tabla14. Datos del sondeo S2 tomados con el equipo Marca ERA.

No.	<i>AB</i>	<i>MN</i>	P. ind	<i>I</i>	<i>k</i>	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mA	m	ohm-m
1	3	0,4	132	10	17,6715	233,3
2	4	0,4	81,4	10	31,416	255,7
3	5	0,4	52,3	10	49,0875	256,7
4	7	0,4	28,4	10	96,2115	273,2
5	9	0,4	18,4	10	159,0435	292,6
6	12	0,4	11,7	10	282,744	330,8
7	16	0,4	7,4	10	502,656	372,0
8	20	0,4	5,22	10	785,4	410,0
9	20	1	11,9	10	314,16	373,9
10	30	1	5,71	10	706,86	403,6
11	40	1	3,11	10	1256,64	390,8
12	50	1	1,96	10	1963,5	384,8
13	50	2	3,79	10	981,75	372,1
14	70	2	1,45	10	1924,23	279,0
15	90	2	0,536	10	3180,87	170,5
16	90	4	1,02	10	1590,435	162,2
17	120	4	0,24	10	2827,44	67,9

Los valores de resistividad obtenidos con el mismo equipo, con respecto a la profundidad teórica ($AB/2$), se presentan graficados en la Figura 121.

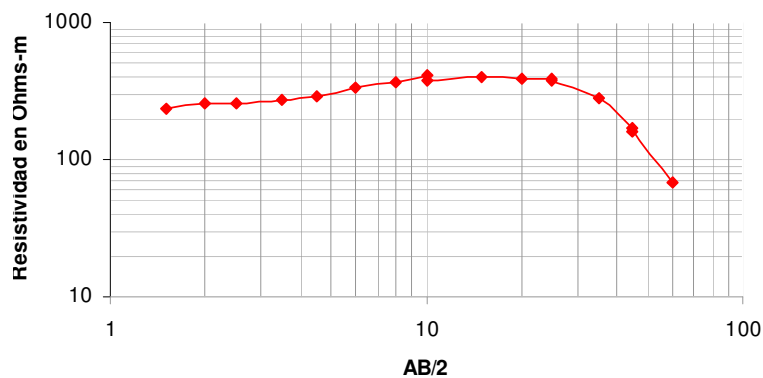


Figura 121. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia $AB/2$ del sondeo S2; equipo marca ERA.

A continuación, se presentan los datos obtenidos durante el tercer sondeo que se realizó con el quipo diseñado.

Tabla15. Datos del sondeo S3 tomados con el equipo diseñado.

No	<i>AB</i>	<i>MN</i>	P. nat.	P. ind	<i>I</i>	Dif. Pot. ΔV	<i>k</i>	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mV	mA	mV	m	ohm-m
1	3	0,4	-16,7	-1.052	164	1035,30	17,6715	111,6
2	4	0,4	-17,2	-630	158	612,80	31,416	121,8
3	5	0,4	-15,4	-456	157	440,60	49,0875	137,8
4	7	0,4	-14,8	-282,7	158	267,90	96,2115	163,1
5	9	0,4	-14,9	-221	170	206,10	159,0435	192,8
6	12	0,4	-14,8	-174,2	194	159,40	282,744	232,3
7	16	0,4	-13,7	-124,8	191	111,10	502,656	292,4
8	20	0,4	-12,8	-93,1	199	80,30	785,4	316,9
9	20	1	-2,1	-188,2	199	186,10	314,16	293,8
10	30	1	-1,8	-84,7	185	82,90	706,86	316,7
11	40	1	-1,4	-39,9	154	38,50	1256,64	314,2
12	50	1	1,2	-23,3	153	24,50	1963,5	314,4
13	50	2	106,8	53,2	152	53,60	981,75	346,2
14	70	2	109,3	92,4	139	16,90	1924,23	234,0
15	90	2	107,9	101	154	6,90	3180,87	142,5
16	90	4	-191,2	-204,7	152	13,50	1590,435	141,3
17	120	4	-178,6	-181,3	106	2,70	2827,44	72,0

La Figura 122 muestra las resistividades aparentes, graficadas contra la profundidad teórica.

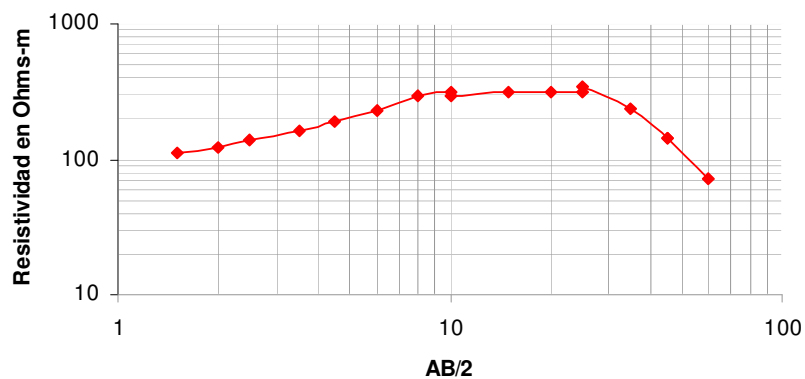


Figura 122. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S3; equipo diseñado.

La Tabla 16 siguiente, presenta los datos obtenidos con el equipo ERA.

Tabla16. Datos del sondeo S3 tomados con el equipo Marca ERA.

No.	AB	MN	P. ind	I	k	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mA	m	ohm-m
1	3	0,4	120	20	17,6715	106,0
2	4	0,4	36,9	10	31,416	115,9
3	5	0,4	26,5	10	49,0875	130,1
4	7	0,4	15,9	10	96,2115	153,0
5	9	0,4	11,3	10	159,0435	179,7
6	12	0,4	7,6	10	282,744	214,9
7	16	0,4	5,4	10	502,656	271,4
8	20	0,4	3,74	10	785,4	293,7
9	20	1	8,95	10	314,16	281,2
10	30	1	4,33	10	706,86	306,1
11	40	1	2,45	10	1256,64	307,9
12	50	1	2,92	20	1963,5	286,7
13	50	2	6,44	20	981,75	316,1
14	70	2	2,19	20	1924,23	210,7
15	90	2	0,79	20	3180,87	125,6
16	90	4	0,78	10	1590,435	124,1
17	120	4	0,22	10	2827,44	62,2

La tendencia de las resistividades calculadas y graficadas, se muestran en la Figura 123 siguiente.

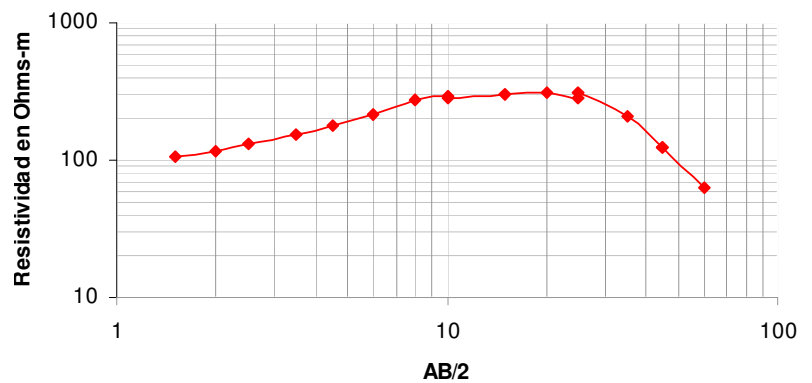


Figura 123. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia $AB/2$ del sondeo S3; equipo marca ERA.

Los datos obtenidos con el equipo diseñado, en el sondeo S4 realizado en la zona arenosa, se detallan a continuación en la Tabla 17. A diferencia de los 3 sondeos anteriores se realizaron sólo 16 mediciones.

Tabla17. Datos del sondeo S4 tomados con el equipo diseñado.

No.	<i>AB</i>	<i>MN</i>	P. nat.	P. ind	<i>I</i>	Dif. Pot. ΔV	<i>k</i>	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mV	mA	mV	m	Ω -m
1	3	0,4	-117,2	-167,1	8	49,90	17,6715	110,2
2	4	0,4	-119,2	-131,1	4	11,90	31,416	93,5
3	5	0,4	-122,5	-138,7	9	16,20	49,0875	88,4
4	7	0,4	-123,3	-164,4	46	41,10	96,2115	86,0
5	9	0,4	-123,6	-150,4	51	26,80	159,0435	83,6
6	12	0,4	-123	-122,8	2	0,20	282,744	28,3
7	16	0,4	-124,6	-122,3	8	2,30	502,656	144,5
8	20	0,4	-125	-127,5	12	2,50	785,4	163,6
9	20	1	-14,2	-19,8	11	5,60	314,16	159,9
10	30	1	-14,3	-20,2	23	5,90	706,86	181,3
11	40	1	-14,6	-17,8	25	3,20	1256,64	160,8
12	50	1	-14,8	-17,3	37	2,50	1963,5	132,7
13	50	2	-40,7	-45,4	35	4,70	981,75	131,8
14	70	2	-40,9	-41,8	31	0,90	1924,23	55,9
15	90	2	-41,5	-41,6	8	0,10	3180,87	39,8
16	90	4	84,9	85	11	0,10	1590,435	14,5

Las resistividades graficadas se muestran en la Figura 124. En este sondeo la curva registrada presenta variaciones mayores entre las resistividades calculadas.

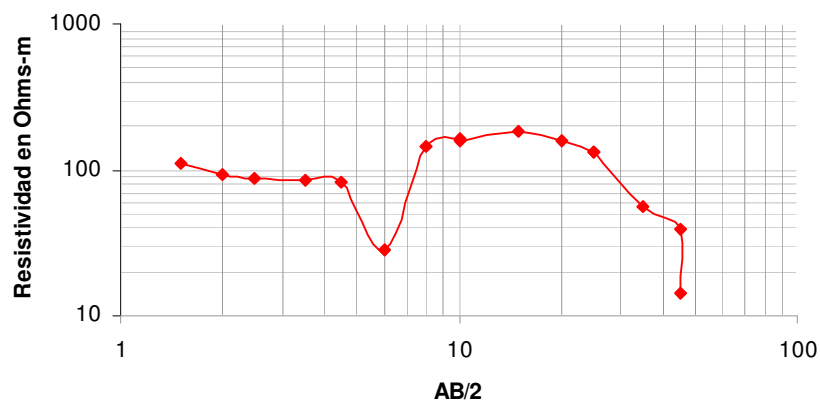


Figura 124. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia $AB/2$ del sondeo S4; equipo diseñado.

Las cifras obtenidas con el equipo ERA se muestran en la Tabla 18.

Tabla18. Datos del sondeo S4 tomados con el equipo Marca ERA.

No.	AB	MN	P. ind	I	k	$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$
	m	m	mV	mA	m	Ω -m
1	3	0,4	52,6	10	17,6715	93,0
2	4	0,4	24,3	10	31,416	76,3
3	5	0,4	15,7	10	49,0875	77,1
4	7	0,4	7,95	10	96,2115	76,5
5	9	0,4	23,6	50	159,0435	75,1
6	12	0,4	5	50	282,744	28,3
7	16	0,4	4,5	20	502,656	113,1
8	20	0,4	8,8	50	785,4	138,2
9	20	1	19,8	50	314,16	124,4
10	30	1	10,9	50	706,86	154,1
11	40	1	5,3	50	1256,64	133,2
12	50	1	2,8	50	1963,5	110,0
13	50	2	5,5	50	981,75	108,0
14	70	2	1,1	50	1924,23	42,3
15	90	2	0,42	50	3180,87	26,7
16	90	4	0,43	50	1590,435	13,7

La gráfica de las resistividades aparentes obtenidas con el equipo ERA, se muestra en la Figura 125 siguiente. Se presenta una tendencia muy similar a la curva obtenida con los datos graficados del quipo diseñado.

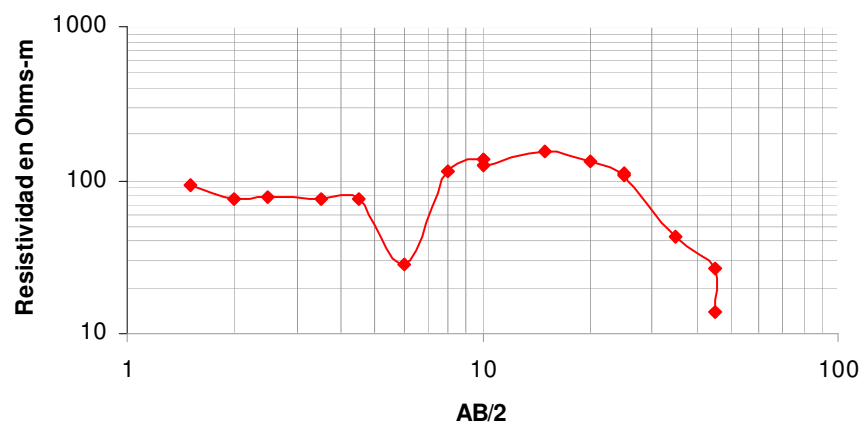


Figura 125. Gráfica de la resistividad aparente vs distancia AB/2 del sondeo S4; equipo marca ERA.

La Figura 126 muestra la zona arenosa donde se realizó el sondeo S4.



Figura 126. Orientación del sondeo S4.

En la Figura 127 se muestra una imagen frontal del lugar donde se realizó el sondeo S4. En este lugar extraen arena y rellenan con escombros.

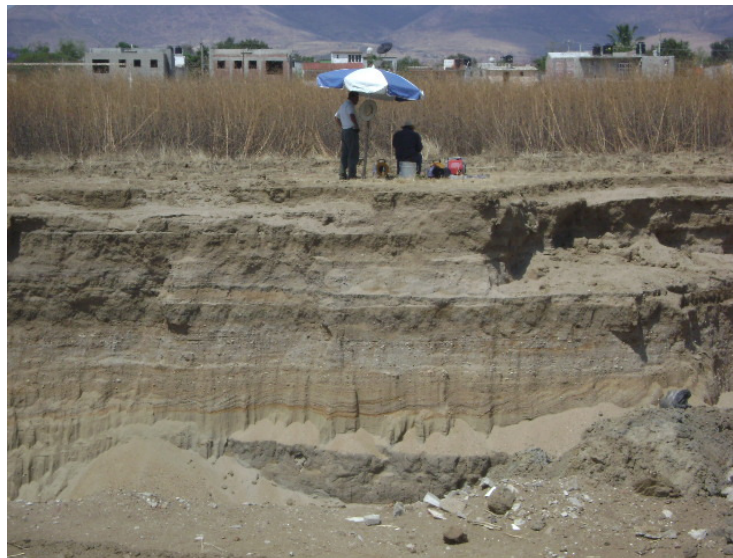


Figura 127. Banco de arena donde se realizó el sondeo S4.

IV.4 Cálculo de la desviación estándar.

Se realizó un sondeo tipo Schlumberger S5, en la misma zona de los sondeos S1-S3, tomándose 20 mediciones en cada punto con el objetivo de tener una estimación confiable de la desviación estándar y una validez general de los

datos (Holman y Gajda, 1986). Se utilizaron aberturas arbitrarias entre electrodos de corriente AB de: 3m, 5m, 7m, 12m, 16m, 30m, 50m, 90 m y 120 m. Los resultados de las resistividades obtenidas en cada punto del sondeo y la media de cada grupo de mediciones, se muestran en las 9 gráficas siguientes.

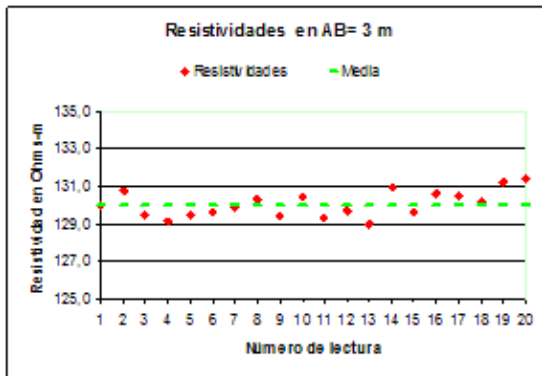


Figura 128. Resistividades en AB=3 m.

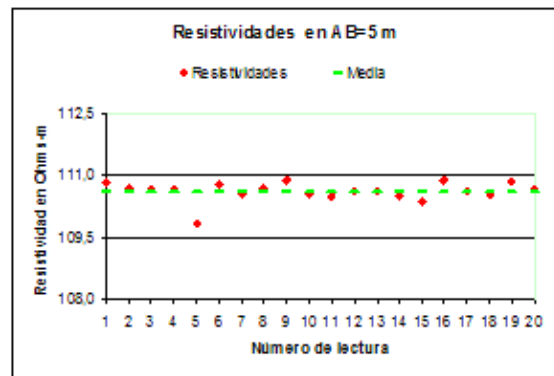


Figura 129. Resistividades en AB=5 m.

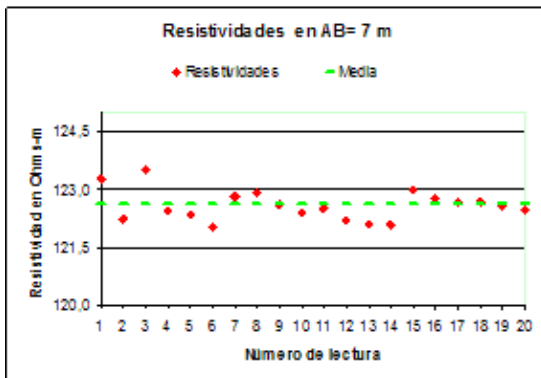


Figura 130. Resistividades en AB=7 m.

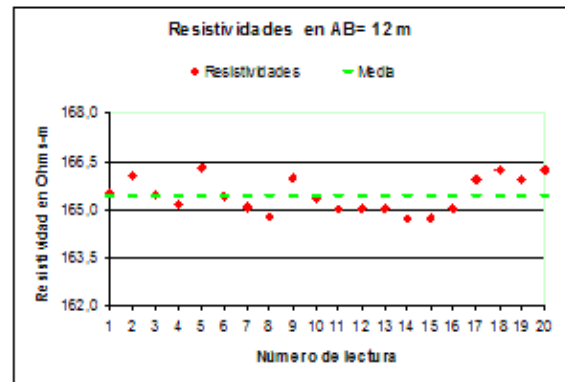


Figura 131. Resistividades en AB=12 m.

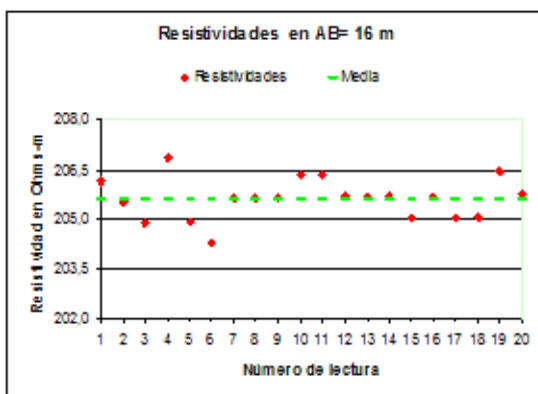


Figura 132. Resistividades en AB=16m.

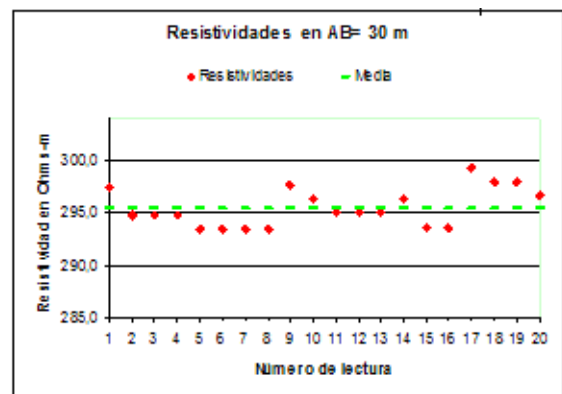


Figura 133. Resistividades en AB=30 m.

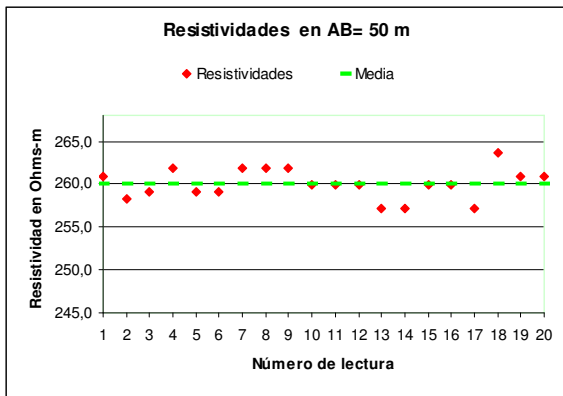


Figura 134. Resistividades en AB=50 m.

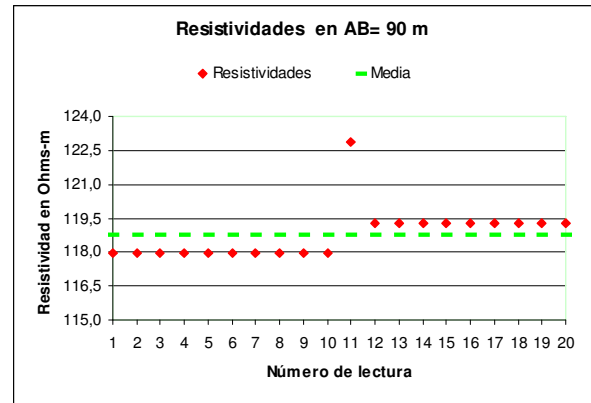


Figura 135. Resistividades en AB=90 m.

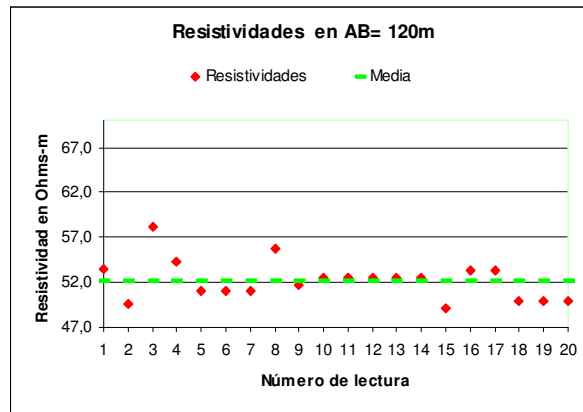


Figura 136. Resistividades en AB=120 m.

Se observa en cada sondeo que los puntos quedan muy cercanos a la media aritmética.

En algunos casos como en la Figura 135, donde la media aritmética es aproximadamente 119 Ohms-m, la lectura número 11 nos muestra un valor un poco mayor a 122.5 Ohms-m. La diferencia entre ambas lecturas no es muy grande pero debido a la escala utilizada este punto parece muy alejado.

A continuación, en la Tabla 19 se muestran las desviaciones estándar calculadas para cada sondeo realizado.

Tabla 19. Datos del sondeo para calcular la desviación estándar del equipo diseñado.

Número de lectura	AB=3 MN=0.4	AB=5 MN=0.4	AB=7 MN=0.4	AB=12 MN=0.4	AB=16 MN=0.4	AB=30 MN=1.0	AB=50 MN=1.0	AB=90 MN=2.0	AB=120 MN=4.0
	ohm-m	ohm-m	ohm-m	ohm-m	ohm-m	ohm-m	ohm-m	ohm-m	ohm-m
1	130,0	110,8	123,3	165,5	206,2	297,4	260,9	117,9	53,5
2	130,7	110,7	122,2	166,0	205,5	294,7	258,2	117,9	49,7
3	129,4	110,7	123,5	165,4	204,9	294,7	259,1	117,9	58,1
4	129,1	110,7	122,4	165,1	206,9	294,7	261,8	117,9	54,2
5	129,5	109,9	122,3	166,3	204,9	293,4	259,1	117,9	51,1
6	129,6	110,8	122,0	165,4	204,3	293,4	259,1	117,9	51,1
7	129,9	110,5	122,8	165,1	205,6	293,4	261,8	117,9	51,1
8	130,3	110,7	122,9	164,8	205,6	293,4	261,8	117,9	55,8
9	129,4	110,9	122,6	166,0	205,6	297,7	261,8	117,9	51,8
10	130,5	110,5	122,4	165,3	206,4	296,3	260,0	117,9	52,5
11	129,3	110,5	122,5	165,0	206,4	295,0	260,0	122,9	52,5
12	129,7	110,6	122,2	165,0	205,7	295,0	260,0	119,3	52,5
13	129,0	110,6	122,1	165,0	205,7	295,0	257,2	119,3	52,5
14	130,9	110,5	122,1	164,7	205,7	296,3	257,2	119,3	52,5
15	129,6	110,3	123,0	164,7	205,0	293,6	260,0	119,3	49,2
16	130,6	110,9	122,8	165,0	205,7	293,6	260,0	119,3	53,3
17	130,5	110,6	122,7	165,9	205,0	299,4	257,2	119,3	53,3
18	130,2	110,5	122,7	166,2	205,0	298,0	263,7	119,3	49,9
19	131,2	110,8	122,6	165,9	206,4	298,0	260,9	119,3	49,9
20	131,4	110,6	122,5	166,2	205,8	296,6	260,9	119,3	49,9
Desviación estándar	0.711	0.2255	0.3982	0.5329	0.6261	1.8573	1.75	1.1751	2.1954

Cada columna representa las 20 lecturas tomadas en cada abertura de electrodos AB. El valor de abajo en cada columna es la desviación estándar calculada para cada evento de mediciones, obteniéndose un máximo de 2.1954 Ohms-m al separar los electrodos de corriente a una distancia AB= 120 m.

CAPÍTULO V.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE ERRORES.

V.1 Sondeo 1 (S1).

Los datos de resistividad obtenidos con ambos equipos en el sondeo 1 se muestran en la gráfica de la Figura 137, y la diferencia entre los datos se muestra en la Tabla 20.

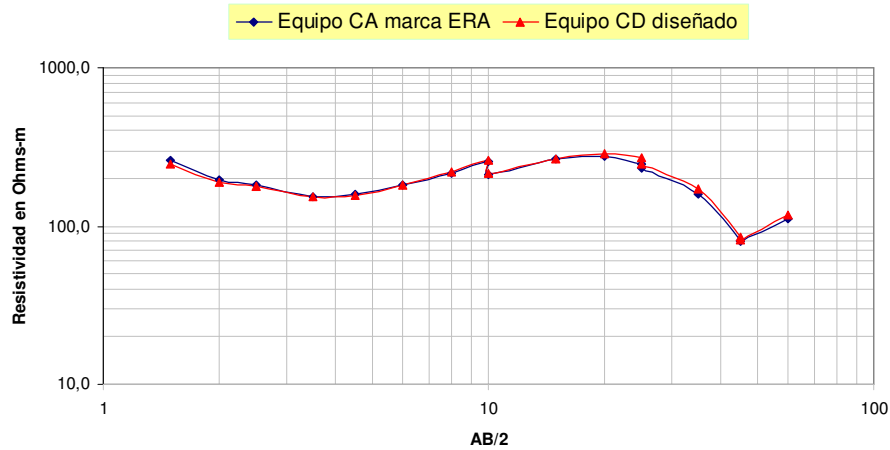


Figura 137. Gráficas del sondeo S1 considerando ambos equipos.

Tabla 20. Diferencia entre los datos tomados en sondeo S1.

No.	pa equipo ERA	pa equipo diseñado	Diferencia	% de la diferencia
1	258	247,1	10,9	4,22
2	196,4	189,9	6,5	3,31
3	180,2	177,8	2,4	1,33
4	153	152,4	0,6	0,39
5	158,7	155,7	3	1,89
6	183,2	182,5	0,7	0,38
7	217,1	218,7	-1,6	-0,74
8	254,5*	260*	-5,5*	-2,16*
9	212,4*	216,6*	-4,2*	-1,98*
10	263	266,9	-3,9	-1,48
11	273,9	283,9	-10	-3,65
12	245,4*	268,7*	-23,3*	-9,49*
13	233,7*	246,8*	-13,1*	-5,61*
14	158,9	170,4	-11,5	-7,24
15	80,8*	85,6*	-4,8*	-5,94*
16	79,8*	82,6*	-2,8*	-3,51*
17	110,8	117,2	-6,4	-5,78

La máxima diferencia que se tuvo en este sondeo fue del -9.49% (lectura 12) en un empalme o incremento de la distancia MN. El signo negativo indica que la resistividad calculada con el equipo diseñado fué mayor que la resistividad medida con el equipo de marca.

En el sondeo S1 mostrado en la Tabla 20, los datos que tienen asterisco son aquellos en los cuales se ha realizado un incremento en la distancia entre los electrodos de potencial MN; esto es, se ha realizado un empalme, necesario para obtener lecturas mayores de diferencia de potencial debido a que, conforme los electrodos de corriente se van alejando, la diferencia de potencial se va reduciendo. Estos empalmes aparecen como cortes en las curvas presentadas en las Figuras 137-140. Al aumentar la distancia entre los electrodos de potencial se abarca más terreno y aumenta la resistencia que existe entre los puntos M y N; así que, para una misma corriente se tendrán valores de potencial mayores según la Ley de Ohm ($V=I \cdot R$). Es en esta transición donde ocurren las mayores diferencias entre las resistividades medidas con ambos equipos; como ejemplo de esto tenemos el punto 12 en la Tabla 11 (referente a los datos del sondeo S1 obtenidos con el equipo diseñado), donde se obtuvo una diferencia de potencial de tan solo 5.20 mV cuando MN= 1 m. En ese punto se calculó un -9.49 % de diferencia entre los datos, según la Tabla 20. En el momento en que la distancia MN cambió a 2 m, (lectura 13 en Tabla 11), con la misma distancia entre electrodos AB = 50 m, la diferencia de potencial subió a 9.30 mV y la diferencia entre resistividades medidas disminuyó a -5.61% (Tabla 20).

Una situación similar ocurre en las lecturas 8 y 9 en la Tabla 11, donde se hizo otro empalme, aumentando la distancia MN de 0.4 m a 1 m para una misma separación entre electrodos A, B; y el otro empalme ocurrió en las lecturas número 15 y 16 de la misma Tabla 11, donde se muestra que la diferencia de potencial medida aumenta si la distancia MN también aumenta, esto se refleja con una disminución en la diferencia de resistividades calculadas en la Tabla 20 para los mismos puntos.

En el caso de los empalmes, se toma en cuenta la lectura en la que se tiene una mayor diferencia de potencial pues se considera más confiable al tener una mejor relación señal/ruido. Por lo tanto la máxima diferencia ocurre en el punto de medición número 14, que es de -7.24 % (Tabla 20). Analizando las diferencias que se estimaron en cada empalme se tiene que:

Empalme 1; AB = 20 m; MN = 0.4 y 1 m; puntos 8 y 9 en la Tabla 11.

Para el equipo diseñado se encontró una diferencia de resistividades de:

$$(260.0 \Omega \cdot m) - (216.6 \Omega \cdot m) = 43.4 \Omega \cdot m$$

y para el equipo ERA (Tabla 12):

$$(254.5 \Omega \cdot m) - (212.4 \Omega \cdot m) = 42.1 \Omega \cdot m$$

Ambos equipos mostraron una gran diferencia en resistividad al cambiar la distancia MN, en ese punto.

Empalme 2; AB = 50 m; MN = 1 y 2 m; puntos 12 y 13 en la Tabla 11.

Para el equipo diseñado:

$$(268.7 \Omega \cdot m) - (246.8 \Omega \cdot m) = 21.9 \Omega \cdot m$$

Para el equipo ERA (Tabla 12):

$$(245.4 \Omega \cdot m) - (233.7 \Omega \cdot m) = 11.7 \Omega \cdot m$$

Empalme 3; AB = 90 m; MN = 2 y 4 m; puntos 15 y 16 en la Tabla 11.

Para el equipo diseñado:

$$(85.6 \Omega \cdot m) - (82.6 \Omega \cdot m) = 3 \Omega \cdot m$$

Para el equipo ERA (Tabla 12):

$$(80.8 \Omega \cdot m) - (79.8 \Omega \cdot m) = 1 \Omega \cdot m$$

En los empalmes 2 y 3, el equipo diseñado presenta mayor diferencia en comparación con el equipo ERA. El hecho de que las lecturas de resistividad cambien cuando la distancia MN se incrementa, dejando fijos los electrodos de corriente, supone un terreno no homogéneo en esa zona, y no es por defecto de los equipos.

V.2 Sondeo 2 (S2).

Los datos de resistividad obtenidos con ambos equipos en el sondeo S2 se muestran en la Figura 138 y la diferencia de los datos obtenidos con ambos equipos, en la Tabla 21.

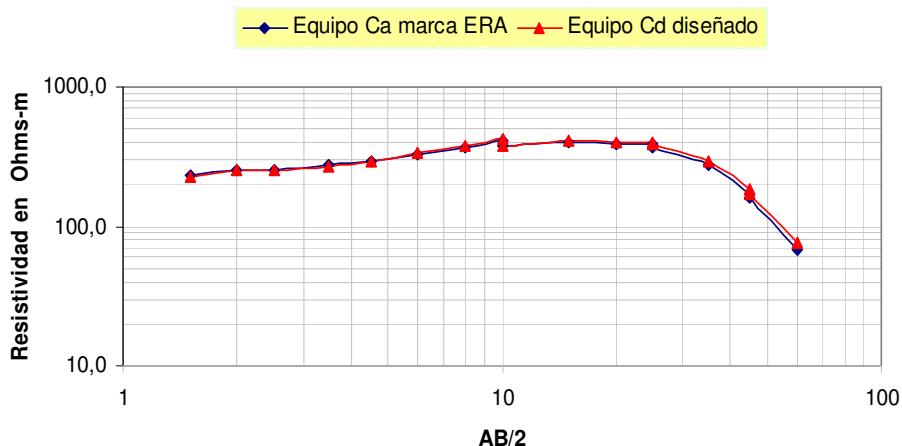


Figura 138. Gráficas del sondeo S2 considerando ambos equipos.

Tabla 21. Diferencia entre los datos tomados en sondeo S2.

No.	pa equipo ERA	pa equipo diseñado	Diferencia	% de la diferencia
1	233,3	227,1	6,2	2,66
2	255,7	251,8	3,9	1,53
3	256,7	254	2,7	1,05
4	273,2	270,3	2,9	1,06
5	292,6	291,2	1,4	0,48
6	330,8	334,6	-3,8	-1,15
7	372	379,2	-7,2	-1,94
8	410*	418,9*	-8,9*	-2,17*
9	373,9*	380,6*	-6,7*	-1,79*
10	403,6	415	-11,4	-2,82
11	390,8	405,4	-14,6	-3,74
12	384,8*	398,3*	-13,5*	-3,51*
13	372,1*	387,1*	-15*	-4,03*
14	279	290,6	-11,6	-4,16
15	170,5*	184,5*	-14*	-8,21*
16	162,2*	168,7*	-6,5*	-4,01*
17	67,9	77,1	-9,2	-13,55

La máxima diferencia obtenida fué del -13.55% para este sondeo.

En la comparación de los datos obtenidos con ambos equipos ilustrada en la Tabla 21, con respecto a los empalmes no se observa una diferencia grande en el caso de las lecturas 8 - 9; y 12 - 13. No ocurre lo mismo en el empalme realizado en las lecturas 15 - 16, donde la diferencia entre resistividades calculadas va de -8.21% a -4.01%.

Si nos referimos a la Tabla 13 donde se muestran los datos estimados con el equipo diseñado en el sondeo S2, se puede ver que la diferencia de potencial medida en el punto 15 fué pequeño, con un valor de 5.8 mV, este punto es el que ocasiona la diferencia de -8.21 % de la Tabla 21. En el momento en que la distancia MN aumentó de 2 m a 4 m (Tabla13), se incrementa la diferencia de potencial a 10.5 mV y la diferencia entre las resistividades cae a -4.01 % (Tabla 21, punto 16)

Nuevamente, el punto en donde existió la menor diferencia de potencial (punto 17 de la Tabla 13) con 2.1 mV, es donde se obtiene la mayor diferencia entre las resistividades calculadas en la Tabla 23, con un valor de -13.55 %.

En este caso la mayor diferencia entre las resistividades calculadas no se obtuvo al realizar los empalmes, sino en la lectura donde la distancia entre electrodos de corriente A y B fue mayor, y la diferencia de potencial menor; o sea, en la lectura 17 (Tabla 13). Este valor de diferencia en resistividad estimado, disminuiría si se empleara una abertura mayor entre electrodos M y N, para la misma distancia A, B.

En este sondeo mediante el equipo diseñado, se tuvieron lecturas de corriente y diferencia de potencial mucho mayores que en el sondeo S1 anterior, y los datos calculados de resistividad son mayores que los encontrados en el sondeo S1, lo que indica una mayor mezcla de arena en esta parte del terreno, o una capa de material más resistivo que la arcilla común. Recordar que los sondeos S1 a S3 se realizaron en el terreno del CIIDIR que se encuentra cerca de la rivera del río.

No hay que perder de vista que estos datos todavía deben ser interpretados mediante un software para obtener un modelo de subsuelo que muestre el número de capas, grosores de las mismas y valores de resistividades aproximadas.

En este trabajo sólo se han considerado las curvas de resistividad contra profundidad, obtenidas en campo, dejando relegada la interpretación de las mismas debido a los objetivos específicos planteados al inicio del documento.

Analizando las diferencias que se obtuvieron en cada empalme se tiene que:

Empalme 1; AB = 20 m; MN = 0.4 y 1 m; puntos 8 y 9 en la Tabla 13.

Para el equipo diseñado, la diferencia de las resistividades es:

$$(418.9 \Omega \cdot m) - (380.6 \Omega \cdot m) = 38.3 \Omega \cdot m$$

y para el equipo ERA (Tabla 14):

$$(410 \Omega \cdot m) - (373.9 \Omega \cdot m) = 36.1 \Omega \cdot m$$

Ambos equipos mostraron casi la misma diferencia en resistividad al cambiar la distancia MN.

Empalme 2; AB = 50 m; MN = 1 y 2 m; puntos 12 y 13 en la Tabla 13.

Para el equipo diseñado:

$$(398.3 \Omega \cdot m) - (387.1 \Omega \cdot m) = 11.2 \Omega \cdot m$$

Para el equipo ERA (Tabla 14):

$$(384.8 \Omega \cdot m) - (372.1 \Omega \cdot m) = 12.7 \Omega \cdot m$$

Empalme 3; AB = 90 m; MN = 2 y 4 m; puntos 15 y 16 en la Tabla 13.

Para el equipo diseñado:

$$(184.5 \Omega \cdot m) - (168.7 \Omega \cdot m) = 15.8 \Omega \cdot m$$

Para el equipo ERA (Tabla 14):

$$(170.5 \Omega \cdot m) - (162.2 \Omega \cdot m) = 8.3 \Omega \cdot m$$

Los valores de las diferencias en resistividad que se van encontrando al cambiar la distancia MN dejando fijos los electrodos A y B, en los dos primeros empalmes son muy parecidos en ambos equipos. En el último empalme se obtuvieron valores de potencial más bajos por parte del equipo diseñado (Tabla 13).

V.3 Sondeo 3 (S3).

Los datos de resistividad obtenidos con ambos equipos en el sondeo S3 se muestran en la Figura 139 y la desviación de los datos en la Tabla 22. Se observa que ambas gráficas presentan la misma tendencia; lo mismo ocurrió en los dos sondeos anteriores.

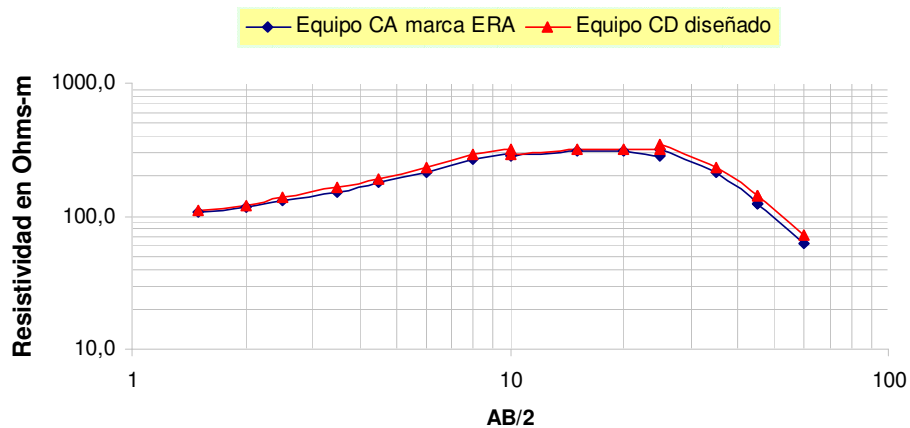


Figura 139. Gráficas del sondeo S3 considerando ambos equipos.

Tabla 22. Diferencia entre los datos tomados en sondeo S3.

No.	pa equipo ERA	pa equipo diseñado	Diferencia	% de la diferencia
1	106	111,6	-5,6	-5,28
2	115,9	121,8	-5,9	-5,09
3	130,1	137,8	-7,7	-5,92
4	153	163,1	-10,1	-6,60
5	179,7	192,8	-13,1	-7,29
6	214,9	232,3	-17,4	-8,10
7	271,4	292,4	-21	-7,74
8	293,7*	316,9*	-23,2*	-7,90*
9	281,2*	293,8*	-12,6*	-4,48*
10	306,1	316,7	-10,6	-3,46
11	307,9	314,2	-6,3	-2,05
12	286,7*	314,4*	-27,7*	-9,66*
13	316,1*	346,2*	-30,1*	-9,52*
14	210,7	234	-23,3	-11,06
15	125,6*	142,5*	-16,9*	-13,46*
16	124,1*	141,3*	-17,2*	-13,86*
17	62,2	72	-9,8	-15,76

El porcentaje de desviación obtenido fue incrementándose en los 6 últimos puntos del sondeo obteniéndose una diferencia máxima de -15.76%.

En la comparación de los datos estimados con ambos equipos, mostrados en la Tabla 22 con respecto a los empalmes, se puede ver una disminución de la diferencia de resistividad medida entre las lecturas 8 y 9 (de -7.90 % decrece a -4.48 %) al incrementar la distancia MN; esto significa que el equipo diseñado mejora su sensibilidad al aumentar dicha distancia, debido a que se incrementa la diferencia de potencial medida, pero no alcanza exactamente el valor medido por el equipo ERA.

El hecho de que la diferencia en la medición de resistividad disminuya, significa que los valores del equipo diseñado se acercan más a los valores de resistividad obtenidos con el equipo ERA.

En los empalmes que ocurren en las lecturas 12 – 13 y 15 – 16 de la Tabla 22; se observa que a pesar de que hubo un incremento en la distancia MN, la diferencia de potencial medido con el equipo diseñado aumentó según los datos de la Tabla 15, pero la diferencia de resistividad observada entre un equipo y otro no cambió mucho.

Analizando las diferencias que se obtuvieron en cada empalme se tiene que:

Empalme 1; AB = 20 m; MN = 0.4 y 1 m; puntos 8 y 9 en la Tabla 15.

Para el equipo diseñado, la diferencia de las resistividades es:

$$(316.9 \Omega \cdot m) - (293.8 \Omega \cdot m) = 23.1 \Omega \cdot m$$

y para el equipo ERA (Tabla 16):

$$(293.7 \Omega \cdot m) - (281.2 \Omega \cdot m) = 12.5 \Omega \cdot m$$

Empalme 2; AB = 50 m; MN = 1 y 2 m; puntos 12 y 13 en la Tabla 15.

Para el equipo diseñado:

$$(314.4 \Omega \cdot m) - (346.2 \Omega \cdot m) = -31.8 \Omega \cdot m$$

Para el equipo ERA (Tabla 16):

$$(286.7 \Omega \cdot m) - (316.1 \Omega \cdot m) = -29.4 \Omega \cdot m$$

Empalme 3; AB = 90 m; MN = 2 y 4 m; puntos 15 y 16 en la Tabla 15.

Para el equipo diseñado:

$$(142.5 \Omega \cdot m) - (141.3 \Omega \cdot m) = 1.2 \Omega \cdot m$$

Para el equipo ERA (Tabla 16):

$$(125.6 \Omega \cdot m) - (124.1 \Omega \cdot m) = 1.5 \Omega \cdot m$$

En el primer empalme se observa una diferencia mayor de resistividad en el equipo diseñado (23.1 $\Omega \cdot m$), que en el equipo ERA (12.5 $\Omega \cdot m$), al cambiar la distancia MN. En el segundo empalme también existe una diferencia moderada entre las diferencias de resistividades obtenidas en ambos equipos.

En el último empalme no se muestra una variación importante, ambos equipos detectaron una resistividad muy parecida antes y después de ampliar la distancia MN; esto es debido a que en el subsuelo existen zonas de material homogéneo y no homogéneo de diferentes espesores, las cuales al ser detectadas por los equipos, presentan estas variaciones.

En los sondeos S1 a S3, existen diferencias pequeñas al comparar las resistividades obtenidas con ambos equipos, debido al tipo de materiales predominantes como la arcilla y arenisca. Los datos que presentan estos sondeos son indicativos de que:

- a) El equipo construido presenta menor sensibilidad que el equipo ERA, cuando se trata de terrenos predominantemente arcillosos, pero no en forma drástica; lo que se corrobora cuando se observa que los datos calculados con ambos equipos, al ser graficados presentan la misma tendencia.
- b) En el caso del equipo diseñado, se miden potenciales naturales que con el tiempo van cambiando; es decir, antes de medir el potencial inducido,

se mide el potencial natural que existe en ese instante, para cuando se mide el potencial inducido, el potencial natural pudo haber cambiado dando una diferencia de potencial que no corresponde a la de unos instantes anteriores y entonces se comete un pequeño error en el cálculo de la resistividad, que se refleja en una mayor diferencia de resistividad comparándola con la obtenida por medio del equipo ERA. Entre más corto es el intervalo de tiempo entre la medición de potencial natural e inducido se cometerán menos errores de medición.

A continuación se analizarán los datos que se calcularon en una zona predominantemente arenosa, donde se observa que las diferencias entre ambos equipos son mayores.

V.4 Sondeo 4 (S4).

Los datos de resistividad obtenidos con ambos equipos en el sondeo S4, realizado en el banco de arena, se muestran en la gráfica de la Figura 140 y la diferencia de los datos en la Tabla 23.

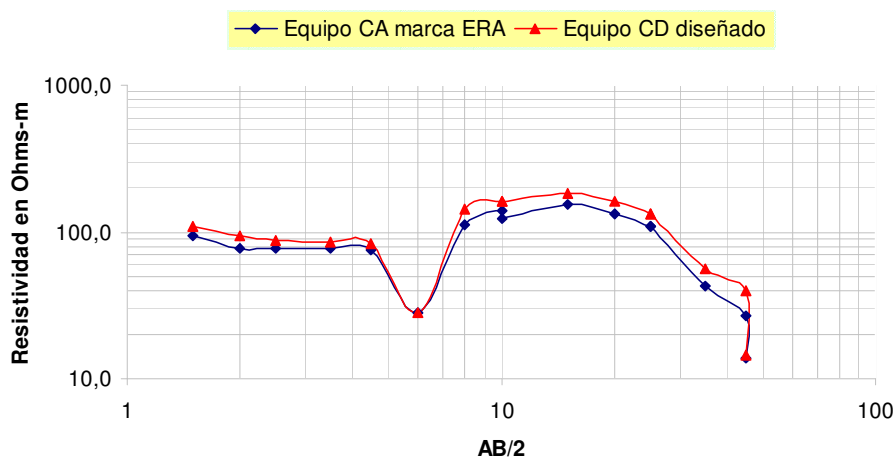


Figura 140. Gráficas del sondeo S4 considerando ambos equipos.

La diferencia que se obtuvo entre los datos obtenidos con ambos equipos durante el sondeo 4, se observan en la Tabla 23.

Tabla 23. Diferencia entre los datos tomados en sondeo S4

No.	pa equipo ERA	pa equipo diseñado	Diferencia	% de la diferencia
1	93	110,2	-17,2	-18,49
2	76,3	93,5	-17,2	-22,54
3	77,1	88,4	-11,3	-14,66
4	76,5	86	-9,5	-12,42
5	75,1	83,6	-8,5	-11,32
6	28,3	28,3	0	0,00
7	113,1	144,5	-31,4	-27,76
8	138,2*	163,6*	-25,4*	-18,38*
9	124,4*	159,9*	-35,5*	-28,54*
10	154,1	181,3	-27,2	-17,65
11	133,2	160,8	-27,6	-20,72
12	110*	132,7*	-22,7*	-20,64*
13	108*	131,8*	-23,8*	-22,04*
14	42,3	55,9	-13,6	-32,15
15	26,7*	39,8*	-13,1*	-49,06*
16	13,7*	14,5*	-0,8*	-5,84*

En este sondeo, la distancia máxima entre electrodos de corriente fue de 90 m; se observan diferencias grandes entre las resistividades obtenidas con los dos equipos, llegando hasta un -49.06 % en el penúltimo punto del sondeo, en el cual se presenta un empalme; es decir, en este punto la distancia MN se incrementó de 2 m a 4 m, presentándose una disminución en la diferencia de las resistividades medidas (de -49.06 % a -5.84 % en la Tabla 23), siendo -5.84 % la diferencia que se toma en cuenta debido a la mejor relación señal/ruido. Por lo tanto, la máxima diferencia que se observa en este sondeo es la obtenida en el punto 14 de la Tabla 23, con un -32.15 %.

Refiriéndose a la Tabla 17 que presenta los datos tomados con el equipo diseñado, se presentan valores de corriente muy pequeños, debido a que en esa zona el terreno es muy arenoso; de hecho, en ese lugar se extrae arena para comercializar y van rellenando el subsuelo con escombros. Esta situación hace que exista una gran resistencia de contacto entre el terreno y los electrodos, y evita que la corriente pueda fluir entre los electrodos A, B.

Entre más pequeña es la corriente, las diferencias de potencial medidas también disminuyen, por lo que para el caso del equipo diseñado se obtienen

valores de resistividad moderadamente alejados de los datos obtenidos con el quipo ERA.

Esta situación no pudo mejorarse vertiendo agua en la zona donde se enterraron los electrodos.

De acuerdo a los datos obtenidos en este sondeo:

- a) El terreno en el que se midió la resistividad es de consistencia más arenosa conforme se va profundizando en el sondeo, por lo que el equipo diseñado presenta menor sensibilidad en este tipo de terrenos.
- b) En algunos puntos del sondeo existía una gran resistencia de contacto entre los electrodos y el terreno, lo que permitía una corriente muy pequeña, la cual no pudo mejorarse en la mayoría de los puntos sondeados ocasionando errores en la lectura de corriente por parte del equipo diseñado.
- c) El equipo de marca presentó un funcionamiento dudoso en este sondeo, debido a que el receptor tenía problemas para estabilizar su lectura en algunos puntos.

V.5 Sondeo 5 (S5).

El sondeo S5 fue realizado únicamente con el equipo diseñado y la intención del mismo fue obtener la desviación estándar que presenta. De acuerdo a los datos que se obtuvieron cuando se hizo el sondeo se tiene:

Número de lectura	AB=3 MN=0.4	AB=5 MN=0.4	AB=7 MN=0.4	AB=12 MN=0.4	AB=16 MN=0.4	AB=30 MN=1	AB=50 MN=1	AB=90 MN=2	AB=120 MN=4
Desviación estándar	0.711 Ω -m	0.2255 Ω -m	0.3982 Ω -m	0.5329 Ω -m	0.6261 Ω -m	1.8573 Ω -m	1.75 Ω -m	1.1751 Ω -m	2.1954 Ω -m

La desviación estándar va creciendo conforme la distancia entre los electrodos de corriente AB, va aumentando. Una causa posible de esto es la variación entre el tiempo en que se mide el potencial natural y el inducido, como se

indicó anteriormente. Cuando $AB = 120$ m se tiene una desviación estándar de 2.1954Ω -m. De acuerdo con la gráfica de la Figura 136 la media para este punto es 52.2Ω -m, por lo tanto la desviación estándar representa un:

$$\text{Porcentaje de la media} = \{(2.1954 \Omega\text{-m}) / (52.2 \Omega\text{-m})\} * 100 = 4.2 \%$$

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Con base en el análisis de los resultados se tienen las siguientes conclusiones:

Al inicio del documento se planteó la hipótesis en la que se esperaba que el resistivímetro diseñado se pudiera utilizar hasta una distancia $AB=120$ m en diferentes zonas aluviales. Mediante este equipo se obtuvieron lecturas estables de potencial natural, potencial inducido y corriente hasta la distancia considerada, en diferentes zonas, utilizando el arreglo Schlumberger.

Las curvas de resistividad que se adquirieron con ambos equipos guardan la misma tendencia, obteniéndose valores similares a lo largo de los sondeos.

Las diferencias que existen entre las curvas de resistividad obtenidas con los datos que proporcionó el resistivímetro diseñado y el comercial, no son críticas pues al aplicar la inversión de los datos para obtener un modelo del subsuelo, se parte de un modelo inicial.

Recomendaciones:

- ❖ Realizar más sondeos con el resistivímetro diseñado para seguir evaluando su funcionamiento.
- ❖ Realizar pruebas con el circuito compensador de potencial y realizar los cambios o ajustes que vayan surgiendo.
- ❖ Se recomienda utilizar otro tipo de cubierta que proteja al aparato de la humedad.
- ❖ Medir y analizar qué sucede con el potencial natural cuando se inyectan corrientes de frecuencias variables, con la finalidad de diseñar un resistivímetro de CA.
- ❖ Al realizar sondeos utilizando el arreglo Schlumberger en terrenos arenosos, fijar una distancia MN lo más cercana a $2/5$ de la distancia AB con el fin de mejorar las mediciones de potencial.
- ❖ Realizar interpretación de sondeos verticales considerando el factor geométrico normal y el corregido, para comparar resultados.

REFERENCIAS.

1. Abdelhady E., Essam A., Morsy & Sherif M. (2004). Geoelectric Resistivity Sounding for Groundwater Evaluation: Two Field Examples. Geophysics Dept., Faculty of Science, Cairo University. Egyptian Geophysical Society Journal, vol. 2, No. 1, 61-68.
2. Alepuz S. (2004). Aportación al Control del Convertidor CC/CA de Tres Niveles. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Pp. 1-10.
3. Álvarez A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería Civil. Publicación Técnica No. 229. Sanfandila, Querétaro. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.
4. Angulo F. (2004). Análisis de la Dinámica de Convertidores Electrónicos de Potencia Usando PWM Basado en Promediado Cero de la Dinámica del Error (zad). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. pp. 1-11.
5. Arteaga M. (2006). Control No Lineal de Convertidores Conmutados CC/CC: Análisis de Prestaciones y Verificación Experimental. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona. Pp 10-20.
6. Auken E., Pellerin L., Christensen N. & Sorensen K. (2006). A survey of current trends in near-surface electrical and electromagnetic methods. Society of exploration geophysicists. Geophysics vol. 71, no. 5, G249-258.
7. Bauer P., Supper R., Zimmermann S. & Kinzelbach W. (2006). Geoelectrical imaging of groundwater salinization in the Okavango Delta, Botswana. Journal of Applied Geophysics 60,126-141.
8. Belmonte J., Campos E. y Alatorre Z. (2003). Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etlá, Oaxaca, México. *Revista Geofísica No. 59*.
9. Belmonte J., Campos E. & Herrera J. (2005). Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, México. *Geofísica Internacional*, Vol. 44, Num. 3, 283-300.
10. Bolshakov D., Modin I., Pervago E., & Shevnin V. (1995). Anisotropy effects investigatios by resistivity method in some inhomogeneous media. Geological faculty, Moscow, 1-6.
11. Bolshakov D., Modin I., Pervago E. & Shevnin V. (1998a). Modeling and interpretation of azimuthal resistivity sounding over two-layered model with arbitrary-oriented anisotropy in each layer. Geological faculty, Moscow, 1-4

12. Bolshakov D., Modin I., Pervago E. & Shevnin V. (1998b). New Step in anisotropy studies: Arrow-type array. MSU, Geological faculty, Moscow, 1-4.
13. Boyd, T. (1996). Introduction to Geophysical Exploration, obtenida de: http://galitzin.mines.edu/INTROGP/main_template.jsp?menu=res_menu.html&page=DC%20Resistivity%3A%20Home&url=RES%2Fmain.html
14. Busby, J. & Jackson, P. (2006). The application of time-lapse Azimuthal apparent resistivity measurements for the prediction of coastal cliff failure. *Journal of Applied Geophysics* 59, 261-272.
15. Buseli G. & Kanglin L. (2001). Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods, *Journal of Applied Geophysics* 48, 11 – 23.
16. Busso, A. y Yermolin, E. (2007). Métodos Geofísicos en Investigaciones Geotécnicas en el Permafrost Antártico. VI SIMPOSIO ARGENTINO Y III LATINOAMERICANO SOBRE INVESTIGACIONES ANTÁRTICAS.
17. Cassiani G., Vittorio B., Alberto V., Nicoletta F. & Andrew M. (2006). A saline trace test monitored via time-lapse surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics* 59, 244-259.
18. Cataldi, A., Zambrano F. y Rojas H., (2006). Aplicación de Métodos de Resistividad en Investigación Hidrológica (experiencias en Venezuela). XIII Congreso Venezolano de Geofísica.
19. Custodio E., y Llamas R. (2001) Hidrología subterránea. (2da.ed.). Barcelona España: Omega.
20. Dahlin T. (2000). Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 48, 181-187.
21. De la Vega M. (2002). Ingeniería de Puesta a Tierra. (2da. ed.). México: Limusa.
22. Echeverría A. (n.d.). Elementos de Máquinas, Correas y Poleas. Transmisiones Mecánicas. Apuntes de texto. Departamento de Ingeniería Mecánica. FIUBA. Cuba.
23. Ezekoye, B.A. & V.N. Ugha. (2007). Characterizations And Performance Of A Solid-State Inverter And Its Applications In Photovoltaics. *Pacific Journal of Science and Technology*. 8(1):4-11.
24. Gasulla, M. (1999). Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica en el subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Cataluña. Barcelona. Pp 1-1:2-9

25. Gispert, J. (2005). Definición del volumen de suelo húmedo (vsh) en microirrigación, mediante la resistividad eléctrica: aplicación al estudio del porcentaje de vsh en el comportamiento del manzano (*malus domestica* borkh). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol. VII:*
26. Habberjam, G. & Wattkins G.(1967). The use of the square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical prospecting* 15, 445-467.
27. Haeberlin H. & Graf J. (1998). Islanding of Grid-Connected PV Inverters: Test Circuits and Some Test Results. 2nd World conference on Photovoltaic solar energy conversion, Viena, Austria.
28. Haik Y. (2003). *Engineering Design Process*. U.S.A: Thompson Brooks/Cole.
29. Hayt W. (1988). *Análisis de circuitos en ingeniería*. (4ª. ed.). México: McGraw–Hill.
30. Hennig T., Weller A. & Canh T. (2005). The effect of dike geometry on different resistivity configurations. *Journal of Applied Geophysics* 57, 278-292.
31. Holman J. Gajda W.(1986). *Métodos experimentales para Ingenieros*. (4ª. ed.). México: McGraw- Hill.
32. Inman J. (1975). Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics journal* 40, 798-817.
33. Jesiotr V., Bernatene E. y Winograd E. (2005). Fuentes de tensión y corriente. Laboratorio de electrónica, Departamento de física, FCEyN, UBA, pp.1-6.
34. Koefoed O. (1968). *The Application of the Kernel Function in Interpreting Geoelectrical Resistivity Measurements*. Series 1 No.2 France: G.Kunetz Editors
35. Lashkaripour G. (2003). An investigation of groundwater condition by geoelectrical resistivity method: A case study in Korin aquifer, southeast Iran. *Journal of Spatial Hydrology*. Vol. 3. No.1
36. Maloney J. (1997). *Electrónica Industrial moderna*. (3era. ed.). México: Prentice Hall.
37. Malvino A. (1994). *Principios de electrónica*. (5ta. ed.). España: Macmillan / McGraw-Hill.
38. Milsom J. (1996). *Field Geophysics*. Third Edition. Wiley Editors. U.S.A.
39. Molina, W. (2006). Comparación de los métodos 1-d y 2-d de resistividad eléctrica por medio de sondeos tipo Wenner, Dipolo-dipolo y Wenner-

Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD y RES2DINV. UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR.

40. Mota R., Monteiro F., Mateus A., Marques F., Goncalves M., Figueiras J. & Amaral H. (2004). Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by geoelectrical surveys. *Journal of Applied Geophysics* 57, 11-22.
41. Niels B. (2000). Difficulties in determining electrical anisotropy in subsurface investigations. *Geophysical Prospecting* 48, 1-19.
42. NTE electronics. (2005). *Technical Guide and Cross Reference*. (12^a ed.) U.S.A
43. Orellana E. (1982). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Vol.1. (2da. ed.). Madrid: Paraninfo.
44. Orellana E., Higuera M. y Merchán F. (1995) La interpretación automática (por medio de ordenador) en la prospección geofísica. Caso de refracción sísmica y de SEV. *Física de la Tierra* no. 7, 33-51.
45. Osella, A., Favetto, A., Martinelli, P. & Cernadas, D. (1999). Electrical imaging of an alluvial aquifer at the Antinaco-Los Colorados tectonic valley in the Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of Applied Geophysics* 41. pp 359-368.
46. Pinilla A. (n. d.). *Adaptación de un Generador Eléctrico de Imanes Permanentes y flujo radial*. Universidad de los Andes. Colombia.
47. Pirttijärvi M. (2005). DCINV 1-D. Interpretation of electrical (DC) soundings. Versión 1.4 ©. Obtenida de: www.repidshare.com/files/182572059/DC_INV.zip.html
48. Rivas R. (n.d.). *Caracterización de áreas de recarga y descarga de aguas subterráneas mediante la aplicación de sondeos eléctricos verticales*. Instituto de hidrología de Llanuras- Universidad Nacional de La Pampa. República de Argentina. Pp. 139-142.
49. Ruiz J. (1993). *Prospección geoelectrica y registros geofísicos de pozos*. Libro V. C.N.A. México.
50. Sánchez F. (2004). *Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales*. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca España, tomado de: <http://web.usal.es>
51. Senos M. (2002). Square array anisotropy measurements and resistivity sounding interpretation. Department of Geosciences, University of Aveiro, Portugal. *Journal of Applied Geophysics* 49, 185– 194

52. Schmutz M., Andrieux P., Bobachev A., Montoroi J. & Nasri S. (2006). Azimuthal resistivity soundings over a steeply dipping anisotropic formation. A case history in central Tunisia. *Journal of Applied Geophysics* 60, 213-224.
53. Steinich B., I. Simon, J., A. Chavarría & I. Marín, (1997). Geophysical investigations of the vadose zone in the Valley of Hermosillo aquifer, Sonora, México. *Geofísica internacional*, 1-11.
54. Telford W., Geldart L., Sheriff R. (1990). *Applied Geophysics*. (2nd. Ed.) Cambridge University Press.
55. Valkenburgh V. (1994). *Electricidad Básica*. Vol.1. (12^a ed.). México: CECSA.
56. Vallejo H. (2003). Teoría, Práctica y Diseño con CI555 Funcionamiento y Características. *Revista Saber electrónica*. Año X, No. 21. México. 5-19.
57. Vernavá A. (2005). *Inversores Monofásicos Autónomos*. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario, 40 p.
58. Wolf S. y Smith R. (1992). *Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio*. (2da. ed.). México: Prentice Hall.
59. Zapata, A. (2001). Prospección de materiales de aluvión, mediante estudio geeléctrico para el cálculo de reservas y planeamiento minero. *Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre "Caracterización y Normalización de Materiales de Construcción"*. Programa CYTED. Madrid. Pp. 1-10.

ANEXO A. Generador de polos permanentes impulsado por un mecanismo de bicicleta.

A.1 Fuente de voltaje de 12 VCD impulsada por un sistema mecánico.

Cuando las pilas que alimentan el equipo se descargan en campo, es muy difícil continuar con la labor de los sondeos a menos que se cuente con pilas de repuesto.

El equipo diseñado en este documento, puede ser alimentado externamente por medio de otro par de pilas de las mismas características, e incluso por la pila de un carro que presenta de 12 a 13.8 VCD. Otra opción es conectar un generador de corriente directa de imanes permanentes movido mecánicamente, con la ventaja de que no tiene que recargarse como las pilas utilizadas, con la pérdida de tiempo correspondiente, además de que no contamina, y puede transportarse a cualquier lugar.

El motor generador se observa en la Figura A.1 siguiente. Por medio del mecanismo de una bicicleta acoplado a una transmisión por bandas (Echeverría, n.d.), se obtiene a la salida del generador un voltaje de 40 VCD; regulándolo a 12 VCD y alimentándolo al equipo por medio del conector correspondiente, se obtiene una fuente estable de voltaje para energizar el equipo. Esta clase de generadores no necesitan de una corriente excitatriz para producir el campo magnético ya que este es suministrado constantemente por los imanes. (Pinilla, n. d.)



Figura A.1. Generador de C.D. de imanes permanentes.

En la Figura A.2 se muestra el generador acoplado al mecanismo de bicicleta, con un par de poleas se multiplican las r.p.m. que se aplican a los pedales.



Figura A.2. Generador acoplado a una bicicleta.

A.2 Cálculo de los parámetros del generador impulsado por un mecanismo de bicicleta.

Los datos que presenta el motor generador son:

Marca: WER INDUSTRIAL

Velocidad: 1725 *rpm*

Voltaje de salida: 90 VCD

Corriente: 5.5 A

Potencia: 0.5 HP

Como todo generador de voltaje, existe una relación directa entre la velocidad con que el rotor corta las líneas de fuerza del campo magnético y el voltaje que se genera en sus terminales, los parámetros de este elemento nos indican que si el rotor del generador se hace girar a una velocidad de 1725 *rpm*, se obtendrán 90 VCD en sus terminales de salida. En este caso se necesitan 12 VCD para poder alimentar el equipo diseñado, así que se obtiene a

continuación la velocidad a la que debe girar el rotor del generador para obtener 12 VCD.

$$rpm \text{ del generador} = \frac{(1725rpm)(12VCD)}{90VCD} = 230 rpm .$$

En caso de que la velocidad del rotor exceda este valor, se cuenta con un regulador de voltaje que se encargará de mantener los 12 VCD a la salida del generador y no se origine una sobrealimentación que pueda dañar el equipo de medición diseñado en este documento. La imagen y el circuito del regulador se muestran en las Figuras A.3 y A.4 respectivamente.

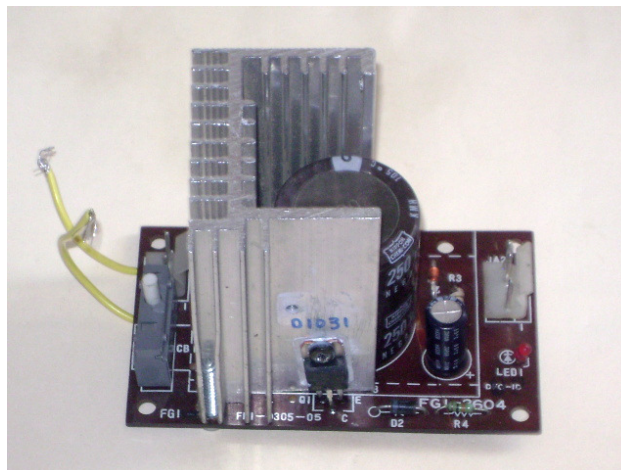


Figura A.3. Imagen del circuito regulador.

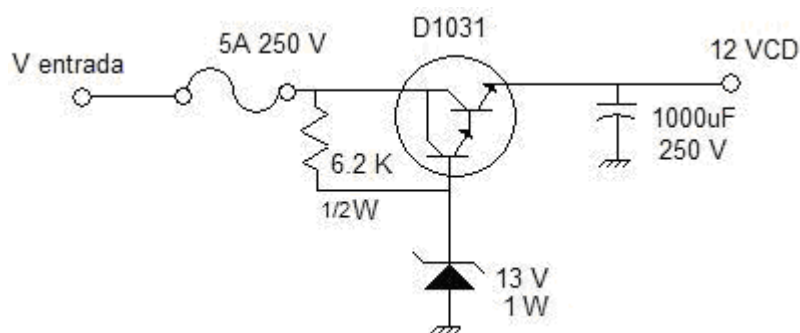


Figura A.4. Circuito electrónico del regulador de voltaje.

A.3 Cálculo de la velocidad de pedaleo para generar 12 VCD.

La velocidad del eje motriz se calcula de la siguiente forma:

$$rpm \text{ polea motriz} = rpm \text{ polea conducida} \times D. \text{ de polea conducida} / D. \text{ polea motriz}$$

Donde D = diámetro.

Se tiene el sistema siguiente:

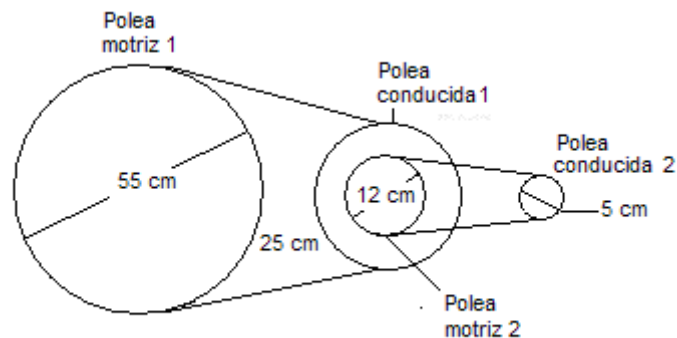


Figura A.5. Sistema de poleas compuesto.

Los datos se calculan tomando en cuenta la velocidad a la que debe girar el generador y de ahí hasta encontrar la velocidad de la polea motriz (rueda de bicicleta)

$$rpm \text{ polea motriz 2} = rpm \text{ polea conducida 2} \times D. \text{ de polea conducida 2} / D. \text{ polea motriz 2}$$

$$rpm \text{ polea motriz 2} = 230 \text{ rpm} \times 5 \text{ cm} / 12 \text{ cm} = 95.83 \text{ rpm}$$

La velocidad de la polea motriz 2 se transfiere a la polea conducida 1, por lo tanto:

$$rpm \text{ polea motriz 1} = rpm \text{ polea conducida 1} \times D. \text{ de polea conducida 1} / D. \text{ polea motriz 1}$$

$$rpm \text{ polea motriz 1} = 95.83 \text{ rpm} \times 25 \text{ cm} / 55 \text{ cm} = 43.55 \text{ rpm}$$

Dividiendo entre 60, significan 0.72 vueltas de la rueda de bicicleta por cada segundo.

Durante los sondeos, la bicicleta se revolucionó a una vuelta por segundo, si calculamos la velocidad obtenida en el generador, a partir de esa velocidad de entrada, se tiene que:

$$rpm \text{ en polea motriz 1} = 60 \text{ rpm}$$

$$rpm \text{ polea conducida 1} = rpm \text{ polea motriz 1} \times D \text{ de polea motriz 1} / D \text{ polea conducida 1}$$

$$rpm \text{ polea conducida 1} = 60 \text{ rpm} \times 55 \text{ cm} / 25 \text{ cm} = 132 \text{ rpm}$$

$$rpm \text{ polea conducida 2} = rpm \text{ polea motriz 2} \times D \text{ de polea motriz 2} / D \text{ polea conducida 2}$$

$$rpm \text{ polea conducida 1} = 132 \text{ rpm} \times 12 \text{ cm} / 5 \text{ cm} = 316.8 \text{ rpm}$$

Lo cual da una relación de voltaje de: $316.8 \text{ rpm} \times 90 \text{ VCD} / 1725 \text{ rpm} = 16.52 \text{ VCD}$, los cuales se estabilizaron a 12 VCD por medio del circuito regulador.

A.4 Comparación de resistividades obtenidas alimentando el resistivímetro con las baterías y con de un generador de corriente directa de imanes permanentes.

Se realizó un sondeo tipo Schlumberger S6 para comparar las resistividades calculadas con el equipo, utilizando baterías y utilizando la fuente mecánica que se diseñó y construyó. Las distancias entre electrodos de corriente que se utilizaron, fueron: AB= 3 m, 4 m, 5 m, 7 m, 9 m, 12 m, 16 m, 18 m, 20 m, 30 m.

En la Figura A.6 se muestra la fuente mecánica alimentando al equipo diseñado.



Figura A.6. La fuente mecánica que proporciona el voltaje de entrada.

La Figura A.7 muestra el voltaje de salida ya regulado, el cual es de 11.7 VCD.



Figura A.7. Carátula que muestra el voltaje regulado a la salida del generador.

A continuación en la Tabla A.1, se muestran los datos obtenidos en el sondeo de prueba realizado con el equipo energizado con baterías.

Tabla A.1. Datos obtenidos alimentando el equipo diseñado con baterías.

<i>AB</i>	MN	k	P. nat.	P. ind	ΔV	<i>I</i>	ρ_a
m	m	m	mV	mV	mV	mA	Ω -m
3	0,4	17,6715	31,1	-727	758,1	215	62,31
4	0,4	31,416	23,8	-342	365,8	193	59,54
5	0,4	49,0875	20,70	-202,60	223,3	198,00	55,36
7	0,4	96,2115	20,10	-66,10	86,2	170,00	48,78
9	0,4	159,0435	18,90	-37,30	56,2	194,00	46,07
12	0,4	282,744	17,90	-6,40	24,3	170,00	40,42
16	0,4	502,656	16,80	-5,10	21,9	217,00	50,73
18	0,4	636,174	16,50	10,10	6,4	84,00	48,47
20	1,00	314,16	15,90	4,20	11,7	203,00	18,11
30	1,00	706,86	15,40	3,50	11,9	225,00	37,39

La siguiente Tabla A.2, muestra los datos obtenidos con el equipo diseñado al conectar el generador accionado por la bicicleta.

Tabla A.2. Datos obtenidos alimentando el equipo diseñado con el generador.

<i>AB</i>	<i>MN</i>	<i>k</i>	<i>P. nat.</i>	<i>P. ind</i>	ΔV	<i>I</i>	ρ_a
m	m	m	mV	mV	mV	mA	Ω-m
3	0,4	17,6715	25,2	-656	681,2	193	62,37
4	0,4	31,416	23,3	-318	341,3	180	59,57
5	0,4	49,0875	20,70	-189,50	210,2	185	55,77
7	0,4	96,2115	19,60	-62,80	82,4	162	48,94
9	0,4	159,0435	18,60	-33,80	52,4	178	46,82
12	0,4	282,744	17,70	-5,30	23	160	40,64
16	0,4	502,656	16,60	-3,40	20	195	51,55
18	0,4	636,174	16,40	9,90	6,5	84	49,23
20	1,00	314,16	15,70	3,90	11,8	196	18,91
30	1,00	706,86	15,20	3,30	11,9	220	38,23

A continuación en la Tabla A.3, se muestran los datos de obtenidos en el sondeo S6 (Resumen de las Tablas A.1 y A.2); el cual se desarrolló para comparar los datos de resistividad calculados cuando el equipo diseñado es energizado por baterías, y cuando es energizado con el motor generador impulsado por una bicicleta.

Tabla A.3. Resistividades obtenidas en el sondeo.

<i>AB</i>	<i>MN</i>	Baterías ρ_a	Generador ρ_a	Diferencia ρ_a
m	m	Ω-m	Ω-m	Ω-m
3	0,4	62,31	62,37	-0,06
4	0,4	59,54	59,57	-0,03
5	0,4	55,36	55,77	-0,41
7	0,4	48,78	48,94	-0,16
9	0,4	46,07	46,82	-0,75
12	0,4	40,42	40,64	-0,22
16	0,4	50,73	51,55	-0,82
18	0,4	48,47	49,23	-0,76
20	1,00	18,11	18,91	-0,8
30	1,00	37,39	38,23	-0,84

La máxima distancia entre los electrodos de corriente fue de 30 m, y la máxima diferencia entre las resistividades medidas fue de -0.84 Ω -m, ocurrido en el

último punto del sondeo. El signo negativo es por que la lectura con el generador fue mayor.

Los valores de ΔV e I obtenidos con el motor generador son menores que los obtenidos cuando se conectaron baterías al resistímetro. Una causa posible de esta condición es que si la frecuencia en el pedaleo no es uniforme, los valores eficaces de la corriente y el potencial medidos disminuyen un poco; aún así la diferencia no es crítica, como puede observarse en la Figura A.10, la cual ilustra un comparativo de ambas curvas.

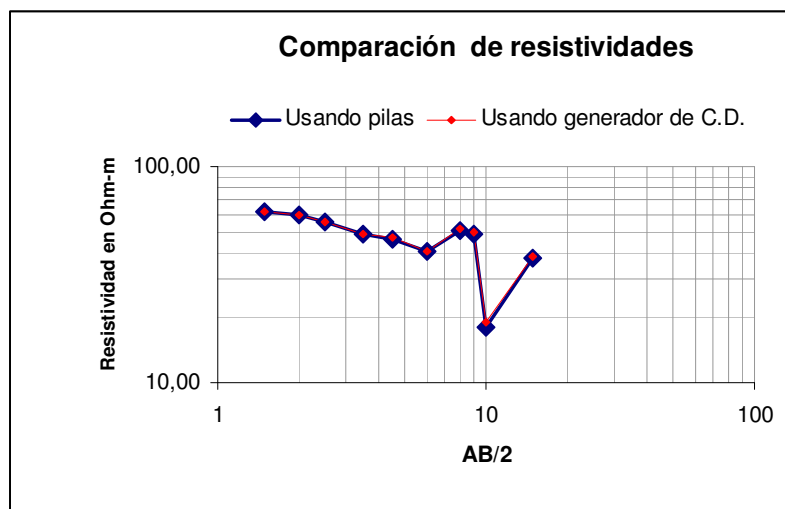
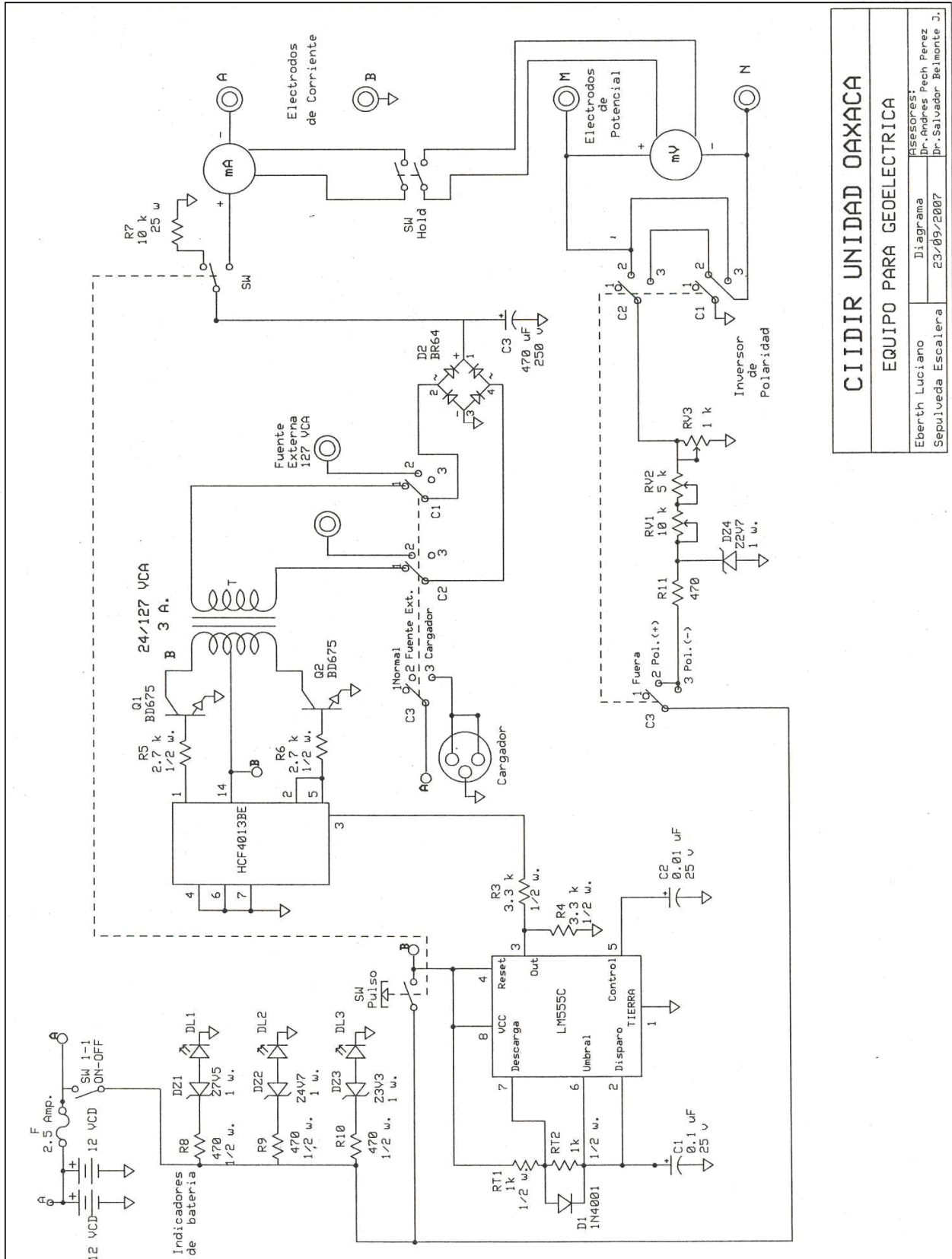


Figura A.8. Comparativo de las resistividades obtenidas.

En la gráfica se observa que las diferencias calculadas son mínimas y las dos curvas se ven montadas una sobre otra.

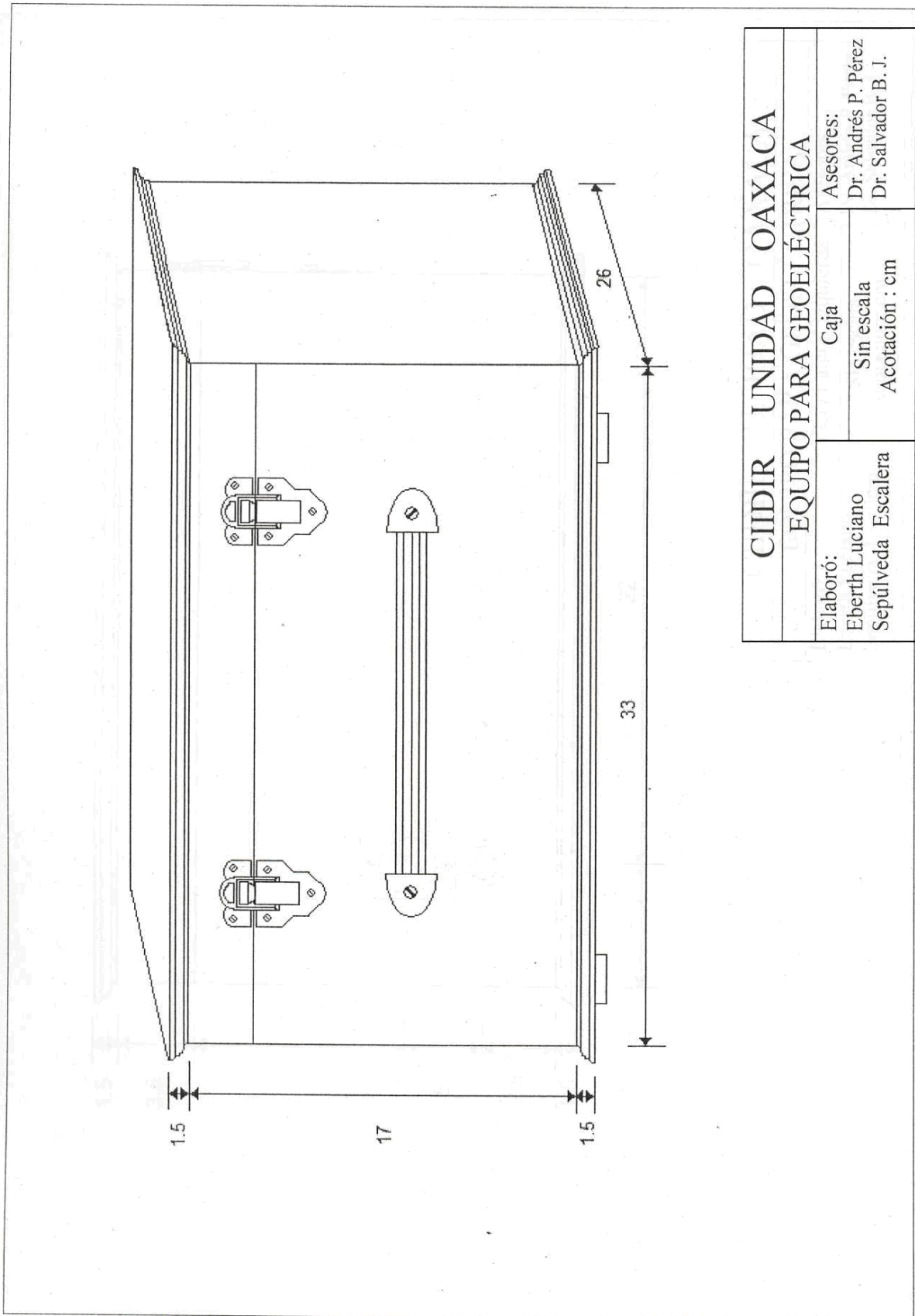
Mediante este sondeo se comprueba que es posible mantener un voltaje estable mediante el uso de un motor generador de imanes permanentes, impulsado por medios mecánicos. Esto significa contar con una fuente de energía renovable, no contaminante, que puede sustituir a las baterías de ácido-plomo que se utilizan comúnmente para alimentar este tipo de equipos, aprovechando el esfuerzo humano.

ANEXO B. Diagrama electrónico.

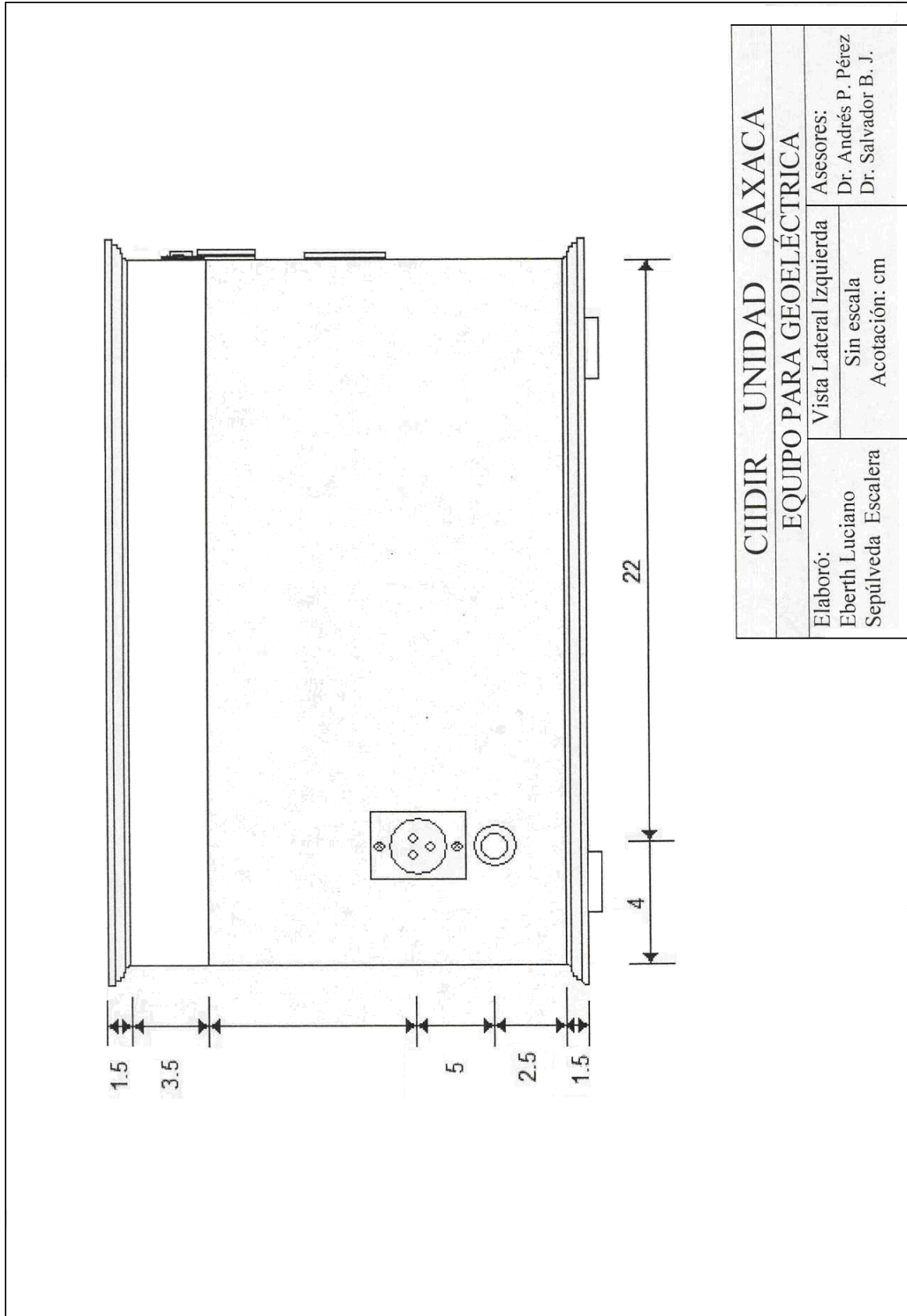


CIIDIR UNIDAD OAXACA
EQUIPO PARA GEOELECTRICA
 Diseñador: Eberth Luciano
 Diagrama: Dr. Andres Pech Perez
 Fecha: 23/09/2007
 Asesor: Dr. Salvador Belmonte J.
 Sepulveda Escalera

ANEXO D. Vista frontal de la cubierta.



ANEXO E. Vista lateral izquierda de la cubierta.



ANEXO F. COSTOS

Cantidad	Elemento	Descripción	Costo
1	conector	Tipo hembra CANON.	15.00
1	conector	Tipo macho CANON.	11.00
2	broche	Tipo veliz.	6.00
1	agarradera	Tipo veliz / negra.	14.00
7m.	cable	Número 20 para realizar conexiones.	14.00
2	Teclas	De plástico color gris.	8.00
1	Transform.	127 / 24V, 4 A.	130.00
2	Resistencias	RT1,RT2 1 k Ω ½ W, de carbón.	2.00
2	Resistencias	R3, R4 3.3 k Ω ½ W, de carbón.	2.00
2	Resistencias	R5, R6 2.7 k Ω ½ W, de carbón.	2.00
1	Resistencia	R7 10 k Ω 25 W, de alambre.	6.00
4	Resistencias	R8, R9, R10, R11, 470 Ω ½ W, de carbón.	4.00
1	Diodo zener	DZ1 9.1 V, 1 W.	1.50
1	Diodo zener	DZ2 6.7 V, 1 W.	1.50
1	Diodo zener	DZ3 3.3 V, 1 W.	1.50
1	Diodo zener	DZ4 2.7 V, 1 W.	1.50
1	Diodo	D1 Rectificador 1N4001	1.50
1	Diodo	D2 Puente de diodos 8 A, 400 V	7.00
3	Diodos	Led 5 mm color ámbar con base.	12.00
1	Capacitor	CT Electrolítico 0.1 uF. 25 V.	1.50
1	Capacitor	C2 Electrolítico 0.01 uF. 25 V.	1.50
1	Capacitor	C3 Electrolítico 470 uF. 250 V.	41.50
1	C.I.	Circuito integrado LM555C	6.00

1	C.I.	Circuito integrado HCF4013BE	8.00
2	Transistores	Q1,Q2 BD675 Darlington tipo NPN	24.00
2	Bases	Para apoyar los circuitos integrados	6.00
1	Tabla Fen.	Tarjeta para realizar circuitos	15.00
1	Rollo	Soldadura estaño plomo 40/60	47.00
1	Ácido	Para realizar tarjetas de circuitos.	20.00
4	Planillas	Para plantilla de circuitos.	32.00
3	Resistencias	RV1, RV2, RV3 de 10 k Ω , 5 k Ω , y 1 k Ω respectivamente.	21.00
5	Fusibles	Tipo europeo de 2.5 A.	7.50
2	Baterías.	12 VCD y 7 A-h.	740.00
1	Portafusible.	Tipo europeo.	2.5
1	Interruptor	Tipo push múltiple	10.00
1	Interruptor	Tipo push 2 polos/2 tiros	8.00
1	Interruptor	Tipo deslizable 2 polos/2 tiros	6.00
2	Interruptor	Rotatorio 3 polos 4 tiros	28.00
3	perillas	Plástico P-07	27.00
3	perillas	Baquelita P-05	39.15
1	cargador	Para pilas de ácido-plomo a 12 vcd.	290.00
4	caimanes	Tipo tijera 30 A	36.00
6	Plugs	Tipo banana philips	30.00
10	Jacks	Tipo banana philips	42.00
6	Terminales	Latón tipo FASTO	18.00
1	Disipador	Aluminio	13.00
1	Multímetro	M9501	176.00
1	Multímetro	M9502	240.00

1	Acrílico	Con perforaciones y rotulado 23x30 cm.	200.00
2	Tablas	3/4 x 12 x 3-1/4. / cubierta y carretes.	217.00
2	Bisagras	De fierro.	3.00
		Total	2595.65

ACCESORIOS

Cantidad	Elemento	Descripción	Costo
100 m.	Cable · 16	THW CONDUMEX	323.03
1 par	Guantes	De piel tipo OSCARIA no. 12	75.00
1 Kg.	Electrodos.	De 3/32 para soldar acero inoxidable.	460.00
7	Varillas	Acero ½ inoxidable	1950.00
1	broca	1/16 para fierro	7.80
1	cinta	50 m. de longitud.	120.00
		Total:	2935.83

ANEXO G. Manual de usuario.

MANUAL DE USUARIO

Los diseñadores no aceptan responsabilidad alguna por los errores en el documento o los problemas que pudieran producirse por el uso de este material.

-----Reservados todos los derechos-----

¡ADVERTENCIA!

El equipo geoelectrónico diseñado produce descargas de corriente a elevado voltaje de corriente continua.

El operador debe mantener siempre bajo control los cables de los electrodos para evitar accidentes a personal de ayuda, personas no autorizadas y animales, mientras el sistema está operando. ***Se recomienda usar equipo de seguridad como zapatos aislantes y guantes para minimizar el riesgo de una descarga eléctrica accidental, y quitarse objetos metálicos de las manos como pulseras o anillo que pudieran presentar un camino de baja impedancia para la corriente eléctrica.***

Los circuitos de corriente están conectados con semiconductores, los rayos, las cercas de ganado de alta tensión u otras fuentes de alta tensión pueden dañar el aparato. Los rayos caídos a kilómetros de distancia pueden inducir cientos de voltios en disposiciones de cables de cierta longitud, y esto acarrea un riesgo tanto para personas como para el equipo.

¡Nunca deben hacerse mediciones durante una tormenta con este aparato eléctrico!

Si se acercara una tormenta mientras se están haciendo mediciones, apague el equipo y desconecte los cables de los terminales sin tocar ningún conductor desnudo. Con el aparato y los accesorios conectados sólo debe operar

personal instruido para ello. Manténgase a las personas no autorizadas y a los animales sueltos lejos del aparato, accesorios conectados y cables.

FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

CONTROLES Y TERMINALES. La Figura G.1 muestra los controles del equipo diseñado.

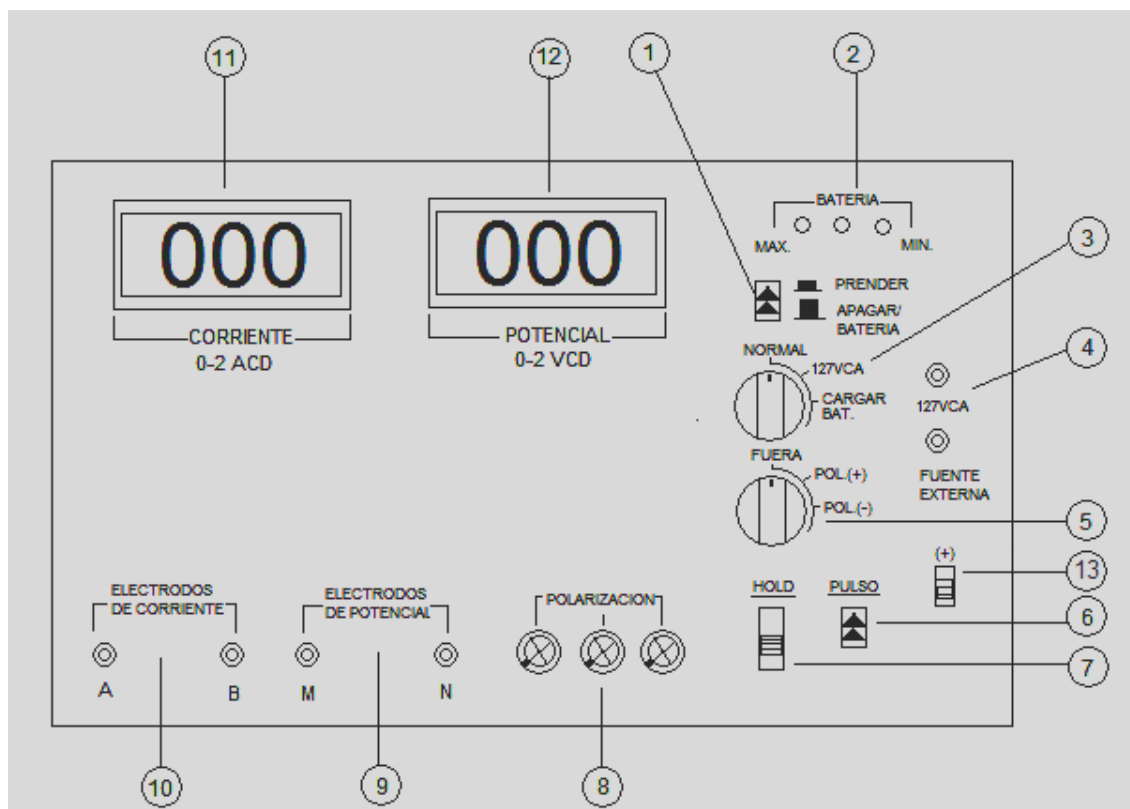


Figura G.1. Controles del equipo.

Descripción:

1.- Botón de encendido.

Al presionarlo, se observarán los diodos indicadores de carga encendidos si las baterías tienen energía, y los medidores de corriente y potencial se pondrán en ceros. Para apagar el equipo vuelve a oprimir el botón.

2.- Indicador de estado de las baterías.

Consta de 3 diodos que se irán apagando uno a uno según la carga de las baterías internas vaya disminuyendo a la mitad y 1 tercio de carga.

3.- Control de fuente:

Tiene 3 posiciones marcadas como:

- a) Normal: en esta posición el oscilador interno hace que salga la energía eléctrica que alimentará el subsuelo por las terminales A, B.
- b) 127 vca: Si se cambia el interruptor a esta posición, se desconecta la alimentación de voltaje desde el oscilador del equipo y permite conectarse a una fuente externa de 127 VCA que puede ser un generador a gasolina (no incluido). El voltaje rectificado saldrá por las terminales A, B. Esta opción debe elegirse cuando la carga en las pilas se ha agotado o ha disminuido a tal nivel que ya la circuitería no funciona.
- c) Cargar Batería: Esta posición permite cargar las baterías conectando el cargador (incluido) desconectando los circuitos internos. Se recomienda poner el interruptor de encendido en posición de apagado. El cargador es para baterías de ácido plomo de 12 VCD, el cual al conectarse a la energía eléctrica, avisa por medio de un indicador luminoso el estado o desarrollo de la batería.

4.-Terminales para fuente externa:

Como se mencionó anteriormente, estas terminales permiten conectarse a la energía de un generador de voltaje alterno monofásico, para activarlas hay que seleccionar la opción 127 VCA en el interruptor de control de la fuente.

5.-Control de compensación de potencial natural:

Tiene 3 posiciones, las cuales se describen a continuación:

- a) Fuera: en esta posición se deja inoperante el circuito, obteniéndose el potencial natural que después se restará al potencial inducido resultante de cada prueba.
- b) Pol. (+): En esta posición se envía un voltaje de polarización positivo a la terminal M, regulable mediante 3 resistencias variables y la tierra se encuentra en terminal N.
- c) Pol. (-): En esta posición se envía un voltaje de polarización positivo a la terminal N, regulable y la tierra se encuentra en terminal M.

Una vez que ha logrado anular el potencial natural oprima el botón de pulso, para iniciar una lectura.

Se ha observado que el potencial natural cambia rápidamente de valor e incluso de polaridad, así que es recomendable tomarse su tiempo para poder anular este parámetro y tomar varias lecturas, en el mismo punto antes de cambiar de posición.

6.- Botón de pulso:

El equipo debe estar prendido para que por medio de este botón se pueda energizar el oscilador del circuito y pueda salir la corriente eléctrica por las terminales AB.

Este botón es de tipo momentáneo y normalmente abierto para evitar que exista un riesgo mayor al usuario en caso de una descarga eléctrica accidental; al soltarse el botón el equipo dejará de emitir energía eléctrica.

7.-Botón Hold:

Cuando se realiza una medición de corriente y potencial, deslice este botón hacia arriba, sin soltar el botón de pulso, las lecturas obtenidas en ese momento se retienen en ambos medidores, una vez hecho esto, libere el botón de pulso, anote las lecturas que obtuvo y deslice hacia abajo el botón hold, las lecturas desaparecerán y se observarán ceros en ambos medidores.

8.- Controles variables para anular el potencial natural:

Sirven para controlar la salida de 2 voltios de cd que genera este circuito y alimentarlos a las terminales MN para que el potencial natural presente se pueda anular.

9.-Terminales para potencial:

Por estas terminales se conectan los cables que se unen al medidor de potencial inducido con los electrodos de acero denominados MN previamente enterrados en el suelo.

10.-Terminales para corriente:

En estas terminales se conectan los cables que se unen a los electrodos para corriente denominados AB previamente enterrados en el suelo.

11.-Medidor de corriente:

Este medidor muestra los valores de corriente obtenidos en las pruebas hasta un máximo de 2 amperes de corriente directa. Si la lectura es mayor, en la tarjeta bajo la cubierta de acrílico se encuentra un fusible que puede llegar a dañarse si la corriente sobrepasa ese límite.

12.-Medidor de potencial:

Este medidor muestra los valores de potencial obtenidos entre electrodos conectados a las terminales MN. Puede leer valores hasta de 2 voltios de corriente directa, en caso de pasarse de este nivel, se observará un 1.

13.- Cambiador de polaridad:

Este interruptor cambia la polaridad de la corriente de salida en terminales A, B. En la posición hacia arriba, viendo de frente el equipo, se tiene la polaridad siguiente: A (+), B (-); si el interruptor se acciona hacia abajo, la polaridad es: A (-), B (+).

ANEXO H. Problemas y su solución.

A continuación se muestran algunos problemas que pudieran presentarse en el equipo, sus posibles causas y su solución.

Tabla H.1. Problemas comunes y su posible solución.

PROBLEMA	MOTIVO	SOLUCIÓN
1.- El botón de encendido se pulsa y ni los diodos indicadores de carga de las pilas ni los medidores encienden.	-Interruptor dañado.	-Cambo directo.
2.-Se pulsa el botón de encendido y sólo prenden los medidores de corriente y potencial.	-Fusible de entrada dañado.	Cheque visualmente el fusible y a continuidad con un probador y si está abierto reemplácelo con los mismos valores de corriente y voltaje.
	-Pilas completamente descargadas.	Compruebe con un voltímetro el estado de las pilas, y si están descargadas conecte el cargador.
	-Posible componente abierto o en corto.	-Revise el estado de todas las resistencias, el transformador y los transistores de potencia.

		-Cheque con el diagrama que el voltaje de alimentación y la tierra lleguen a los circuitos integrados.
3.- Uno o los dos medidores muestran números muy tenues o ya no prenden.	- Cada medidor trae una pila de 9 voltios independiente de las pilas recargables que pudiera estar baja de carga.	Desatornille la tapa y con un voltímetro cheque el estado de las mismas, si es necesario reemplácela (las)
4.- El medidor de potencial sólo muestra un 1 en su carátula al estar haciendo una medición.	-El rango de medición de 2 VCD se ha sobrepasado.	-Es posible cambiar la escala del voltímetro. -Si persiste el problema cambie los electrodos de lugar.
5.- Con el uso se van obteniendo lecturas cada vez menores en uno o ambos medidores.	-Las pilas empiezan a descargarse y el voltaje de salida disminuye.	Este comportamiento es normal, lo recomendable es que una vez que el segundo diodo indicador de carga de las pilas se apaga, deberá recargar las pilas.

<p>6.-Las pilas no se cargan dejándolas un tiempo considerable conectadas al cargador.</p>	<p>-El cargador está dañado</p>	<p>Cerciórese de que el tomacorrientes está bien, después observe que el indicador verde del cargador se ilumine, si no lo hace reemplácelo.</p>
	<p>-Las pilas ya no retienen la carga.</p>	<p>Si el cargador se sabe en buenas condiciones y aún así las pilas no cargan ni dejándolo conectado por varias horas, reemplace las pilas.</p>
<p>7.- Una vez conectados los accesorios como cables, electrodos y prender el equipo, se presiona el botón de pulso y sólo se observan ceros en ambos medidores.</p>	<p>-Los conectores o alguna terminal está floja.</p>	<p>Reapriételas si este es el caso.</p>
	<p>-Cables sueltos o rotos.</p>	<p>Apague el equipo y revise la instalación de los electrodos, los carretes y el estado de las bananas y caimanes.</p>

	-Botón de pulso defectuoso o se ha desoldado.	Apague el equipo, quite el acrílico y compruebe el estado del interruptor.
8.- El circuito compensador de potencial natural no funciona.	-Selector dañado o desconectado.	Si es el caso reemplácelo o resolde las terminales.
	-Diodo zener DZ4 dañado	Compruebe su estado con un probador de diodos. Si está abierto o en corto reemplácelo.
	-Alguna de las resistencias variables se encuentra abierta.	Mida con un óhmetro el valor de cada una de ellas entre terminales extremos, si están bien deberán darnos el valor que indican en el diagrama.

ANEXO I. Estado de los componentes.

Existen algunas fallas en las que no es necesario contar con conocimientos de electrónica, sin embargo, una falla severa requiere el conocimiento un poco más profundo del funcionamiento de cada componente del equipo para poder proponer un sustituto en caso de encontrarse algún elemento dañado, por lo tanto a continuación se ofrece una guía rápida a manera de resumen de cómo se checa cada elemento de la tarjeta, comenzando con el más fácil, que es el fusible.

Fusible:

Se identifica con el siguiente símbolo:



Figura I.1. Simbología del fusible.

En caso de que la inspección visual no sea satisfactoria, consígase un óhmetro y mídalo directamente en la escala más pequeña sin importar la polaridad de las terminales, si el fusible está correcto se obtendrá una lectura muy baja en ohms, lo que indica continuidad. Si el fusible está abierto, el medidor mostrará las letras OL. Si el medidor cuenta con función audible, se escuchará un pitido al probar un fusible en buen estado. Los valores importantes son: la corriente máxima a la que se abrirá, en este caso 2.5 amperes, y el voltaje máximo de trabajo que mientras sea mayor a 12 voltios no hay problema.

Resistencias:

Los símbolos más comúnmente usados en los diagramas son:

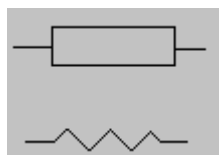


Figura I.2. Símbolos para resistencias.

Muestran un código de 4 franjas de colores, cuyas primeras dos franjas son cifras significativas, la tercera es el multiplicador o número de ceros que se aumentará al par de cifras anterior, y la cuarta banda es la tolerancia que puede ser de uno de dos colores: dorada (+- 5%) o plateada (+- 10%). La tabla de colores se muestra a continuación:

Tabla I.1. Código de colores para resistencias de carbón.

Color	Franja 1	Franja 2	Franja 3	Franja 4
Negro	-	0	X 1	Tolerancia
Café	1	1	X 10	
Rojo	2	2	X 100	
Naranja	3	3	X 1000	
Amarillo	4	4	X 10 000	
Verde	5	5	X 100 000	
Azul	6	6	X 1000 000	
Morado	7	7	X 10 000 000	
Gris	8	8	X 100 000 000	
Blanco	9	9	X1 000 000 000	
Oro				+ - 5%
Plata				+ - 10%

Para medir correctamente cada resistencia con el óhmetro antes se deberá saber su valor mediante el código, por ejemplo una resistencia muestra los siguientes colores:

Amarillo, morado, café, oro

Para leer correctamente su valor la franja de la tolerancia se pone del lado derecho. Las dos primeras franjas representan las dos primeras cifras del valor, (no deben sumarse), así tenemos que las dos primeras cifras son: 4 (amarillo) y 7 (morado)

El siguiente paso es agregar el valor de la tercera cifra, en este caso el café como tercera franja significa que al 47 hay que multiplicarlo por 10, entonces se obtiene que esta resistencia es de $47 \times 10 = 470$ ohms. La tolerancia nos da idea sobre la exactitud del valor cuando se mida, al ser oro, quiere decir que el valor de esta resistencia se encuentra en un intervalo 5% arriba o debajo de su valor.

Otro ejemplo; otra resistencia muestra las siguientes franjas:

Naranja, naranja, rojo, oro.

Las primeras dos cifras son: 33

La tercera cifra significa multiplicar por 100 (rojo) la cantidad anterior, por lo que se obtiene un valor de 3300 ohms, o sea 3.3 k ohms.

La tolerancia sobre el valor es de 5% arriba o debajo del valor nominal.

Una vez que ha descifrado el valor de cada resistencia, desoldar al menos una terminal de la misma cuando la vaya a checar, y con el óhmetro observe que se mantenga dentro del límite marcado por la tolerancia, en caso contrario reemplácela. Todas las resistencias se piden por valor en ohms y por potencia de disipación, en el caso de R7 su valor en ohms y su potencia de disipación vienen expresados en el cuerpo, todas las demás son de carbón y a medio watt.

En el caso de las resistencias variables RV1, RV2 y RV3 son muy difícil que fallen debido al circuito donde se encuentran; se checan midiendo el total del valor en ohms entre terminales extremos, y entre terminal central y extremo deberá variar casi linealmente la lectura al girar el cursor.

Diodos:

Independientemente del tipo de diodo se checan igual, pueden ser diodos rectificadores como el D1, o Zener como DZ1 a DZ4, cuyos símbolos se muestran a continuación, en la Figura I.3:

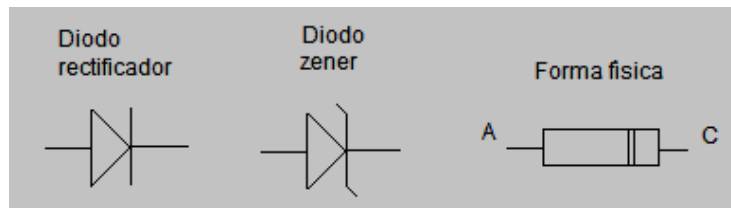


Figura I.3. Símbolos y forma física de diodos.

Primeramente deberá desconectar una terminal del diodo, después poner el multímetro en función de prueba de diodos, identificado en el selector por el símbolo del diodo.

Observe que en un extremo tiene dibujada alrededor del cuerpo una franja que identifica al cátodo o terminal (-), y el otro extremo es el ánodo (+); se hacen dos pruebas:

- a) polarización directa: Conecte la terminal (+) del multímetro en el ánodo y la terminal (-) del multímetro en el cátodo, si el diodo está correcto deberá observarse una lectura comprendida entre 0.3 y 0.7 voltios, que es la caída de voltaje típica que presenta un diodo de silicio. Si marca OL el diodo está abierto y si marca cero o un valor muy cercano el diodo está en corto, estos dos últimos resultados indican un diodo defectuoso.
- b) Polarización inversa: Conecte la terminal (+) del multímetro en el cátodo y la terminal (-) del multímetro en el ánodo, si el diodo está correcto deberá observarse en el multímetro las letras OL que indican circuito abierto. para que el diodo se encuentre en buen estado no debe mostrar lectura alguna en esta prueba.

En cuanto a los diodos led se realizan las mismas pruebas, pero en forma práctica deberá observarse que cuando se polarizan en forma directa enciendan, y al polarizarlos en forma inversa no enciendan. En el caso de los diodos zener dos datos son importantes a la hora de cambiarlos, su voltaje y su potencia de disipación en watts, todos son de 1 watt.

Capacitores:

Se checan con un capacitómetro; debido a que en el circuito no pasan corrientes muy grandes se puede descartar que alguno se dañe. Cuando

están dañados su capacitancia disminuye más del 10 %. Existen capacitores polarizados y no polarizados. La Figura I.4 muestra la simbología utilizada.

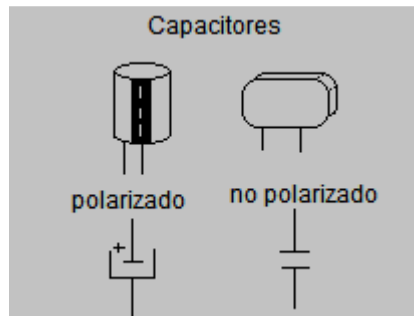


Figura I.4. Símbolos y forma física de los capacitores.

Circuitos integrados:

Se piden por la matrícula que presentan en su cuerpo, al ser baratos pueden probarse a sustitución sin ningún problema. Tener cuidado de colocarlos en la misma posición en que se quitaron.

Transformador:

Desconectar las terminales de cada lado del mismo y probar con un óhmetro la continuidad de los devanados, lo que se debe observar es que no existan cortos circuitos entre los devanados y el núcleo y que cada devanado muestre continuidad entre sus extremos. Los puntos de conexión del óhmetro se muestran en la siguiente figura, en cada prueba deberá encontrarse un valor en ohms, en caso contrario el devanado está abierto.

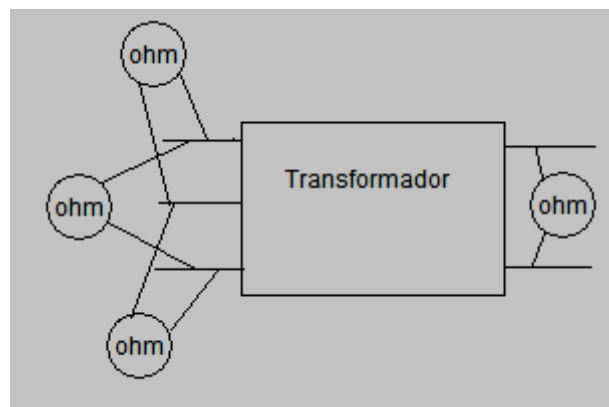


Figura I.5. Pruebas al transformador.

Transistores:

Los elementos encargados de permitir la oscilación en el transformador son los transistores BD675, los cuales tienen la siguiente configuración en terminales, de izquierda a derecha: emisor, colector y base. Son tipo NPN y al ser darlington no se checan como transistores comunes, hay que probar a sustitución. Al pertenecer al circuito de potencia están más propensos a dañarse.

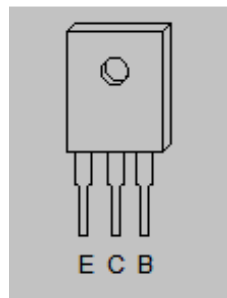


Figura I.6. Forma física del transistor.

ANEXO J. Medición de potencial.

Para obtener la diferencia de potencial real en el terreno bajo prueba, se consideran 4 casos:

Caso 1. El potencial inducido y el potencial natural son de polaridad positiva.

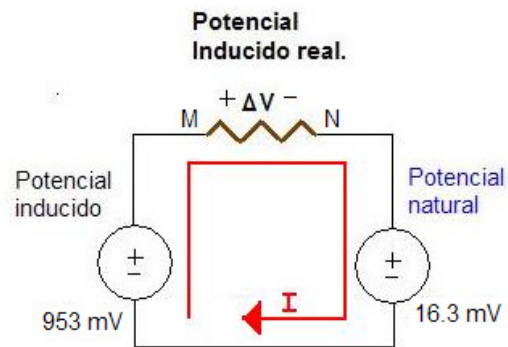


Figura J.1. Datos tomados de la Tabla 11, lectura 1.

Aplicando la Ley de Voltajes de Kirchhoff, en la cual la suma algebraica de los voltajes alrededor de una trayectoria cerrada de un circuito eléctrico es igual a cero, y siguiendo la dirección de la corriente I , se tiene:

$$-953 \text{ mV} + \Delta V + 16.3 \text{ mV} = 0$$

$$\Delta V = 953 \text{ mV} - 16.3 \text{ mV}$$

$$\Delta V = 936.7 \text{ mV}$$

Caso 2. El potencial inducido es de polaridad positiva y el potencial natural es negativo.

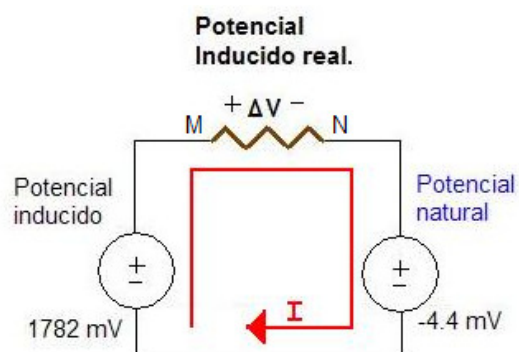


Figura J.2. Datos tomados de la Tabla 13, lectura 1.

Aplicando la Ley de Voltajes de Kirchhoff y siguiendo la dirección de la corriente I , se tiene:

$$-1782 \text{ mV} + \Delta V + (-4.4 \text{ mV}) = 0$$

$$-1782 \text{ mV} + \Delta V - 4.4 \text{ mV} = 0$$

$$\Delta V = 1782 \text{ mV} + 4.4 \text{ mV}$$

$$\Delta V = 1786.4 \text{ mV}$$

Se observa que cuando la polaridad entre los potenciales inducido y natural es diferente, el potencial inducido real es la suma de ambos.

Caso 3. El potencial inducido es negativo y el potencial natural es positivo.

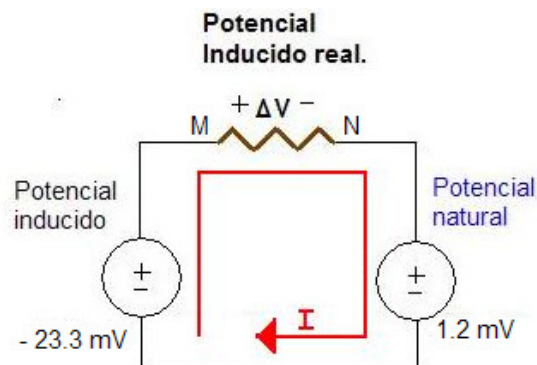


Figura J.3. Datos tomados de la Tabla 15, lectura 12.

$$-(-23.3 \text{ mV}) + \Delta V + 1.2 \text{ mV} = 0$$

$$23.3 \text{ mV} + \Delta V + 1.2 \text{ mV} = 0$$

$$\Delta V = -23.3 \text{ mV} - 1.2 \text{ mV}$$

$$\Delta V = -24.5 \text{ mV}$$

Este valor de potencial es el que nos servirá para calcular la resistividad mediante la relación: $\Delta V / I$ multiplicada por el factor geométrico, y como no tiene sentido práctico obtener un valor de resistividad negativa, se toma el valor absoluto, quedando:

$$\Delta V = 24.5 \text{ mV}$$

Caso 4. El potencial inducido y el potencial natural son de polaridad negativa.

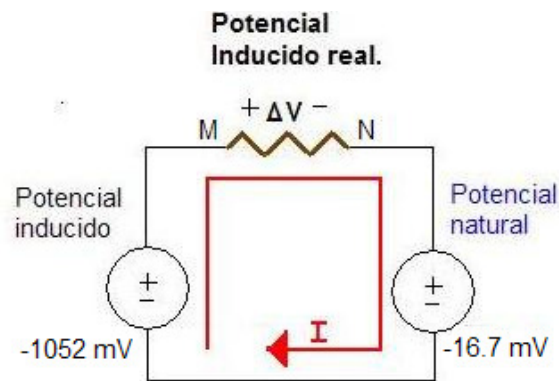


Figura J.4. Datos tomados de la Tabla 15, lectura 1.

$$-(-1052) \text{ mV} + \Delta V + (-16.7) \text{ mV} = 0$$

$$1052 \text{ mV} + \Delta V - 16.7 \text{ mV} = 0$$

$$\Delta V = -1035.3 \text{ mV}$$

De la misma forma que en el caso anterior, se toma el valor absoluto de ΔV , quedando:

$$\Delta V = 1035.3 \text{ mV}$$

De estos casos se observa que cuando el potencial inducido y el potencial natural son de la misma polaridad, la diferencia de potencial ΔV se obtiene restando ambas variables y tomando el valor absoluto.

Y cuando el potencial inducido y el potencial natural son de diferente polaridad, la diferencia de potencial ΔV se obtiene sumando ambas variables y tomando el valor absoluto.

Para efectos prácticos, estas relaciones quedan representadas por la siguiente expresión.

$$\Delta V = |P. \text{ ind} - P. \text{ Nat}| \quad (\text{J.1})$$

ANEXO K. Factor geométrico.

K.1 Recalculando el factor geométrico.

En el capítulo II de este documento, se analizaron los fundamentos en que se basa el método de resistividad de CD aplicado a medios estratificados. Quedando la fórmula (2.11) para calcular la resistividad como:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I},$$

donde k , fórmula (2.12) es el factor geométrico dependiente de las distancias que existen entre los electrodos de corriente A, B y los de potencial M, N, y es igual a:

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

Para que el campo eléctrico se transmita en el suelo formando superficies equipotenciales semiesféricas se ha tomado en cuenta una de las dos consideraciones siguientes:

- a) El electrodo es esférico.
- b) El electrodo se encuentra sobre la superficie.

En los sondeos que se realizan en campo, la corriente se hace transmitir al suelo a través de dos electrodos enterrados previamente en el suelo. El electrodo tiene forma de varilla cilíndrica con punta en un extremo y siempre va enterrado para lograr una buena conducción de la corriente a través del suelo, por lo tanto la superficie equipotencial que se genera es la que corresponde a la geometría del electrodo.

Según Milsom (1996) una superficie equipotencial es aquella en la que todos los puntos están al mismo potencial, y son perpendiculares a las líneas del campo eléctrico.

Ya se ha explicado anteriormente lo que ocurre cuando la superficie equipotencial es esférica. Si se considera la forma geométrica del electrodo por estar dentro del suelo entonces las superficies equipotenciales cambian según la Figura K.1.

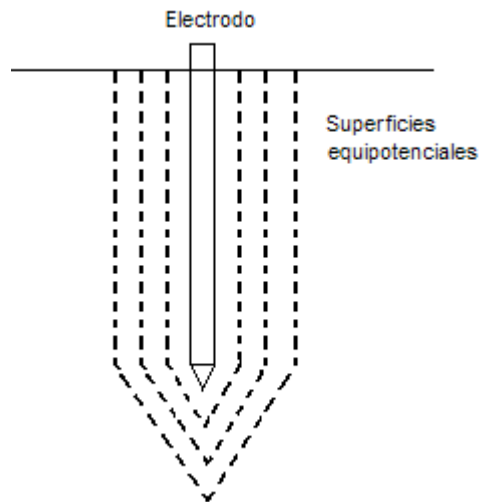


Figura K.1. Superficies equipotenciales que corresponden a un electrodo cilíndrico.

Se obtienen formas cilíndricas y cónicas. Por lo tanto se calculará el valor del potencial tomando en cuenta los nuevos valores de l (longitud del conductor) y s (sección transversal), los cuales son mostrados en la superficie equipotencial de la Figura K.2.

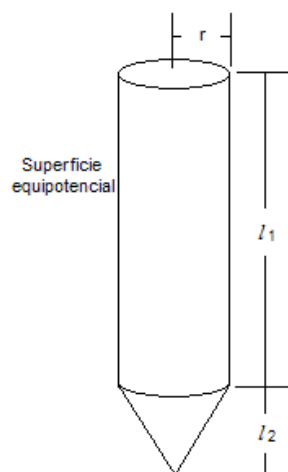


Figura K.2. Parámetros correspondientes a un electrodo cilíndrico.

Donde:

l_1 = corresponde a la longitud del cilindro.

l_2 = es la longitud del cono.

r = el radio de la superficie equipotencial.

Retomando la ecuación (2.3), y aplicándola a ambas figuras se tiene que el potencial total, cuando se considera la forma geométrica del electrodo, es la suma de los potenciales obtenidos por el cilindro y el cono formados.

$$V = I\rho \left(\frac{l_1}{2\pi r l_1} \right) + I\rho \left(\frac{l_2}{\pi r g} \right) \quad (\text{K.1})$$

El primer término entre paréntesis corresponde a la longitud (numerador), y área del cilindro (denominador); y el segundo término entre paréntesis corresponde a la longitud (numerador) y al área lateral del cono (denominador). El valor de g se obtiene de la Figura K.3b.

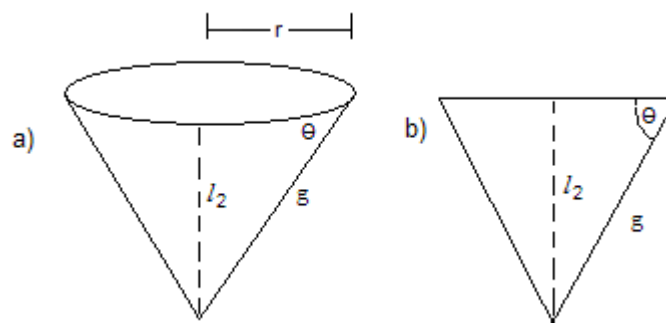


Figura K.3. Variables que intervienen en un cono.

Por lo tanto g se calcula con la función seno.

$$g = \frac{l_2}{\text{sen}\theta}, \quad (\text{K.2})$$

sustituyendo este dato en la ecuación (5.1), queda:

$$V = I\rho \left[\left(\frac{l_1}{2\pi r l_1} \right) + \left(\frac{l_2 \text{sen}\theta}{\pi r l_2} \right) \right], \quad (\text{K.3})$$

simplificando:

$$V = \frac{I\rho}{\pi r} \left[\left(\frac{1}{2} \right) + (\text{sen}\theta) \right], \quad (\text{K.4})$$

si se considera un ángulo $\theta=60^\circ$ que es el más común

$$V = \frac{I\rho}{\pi r} [(0.5) + (0.8660)],$$

$$V = 1.366 \frac{I\rho}{\pi r}, \quad (\text{K.5})$$

sustituyendo la ecuación (5.5) en la ecuación (2.8)

$$\Delta V_{MN} = 1.366 \frac{I\rho}{\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - 1.366 \frac{I\rho}{\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right), \quad (\text{K.6})$$

Reduciendo la expresión anterior

$$\Delta V_{MN} = 1.366 \frac{I\rho}{\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right), \quad (\text{K.7})$$

Finalmente despejamos ρ de la ecuación (18)

$$\rho = \frac{V}{I} 0.732\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{K.8})$$

El factor geométrico k es igual a:

$$k = 0.732\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{K.9})$$

Se observa que el 2 que acompaña a π en el factor geométrico de la ecuación (2.12) ha cambiado a 0.732, si consideramos la geometría del electrodo, según la ecuación (K.9). Esto representa un 36% del valor original.

K.2 Cálculo de resistividades considerando ambos factores geométricos.

Con el fin de comparar lo que sucede al emplear el factor geométrico que siempre se ha utilizado y el calculado en este documento, se analizaron 2 SEV tipo Schlumberger que se hicieron en una zona cercana a la laguna de lixiviados originada por el tiradero municipal en la Villa de Zaachila, Oaxaca.

Los resultados de los mismos se muestran en las Tablas K.1 y K.2, y sus gráficas en las Figuras K.4 y K.5.

Las resistividades se han calculado empleando ambos factores geométricos, el original es k_1 y el nuevo es k_2 .

Sondeo 1.

Tabla K.1. Datos del primer sondeo tipo Schlumberger.

AB/2	MN	I	V	k_1	Pa_1	k_2	Pa_2
m	m	mA	mV	m	Ω -m	m	Ω -m
0,5	0,3	29,077	1.418,00	2,618	127,7	0,958188	42,52
1	0,3	24,6	354,00	10,472	150,7	3,832752	53,91
1,5	0,3	29,044	101,00	23,562	81,9	8,623692	29,69
2	0,3	28,117	36,14	41,888	53,8	15,331008	19,59
2,5	0,3	28,422	18,00	65,45	41,5	23,9547	15,12
3	0,3	29,441	10,00	94,248	32,0	34,494768	11,69
3,5	0,3	21,855	5,10	128,282	29,9	46,951212	10,94
4	0,3	26,122	4,10	167,552	26,3	61,324032	9,61
5	0,3	32,889	3,10	261,8	24,7	95,8188	9,02
6	0,3	34,789	2,00	376,992	21,7	137,979072	7,93
6	1	34,598	6,00	113,0976	19,6	41,3937216	7,13
7	1	40,934	4,70	153,9384	17,7	56,3414544	6,44
8	1	39,168	3,40	201,0624	17,5	73,5888384	6,36
9	1	46,591	2,80	254,4696	15,3	93,1358736	5,58
10	1	54,617	3,10	314,16	17,8	114,98256	6,51
11	1	46,872	2,20	380,1336	17,8	139,128898	6,52
13	1	56,196	10,10	530,9304	95,4	194,320526	34,87

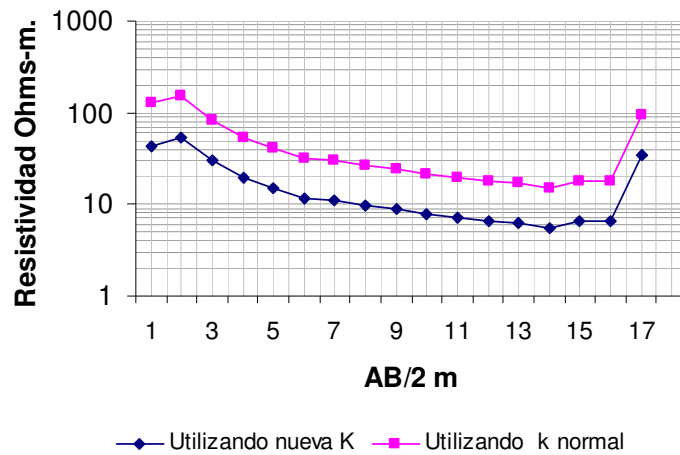


Figura K.4. Gráfica de resistividades del sondeo 1, empleando los dos factores geométricos.

Se observa que los valores de las resistividades para cada punto disminuyen debido a que el factor geométrico se ha reducido, aunque sólo es un factor de escalamiento, es importante para tener una mejor referencia de los valores de resistividad calculados.

Sondeo 2.

Tabla K.2. Datos del segundo sondeo tipo Schlumberger.

AB/2	MN	I	V	k_1	Pa_1	k_2	Pa_2
m	m	mA	mV	m	Ω -m	m	Ω -m
0,5	0,3	57,064	.875,00	2,618	86,0	0,96	31,48
1	0,3	48,082	526,00	10,472	114,6	3,83	41,93
1,5	0,3	50,46	236,00	23,562	110,2	8,62	40,33
2	0,3	39,223	68,00	41,888	72,6	15,33	26,58
2,5	0,3	34,793	31,00	65,45	58,3	23,96	21,34
3	0,3	33,541	14,00	94,248	39,3	34,50	14,40
3,5	0,3	42,125	11,00	128,282	33,5	46,95	12,26
4	0,3	27,667	5,00	167,552	30,3	61,32	11,08
5	0,3	36,828	3,00	261,8	21,3	95,82	7,81
6	0,3	26,394	1,20	376,992	17,1	137,98	6,27
6	1	26,481	4,00	113,0976	17,1	41,39	6,25
7	1	28,203	2,00	153,9384	10,9	56,34	4,00
8	1	10,31	1,00	201,0624	19,5	73,59	7,14
9	1	52,004	3,00	254,4696	14,7	93,14	5,37
10	1	75,66	3,00	314,16	12,5	114,98	4,56
11	1	77,81	3,00	380,1336	14,7	139,13	5,36
13	1	148,24	4,00	530,9304	14,3	194,32	5,24
15	1	143,57	3,00	706,86	14,8	258,71	5,41
20	1	134,27	2,00	1256,64	18,7	459,94	6,85

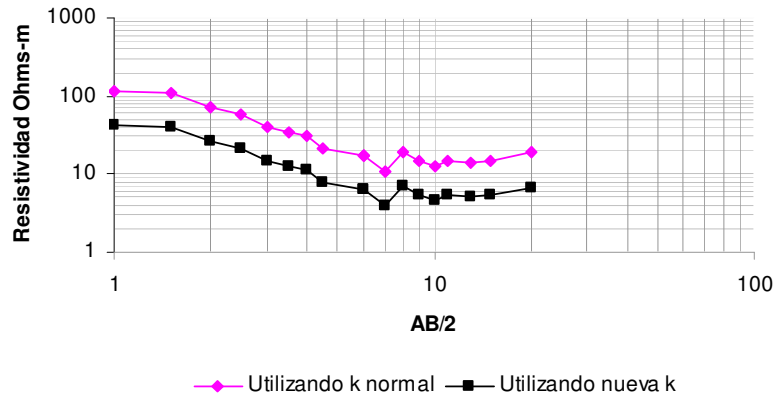


Figura K.5. Gráfica de resistividades del sondeo 2, empleando los dos factores geométricos.

Los valores de resistividad encontrados en ambos sondeos son muy bajos ya que corresponden a una zona donde los desechos sólidos reaccionan con productos de descomposición, químicos, y otros compuestos, y ayudados por la lluvia se infiltran al suelo. Estos lixiviados ricos en ácidos orgánicos, iones sulfato y con altas concentraciones de iones metálicos comunes especialmente hierro se han mezclado con el suelo y han alcanzado las aguas subterráneas por lo que hacen que el terreno sea muy conductivo.

En la Tablas K.1 y K.2, se han calculado los valores de resistividad aparente utilizando ambos factores geométricos. Las gráficas dejan ver que la ubicación de los puntos no se ve afectada, lo que significa que los grosores de las capas no se modifican, sólo la resistividad del material.