

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO MEJORADO
PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE SUELOS**

AUTORES:

**RICAURTE CASADIEGOS AGUDELO
MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
ANDRÉS FELIPE QUINTERO PARRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2008**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO MEJORADO
PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE SUELOS**

AUTORES:

**RICAURTE CASADIEGOS AGUDELO
MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
ANDRÉS FELIPE QUINTERO PARRA**

Trabajo de grado presentado para obtener el título de Ingeniero Electrónico

DIRECTOR:

MSc. ALFREDO RAFAEL ACEVEDO PICÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2008**

DEDICATORIA

•A Dios todopoderoso por permitirme salir adelante y ayudarme en aquellos momentos de angustia que tanto lo necesitaba.

•A mi madre, mi padre, mis hermanas y demás familiares que siempre creyeron en mí y me brindaron su apoyo ilimitado.

•A mi novia Mildred Liliana Monsalve Barragán por estar siempre conmigo en los momentos que más lo necesité, brindándome su cariño, amor, paciencia y apoyo incondicional.

•A la familia de María Alejandra por el apoyo que nos brindaron en todo momento.

•A mis profesores y la Universidad Industrial de Santander por enseñarme y permitirme alcanzar esta meta.

•A mis compañeros de proyecto y todos mis amigos que de una u otra forma estuvieron ahí para brindarme su apoyo y colaboración en las buenas y las malas.

•A mis amigos de Residencias Universitarias UIS (RESIDUIS) con los cuales compartí casi 3 años de mi existencia.

Ricaurte Casadiegos Agudelo.

•A Dios todopoderoso y a la Santísima Virgen por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto y acompañarme en cada etapa de mi vida.

•A mis padres y hermanos por su amor, esfuerzo e invaluable ayuda.

•A mi madre y a mi abuelita quienes estuvieron a mi lado apoyándome en todo momento, brindándome cariño y fuerzas para seguir adelante.

•A mi familia por su apoyo incondicional, cariño y confianza.

•A Oscar Javier Escobar por su amor, paciencia, confianza y colaboración. Gracias por su compañía y apoyo en todo momento.

•A mis profesores quienes me ayudaron a crecer no solo profesionalmente sino también como persona.

•A mis compañeros de proyecto y a mis amigos por compartir conmigo logros y fracasos

•María Alejandra Mantilla Villalobos.

•A mis padres por su paciencia, apoyo, cariño y dedicación incondicional para la consecución de mis metas.

•A mi familia por el afecto e interés mostrado para la consecución de este proyecto.

•A mis amigos por su colaboración en los momentos más difíciles, su apoyo y sus palabras de aliento fueron invaluable.

•A mis compañeros de proyecto por aguantarme, tolerarme y colaborarme para la consecución de un logro común.

•A mis profesores por su colaboración, experiencia, conocimiento y vivencias que permitieron llevar a cabo este proyecto.

•Andrés Felipe Quintero Parra

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente a la Universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por haber aportado mucho en nuestra formación y por permitirnos sus instalaciones para el desarrollo de nuestro proyecto de grado. A nuestro director de proyecto MSc. Alfredo Rafael Acevedo Picón por su tiempo, dedicación, conocimiento, y experiencia que permitieron la consecución de este importante logro en nuestras carreras profesionales y en general a todos los docentes que tuvieron algo que ver con nuestra formación académica. A nuestros familiares y amigos porque sin su continuo apoyo no habiéramos logrado esta importante meta.

Los autores

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO MEJORADO PARA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD DE SUELOS¹

**AUTORES: CASADIEGOS AGUDELO, Ricaurte
MANTILLA VILLALOBOS, María Alejandra
QUINTERO PARRA, Andrés Felipe²**

PALABRAS CLAVES:

RESISTIVIDAD DE SUELOS
TELURÓMETRO
DSP

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo describe el diseño y construcción de un Medidor de Resistividad de Suelos, capaz de realizar mediciones de campo útiles para los laboratorios de corrosión de Ingeniería Metalúrgica e Instrumentación de la E3T.

Durante este proceso se diseñaron y probaron individualmente todos los módulos que integran el prototipo final para unirlos posteriormente. Se implementó una topología de puente completo para inyectar al terreno un nivel de tensión continua. También se utilizó un Procesador Digital de Señales (DSP) 56F8323 de Freescale para controlar cada aspecto de la toma, análisis y muestra de los datos de resistividad. Asimismo se utilizaron pulsadores y una pantalla LCD gráfica para interactuar con el usuario de manera que éste tenga el control de las acciones del equipo. Para el desarrollo de cada uno de estos módulos se contó con documentación obtenida de proyectos de grado anteriores, Internet y libros de texto especializados. Las pruebas individuales permitieron caracterizar cada sección para encontrar los alcances máximos del prototipo final, tomando como base las especificaciones de otros telurómetros.

Una vez analizado el comportamiento y las limitaciones de cada uno de los módulos, se procedió a implementar el prototipo final: un equipo portátil y autónomo con una topología alternativa que busca una optimización en el consumo de energía sin comprometer la eficiencia total del sistema. El MRS V2.0 es capaz de almacenar 14 pruebas de 50 datos, posee una interfaz de usuario (pantalla LCD gráfica – pulsadores) que permite la configuración de la prueba y la presentación del Perfil de Resistividad, además tiene un software de aplicación en LabVIEW que grafica el Perfil de Resistividad, y aproxima la tendencia de la curva ante variaciones de humedad y temperatura por medio de la relación empírica de Albrecht.

¹ Proyecto De Grado

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: MSc. Alfredo Rafael Acevedo Picón.

**TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN IMPROVED PROTOTYPE
FOR SOIL RESISTIVITY MEASUREMENT***

**AUTHORS: CASADIEGOS AGUDELO, Ricaurte
MANTILLA VILLALOBOS, María Alejandra
QUINTERO PARRA, Andrés Felipe****

KEY WORDS:

SOIL RESISTIVITY
TELLMETER
DSP

DESCRIPTION:

This work describes the design and construction of a Soil Resistivity Meter (MRS), able to achieve useful field measurements for the Corrosion and Instrumentation laboratory of the Metallurgic Engineering School and the E3T respectively.

During this process all modules that integrate the final prototype were tested individually. A Full-Bridge topology was used to inject a continuous voltage level. A Digital Processor of Signals (DSP) 56F8323 from Freescale was used to control every aspect of the measure, analysis and exhibition of the resistivity points. A group of switches and a LCD screen were used to interact with the user to let him have the control of the actions of the prototype. For the development of each module, information from previous project degrees, Internet and specialized text books were used. The individual test of each module allowed the characterization of each section to find the maximum reaches of the final prototype, taking as base other tellmeters specifications.

Once the behavior and limitations of each module were analyzed, a final prototype was constructed: A portable and autonomous equipment with an alternative topology, looking for an optimization in the power consumption without compromising the total efficiency of the prototype. The MRS V2.0 can store 14 tests of 50 data each and possess a user's interface (LCD graphic screen – switches) that allows the test's configuration and the exhibition of a Resistivity Profile, moreover it has an application software in LabVIEW that graphs the Resistivity Profile and approximates the curve's tendency with variations of Temperature and Humidity by means of Albretch empiric relationship.

* Degree Project

** Physics Mechanical Engineering Faculty. Electric, Electronic and Telecommunications Engineer School. Director: MSc. Alfredo Rafael Acevedo Picón.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES HISTÓRICOS	2
1.2	EL SUELO Y SU RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	3
1.3	FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD DE SUELOS	4
1.4	MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL TERRENO	6
1.4.1	Método de variación de la profundidad	6
1.4.2	Método de dos electrodos	7
1.4.3	Método de los cuatro electrodos	7
1.5	MÉTODOS TETRA-ELECTRÓDICOS LINEALES BÁSICOS	8
1.5.1	Método Wenner	9
1.5.2	Método Schlumberger	9
1.6	REVISIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO	11
1.6.1	Aparatos requeridos para la medición de la resistividad del suelo según las normas IEEE Std 81-1983 y ASTM G57-06	11
1.6.2	Revisión de algunos modelos comerciales de telurómetros	12
1.6.3	Estudio de las características del MRS 2003	12
1.7	DISTRIBUCIÓN DEL DOCUMENTO	13
2	HARDWARE	15
2.1	ESPECIFICACIONES GENERALES DE DISEÑO	15
2.2	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	20
2.3	CARGADOR DE BATERÍA	20
2.4	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	23
2.4.1	Fuentes Constantes	24
2.4.2	Fuentes Temporales	27
2.5	ETAPA GENERADORA DE POTENCIA	27
2.5.1	Operación Básica	28
2.6	DISEÑO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA	31
2.6.1	Selección Del Calibre De Los Conductores	35
2.7	MOSFETs DEL PUENTE INVERSOR	35
2.8	CONDENSADOR DE BLOQUEO	36
2.9	SENSORES DE TENSIÓN Y CORRIENTE	37
2.9.1	Sensor De Tensión	37

2.9.2	Sensor De Corriente	40
2.9.3	Caracterización De Los Sensores.....	41
2.10	<i>CIRCUITO DE CONTROL</i>	41
2.10.1	Sistema de desarrollo del DSP 56F8323.....	42
2.11	<i>INTERFAZ CON EL USUARIO</i>	43
2.11.1	Pantalla gráfica de cristal líquido	44
2.11.2	Pulsadores	47
2.12	<i>SENSOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURA</i>	49
2.12.1	Transmisión de datos	51
2.13	<i>DESCARGA DE DATOS DEL MRS V2.0 AL PC</i>	53
3	SOFTWARE	56
3.1	<i>CONFIGURACION DE LOS MÓDULOS DEL DSP</i>	56
3.1.1	Interfaz Periférica Serial (SPI).....	57
3.1.2	Modulador por ancho de pulso (PWM).....	59
3.1.3	Generador de pulsos programable (PPG).....	63
3.1.4	Conversor analógico-digital (ADC).....	64
3.1.5	Memoria flash de datos	67
3.1.6	Interfaz de comunicación serial (SCI)	73
3.1.7	Interrupciones periódicas (TimerInt).....	75
3.1.8	Entradas y salidas de propósito general (GPIO).....	75
3.2	<i>PROGRAMA FUENTE DEL CONTROLADOR DIGITAL DE SEÑALES (DSP)</i>	77
3.2.1	Inicialización y manejo de la pantalla gráfica LCD	83
3.2.2	Menú principal.....	91
3.2.3	Medición de resistividad.....	92
3.2.4	Medición de humedad y temperatura.....	96
3.2.5	Graficar datos	99
3.2.6	Observar y borrar datos	101
3.2.7	Descargar datos a LabVIEW.....	102
3.2.8	Otras subrutinas.....	103
3.3	<i>APLICACIÓN EN LABVIEW</i>	103
3.3.1	SubVI utilizado:	104
3.3.2	Software para la recepción de datos:.....	104
3.3.3	Software para el tratamiento de los datos recibidos:.....	105
3.3.4	Software para la muestra de datos y perfil de resistividad	107
3.3.5	Descripción del programa	108
3.3.6	Esquema de operación de la aplicación.....	110
3.3.7	Presentación de los datos.....	112
4	RESULTADOS	113

4.1 PRUEBAS.....	113
4.1.1 Pruebas de campo.....	114
4.2 CONCLUSIONES	122
4.3 RECOMENDACIONES.....	123
BIBLIOGRAFÍA.....	125
ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES.....	128
A.1 RESISTENCIA DE 1Ω	128
ANEXO B. MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD.....	136
ANEXO C. GENERALIDADES DE LABVIEW.....	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la resistividad del suelo con la humedad.....	4
Figura 2. Variación de la resistividad del suelo con la temperatura	5
Figura 3. Variación de la resistividad del suelo con el contenido de sal	5
Figura 4. Dispositivo de cuatro electrodos para la medición de resistividad	7
Figura 5. Método Wenner	9
Figura 6. Método Schlumberger.....	10
Figura 7. Diagrama de bloques del MRS V2.0.....	19
Figura 8. Circuito esquemático del cargador de batería	21
Figura 9. Sistema de control para la carga de batería	22
Figura 10. Circuito esquemático de sensado de tensión en la batería.....	22
Figura 11. Menú principal del MRS V2.0	23
Figura 12. Tarjeta fuentes del MRS V2.0	24
Figura 13. Circuito inversor	25
Figura 14. Circuito esquema completo de fuentes constantes	26
Figura 15. Circuito conmutador.....	26
Figura 16. Topología de puente completo	28
Figura 17. Señal de activación para los MOSFETS y tensión del Primario.	29
Figura 18. Circuito esquemático de sensado para la tensión inyectada al terreno	30
Figura 19. Forma de onda en el primario del Transformador.....	36
Figura 20. Circuito esquemático de la etapa de adquisición de tensión del terreno	38
Figura 21. Circuito esquemático de control de polaridad	39
Figura 22. Circuito esquemático del sistema de sensado de corriente.....	40
Figura 23. Esquemático de conexión de la interfaz de programación del DSP.	42
Figura 24. Esquemático del circuito correspondiente a la conexión del DSP	43
Figura 25. Pantalla gráfica LCD de Hyundai, referencia HG25504NG-01	44
Figura 26. Conexión de los terminales de la pantalla LCD	46
Figura 27. Conector “SEÑALES PULSADORES Y SENSOR” de la tarjeta digital	48
Figura 28. SHT15, sensor de humedad y temperatura	50
Figura 29. Diagrama de bloques del sensor SHT15	50
Figura 30. Secuencia de inicio de transmisión.....	51
Figura 31. Diagrama de operación del FT232BL	54
Figura 32. Circuito de la interfaz entre el DSP y el puerto USB	55
Figura 33. Registros de la interfaz periférica serial (SPI).....	57
Figura 34. Distribución de la memoria de datos del DSP 56F8323.....	68
Figura 35. Distribución de la memoria flash de datos del DSP.	69
Figura 36. Puertos GPIO del DSP56F8323	76
Figura 37. Diagrama de flujo del programa principal del DSP.	79
Figura 38. Caracteres proporcionados por el generador interno.	85
Figura 39. Configuración de la pantalla de texto.....	86
Figura 40. Configuración de la pantalla gráfica.....	87
Figura 41. Visualización del Logo UIS en la pantalla gráfica.	90

Figura 42. Visualización del nombre del MRS V2.0 y de los nombres de sus autores.....	91
Figura 43. Visualización del menú principal y del porcentaje de carga de la batería	92
Figura 44. Interfaz empleada para seleccionar el método de medición y el nivel de tensión de inyección	93
Figura 45. Visualización en pantalla del Método Wenner.	94
Figura 46. Visualización en pantalla del Método Schlumberger.	95
Figura 47. Presentación en pantalla de las mediciones de Humedad y temperatura	98
Figura 48. Gráfica del perfil de resistividad.....	100
Figura 49. Interfaz gráfica de la descarga de datos al PC.	103
Figura 50 Algoritmo utilizado para la recepción de los datos.	105
Figura 51 Tratamiento de los datos recibidos	106
Figura 52 Eliminación de datos no usados y “empacamiento” de los datos de cada prueba.....	107
Figura 53 Corrección de Albretch y realización de una gráfica con fines comparativos.....	108
Figura 54 Mensaje inicial	108
Figura 55 Menú principal de la aplicación.....	109
Figura 56 Mensaje indicador de acción a seguir.....	109
Figura 57. Mensaje en caso de un error de comunicación	110
Figura 58. Esquema de operación de la aplicación en LabVIEW.	110
Figura 59. Panel frontal de la aplicación en LabVIEW.....	112
Figura 60. Prototipo MRS V2.0	113
Figura 61. Modelo resistivo del suelo.....	114
Figura 62. Análisis grafico de los datos a 100V	115
Figura 63. Perfil de resistividad a 100 V obtenido en la pantalla del dispositivo. .	116
Figura 64. Perfil de resistividad con inyección de 100 V	116
Figura 65. Análisis grafico de los datos a 200V	117
Figura 66. Perfil de resistividad a 200 V obtenido en la pantalla del dispositivo. .	118
Figura 67. Perfil de Resistividad con inyección de 200 V	118
Figura 68. Análisis grafico de los datos a 300V	119
Figura 69 Perfil de resistividad a 300 V obtenido en la pantalla del dispositivo. ..	120
Figura 70. Perfil de Resistividad con inyección de 300 V	120
Figura 71. Prueba de resistividad del terreno contiguo al Luis A. Calvo.	121
Figura 72. Prueba de resistividad del terreno de la parte posterior de la escuela de eléctrica	121
Figura 73. Prueba de resistencia	129
Figura 74. Rango 1 de tensión.....	130
Figura 75. Rango 2 de tensión.....	132
Figura 76. Rango 3 de tensión.....	133
Figura 77. Sensor corriente	135
Figura 78 Esquema de la medición polo-dipolo	136
Figura 79 Esquema de conexión del método doble dipolo	136

Figura 80 Esquema de medición del método de tres puntos	137
Figura 81. Configuración del VI configure serial port	140
Figura 82. Configuración del VI Write	140
Figura 83. Configuración del VI Read	140
Figura 84. Configuración del VI Close	141
Figura 85. Configuración del VI One button dialog	141
Figura 86. Configuración del VI Two button dialog	141
Figura 87. Configuración del VI String to Byte Array.....	142
Figura 88. Configuración del VI Index Array	142
Figura 89. Configuración del VI Insert into Array	142
Figura 90. Configuración del VI Bundle	143
Figura 91. Configuración del VI Property Node.....	143
Figura 92. Configuración del VI Array Size	143
Figura 93. Configuración del VI Array Max y Min.....	144

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad	3
Tabla 2. Aplicaciones del medidor de resistividad de suelos de acuerdo a la figura de merito.....	17
Tabla 3. Rangos de medición de tensión.....	37
Tabla 4. Especificaciones de la pantalla LCD.....	44
Tabla 5. Tensión de alimentación de la pantalla LCD a 25°C.....	45
Tabla 6. Terminales de la pantalla gráfica LCD.....	45
Tabla 7. Pines del DSP empleados como entradas para las señales provenientes de los pulsadores.....	48
Tabla 8. Comandos del SHT15.....	52
Tabla 9. Propiedades del bean PWM.....	60
Tabla 10. Métodos del bean PWM.....	61
Tabla 11. Configuración de los beans PWM.....	61
Tabla 12. Propiedades y configuración del bean PPG.....	64
Tabla 13. Propiedades y configuración del bean ADC.....	65
Tabla 14. Propiedades y configuración del bean IntFlash.....	70
Tabla 15. Métodos del bean IntFlash.....	70
Tabla 16. Propiedades y configuración del bean AsynchroSerial.....	73
Tabla 17. Propiedades del bean BitIO.....	76
Tabla 18. Configuración y funcionalidad de los beans BitIO.....	76
Tabla 19. Ítems y subrutinas del programa fuente del DSP.....	80
Tabla 20. Descripción de los comandos del controlador de la pantalla.....	83
Tabla 21. Método de composición de la pantalla.....	85
Tabla 22. Rutina de inicialización de la pantalla gráfica.....	88
Tabla 23. Mediciones realizadas a 100V.....	115
Tabla 24. Mediciones realizadas a 200V.....	117
Tabla 25. Mediciones realizadas a 300V.....	119
Tabla 26. Característica de tensión y corriente en la resistencia de 1 Ω	128
Tabla 27. Caracterización del rango 1 de tensión.....	129
Tabla 28. Caracterización del rango 2 de tensión.....	131
Tabla 29. Caracterización del rango 3 de tensión.....	132
Tabla 30. Caracterización del sensor de corriente.....	134

1 INTRODUCCIÓN

El fenómeno corrosivo que sufren los materiales metálicos debido a su interacción con agentes presentes en el medio que los rodea, se traduce en un deterioro de la eficiencia y de la vida útil de dicho material. Debido a que el suelo está compuesto de sales, materia orgánica, gases y demás, cualquier estructura metálica que se encuentre en contacto directo con este medio, puede sufrir un ataque corrosivo.

Actualmente en la industria, los materiales metálicos son comúnmente utilizados como materiales constructivos y en muchas ocasiones se hace indispensable colocar dichos materiales en contacto directo con el suelo. Con el fin de evitar el deterioro acelerado de estos materiales y prevenir la degradación de las estructuras metálicas inmersas en el suelo, se hace necesario realizar estudios de las condiciones corrosivas del terreno en el cual estará expuesta dicha estructura, con el propósito de seleccionar las propiedades y características del material a utilizar y el tipo de protecciones anticorrosivas adecuadas.

La resistividad del suelo es de particular interés e importancia en el proceso corrosivo debido a que es la base del análisis de los problemas de corrosión en las estructuras enterradas y del diseño de las medidas correctivas. Generalmente los terrenos con alta resistividad son menos corrosivos que los terrenos con baja resistividad. Existe una variedad de métodos y configuraciones electrónicas para realizar la medición de la resistividad del terreno, dentro de los cuales se destacan el método Schlumberger y el método Wenner, siendo este último el aprobado por la norma ASTM (American Society Test Measurement). Estos dos métodos utilizan una configuración tetra-electrónica lineal para realizar la medición de la resistividad.

Para medir la resistividad del terreno se hace necesaria la implementación de equipos electrónicos que realicen esta medición directamente en el terreno de estudio. Comercialmente estos equipos son conocidos como telurómetros, los cuales son utilizados en diferentes aplicaciones, tales como la localización de reservas de agua subterránea, petróleo y minerales, en la protección de los sistemas de poliductos y de los sistemas de distribución de energía eléctrica, entre otras.

Considerando lo anterior, en este proyecto se plantea construir un prototipo electrónico capaz de realizar la medición de la resistividad del suelo y sirva de instrumento de trabajo para las prácticas del laboratorio de corrosión (EIMCM)³ e

³ EIMCM: Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

instrumentación electrónica (E3T)⁴ de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Este prototipo se presenta como una versión mejorada del prototipo elaborado como trabajo de grado en el año 2003 para la escuela de ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander por estudiantes de la E3T. Dentro de las mejoras propuestas se plantea implementar una aplicación con una pantalla LCD por pixeles que permita ir trazando el perfil de resistividad a medida que se va desarrollando el sondeo, actualizar una interfaz en LabVIEW que permita la descarga de datos al PC para posterior análisis en el laboratorio e implementar un circuito medidor de temperatura y humedad del ambiente en el que se realiza la prueba.

A continuación se presentan algunos de los conceptos básicos en los cuales se fundamenta la medición de la resistividad del terreno y se expone la relación existente entre esta propiedad y el fenómeno corrosivo. Además se realiza una revisión de las principales características que poseen los equipos dedicados a la medición de esta propiedad con el fin de identificar las diferentes etapas que se deben tener en cuenta al momento de construir el prototipo.

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La medición de resistividad de suelos se inició desde hace varios siglos, los primeros trabajos fueron realizados por Gray y Wheeler en 1720 sobre la resistividad en las rocas, y por Watson en 1746 que descubrió la conducción del suelo. En el siglo 19 se descubrió la polarización espontánea y se patentó un sistema de medición con dos electrodos. Solo en el siglo 20 se produjeron los primeros electrodos impolarizables, con los que se implementaron las mediciones planteadas anteriormente. Posteriormente, Ragozin realizó estudios sobre la aplicación de la electricidad en la búsqueda de campos mineros, estudio que fue tomado por Conrad Schlumberger, quien, junto a Frank Wenner, desarrollaron el dispositivo tetra-electródico o de cuatro electrodos para la medición de resistividad en el suelo, con el cual se trabaja todavía. En 1938 se utilizó por primera vez el método eléctrico para el descubrimiento de yacimientos petroleros.

En los años 70s se encontró un soporte matemático para los fenómenos que afectaban la medición de resistividad de suelos. Desde ese entonces se han desarrollado dispositivos muy eficientes y confiables gracias al avance de la tecnología integrada, que facilitan la realización de las pruebas.

⁴ E3T: Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.

1.2 EL SUELO Y SU RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

El suelo es un medio heterogéneo biológicamente activo y estructurado, compuesto por rocas, gases, agua, silicatos, óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y materiales orgánicos como humus elaborado y sales. Debido a esta variedad, la resistividad del suelo depende no solo de su composición intrínseca sino también de factores extrínsecos, por tal motivo es complicado definir la composición de un suelo específico midiendo solamente su resistividad, sin embargo, esta propiedad permite estimar el grado de agresividad del suelo (tal como se muestra en la Tabla 1) y se ha convertido en la base del análisis de los ataques corrosivos en estructuras metálicas enterradas.

Tabla 1. Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad

Resistividad (Ω -m)	Grado de agresividad
≤ 10	Severo
10 – 100	Discreto
100 – 1000	Escaso
≥ 1000	Nulo

Fuente: AVILA, Javier. GENESCÁ, Joan. Más allá de la herrumbre II. La lucha contra la corrosión.

La medición de la resistividad de suelos se utiliza para el control de la corrosión de las estructuras enterradas. Esta medida permite estimar la tasa de corrosión esperada y es usada para el diseño del sistema de protección catódico. Para diseñar los sistemas de protección catódica se recomienda realizar las medidas necesarias para obtener una caracterización lo suficientemente representativa del suelo en el cual se enterrará la estructura⁵.

Existen tres factores principales que dificultan el paso de corriente en un terreno: la porosidad de la roca, la resistividad del agua y lo arcilloso que este sea, debido a lo cual es bastante difícil dar un dato exacto de la resistividad en cualquier punto por lo que se hace una aproximación asumiendo que el terreno es un conductor homogéneo.

La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección transversal s y longitud l la resistencia eléctrica está dada por la ecuación:

⁵ ASTM G57-95a Standard Test Method for Field measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four- Electrode Method

$$R = \rho * \frac{l}{s} \quad [1]$$

A partir de ésta ecuación se encuentra la siguiente expresión para la resistividad:

$$\rho = \frac{s * R}{l} \quad [2]$$

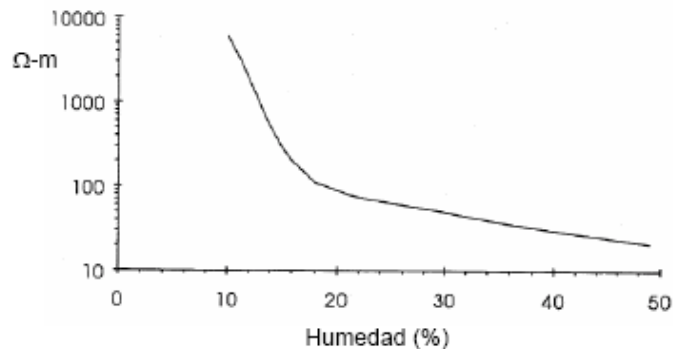
La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el Ohm por metro (Ω -m).

1.3 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTIVIDAD DE SUELOS

La resistividad del suelo varía no sólo con el tipo de suelo sino también con la temperatura, humedad, contenido de sales y compactibilidad⁶.

Debido a que la conductividad del suelo es esencialmente electrolítica, la resistividad de la mayoría de los suelos aumenta considerablemente cuando el contenido de humedad es menor al 15%. El contenido de humedad adicionalmente depende del tamaño del grano y compactación. Sin embargo, como se muestra en la Figura 1, la resistividad es poco afectada para contenidos de humedad mayores al 22%⁷.

Figura 1. Variación de la resistividad del suelo con la humedad



Fuente: Normas de montajes complementarios, medida de la resistividad eléctrica del suelo. EEPPM⁸.

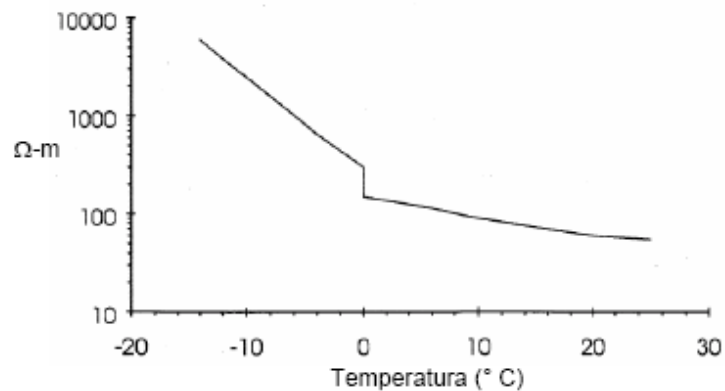
⁶ IEEE Std 81-1983 Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System.

⁷ Normas de montajes complementarios, medida de la resistividad eléctrica del suelo. EEPPM

⁸ EEPPM: Empresas Publicas de Medellín.

El efecto de la temperatura en la resistividad del suelo es despreciable para temperaturas por encima del punto de solidificación del agua, según se observa en la Figura 2. Para temperaturas por debajo de 0°C, la resistividad cambia significativamente llegando a medir hasta miles de $\Omega\cdot m$.

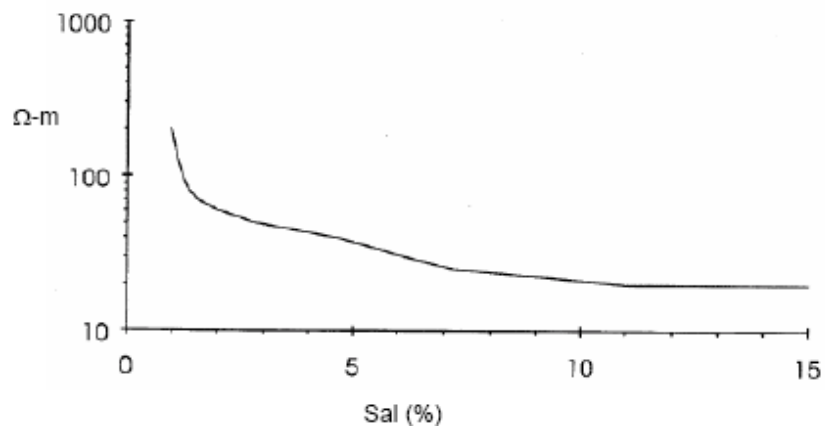
Figura 2. Variación de la resistividad del suelo con la temperatura



Fuente: Normas de montajes complementarios, medida de la resistividad eléctrica del suelo. EEPPM.

La composición y cantidad de sales solubles, ácidos o alcalinos presentes en el suelo, varían considerablemente la resistividad del terreno, tal y como se evidencia en la Figura 3.

Figura 3. Variación de la resistividad del suelo con el contenido de sal



Fuente: Normas de montajes complementarios, medida de la resistividad eléctrica del suelo. EEPPM

No se puede obtener el efecto de un cambio en la humedad y temperatura sobre la resistividad con una relación específica, pero existe una relación analítica netamente empírica que permite una aproximación, conocida como **Relación de Albretch**, que está dada por la ecuación:

$$\rho_2 = \left[\frac{(0.73 * W_1^2 + 1) * (1 + 0.03 * T_1)}{(0.73 * W_2^2 + 1) * (1 + 0.03 * T_2)} \right] * \rho_1 \quad [4]^9$$

En donde **W1** y **T1** son la humedad y temperatura en la condición actual y **W2** y **T2** son humedad y temperatura en una condición distinta. Esta relación sólo es recomendable para una comparación entre dos condiciones del mismo terreno.

Según lo expuesto anteriormente, conocer los valores de humedad y temperatura del terreno en el momento en que se le realiza la medición de la resistividad, permite obtener una mejor interpretación de los resultados. Siguiendo esta idea, el presente proyecto plantea la implementación de un sensor que permita medir estas dos variables.

1.4 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN EL TERRENO

Estimaciones basadas en la clasificación del suelo conducen sólo a valores aproximados de la resistividad. Por tanto, si se desea conocer un valor más confiable de la resistividad del terreno es recomendado hacer esta medición directamente en el sitio de interés.

Las diferentes técnicas utilizadas para medir la resistividad del suelo son descritas en detalle en la IEEE Std 81-1983 “ IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potencial of a ground system” y se exponen brevemente a continuación.

1.4.1 Método de variación de la profundidad

Es también conocido como el método de los tres electrodos, el cual consiste en ir incrementando la profundidad a la cual se encuentran enterrados los electrodos a medida que se van realizando las mediciones de resistencia del terreno, con el fin de que fluya una mayor corriente de prueba por el suelo. Este método permite

⁹ Tesis de grado “Diseño y construcción de un prototipo de un medidor de resistividad de suelos para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica”

obtener información acerca de la naturaleza del terreno. Si el medio de interés es muy grande, es aconsejable utilizar el método de los cuatro electrodos.

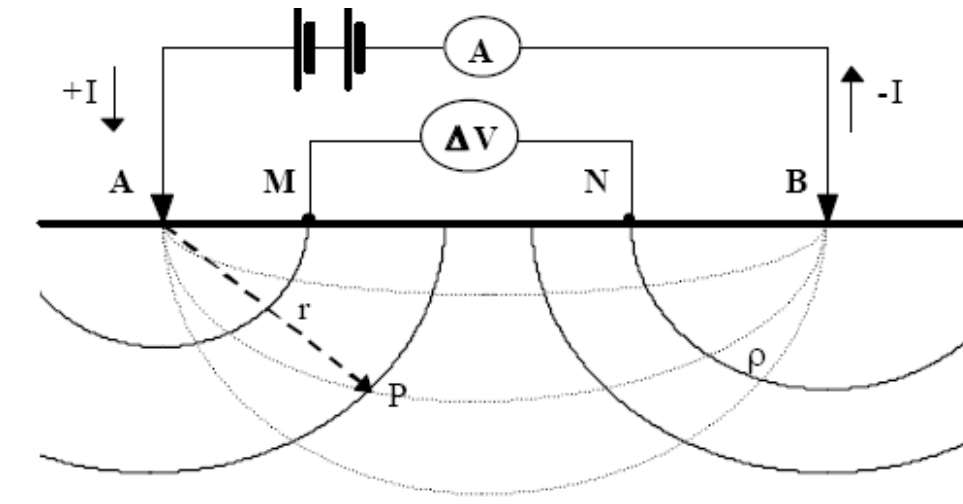
1.4.2 Método de dos electrodos

Este método consiste en utilizar dos electrodos, uno de ellos debe ser de hierro y más pequeño que el otro, los cuales deben estar conectados a una varilla aislante. El terminal positivo de la batería es conectado a través de un miliamperímetro al electrodo más pequeño y el terminal negativo de la batería al otro electrodo. Este método es utilizado para realizar mediciones en porciones pequeñas de terreno durante un corto tiempo.

1.4.3 Método de los cuatro electrodos

El método más preciso para la medición de la resistividad promedio de grandes volúmenes de terreno, es el método de cuatro puntos. Cuatro pequeños electrodos son enterrados en el suelo a la misma profundidad en una distribución lineal, según se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Dispositivo de cuatro electrodos para la medición de resistividad



Fuente: <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/forum/FEEL0602.pdf>

Este método consiste en inyectar una corriente I entre el par de electrodos AB y medir la tensión ΔV entre el par de electrodos MN . Si el medio posee una resistividad homogénea ρ , la diferencia de tensión es:

$$\Delta V = \frac{I * \rho}{2 * \pi} * \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad [5]$$

Donde AM, AN, BM y BN es la distancia entre los respectivos electrodos. La expresión general de la resistividad es:

$$\rho = g \frac{\Delta V}{I} \quad [6]$$

Utilizando las expresiones anteriores se deduce por igualación que la constante geométrica **g** es:

$$g = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad [7]$$

Resolviendo esta ecuación se encuentra la siguiente expresión.

$$g = 2\pi * \left(\frac{AM * AN * BM * BN}{AN * BM * BN - AM * BM * BN - AM * AN * BN + AM * AN * BM} \right) \quad [8]$$

En un dispositivo tetra-electrónico lineal, es decir, que todos los electrodos estén en línea recta, se pueden intercambiar los electrodos de inyección y medida, sin que cambie el factor geométrico **g**, de tal forma que no se altera ninguna de las ecuaciones mencionadas anteriormente, esto se conoce como principio de reciprocidad, útil también en medios heterogéneos, es decir, en medios que presentan resistividades muy diversas en diferentes puntos.

En la práctica no es recomendable colocar los electrodos de detección, A y B, muy separados ya que esto permite que se introduzca mayor ruido y corrientes parasitas entre ellos y degrada la confiabilidad de la lectura. La medida obtenida en un medio heterogéneo se conoce como resistividad aparente **pa**, la cual se calcula suponiendo que el terreno se comporta como un medio homogéneo.

1.5 MÉTODOS TETRA-ELECTRÓDICOS LINEALES BÁSICOS

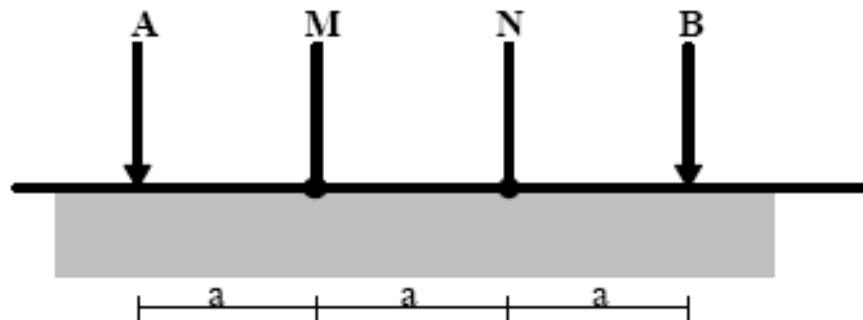
Según la norma IEEE Std 81-1983, los métodos de cuatro electrodos proporcionan valores más precisos de la resistividad del terreno para grandes extensiones. Los métodos tetra-electrónicos empleados comúnmente son el Schlumberger y el Wenner, siendo este último el estandarizado por la norma ASTM G57-06. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se plantea construir un

prototipo el cual realice la medición de la resistividad del terreno utilizando estos dos métodos. A continuación se describe estos métodos.

1.5.1 Método Wenner

Los electrodos se colocan equidistantes sobre una línea recta en el orden AMNB como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Método Wenner



Fuente: <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/forum/FEEL0602.pdf>

El factor geométrico del método está dado por la ecuación [8], con $AM=a$, $AN=2a$, $BM=2a$, $BN=a$, resolviendo se obtiene:

$$g = 2\pi * \left(\frac{a * 2a * a * 2a}{2a * 2a * a - 2a * a * a - 2a * a * a + 2a * 2a * a} \right)$$

$$g = 2\pi * \left(\frac{4a^4}{4a^3 - 2a^3 - 2a^3 + 4a^3} \right)$$

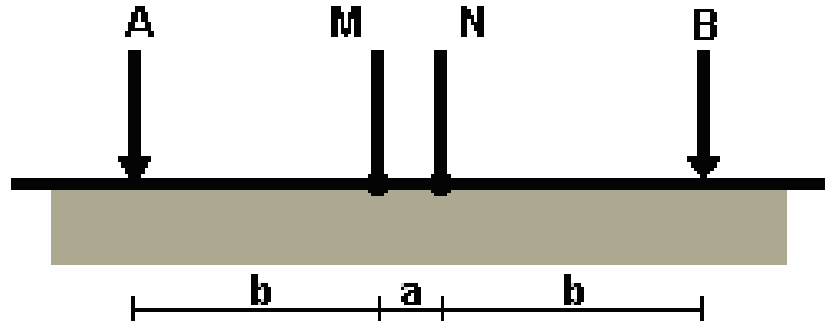
$$g = 2\pi * \left(\frac{4a^4}{4a^3} \right)$$

$$g = 2 * \pi * a \quad [9]$$

1.5.2 Método Schlumberger

Se trata de una distribución simétrica de los electrodos de la forma AMNB dispuestos en línea recta, donde la distancia de los electrodos detectores MN, es menor que la de los inyectores AB. En la práctica se usa la siguiente norma $AB > 5MN$. La distribución se puede observar en la Figura 6.

Figura 6. Método Schlumberger



Fuente: <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/forum/FEEL0602.pdf>

El factor geométrico del dispositivo en este caso está dado por [8] con $AM=b$, $AN=b+a$, $BM=b+a$, $BN=b$, factorizando se encuentra que

$$g = 2\pi * \left(\frac{b * (b + a) * (b + a) * b}{(b + a) * (b + a) * b - b * (b + a) * b - b * (b + a) * b + b * (b + a) * (b + a)} \right)$$

$$g = 2\pi * \left(\frac{b^2 * (b + a)^2}{(b + a)^2 * 2b - 2b^2 * (b + a)} \right)$$

Dividiendo toda la expresión entre $b*(b+a)$ y factorizando el 2 del denominador se obtiene

$$g = \frac{2\pi}{2} * \left(\frac{b * (b + a)}{(b + a) - b} \right)$$

Efectuando las operaciones y simplificando se obtiene la siguiente expresión

$$g = \pi * \left(\frac{b(b + a)}{a} \right) \quad [10]$$

En ciertos casos, el electrodo **B** se lleva a gran distancia de los demás de modo que no influya sobre el valor de ΔV observado, obteniendo con ello el dispositivo denominado Schlumberger asimétrico, o semi-Schlumberger.

1.6 REVISIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Para construir el prototipo planteado en este proyecto, es necesario conocer las especificaciones de los equipos y demás accesorios requeridos para medir la resistividad del suelo. Con tal fin, se estudian las normas IEEE Std 81-1983 y ASTM G57-06 para conocer los dispositivos requeridos para realizar dicha medición, se hace una revisión preliminar de algunos modelos comerciales y se estudian las características del prototipo realizado como trabajo de grado en el año 2003 por estudiantes de la E3T, con base en el documento elaborado. A continuación se exponen cada una de las consideraciones tomadas en cuenta para la realización del prototipo.

1.6.1 Aparatos requeridos para la medición de la resistividad del suelo según las normas IEEE Std 81-1983 y ASTM G57-06

El equipo necesario para realizar la medición de la resistividad del suelo según el método de los cuatro electrodos, requiere de: una fuente de corriente, un voltímetro adecuado, un amperímetro o galvanómetro, cuatro electrodos metálicos y el cable necesario para realizar las conexiones.

- Fuente de corriente: Es recomendada una fuente de corriente generalmente en AC de 97 Hz, dado que la corriente directa DC puede causar error por la polarización que se presenta en casi todos los electrodos metálicos. La corriente puede ser suministrada por un generador AC o una fuente en DC equipada con un oscilador electrónico.
- Voltímetro: El circuito del voltímetro no debe tener una caída apreciable de la corriente para evitar efectos de polarización. La impedancia de entrada del medidor debe tener al menos una impedancia de 10 GΩ. Este puede ser del tipo galvanómetro o electrónico.
- Electrodos: Fabricados de acero estructural de bajo carbón o acero inoxidable tipo martensítico con un diámetro desde 0.475 a 0.635 cm y longitudes desde 30 hasta 60 cm. La varilla debe tener tratamiento térmico para que tengan suficiente rigidez para poder ser hincada en suelos secos o gravilla. Los electrodos deben tener un mango, palanca u otro accesorio para ser hincados y un conector terminal para conectar el cable o alambre. El electrodo varilla debe ser liso. Los electrodos tipo roscado no son recomendados ya que dejan un aire atrapado entre la varilla y suelo creando una alta resistencia de contacto.
- Cableado: El calibre del cable va desde 18 a 22 AWG de cobre. Cuando el equipo viene para distancias normalizadas y fijas en su medición el cable puede ser multi-conductor y apantallado y con los terminales de conexión. Los

terminales de conexión para el cable deberán ser de buena calidad y asegurar una baja resistencia de contacto. El aislamiento de cable debe ser para uso pesado, no se debe desgastar contra el roce o abrasión que sufre el cable contra el piso. Se recomienda que el cable esté empacado en carretes para su fácil transporte y manipulación.

1.6.2 Revisión de algunos modelos comerciales de telurómetros

Para la realización de este proyecto fue necesario hacer una revisión preliminar de algunos modelos comerciales para caracterizar el prototipo; entre estos equipos se encuentran el MRU-101 de Amperis que inyecta una tensión máxima de 40 V a 128 Hz, una corriente de prueba máxima de 250 mA y tiene 5 rangos de medición de resistencia entre 0.6 Ω y 20 K Ω con una precisión de $\pm 2\%$. El EM - 4055 de MEGABRAS inyecta al terreno tensiones entre 0 y 60 V a dos frecuencias diferentes 270 y 1470 Hz y calcula resistencias entre 0.01 Ω y 20 K Ω con una precisión del 2%. El MD-1000R de MEGABRAS presenta unos niveles de inyección de 250, 500 y 1000 Vdc y realiza mediciones de resistencia hasta 20 G Ω . El GC1000 de ED&D inyecta al terreno una corriente de 25 o 30 A con una frecuencia de 50 o 60 Hz, cuenta con una precisión del 2%. El ET 3000 de PCE posee 3 rangos de medición de resistencia entre 0,01 Ω hasta 2000 Ω con una precisión del 2%, inyecta una corriente de 2 mA y efectúa la prueba a 820 Hz. El Earth-Insulation Tester de Metrel inyecta al terreno una tensión sinusoidal de 40 Vp y 125 Hz, una corriente de prueba menor a 20 mA y un rango de medición de resistencia entre 0 y 19.99 K Ω . El MiniSting de AGI capaz de inyectar corrientes de salida de 1-2-5-10-20-50-100-200-500 mA, una tensión máxima de 800 Vpp y un rango de medición de resistencia entre 0.1 m Ω y 400 k Ω .

Según la revisión mostrada anteriormente, se evidencia que en los equipos utilizados para la medición de resistividad de suelos no existen unos valores estándares en la potencia de salida y rangos de medición, ya que estos varían de acuerdo a las diferentes aplicaciones para las que es diseñado el equipo.

1.6.3 Estudio de las características del MRS 2003¹⁰

El MRS 2003 fue desarrollado para su aplicación en estudios de corrosión. Se diseñó con la finalidad de inyectar corriente continua por medio de la generación de voltajes DC entre 100V y 300V a partir de una topología **troceador-elevador** (con capacidad máxima de corriente de 400mA) y detectar la señal de tensión entre electrodos con la respectiva compensación del efecto de polarización

¹⁰ Tesis de grado "Diseño y construcción de un prototipo de un medidor de resistividad de suelos para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica"

espontánea dentro del rango de $\pm 250\text{mV}$, para lo cual cuenta con un circuito de medición y software de control.

El MRS 2003 brinda al usuario una gran flexibilidad y autonomía sobre la ejecución de la prueba, ya que permite acceder al tipo de prueba (Wenner o Schlumberger) y niveles de inyección (100V, 200V o 300V), a través del manejo de un teclado y una pantalla LCD (Liquid Crystal Display), que permiten el fácil desplazamiento sobre los diferentes menús de selección y configuración.

El sistema de adquisición posee las siguientes características:

- Alta impedancia de entrada ($10\text{G}\Omega$).
- Tres rangos para medición de voltaje con resoluciones de $62.5\mu\text{V}$, 1mV y 2.5mV .
- Un rango para medición de corriente con resolución de $100\mu\text{V}$.
- Conversión A/D a 12 bits.
- Respaldo de memoria para almacenamiento de datos de campo.

Además, este prototipo brinda una aplicación en LabVIEW que permite la descarga serial de los datos almacenados en memoria para la posterior representación gráfica del perfil de resistividad con los resultados obtenidos, facilitando de esta forma el estudio de las características y/o comportamiento corrosivo del suelo.

El equipo diseñado puede inyectar una corriente máxima de 400mA y medir una tensión mínima de 10mV con un error del 1% y puede alcanzar profundidades de medición de 750 pies. La máxima resistencia que el MRS 2003 es capaz de medir es $1\text{k}\Omega$.

Según el documento, el diseño en corriente continua presenta grandes ventajas con respecto al generador de corriente alterna, pues permite alcanzar mayores profundidades de estudio, facilita la interpretación de resultados, disminuye la complejidad en su implementación y reduce la interferencia debido a efectos inductivos y/o capacitivos.

1.7 DISTRIBUCIÓN DEL DOCUMENTO

En este trabajo se documentan cada una de las etapas realizadas para la construcción de un Medidor de Resistividad de Suelos (**MRS V2.0**), exponiendo las especificaciones y los criterios tenidos en cuenta en la selección de las diferentes etapas y de los dispositivos que las constituyen. A continuación se muestra una visión general de la estructura del presente documento.

En este capítulo, se han expuesto los principales temas concernientes a la resistividad del terreno y su relación con el ataque corrosivo que sufren las estructuras metálicas enterradas. De igual manera se han estudiado las principales características de los telurómetros comerciales y del prototipo MRS 2003, además de presentar las especificaciones de los instrumentos de medición de resistividad de suelos regidas por las normas IEEE Std 81-1983 y ASTM G57-06, creando con ello un punto de referencia para la construcción y diseño del MRS V2.0.

En el capítulo 2 se plantean las especificaciones del MRS V2.0 y se presentan las diferentes etapas de hardware del prototipo y los criterios de diseño tenidos en cuenta para su construcción. El hardware consta principalmente de una etapa generadora de potencia, de las fuentes de alimentación, de la etapa de control, la etapa de medición, la etapa de comunicación con el PC y del cargador de batería. Se detallan todos los circuitos utilizados, describiendo su funcionamiento e implementación.

El capítulo 3 describe todo lo relacionado con las aplicaciones de software empleadas en el proyecto. Una de estas aplicaciones se relaciona con la configuración y programación del procesador digital de señales (DSP) encargado de controlar las funciones realizadas por el prototipo. La otra aplicación hace referencia a un programa desarrollado en el software LabVIEW empleado para la descarga y visualización de datos en el computador.

En el capítulo 4 se exponen los resultados alcanzados, iniciando con la presentación de los resultados de las pruebas en campo realizadas con el equipo a fin de validar su desempeño. Para realizar la validación se compararon los resultados de las pruebas con mediciones realizadas con un telurómetro comercial proporcionado por la E3T. Seguidamente, se concluye de acuerdo a los resultados obtenidos y se presentan las recomendaciones hechas por los autores para un desarrollo posterior de un prototipo mejorado.

Finalmente se presenta la sección de anexos que muestran información complementaria utilizada en la realización de este proyecto.

2 HARDWARE

En éste capítulo se recopilan las principales consideraciones que se tuvieron en cuenta a la hora de diseñar y construir el Medidor de **Resistividad de Suelos, MRS V2.0**, mediante la explicación de cada una de las etapas que lo constituyen. Se construyó un equipo autónomo que opera a partir de una batería de 12V/7 A-H, diseñado para inyectar tensiones de 100, 200 ó 300V (según lo desee el usuario) por medio de una topología *full-bridge*, un circuito de adquisición manejado por DSP y compensación del voltaje espontáneo por software.

La descripción que se presenta en este capítulo se divide en los siguientes temas: especificaciones de diseño, etapa de alimentación, circuito generador de alta tensión, diseño del transformador, circuitos de medición y control e interfaz con el usuario.

2.1 ESPECIFICACIONES GENERALES DE DISEÑO

Con base en la información presentada en el capítulo 1, al momento de calcular la resistividad eléctrica del suelo es indispensable contar con un equipo capaz de inyectar un nivel de corriente adecuado al terreno y que además realice mediciones de tensión y corriente.

Partiendo de la necesidad de construir un equipo portátil el cual realice las pruebas en campo y cuente con un sistema de alimentación adecuado capaz de suministrar la energía necesaria para su correcto funcionamiento, se propone trabajar con una batería, fácil de transportar y que cumpla con las especificaciones de corriente y tensión necesarias. Inicialmente se planteó utilizar una batería de litio polimérico por su tamaño reducido, bajo peso y capacidad energética suficiente a la requerida para la alimentación del prototipo [29]. Sin embargo, no fue posible trabajar con una batería de estas características debido a su elevado costo. Por esta razón, se utilizó la misma batería (referencia BT-7 12HR) del prototipo MRS 2003, la cual fue suministrada por el grupo CEMOS¹¹. Debido a que se emplea la misma fuente de alimentación del prototipo anterior y que ésta batería no es una solución óptima dado su tamaño, peso y sobredimensionamiento en las especificaciones, se optó por no realizar modificaciones al cargador de batería. Dentro de las recomendaciones del proyecto se plantea mejorar este aspecto debido a que la solución dada en ese diseño no es la más adecuada.

¹¹ CEMOS: grupo de investigación en Control, Electrónica, Modelado y Simulación.

En las mediciones de resistividad, es utilizada la inyección de corriente DC cuando se necesita alcanzar grandes profundidades de prospección, además facilita la interpretación de resultados debido a que el campo eléctrico producido no crea fenómenos de inducción electromagnética apreciable lo cual si ocurre cuando se utilizan generadores de alterna. Este método de inyección de corriente DC también evita complejas implementaciones de *hardware*, pero tiene la desventaja de someter a los electrodos a fenómenos de polarización, que pueden ser críticos sin una adecuada compensación. Analizando los conceptos mencionados anteriormente, se determinó que el funcionamiento del prototipo será en corriente continua por facilidad de manejo, interpretación de datos y aplicabilidad en lugares alejados. Para tal motivo, se plantea implementar un circuito generador de corriente directa y realizar la respectiva compensación del fenómeno de polarización por software.

La sensibilidad de los equipos utilizados para medir la resistividad del terreno es función de la capacidad de potencia de la fuente de corriente y de la sensibilidad del circuito medidor. La capacidad del sistema puede ser aumentada incrementando la cantidad de corriente que puede ser proporcionada a la tierra o incrementando la sensibilidad del circuito medidor. Es necesario considerar los dos factores al comparar ambos componentes. Una figura de merito para el equipo de resistividad puede ser calculada tomando la relación de la tensión mínima que puede ser leída con la precisión deseada por el circuito receptor y con la máxima corriente que puede ser proporcionada al terreno por el circuito emisor. La máxima corriente puede ser tomada como la corriente máxima que puede ser manejada por el equipo o la máxima tensión proporcionada por el circuito de inyección de corriente dividido por un valor de resistencia nominal de contacto, como por ejemplo 150Ω .¹² La menor de estas dos debe ser utilizada como un ejemplo de sensibilidad requerido. En la Tabla 2, se muestran el valor de la figura de merito para varios problemas de exploración.

¹² BRAVO BOHADA, Liliana – HURTADO PARRA, Juan Carlos. Resistenciómetro para Aguas: Que determina la localización de depósitos de aguas subterráneas empleando medidas de resistividad del terreno. Trabajo de Grado. UIS. 1997.

Tabla 2. Aplicaciones del medidor de resistividad de suelos de acuerdo a la figura de merito.

Problema tipo	Mínima tensión / máxima corriente
Localización de depósitos de grava o reconocimiento de aguas subterráneas a distancias no mayores de 50 pies.	0.1 -1 Ω
Resistividad a profundidades moderadas (hasta 1000 pies) para estudios de camas de tierra o estructuras geológicas no profundas.	0.001 Ω
Medida de resistividad profunda, para encontrar rocas sedimentarias a una profundidad de 1000 a 1500 pies.	0.000001 Ω

Fuente: BRAVO BOHADA, Liliana – HURTADO PARRA, Juan Carlos. Resistenciómetro para Aguas: Que determina la localización de depósitos de aguas subterráneas empleando medidas de resistividad del terreno. Trabajo de Grado. UIS. 1997.

El prototipo MRS V2.0 es diseñado para calcular la resistividad del suelo con el fin de estimar las condiciones corrosivas del terreno. Por tal motivo, el equipo fue diseñado para alcanzar profundidades de alrededor de 1000 pies, por lo que se seleccionó una corriente de inyección máxima de 400 mA y una resolución mínima en el sensor de tensión de 0.4 mV.

Con base en la revisión realizada en la sección 1.6, el MRS V2.0 se diseñó con la finalidad de inyectar al terreno corriente continua (con capacidad máxima de corriente de 400mA), por medio de la generación de tensiones de DC de 100, 200 y 300 V. Para generar estos niveles de tensión a partir de la tensión de la batería de alimentación, en el MRS 2003 se implementó una topología troceador-elevador, sin embargo, en la construcción de este prototipo (MRS V2.0) se propone utilizar la topología **full-bridge** como alternativa, que teóricamente presenta una eficiencia mayor al 80%, es comúnmente utilizada para aplicaciones que involucren conversión DC-DC¹³ y los elementos magnéticos necesarios para su funcionamiento son de menor tamaño que los requeridos en una topología troceador-elevador.

La topología full-bridge implementada en el MRS V2.0, requiere el diseño y construcción de un transformador. Por tal razón en la sección 2.6 se describen con detalle cada uno de los pasos que se tuvieron en cuenta para el diseño de este transformador.

¹³ PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design. Second Edition. McGraw-Hill.

Con el fin de calcular el valor de la resistividad del terreno, el equipo dedicado a este propósito debe estar en condiciones de medir tensión y corriente. Por tal razón en el MRS V2.0, se hace necesaria la implementación de circuitos dedicados a estos propósitos, lo cual se aborda con detalle en la sección 2.9. A partir de la revisión realizada en la sección 1.6, se diseñaron los sensores de tensión y corriente bajo las siguientes especificaciones:

- Impedancia de entrada de 100 G Ω . (Según las recomendaciones de la norma ASTM G57-06 el sensor de tensión utilizado debe tener una impedancia de entrada mayor a 10 G Ω).
- Tres rangos de medición de tensión con resoluciones de 48.82 μ V, 0.61 mV y 2.44 mV.
- Un rango para medición de corriente con resolución de 140 μ A.

Para la selección de los rangos de medición de tensión se tuvieron en cuenta los niveles de tensión espontanea (0-200 mV) y niveles inducidos (0-10 V) en suelos de diferentes características. ¹⁴

Para controlar las funciones del MRS V2.0 se propone utilizar el DSP de referencia 56F8323 de Freescale debido a que se contaba con información suficiente relacionada con el software de programación y con el manejo de la pantalla gráfica mediante este DSP¹⁵. Aunque no se hace necesaria la utilización de las funciones de procesamiento digital que brinda el DSP, se plantea emplear algunos módulos que este dispositivo ofrece, tales como: ADC, PWM, SPI, SCI, GPIOs y PPG, entre otros.

Con el fin de brindarle al usuario una gran flexibilidad y autonomía sobre la ejecución de las prueba y control de las diferentes opciones proporcionadas por el equipo, se propone implementar una interfaz con el usuario compuesta de una pantalla LCD y cuatro pulsadores, los cuales no solo deben ofrecer la posibilidad de observar las mediciones realizadas, sino también de permitir trazar el perfil de resistividad de las pruebas.

A continuación se resumen las características planteadas para el diseño del MRS V2.0:

- Sistema de inyección de tensión de 100, 200 y 300 Vdc por medio de topología full-bridge.
- Métodos de medición Wenner y Schlumberger.

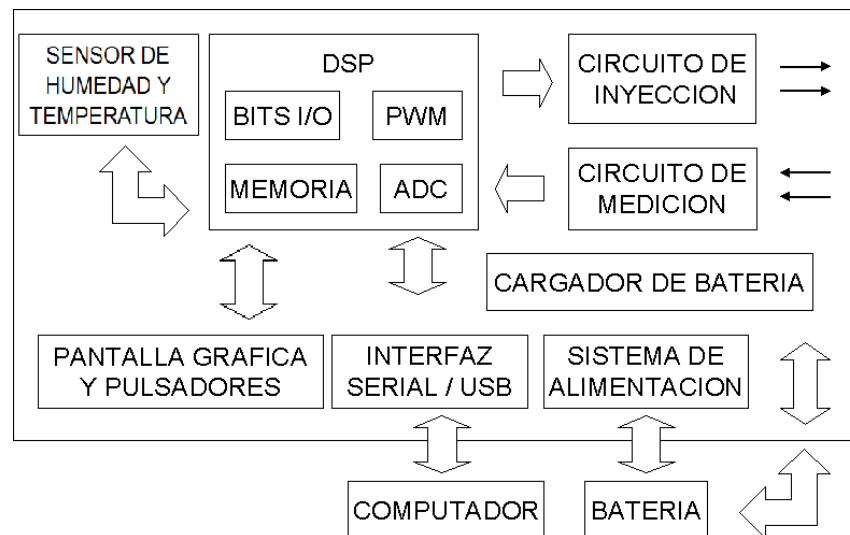
¹⁴ Tesis de grado "Diseño y construcción de un prototipo de un medidor de resistividad de suelos para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica"

¹⁵ AMARIS DOMINGUEZ, Jean Pierre - LOPEZ PATIÑO, José Alberto. Elaboración de software para la caracterización de una celda electroquímica utilizando DSP familia 56800 de Motorola. Trabajo de Grado. UIS. 2004.

- Máxima corriente de inyección de 400 mA.
- Alta impedancia de entrada del sensor de tensión (100GΩ).
- Tres rangos para medición de voltaje con resoluciones de 48.82 μ V, 0.61 mV y 2.44 mV.
- Un rango para medición de corriente con resolución de 140 μ V.
- Conversión A/D a 12 bits.
- Respaldo de memoria para almacenamiento de datos de campo.
- Sensor de humedad y temperatura
- Interfaz gráfica con el usuario.
- Pantalla gráfica que permite trazar el perfil de resistividad.
- Descarga de datos al computador por medio del puerto USB.
- Programa en LabVIEW para la descarga de datos y posterior análisis.
- Rango de medición de resistencia entre 85 μ Ω y 71.42 KΩ.

En la Figura 7 se muestra un diagrama de bloques del MRS V2.0 en donde se observan los diferentes módulos que conformarán el prototipo según las características y especificaciones planteadas anteriormente. Cada una de estas etapas es explicada en las siguientes secciones de éste capítulo.

Figura 7. Diagrama de bloques del MRS V2.0



Fuente: los autores

2.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

El MRS V2.0 es un dispositivo autónomo y portátil, por lo que debe poseer un sistema de alimentación que le permita cumplir con estos requerimientos. Según lo anterior, es necesario contar con una fuente de alimentación que proporcione la energía suficiente para el dispositivo y además sea fácil de transportar, permitiendo con ello que el equipo no pierda su autonomía. Teniendo presente los requerimientos que exige la fuente de alimentación, se decidió seleccionar una batería, la cual sea fácil de transportar y sea capaz de suministrar la potencia necesaria para que el equipo opere correctamente. De esta manera, el sistema opera mediante una batería recargable de referencia BT-7 12HR la cual normalmente suministra una tensión continua de $12 V_{DC}$ y posee una capacidad de corriente de 7 A-H. Estas especificaciones, permiten que los requerimientos para la fuente de alimentación sean cumplidas, permitiendo con ello un correcto funcionamiento del equipo.

2.3 CARGADOR DE BATERÍA

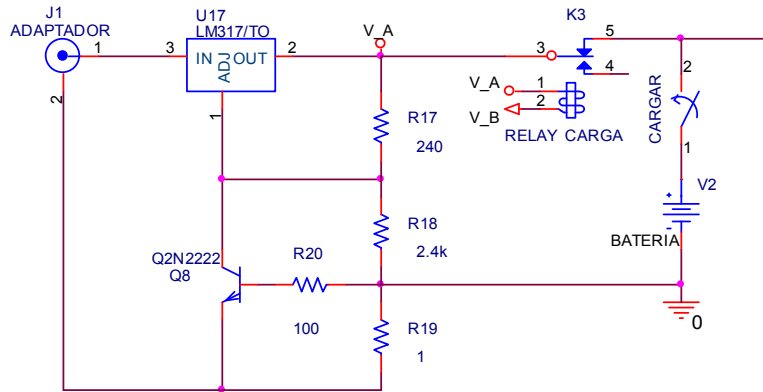
Una vez seleccionado el sistema de alimentación, se presenta la necesidad de contar con un cargador de baterías, el cual permita mantener el nivel de carga de ésta, dentro de los rangos recomendados por el fabricante (el valor de tensión de la batería se debe mantener dentro de un rango de 11.3V a 13.7V)¹⁶ y así evitar deterioros que reducirán su vida útil. Con tal fin, en el MRS V2.0 se implementó el cargador de batería propuesto en el MRS 2003. Cabe aclarar que para el diseño de este cargador de batería no se tuvieron en cuenta las curvas de corriente de carga y descarga de la batería, lo cual también influye considerablemente en la vida útil de ésta. Por tal motivo se plantea en las recomendaciones abordar este punto como mejora de este prototipo.

Al momento de implementar el cargador de batería, se requiere que éste sea lo más autónomo posible con el fin de permitir al dispositivo una flexibilidad, tal que no sea necesaria la presencia de un operario mientras se está recargando la batería. Por tal motivo, en el circuito cargador de batería se realiza un sistema de control automático que permite desactivar la carga de la batería cuando ésta alcance el valor máximo de tensión recomendado y además que cuenta con una señal luminosa, la cual permite informar al usuario el momento en el cual la carga de la batería se ha realizado completamente.

¹⁶ Valores tomados de la tesis DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE UN MEDIDOR DE RESISTIVIDAD DE SUELOS PARA EL LABORATORIO DE CORROSIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA, 2003

El circuito esquemático del cargador de batería, que se muestra en la Figura 8, opera a partir de un adaptador comercial de 16 o 18 V. El cargador se habilita únicamente cuando el interruptor principal se posiciona en el modo ‘CARGAR’ y además la tensión de batería se encuentra por debajo de 13.7V, de lo contrario el sistema se inhabilita automáticamente impidiendo así, que la carga de la batería se realice.

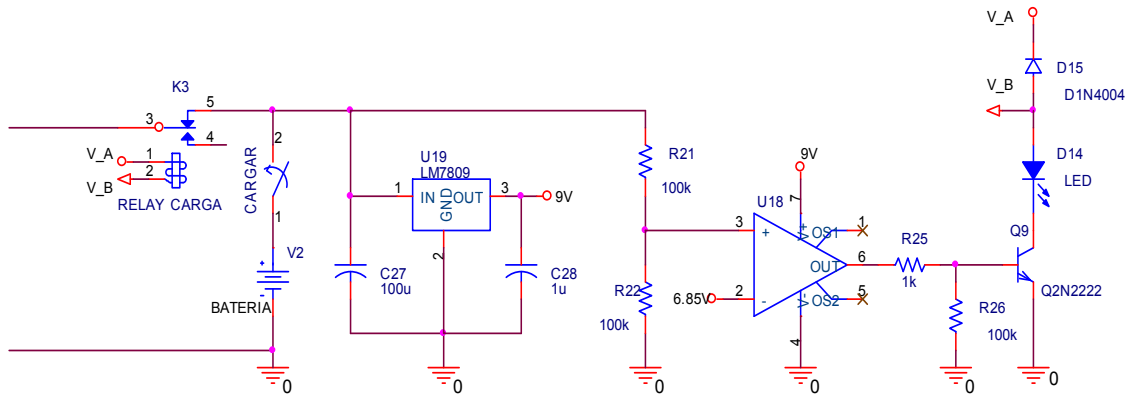
Figura 8. Circuito esquemático del cargador de batería



Fuente: los autores

En condiciones normales de carga la tensión de salida del regulador LM317 (V_A) se fija a 13.7 V y queda aplicada sobre la batería limitando el paso de corriente mediante el resistor R19 de la Figura 8. Durante el proceso de carga, la tensión de la batería es sensada continuamente mediante el divisor resistivo conformado por las resistencias R21 y R22, tal y como se observa en la Figura 9, para ser aplicados a la entrada positiva del Amplificador Operacional U18 que se encuentra configurado como comparador, el cual proporciona una tensión de salida de, aproximadamente 9V cuando la tensión de la batería sea mayor o igual a 13.7V, activando así el transistor Q9, que opera como interruptor, energizando con ello la bobina del relé que interrumpe la carga de la batería y se genera una señal luminosa mediante el led D14 que informa al usuario sobre la culminación exitosa del proceso de carga de la batería.

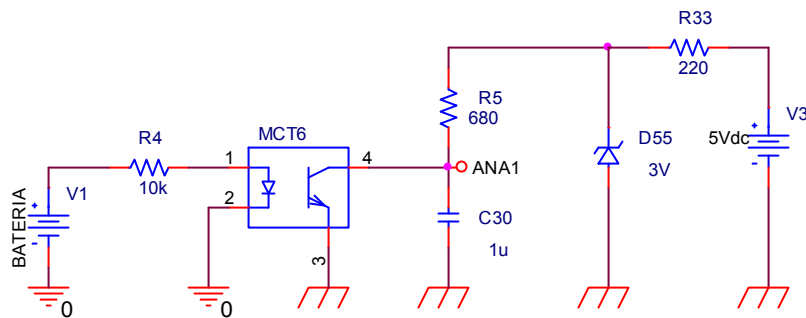
Figura 9. Sistema de control para la carga de batería



Fuente: los autores

Como se ha mencionado con anterioridad, se recomienda que el nivel de tensión de la batería no disminuya de 11.3V. Debido a esto, es necesario contar con un circuito que permita realizar un sensado continuo de la tensión de la batería y le informe al usuario el nivel de carga que ésta posee. El circuito esquemático que permite realizar el sensado continuo del nivel de la batería se muestra en la Figura 10, el cual provee una tensión que varía de 3V a 0.5V aproximadamente a medida que la tensión de entrada (batería) se varía de 0V a 15V. Adicionalmente el diodo zener, con el cual cuenta este circuito, opera como limitador evitando que la tensión en la entrada analógica no supere los 3V con el fin de asegurar la integridad del DSP.

Figura 10. Circuito esquemático de sensado de tensión en la batería



Fuente: los autores

El circuito de sensado opera continuamente, pero su lectura, la cual se realiza mediante el terminal ANA1 del DSP, se efectúa únicamente cuando el equipo se encuentra en el menú principal. En la pantalla del menú principal el usuario puede

observar además de las principales opciones que el MRS V2.0 ofrece, el nivel de carga al cual se encuentra la batería, tal y como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Menú principal del MRS V2.0



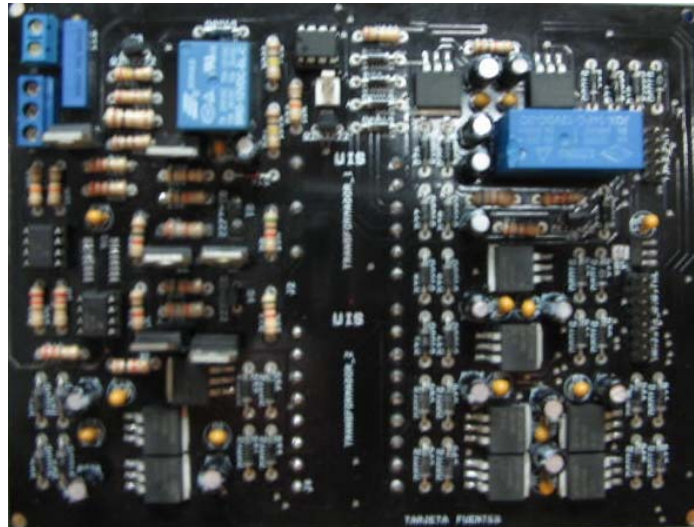
Fuente: los autores

2.4 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Para la alimentación del sistema en general, se identificaron dos grupos principales de fuentes. Un grupo (al cual se refiere el texto como fuentes constantes) que debe operar durante todo el periodo que el equipo se encuentre encendido y el otro (al cual se refiere el texto como fuentes temporales) que solo es necesario en el momento que se desee realizar la medida de resistividad del terreno. Por ello, se desacoplaron estos dos grupos de fuentes utilizando dos transformadores de núcleo de ferrita operados a una frecuencia de 40kHz. Otra consideración importante que se analizó fue minimizar el consumo de potencia, por ello se separaron las fuentes en dos grupos y como todo el sistema de alimentación es regulado, se utilizaron reguladores tipo LDO¹⁷. En la Figura 12 se muestra la tarjeta donde se ubican las fuentes.

¹⁷ Low Drop-Out Voltage.

Figura 12. Tarjeta fuentes del MRS V2.0



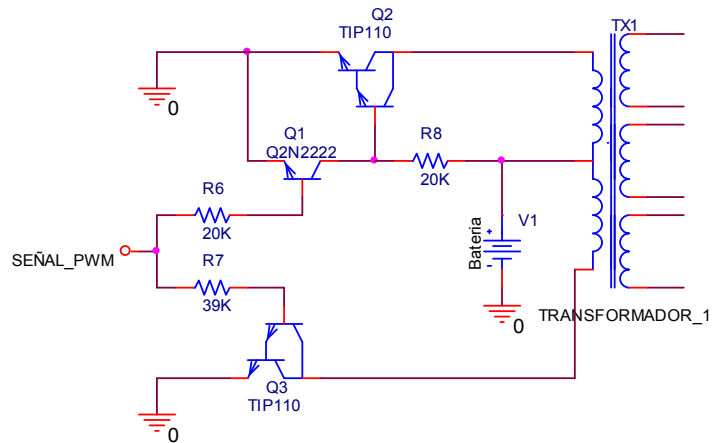
Fuente: los autores

2.4.1 Fuentes constantes.

Este grupo de fuentes tienen la misma referencia (tierra digital) y está conformado por tres fuentes de tensión que son: +3.3V (para alimentar el DSP), +5V (para alimentar la pantalla) y -12V (para ajustar el contraste de la pantalla).

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema completo solo cuenta con una batería de 12Vdc a partir de la cual se generan todas las señales de alimentación que sean necesarias. Por ello se implementó un circuito inversor basado en transistores como el que se muestra en la Figura 13, el cual permite aplicar al primario del transformador una tensión bipolar de 12 V con ciclo de trabajo del 50% a una frecuencia determinada por la frecuencia de la señal PWM.

Figura 13. Circuito inversor



Fuente: los autores

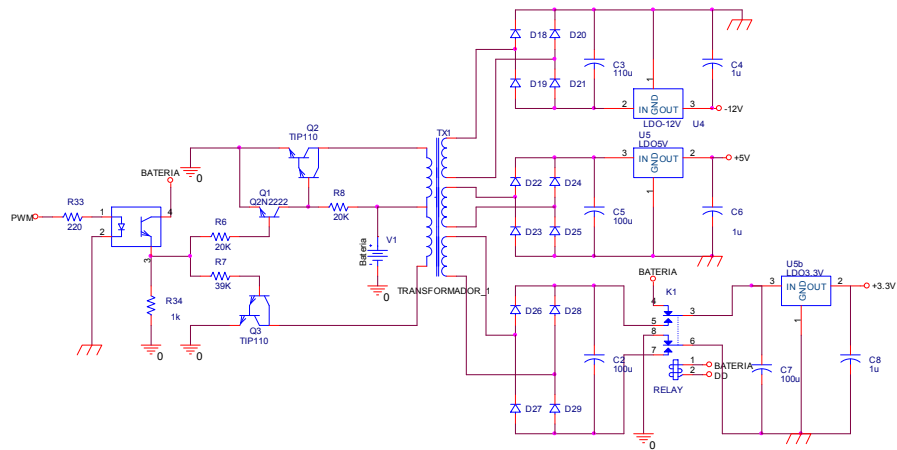
Para el diseño del transformador se utilizó un núcleo de ferrita que se obtuvo de una fuente de computador y se arrolló con alambre de cobre calibre 23. El número de vueltas del primario es 40, y de los secundarios 14, 20 y 30 para generar 3.3, 5 y -12 respectivamente.

Para generar la señal PWM se consideraron dos ideas. La primera consistía en utilizar un circuito oscilador LM555 en configuración astable el cual opera a partir de la tensión de la batería y genere la señal PWM necesaria para que funcione el puente inversor. La segunda idea consistía en implementar un circuito que permitiera al DSP operar un pequeño instante con alimentación directa de la batería, periodo durante el cual se enciende el DSP y se configura un terminal del DSP como PWM a una frecuencia de 40kHz, para que al momento de desengancharse de éste circuito, el sistema pueda operar con el PWM que se generó y así auto sostenerse.

Finalmente se optó por la segunda idea debido a que es más atractiva y elimina de cierta forma la utilización de un número de componentes dedicados a realizar una tarea que puede fácilmente ser implementada por el DSP y sin tener en cuenta que incrementa el tamaño y costo tanto económico como energético del sistema completo.

El sistema completo se muestra en la Figura 14, en donde es posible apreciar el circuito esquemático utilizado. El circuito, es un relé que enciende el dispositivo con la tensión proveniente de la batería y al conmutar, permite que el sistema siga operando a través del transformador, logrando aislar las referencias y evitar posibles daños.

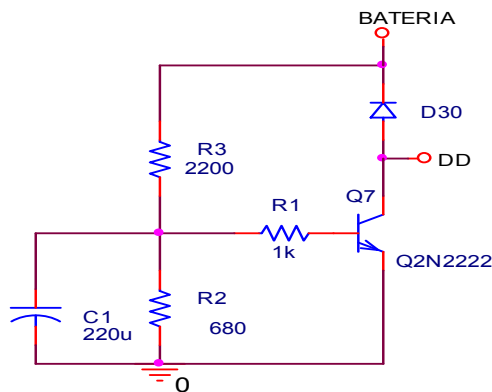
Figura 14. Circuito esquema completo de fuentes constantes



Fuente: los autores

Otro punto a tener en cuenta es el instante en el cual se hace conmutar el relé, debido a que si éste llega a cambiar de estado antes que se active el circuito inversor, el condensador C2 de la Figura 14 no estaría cargado, impidiendo así que el sistema se enganche correctamente. Por ello se implementa el circuito que se muestra en la Figura 15, el cual permite la activación correcta del relé debido al retraso que produce la red RC conformada por R2 y C1. Esta red RC se diseña de tal modo que permita el retraso suficiente antes de conmutar el relé para inicializar el DSP y configurar la señal oscilante de 40kHz necesaria para el funcionamiento del puente inversor.

Figura 15. Circuito conmutador



Fuente: los autores

2.4.2 Fuentes temporales

Con el fin de obtener la medida de la resistividad del terreno se deben generar señales de corriente y tensión, para lo cual se utilizan elementos activos que necesitan ser alimentados previamente. Es por esta razón que en este trabajo de grado se identificaron y aislaron estas fuentes con el objetivo de utilizarlas solo en los instantes necesarios, logrando con ello un ahorro de energía que muy probablemente se traduce a una mayor autonomía del equipo final.

Este grupo de fuentes está conformado por 9 (nueve) señales de tensión que se listan a continuación:

- 3 (tres) señales de 12V con referencias independientes, utilizadas para la conmutación de los MOSFETs del puente inversor de potencia.
- 1 (una) señal de $\pm 5V$ con la misma referencia de la señal de potencia inyectada al terreno, utilizada para alimentar la primera parte del amplificador de aislamiento utilizado en la medición de corriente.
- 1 (una) señal de $\pm 5V$ con referencia analógica, utilizada para alimentar la segunda parte del amplificador de aislamiento.
- 1 (una) señal de $\pm 12V$ con referencia analógica, utilizada para alimentar el amplificador de instrumentación y algunos operacionales que son necesarios para el acondicionamiento de las señales.

El circuito utilizado para esta parte del proyecto es similar al mostrado en la Figura 14, en donde se utiliza otro transformador con núcleo de ferrita (el cual se extrajo de una fuente de computador y tiene 40 vueltas en el primario, tres arrollamientos de 30 vueltas cada uno para generar las tres fuentes de 12V, un arrollamiento de 36 vueltas con tap central para generar la señal de $\pm 5V$ con la misma referencia de la señal de potencia y cuatro arrollamientos más, que suman 68 vueltas, para generar las señales de $\pm 5V$ y $\pm 12V$ con referencia analógica) operado a una frecuencia de 40kHz. Las señales PWM que activan el circuito inversor, proviene de los terminales PWM4 y PWM5 del DSP, los cuales se habilitan únicamente en los instantes que se está realizando la medición de resistividad del terreno. El transformador utilizado para esta parte es un poco más grande debido a que el número de espiras aumenta considerablemente en comparación con las espiras necesarias en las fuentes permanentes donde solo se obtienen tres fuentes de tensión.

2.5 ETAPA GENERADORA DE POTENCIA

Para el circuito de potencia se implementó un convertidor de puente completo como el que se muestra en la Figura 16, el cual permite generar la tensión

suficiente para inyectar al terreno y con ello poder realizar la medición de resistividad.

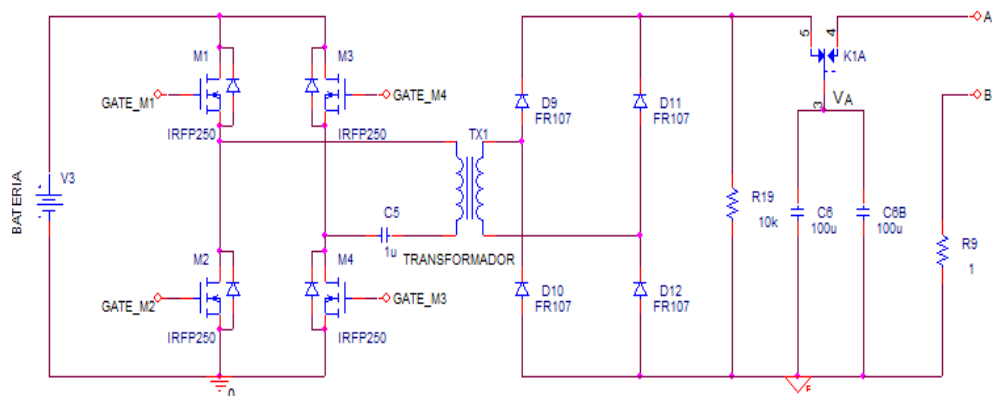
Las topologías de medio puente y puente completo someten a sus transistores en estado apagado a una tensión igual al valor de la alimentación DC y no al doble como las topologías de convertidores **push-pull**, **single-ended** e **interleaved forward**. Así las topologías de puente son utilizadas en convertidores fuera de línea donde dos veces el valor DC rectificado sería más que el valor de tensión que cada transistor pudiese soportar. Adicionalmente, estas topologías son casi siempre usadas donde la tensión nominal AC de entrada es 220V o más y frecuentemente para 120V AC.

Otra característica importante de la topología de puente es que cualquier pico de tensión debido a la inductancia del primario es fácilmente anclado al valor DC de alimentación y cualquier energía almacenada en la inductancia de dispersión es regresada a la entrada en vez de ser disipada por un elemento resistivo.

2.5.1 Operación Básica

Una de las principales características de esta topología es que la tensión fijada a través del primario del transformador es una onda bipolar con amplitud de 12V (tensión de batería) y ciclo útil variable, dependiendo del tiempo de encendido de los transistores. La tensión que soporta cada transistor cuando está apagado es de tan solo 12V (tensión de batería), por tal razón, las principales especificaciones al momento de seleccionar los MOSFETS son la frecuencia de operación del puente inversor y la corriente tanto pico como promedio que estos deban soportar.

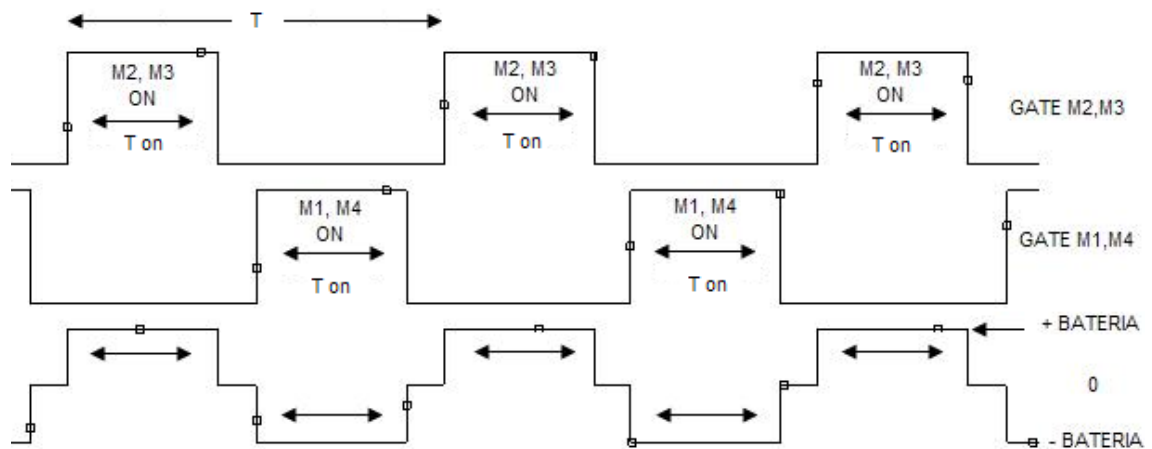
Figura 16. Topología de puente completo



Fuente: los autores

Para un correcto funcionamiento del puente, los transistores M2 y M3 son encendidos simultáneamente por un tiempo ajustable durante media mitad del periodo, igualmente los transistores M1 y M4 son encendidos simultáneamente durante un tiempo igual en la otra mitad del periodo. Asumiendo que la caída de tensión en los transistores cuando se encuentran encendidos es despreciable, el primario del transformador será manejado con una onda cuadrada de polaridad alternante de amplitud V_{DC} (tensión de batería) y con un tiempo T_{ON} determinado por el tiempo que duran encendidos los transistores. En la Figura 17, se muestran las formas de ondas que se deben aplicar a las compuertas de los transistores y la tensión que se genera en el primario del transformador.

Figura 17. Señal de activación para los MOSFETS y tensión del Primario.



Fuente: los autores

Asumiendo una caída de tensión de 1V cuando los transistores se encuentran encendidos y 0.5V de tensión en polarización directa de los diodos utilizados en el rectificador¹⁸, se llega a una expresión aproximada que permite determinar la tensión de salida generada con ésta topología de la siguiente forma:

$$V_A = \left[(V_{BATERIA} - 2) \frac{N_S}{N_P} - 1 \right] \frac{2T_{ON}}{T} \quad [11]$$

$$V_A \approx V_{BATERIA} \frac{N_S}{N_P} \frac{2T_{ON}}{T} \quad [12]$$

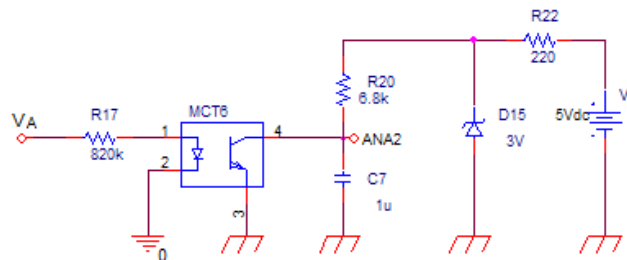
Como se muestra en la ecuación [12], la tensión de salida que se obtiene es función de los parámetros de la topología y del tiempo que se mantengan

¹⁸ PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design. Second Edition. McGraw-Hill. P102.

encendido los transistores, por ello, una vez fijados los valores adecuados de N_S , N_P y T (los cuales se calculan más adelante), es posible obtener tensiones DC de salida configurables dependiendo del T_{ON} . Este punto es importante debido a que el dispositivo brinda la posibilidad de aplicar diferentes niveles de tensión al terreno (100V, 200V y 300V), lo que se logra variando el tiempo muerto¹⁹ de operación. Al momento de variar el tiempo muerto, debe tomarse la precaución de no activar simultáneamente uno de los pares de transistores que se encuentran en la misma columna (M1 y M2 o M3 y M4), debido a que esto ocasiona que la batería entre en cortocircuito, lo cual provocaría daños tanto en los transistores como en ella misma. Por esta razón se aconseja que el T_{ON} , no supere el 80% de la mitad del periodo²⁰.

Para ajustar correctamente el nivel de tensión que el usuario desea aplicar sobre el terreno, se implementa un sistema de sensado como el que se muestra en la Figura 18, el cual permite por medio del terminal ADC2 del DSP realizar una retroalimentación con el equipo para ajustar el tiempo muerto hasta que la señal de salida sea la deseada.

Figura 18. Circuito esquemático de sensado para la tensión inyectada al terreno



Fuente: los autores

Para la inyección de la tensión al terreno se analizaron dos posibles estrategias las cuales consistían en:

- Conectar los terminales de inyección directamente a la salida del rectificador, lo cual implica que el puente inversor debe estar encendido hasta por lo menos el momento en que se realicen las respectivas mediciones de tensión y corriente.
- Permitir que el puente inversor cargue los condensadores hasta el valor de tensión que el usuario haya seleccionado, posteriormente se inyecte esta tensión al terreno y se realicen las mediciones pertinentes sin necesidad que el puente inversor esté en operación.

Como se observó en la Figura 16, la opción adoptada fue la segunda debido a que por pruebas realizadas con anterioridad en el laboratorio se evidenció la fuerte

¹⁹ Tiempo en el cual ninguno de los cuatro transistores se encuentran encendidos.

²⁰ PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design. Second Edition. McGraw-Hill. P103.

interferencia que el puente ocasionaba en las señales de corriente y tensión que se medían. Por tal motivo es deseable que al momento de realizar las mediciones, el puente inversor se encuentre apagado. De igual manera el circuito esquemático de la Figura 18, fue implementado dentro del equipo pero no se utiliza debido a que no se hace necesaria su presencia para ajustar el nivel de tensión que el usuario requiera. Por lo contrario los diferentes niveles de tensión a la salida se ajustaron manipulando directamente el tiempo muerto, el cual es manipulado por software, dependiendo de lo que el usuario desee.

2.6 DISEÑO DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

A modo de aclaración cabe resaltar que la mayoría de la información suministrada en esta sección fue extraída de un manual de diseño que se encuentra en la página de Internet de FERROXCUBE, el cual se puede ubicar en la siguiente dirección:

http://www.mag-inc.com/pdf/2006_ferrite_catalog/2006_design_information.pdf

Las ferritas son materiales ideales para núcleos de transformadores, inversores e inductores que operan a rangos de frecuencias comprendidos entre 20 KHz y 3 MHz, debido a la combinación de bajo costo y bajas pérdidas del núcleo.

La capacidad de potencia que puede manejar el núcleo de un transformador, está determinada por el producto $W_a \times A_c$, donde W_a es el área de ventana del núcleo y A_c es el área efectiva de la sección transversal del núcleo. Partiendo de la ley de Faraday se tiene:

$$E = 4 \times B \times A_c \times N \times F \times 10^{-8} \quad \text{Para onda cuadrada. [13]}$$

Donde:

E	=	Tensión aplicada (rms).
B	=	Densidad de flujo (Gauss).
A_c	=	Área del núcleo (cm^2)
N	=	Número de vueltas en el primario del transformador
F	=	Frecuencia (Hz)

Además:

A_w	=	Área del conductor (cm^2)
W_a	=	Área de ventana del núcleo (cm^2)
C	=	Capacidad de corriente (cm^2/A)

K	=	Factor de arrollamiento
I	=	Corriente (rms)
P _i	=	Potencia de entrada
P _o	=	Potencia de salida
e	=	Eficiencia del transformador

Para el diseño del transformador se contaba con dos núcleos, uno de ellos de referencia EC70 y el otro 3C81, ambos núcleos de Ferroxcube. Finalmente se optó por utilizar el segundo núcleo debido a su menor tamaño y mejor desempeño experimental en esta aplicación.

Para la ferrita disponible 3C81, se tienen los siguientes valores²¹:

W _A	=	1.781 cm ²
A _C	=	1.81 cm ²
B _{máx}	=	1600 Gauss.

A partir de la ecuación [13] obtenemos:

$$N \times A_C = \frac{E \times 10^8}{4 \times B \times F} \quad [14a]$$

El factor de arrollamiento K se define como:

$$K = \frac{N \times A_w}{W_A} \quad \text{Así} \quad N = \frac{K \times W_A}{A_w} \quad \text{y} \quad N \times A_C = \frac{K \times W_A \times A_C}{A_w} \quad [14b]$$

Combinando [13] con [14b] y resolviendo para W_A * A_C se obtiene:

$$W_A \times A_C = \frac{E \times A_w \times 10^8}{4 \times B \times F \times K} \quad [15]$$

Además:

$$A_w = I \times C, \quad e = \frac{P_o}{P_i} \quad \text{y} \quad P_i = E \times I$$

Así:

$$A_w \times E = E \times I \times C = P_i \times C = \frac{P_o \times C}{e} \quad [16]$$

²¹ PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design. Second Edition. McGraw-Hill. Tabla 7.2b.

Sustituyendo [16] en [15] se tiene:

$$W_A \times A_C = \frac{P_o \times C \times 10^8}{4 \times e \times B \times F \times K} \quad [17]$$

De acuerdo a las especificaciones de diseño, la potencia de salida máxima que manejará el transformador está dada por:

$$P_o = 300V \times 400mA = 120W$$

La ecuación [17] se puede reescribir como:

$$W_A \times A_C = \frac{K' \times P_o \times 10^8}{B \times F}, \text{ donde } K' = \frac{C}{4 \times e \times K} \quad [18]$$

Para operación de transformadores con onda cuadrada $K' = 0.00528$
Despejando de la ecuación [18] se obtiene:

$$F = \frac{P_o \times K' \times 10^8}{W_A \times A_C \times B} \quad [19]$$

Reemplazando los valores en la ecuación [19], se obtiene que la frecuencia de operación del transformador debiera ser de 12.284 KHz.

Retomando la ecuación [12]:

$$V_A \approx V_{BATERIA} \frac{N_s}{N_p} \frac{2T_{ON}}{T}$$

Se puede observar que la tensión DC de salida que se puede obtener del puente inversor una vez se haya diseñado el transformador depende de la relación entre el periodo y el tiempo que los transistores se encuentren encendidos. Por ello, al fijar un periodo de trabajo se puede manipular el tiempo muerto con el fin de obtener la tensión deseada.

Según la ecuación [19], se obtiene que la frecuencia de trabajo debiera ser de 12.284 KHz, pero en la sección 1.3.5 del libro de PRESSMAN concluyen que la frecuencia óptima de operación se encuentra entre 20 KHz y 50 KHz debido a que se encuentra por encima del rango de frecuencias audibles y por debajo del nivel donde las pérdidas de conmutación se vuelven considerables. Por tal motivo, se seleccionó una frecuencia de operación de 40 KHz, a la cual el transformador

puede manejar una potencia que está entre 348.1W y 693.1W en topología full bridge²², la cual es suficiente para la aplicación que se desea realizar.

Retomando la ecuación [14a]:

$$N \times A_C = \frac{E \times 10^8}{4 \times B \times F} \quad \text{Y despejando } N = \frac{E \times 10^8}{4 \times B \times F \times A_C}$$

Se calcula el número de vueltas mínimas necesarias en el primario del transformador para asegurar el funcionamiento de acuerdo a los requerimientos suponiendo el punto de operación crítico, el cual ocurre cuando la tensión rms en el primario es 11.3V, debido a que la batería se encuentra en su nivel mínimo de carga.

$$N = \frac{11.3 \times 10^8}{4 \times 1600 \times 40000 \times 1.81} = 2.43 \text{ _vueltas}$$

Se selecciona $N_p=4$ vueltas, buscando generar una inductancia considerable en el primario, que asegure una correcta operación del transformador y brinde un sobre dimensionamiento que genere seguridad al diseño.

Para calcular la relación de vueltas del transformador se tiene en cuenta la tensión mínima de la batería y la caída de tensión en los MOSFETs. Para el caso más desfavorable se supone una tensión mínima en el primario del transformador de 9.3 Vrms para asegurar que bajo estas circunstancias se obtenga una tensión de salida de 300 V_{DC}, se selecciona la relación de vueltas de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$N' = \frac{V_{OUT(MÁX)}}{V_{IN(MIN)}} = \frac{300}{9.3} \approx 32.25$$

El número de vueltas en el secundario esta dado por:

$$N_s = N' \times N_p \approx 32.25 \times 4 = 129 \text{ _vueltas}$$

Estos valores de N_s y N_p aseguran el correcto funcionamiento del generador de alta tensión para el caso más desfavorable. En circunstancias diferentes, la tensión de salida se puede regular según lo indica la ecuación [12], variando el tiempo de activación de cada MOSFET (T_{on}).

²² PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design. Second Edition. McGraw-Hill. Tabla 7.2b.

2.6.1 Selección del calibre de los conductores ²³

Suponiendo una eficiencia del 80%, un ciclo útil de 0.8 y 500 circular mils por Arms, se tiene la siguiente expresión para el calibre del conductor utilizado en el primario:

$$Circular_mils = \frac{700 \times P_o}{V_{DC}} = \frac{700 \times 300 \times 400 \times 10^{-3}}{12} = 7000$$

Y la siguiente expresión para el calibre del conductor utilizado en el secundario:

$$Circular_mils = 316 \times I_{DC} = 316 \times 400 \times 10^{-3} = 126.4$$

A partir de estos cálculos se obtiene que el calibre del conductor que se utiliza en el primario debe ser AWG 12 y para el secundario AWG 29²⁴.

Buscando aprovechar al máximo el espacio que brinda el núcleo, el transformador se embobinó únicamente con alambre AWG 23 utilizando 5 capas de cobre para arrollar la bobina del primario.

2.7 MOSFETS DEL PUENTE INVERSOR

Para seleccionar los MOSFETs se tuvo en cuenta la corriente máxima por el primario del transformador y la frecuencia a la cual conmutará el puente inversor, la cual es de 40 KHz.

Para una eficiencia del 80%, la amplitud de la corriente máxima en el primario del transformador está dada por²⁵:

$$I_{PFT} = \frac{1.56 \times P_o}{V_{DC}} \quad [20]$$
$$I_{PFT} = \frac{1.56 \times 300 \times 400 \times 10^{-3}}{12} = 15.6A$$

Según estas especificaciones, se seleccionó el MOSFET de referencia IRFP250 de la empresa International Rectifier, el cual soporta corrientes de drenaje hasta 30A, tensión V_{DS} máxima de 200V y exhibe una resistencia de encendido de 85mΩ, cumpliendo satisfactoriamente los requerimientos del diseño.

²³ PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design. Second Edition. McGraw-Hill. Página 103

²⁴ <http://academic.evergreen.edu/projects/biophysics/technotes/fabric/wire.htm>

²⁵ PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design. Second Edition. McGraw-Hill. Eq 3.7.

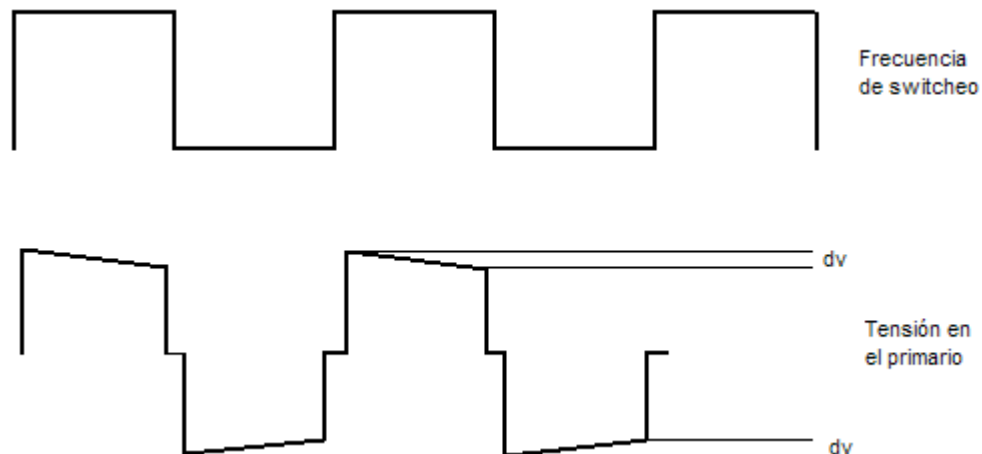
2.8 CONDENSADOR DE BLOQUEO

El condensador C5 que se muestra en la Figura 16, es utilizado para evitar la saturación del núcleo del transformador, ya que éste elimina la componente de DC de la corriente del primario.

Según el funcionamiento del circuito de potencia, la corriente del primario del transformador carga el condensador C5, causando una caída de tensión en la señal del primario como se observa en la Figura 19. Para el correcto funcionamiento del puente inversor, es recomendable que ésta caída de tensión no supere el 10% de la tensión pico del primario²⁶. Suponiendo una caída de tensión dv , una amplitud de corriente en el primario del transformador I_{PFT} y un ciclo útil de 0.8, la magnitud del capacitor C5 está dada por [21]:

$$C = \frac{I_{PFT} \times 0.8 \times \frac{T}{2}}{dv} \quad [21]$$

Figura 19. Forma de onda en el primario del Transformador



Fuente: los autores, tomada de PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design

²⁶ PRESSMAN, Abraham. Switching Power Supply Design. Second Edition. McGraw-Hill. Sección 3.2.4

Para una eficiencia del 80%, la corriente máxima en el primario del transformador está dada por la ecuación [20], de donde $I_{PFT} = 15.6$ A. Suponiendo una caída de tensión del 10% y reemplazando en [21] tenemos:

$$C = \frac{15.6 \times 0.8 \times \frac{1}{2 \times 40000}}{0.1 \times 12} = 0.13mF$$

2.9 SENSORES DE TENSIÓN Y CORRIENTE

Como se definió en el capítulo 0, la resistividad del terreno es independiente del método utilizado para medirla y se define como:

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

Por ello, el instrumento utilizado para medir ésta propiedad del terreno debe estar en la capacidad de sensar tensiones y corrientes para posteriormente calcular el valor de la resistividad.

El MRS V2.0 posee un sistema que le permite realizar el sensado de tensión y corriente a través de los puertos ADC del DSP, además de detectar la polaridad de la señal de tensión que sensa y ajustar el rango de medición que utiliza.

2.9.1 Sensor de tensión

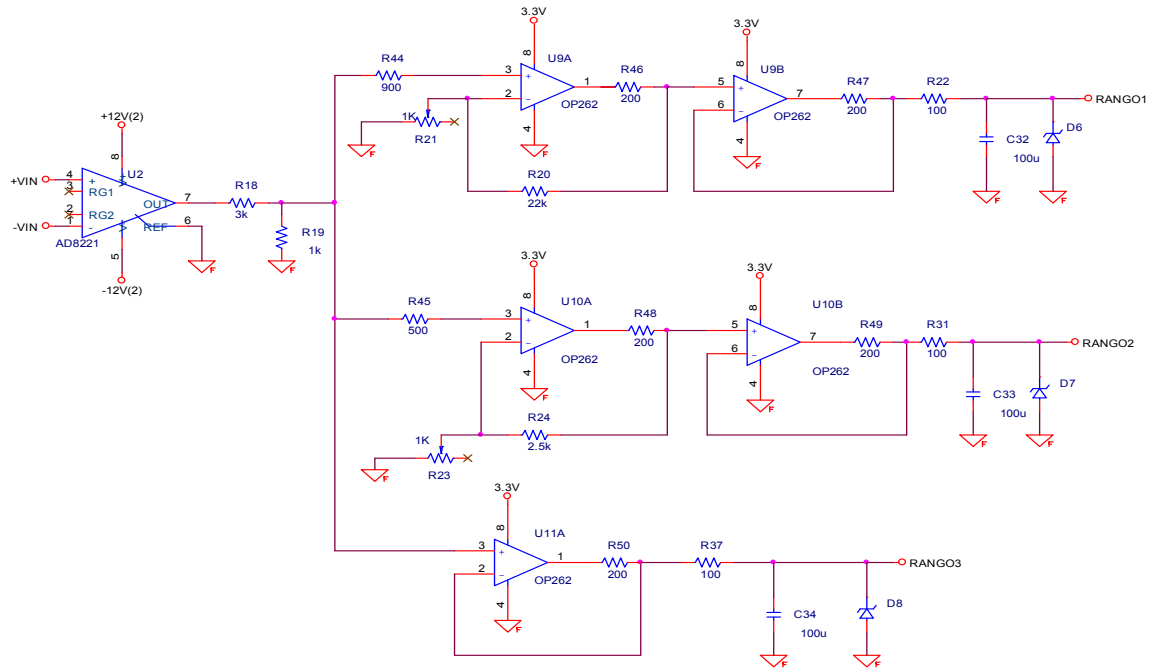
El MRS V2.0 posee un sistema que le permite medir tensiones que van desde 0V hasta 10V utilizando tres rangos de medición, los cuales se detallan en la Tabla 3. La señal de tensión que se mide del terreno es procesada por una etapa de adquisición de datos, la cual se muestra en la Figura 20, encargada de acondicionar la señal para ser leída por los terminales ANA4, ANA5 y ANA6 del DSP.

Tabla 3. Rangos de medición de tensión

Referencia	Rango	Resolución
Rango 1	0 – 200mV	48.82 μ V
Rango 2	200mV – 2.5V	0.61 mV
Rango 3	2.5V – 10V	2.44 mV

Fuente: los autores

Figura 20. Circuito esquemático de la etapa de adquisición de tensión del terreno



Fuente: los autores

La tensión que se induce en el terreno es sensada en primera instancia por el amplificador de instrumentación AD8221 configurado para una ganancia unitaria, el cual se encarga de eliminar posibles tensiones de modo común que puedan llegar a aparecer. Este amplificador de instrumentación cumple con la especificación de diseño (impedancia de entrada mayor a $10\text{ G}\Omega$) que se recomienda para la medición de tensión. Seguidamente, la señal se pasa por un divisor de tensión, el cual evita que la tensión supere los 3V y con ello llegue a saturar alguno de los amplificadores. Como se observa en la Figura 20, la señal tiene tres caminos de procesamiento, los cuales se explican detalladamente a continuación:

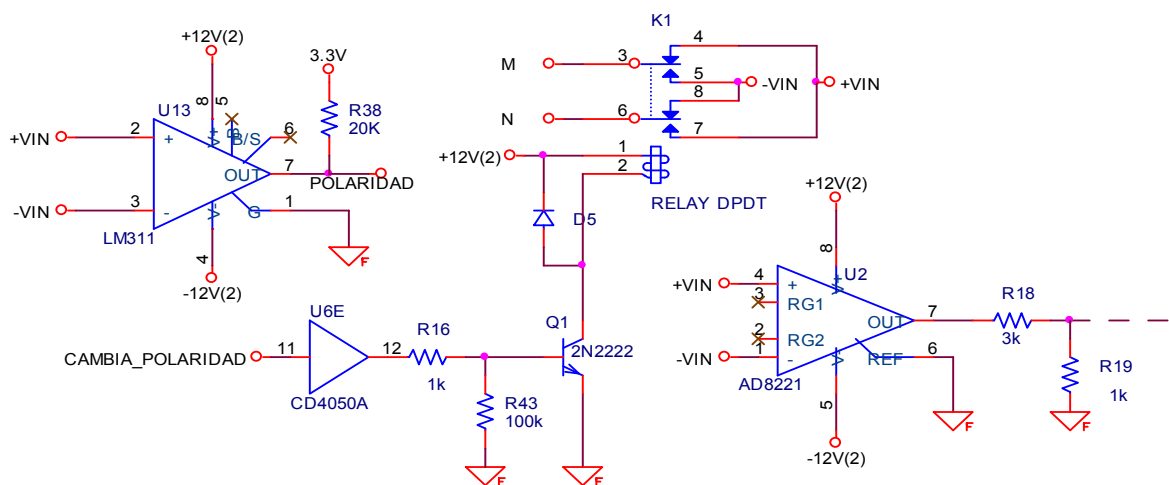
- **Rango 1:** esta primera ramificación se realizó para permitir sensar tensiones que se encuentren dentro de un rango de 0V a 200mV. La tensión que se obtiene luego del divisor resistivo se hace pasar por un amplificador operacional en configuración no inversora con ganancia de aproximadamente 45 V/V con el fin de lograr que la tensión de salida varíe entre 0V y 2.25V. Seguidamente la señal pasa por un seguidor de tensión, un filtro pasa bajos pasivo de primer orden y un limitador (diodo zener), los cuales son recomendados por el fabricante para la lectura de señales analógicas por medio de los puertos ADC del DSP.

- **Rango 2:** esta segunda ramificación se encarga de sensar tensiones que se encuentran en un rango de 200mV hasta 2V. La tensión que se obtiene después del divisor resistivo se hace pasar por un amplificador operacional en configuración no inversora con ganancia de aproximadamente 4 V/V con el fin de lograr que la tensión de salida varíe entre 0.2V y 2V. Posteriormente la señal pasa por un seguidor de tensión, un filtro pasa bajos pasivo de primer orden y un limitador (diodo zener), al igual que en el rango 1.
- **Rango 3:** esta tercera ramificación se utiliza para sensar tensiones que varían de 2V hasta 10V, por esta razón no se hace necesario utilizar una etapa amplificadora y directamente se le aplica el acondicionamiento que necesita el ADC.

Al momento de realizar medidas de tensión, se leen 50 veces cada uno de los tres canales ADC y se promedian a fin de minimizar posibles errores. Seguidamente se procede a identificar el rango dentro del cual se encuentra la tensión sensada, comenzando por el rango más grande con el propósito de elegir la mejor resolución posible.

Para un correcto funcionamiento de este método de sensado se hace necesario que la tensión de salida del amplificador de instrumentación sea positiva, es decir, que la tensión de la terminal positiva del AD8221 sea más positiva que la tensión de su terminal negativo. Por ello se implementó un sistema que asegure que al momento de realizar las lecturas de los terminales ADC la tensión siempre será positiva. Este sistema, que se muestra en la Figura 21, consiste principalmente en un relé que conmuta o no, dependiendo si la tensión V_{MN} sensada directamente en el terreno es negativa o no.

Figura 21. Circuito esquemático de control de polaridad



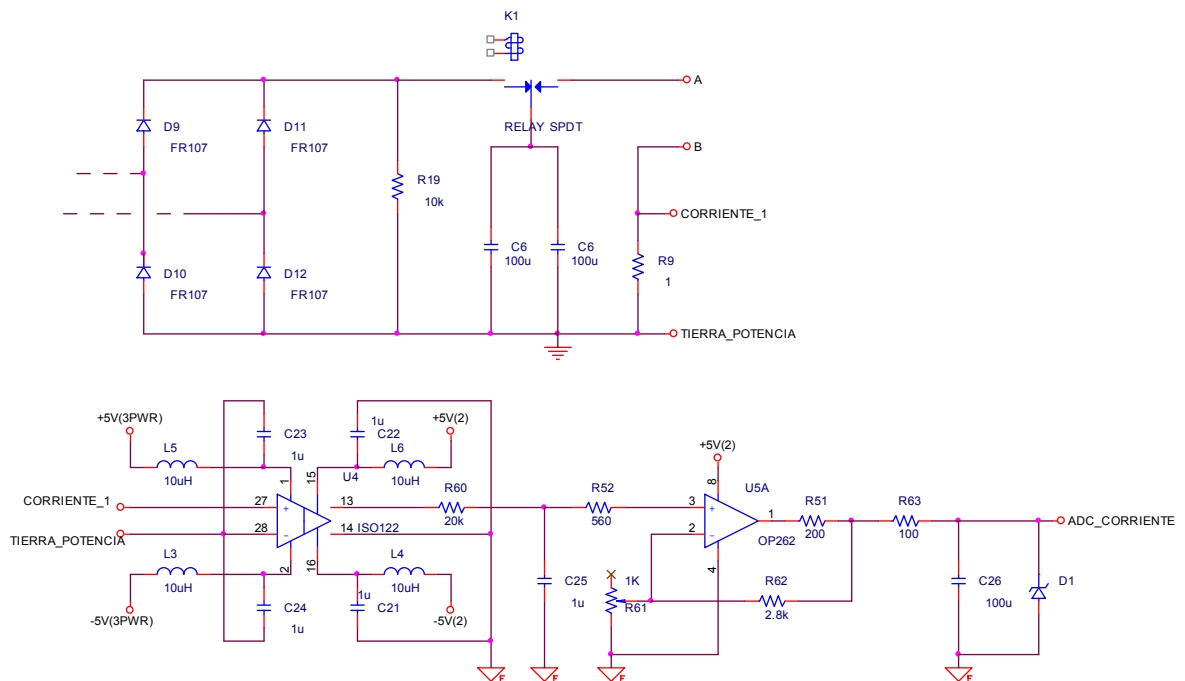
Fuente: los autores

Para la operación correcta del sistema se implementó un comparador mediante el circuito integrado LM311, el cual compara las tensiones sensadas del terreno y entrega una señal de 3.3V si la tensión del terminal 2 es más positiva que la tensión del terminal 3, de lo contrario se obtiene una señal de 0V. Esta señal de tensión es enviada al DSP por medio del terminal INDEX0, y si se detecta que la tensión que se va a sensar es negativa, se envía una señal de aproximadamente 3.3V por medio del terminal HOME0 del DSP, el cual hace conmutar el relé para conseguir que la señal que ingresa a los canales ADC del DSP sea siempre positiva.

2.9.2 Sensor de corriente

El MRS V2.0 está equipado con un sistema de medición de corriente por medio de una resistencia, el cual tiene una resolución de 0.14 mA y le permite medir hasta una corriente de 574 mA, la cual se sensa por medio del terminal ANA0 del DSP. El sistema completo que se utiliza para la medición de corriente se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Circuito esquemático del sistema de sensado de corriente



Fuente: los autores

Al momento de inyectar tensión al terreno, la corriente que circula por éste, circula también por la resistencia R9. Por tal motivo, al sensar la tensión de ésta

resistencia, indirectamente se está midiendo la corriente que pasa por ella. La tensión que se sensa de la resistencia se pasa a través del amplificador de aislamiento ISO122 con el fin de aislar las tierras. La tensión que entrega el ISO122 pasa por un filtro pasivo pasa bajas de primer orden y es amplificado seguidamente por un amplificador configurado en topología no inversora con ganancia de aproximadamente 5 V/V para dar una mejor resolución de medida.

2.9.3 Caracterización de los sensores

Con anterioridad se han mostrado y explicado cada uno de los circuitos que utiliza el MRS V2.0 para medir tensión y corriente. Estos sensores están compuestos por elementos activos y pasivos que no son ideales, por tal motivo se requiere que éstos circuitos sean caracterizados para tener una idea más real del funcionamiento de ellos. Por ello, cada uno de estos circuitos fue caracterizado simulando una tensión de entrada y midiendo las tensiones que se presentaban en las salidas de las diferentes etapas. Todos estos resultados se muestran en tablas y se complementan con gráficos que permiten tener una idea más clara del comportamiento de cada uno de ellos. Los resultados de estas caracterizaciones de muestran detalladamente en el anexo A.

2.10 CIRCUITO DE CONTROL

El control de todas las funciones realizadas por el prototipo MRS V2.0 se realiza por medio del Procesador Digital de Señales (DSP) de referencia 56F8323 de Freescale, el cual pertenece a la familia de procesadores de 16 bits de núcleo 56800E. La operación de éste controlador se basa en una arquitectura “harvard dual” la cual permite realizar hasta tres accesos simultáneos a la memoria de programa o la memoria de datos en un solo ciclo de reloj. La velocidad de la unidad de procesamiento central de DSP puede llegar a superar las 60 millones de instrucciones por segundo (60 MIPS).

El DSP 56F8323 ofrece 32KB de memoria flash de programa, 4KB de memoria RAM de programa, 8KB de memoria flash de datos, 8KB de memoria RAM de datos y 8KB de memoria boot flash.

Algunos de los módulos o periféricos proporcionados por el DSP son:

- Un modulador por ancho de pulso (PWM) con seis salidas PWM.
- Dos conversores analógico-digital con resolución de 12 bits. Este módulo ofrece 8 canales ADC.
- Más de dos interfaces de comunicación serial (SCIs).
- Más de dos interfaces periféricas serial (SPIs).

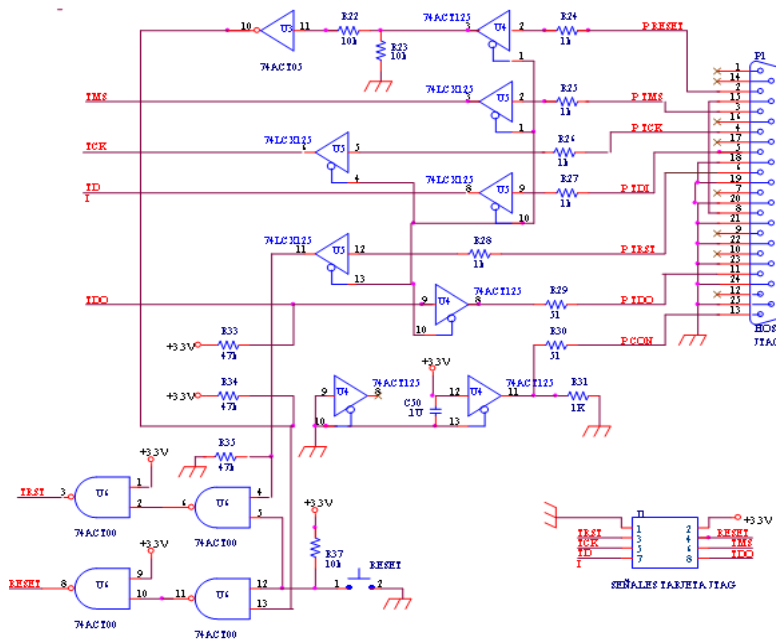
- Watchdog timer (WDT).
- 27 entradas/salidas de propósito general (GPIO).
- PLL (Phase Locked Loop) programable para generar frecuencias de sistema variables.
- Un terminal de interrupción externa.

2.10.1 Sistema de desarrollo del DSP 56F8323

El sistema de desarrollo del DSP 56F8323 consta principalmente de un cristal de 8 MHz, una interfaz de comunicación paralela SPP (Standart Parallel Port) encargada de la programación del DSP, alimentación regulada del DSP y del conversor analógico digital y conexión de cada uno de los puertos o terminales del DSP encargados de realizar funciones periféricas.

La interfaz de comunicación paralela SPP fue implementada en una tarjeta aparte ya que ésta solo se utiliza para realizar la programación del DSP. En la Figura 23, se puede observar el esquemático correspondiente al circuito empleado para la programación del DSP.

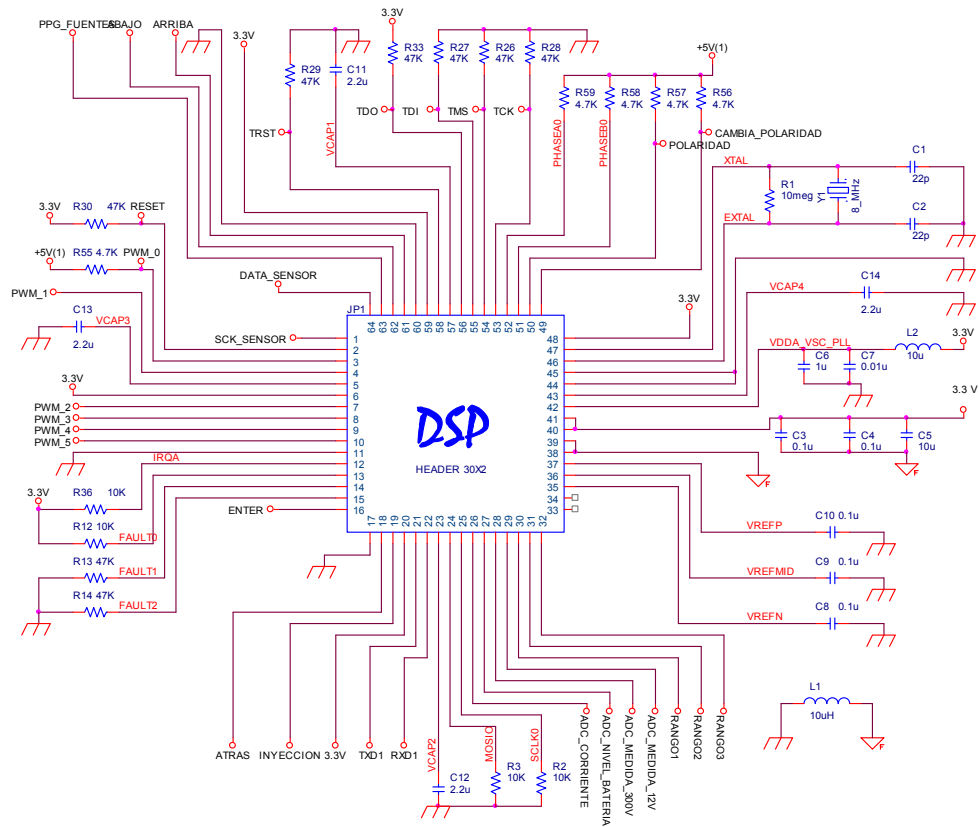
Figura 23. Esquemático de conexión de la interfaz de programación del DSP.



Fuente: los autores

En la Figura 24, se presenta el esquemático correspondiente al circuito empleado para realizar la conexión del DSP 56F8323.

Figura 24. Esquemático del circuito correspondiente a la conexión del DSP



Fuente: los autores

2.11 INTERFAZ CON EL USUARIO

El prototipo MRS V2.0 cuenta con una interfaz que permite al usuario interactuar con las diferentes funcionalidades que posee el equipo. Para la implementación de esta interfaz, se empleó una pantalla gráfica de cristal líquido de Hyundai y un juego de cuatro pulsadores, mediante los cuales, el usuario puede visualizar e interactuar con las opciones que ofrece el equipo (Medición de resistividad, medición de humedad y temperatura, observar datos, graficar datos y envío de datos al computador). Además de permitir la visualización en tiempo real de los datos tomados, tanto de resistividad del terreno como de humedad y temperatura, esta aplicación hace al prototipo autónomo del computador, ya que tiene la capacidad de graficar el perfil de resistividad de los datos tomados a medida que se realiza el sondeo, sin necesidad de descarga al PC, permitiendo el análisis y la validación de dichas curvas directamente en el terreno donde se realiza la prueba.

2.11.1 Pantalla gráfica de cristal líquido

Para la interfaz gráfica con el usuario se utilizó la pantalla gráfica LCD de referencia HG25504NG-01 de Hyundai mostrada en la Figura 25, la cual cuenta con una resolución de 256 x 128 píxeles. Las características más importantes tenidas en cuenta al momento de seleccionar la pantalla fueron: la resolución y el área de visualización, debido a que la pantalla debe tener la capacidad de graficar el perfil de resistividad en un tamaño adecuado para su visualización. Para la selección de la pantalla, también se tomo en cuenta su capacidad de combinar tanto texto como gráficos y su bajo costo con respecto a otras LCD de características similares.

Figura 25. Pantalla gráfica LCD de Hyundai, referencia HG25504NG-01



Fuente: All Electronics Corp, <http://www.allelectronics.com>

En la Tabla 4 y Tabla 5, se pueden observar algunas de las especificaciones de la pantalla HG25504NG-01 de Hyundai, proporcionadas por el fabricante en la hoja de datos. Estas especificaciones de la pantalla son suficientes para realizar en un tamaño propicio la gráfica del perfil de resistividad.

Tabla 4. Especificaciones de la pantalla LCD

Ítem	Especificación	Unidades
Tamaño de la pantalla LCD	147,0 x 116,0 x 12,0 Max	mm
Área de visualización	127,0 x 70,0	mm
Tamaño del punto	0,43 x 0,43	mm
Formato de visualización	256 x 128	puntos

Fuente: los autores

Tabla 5. Tensión de alimentación de la pantalla LCD a 25°C

Ítem		Valor			Unidades
		Mínimo	Típico	Máximo	
Tensión de alimentación	Lógica	4.5	5.0	5.5	V
	LCD	14.3	15.1	15.9	V

Fuente: los autores

El manejo de la pantalla gráfica se realiza mediante un controlador de referencia SED1330F. Algunas de las características que posee el controlador son:

- Tiene la capacidad de combinar textos y gráficos.
- Posee un generador interno de caracteres, con 160 caracteres ya predeterminados en un formato de visualización de 5x7 píxeles.
- Tensión de alimentación: 4.5 a 5.5 V.

El módulo compuesto por la pantalla y su respectivo controlador utiliza 17 terminales como interfaz de conexión. Cuatro de estos terminales se emplean para la alimentación del módulo, cinco se usan para el control y los ocho restantes son empleados como terminales de entrada/salida (datos o comandos). En la Tabla 6, se pueden observar los terminales con su respectiva funcionalidad según la hoja de datos del fabricante de la pantalla.

Tabla 6. Terminales de la pantalla gráfica LCD

No. PIN	SIMBOLO	NIVEL	FUNCIÓN
1	FG	0 V	Tierra.
2	V _{SS} (GND)	0 V	Tierra.
3	V _{DD} (V _{CC})	5 V	Tensión de alimentación para la lógica y la LCD.
4	V _O	-	Tensión de operación de la LCD (variable).
5	/RES	H/L	Señal de reset.
6	/RD	H/L	Señal de lectura.
7	/WR	H/L	Señal de escritura.
8	/CS	H/L	Señal de selección del chip.
9	AO	H/L	Señal de selección del tipo de datos.
10	DB0	H/L	Bit 0 datos
11	DB1	H/L	Bit 1 datos
12	DB2	H/L	Bit 2 datos
13	DB3	H/L	Bit 3 datos
14	DB4	H/L	Bit 4 datos
15	DB5	H/L	Bit 5 datos

16	DB6	H/L	Bit 6 datos
17	DB7	H/L	Bit 7 datos

Fuente: los autores

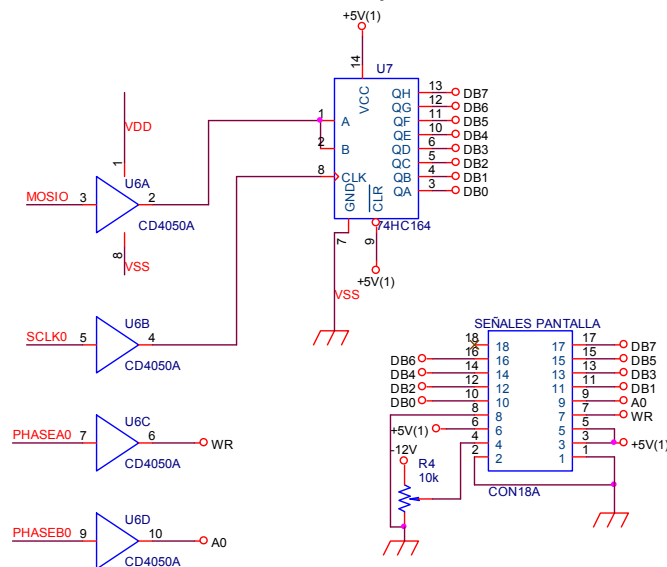
En la Figura 26, se observa el esquema del circuito implementado para la conexión de la pantalla gráfica. El conector CON18A contiene las señales que van conectadas a la pantalla, cuya numeración de terminales coincide con la numeración de la Tabla 6.

Los terminales 1 y 2 de la pantalla se encuentran conectados a tierra digital, el terminal 3 se conecta a la fuente de alimentación de +5V y el terminal 4 a la tensión de operación de la LCD la cual se gradúa por medio de un trimmer de 10 KΩ, conectado entre -12V y tierra. La variación de esta tensión de operación V_O , permite variar el contraste de la pantalla gráfica.

Los terminales 5 (/RES) y 6 (/RD) de la pantalla, los cuales corresponden a las señales de reset y de lectura, respectivamente, se conectan a la fuente de alimentación de +5V con el fin de inhabilitar su función, pues en ningún momento se hacen necesarios.

El terminal 8 (/CS) es el encargado de habilitar el controlador. Como la señal es de activación baja, el terminal se conecta a tierra digital para mantener el controlador habilitado.

Figura 26. Conexión de los terminales de la pantalla LCD



Fuente: los autores

El terminal 7 (WR) de la pantalla se encarga de habilitar e inhabilitar la función de escritura. Esta señal de control de escritura es proporcionada por el terminal 52 (PHASEA0/GPIOB7) del DSP, configurado como salida de propósito general. La señal de salida del DSP debe ser adecuada al nivel de tensión y corriente que exige la pantalla para lo cual se emplea el buffer no inversor de referencia CD4050.

El terminal 9 (AO) tiene como función indicarle a la pantalla si las señales enviadas a los pines DB0-DB7 de la misma, corresponden a datos o a comandos. Esta señal de selección de tipo de datos es proporcionada por el terminal 51 (PHASEB0/GPIOB6) del DSP, configurado como salida de propósito general. Al igual que en el caso anterior, la señal del DSP debe ser adecuada al nivel de tensión y corriente que exige la pantalla, para lo cual se emplea otro de los buffers del CD4050.

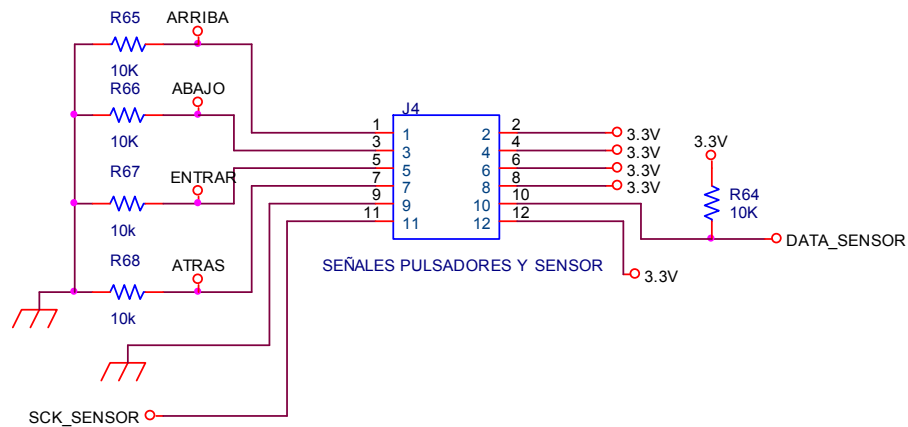
Los terminales 10 al 17 (DB0 al DB7) de la pantalla, corresponden a las entradas/salidas de datos. Debido a que en el prototipo MRS V2.0 la señal de lectura nunca es empleada, estos terminales solo funcionan como entradas. Las señales que llegan a estos pines son generadas por medio del DSP y pueden ser de dos tipos: comandos o datos. Para el envío de los datos desde el DSP hasta la pantalla, existen dos posibles configuraciones: paralela y serial. Con el fin de reducir el número de terminales empleados en el DSP para la transmisión de estos datos, se optó por emplear la configuración serial. Esta configuración consta de un registro de desplazamiento de referencia 74HC164 de entrada serie y salida paralela, tal como se muestra en la Figura 26. Los datos son enviados desde el DSP al registro de desplazamiento utilizando la interfaz de comunicación serial síncrona que ofrece el DSP, el cual genera una señal de datos por medio del terminal MOSIO del DSP y una señal de reloj por medio del terminal SCLK0. La señal de datos proveniente del DSP se adecúa por medio del buffer CD4050 a los niveles de tensión y corriente exigidos por el 74HC164 y posteriormente es conectada a la entrada de datos del registro de desplazamiento. La señal de reloj también es adecuada por medio del buffer CD4050 y luego se conecta a la entrada de reloj del registro. Finalmente la salida de datos paralela del 74HC164 es conectada a los terminales 10 al 17 de la pantalla.

2.11.2 Pulsadores

Con el fin de proporcionar al usuario una interacción con las diferentes opciones que ofrece el prototipo, éste cuenta con un juego de cuatro pulsadores los cuales son empleados para realizar diferentes tipos de funciones. Los nombres dados a cada uno de los pulsadores son: entrar, atrás, arriba y abajo. Estos nombres se encuentran relacionados con la respectiva función que cumple cada pulsador.

Los pulsadores se conectan por medio del conector J4 a la tarjeta digital del prototipo, según se observa en la Figura 27. Este conector denominado “SEÑALES PULSADORES Y SENSOR”, está encargado también de enviar las señales al sensor de humedad y temperatura. Cada uno de los pulsadores se encuentra conectado entre la tensión de alimentación del DSP (3.3V) y un terminal del DSP. Estos terminales se configuran como entradas de propósito general. Las señales que van al DSP se encuentran a su vez conectadas con una resistencia de 10 K Ω a tierra digital, con el fin de asegurar un 0 lógico en las entradas del DSP en los intervalos de tiempo en los cuales no se oprimen los pulsadores. En el momento en el que se oprime cualquiera de los pulsadores, los 3.3 V aparecen en la entrada del DSP que corresponde al pulsador que se oprimió, nivel de tensión que indica un 1 lógico. En la Tabla 7 se relacionan las señales provenientes de los pulsadores y los pines del DSP utilizados como entradas para cada una de estas señales.

Figura 27. Conector “SEÑALES PULSADORES Y SENSOR” de la tarjeta digital



Fuente: los autores

Tabla 7. Pines del DSP empleados como entradas para las señales provenientes de los pulsadores

NOMBRE DEL PULSADOR	NUMERO DEL TERMINAL DEL DSP	NOMBRE DEL PIN DEL DSP
Entrar	16	ISA0/GPIOA9
Atrás	18	ISA1/GPIOA10
Arriba	61	CAN_RX/GPIOC2
Abajo	62	CAN_TX/GPIOC3

Fuente: los autores

2.12 SENSOR DE HUMEDAD Y TEMPERATURA

Los factores más influyentes que afectan la resistividad del suelo son la humedad y la temperatura del mismo. Los métodos comúnmente usados para la medición de la humedad del suelo son complicados y costosos. Entre estos métodos se encuentran la sonda de neutrones y el TDR (Time Domain Reflectometer)²⁷. Otro método utilizado es el gravitacional, el cual consiste en pesar una muestra de tierra antes y después del secado. Para la medición de la temperatura del terreno, son usados instrumentos como los termómetros de líquido en tubo de vidrio, los termómetros de mercurio con varillas dobladas, la tele-termógrafo y los termómetros de resistencia eléctrica²⁸.

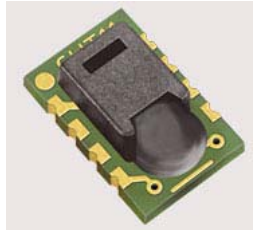
Debido a la complejidad y al costo de los métodos comunes de medición de humedad y temperatura del suelo y al hecho de que el enfoque del prototipo MRS V2.0 es la medición de resistividad del terreno y no de humedad y temperatura del mismo, se descartó la idea de emplear alguno de estos métodos. Se optó entonces por realizar la medición de la humedad y de la temperatura relativa del medio en el cual se realiza la prueba, ya que es un método mucho más sencillo y menos costoso, con el fin de proporcionarle al usuario una medida relativa de estos factores en caso de que no se tenga acceso a un instrumento que proporcione medidas más exactas. La medición se realiza mediante el sensor SHT15 de la compañía Sensirion, el cual se observa en la Figura 28.

El sensor SHT15, tiene la capacidad de medir humedad y temperatura relativa con una exactitud de ± 2.0 [%RH] y ± 0.3 [K] a 25°C, respectivamente. La salida del sensor es digital y se encuentra previamente calibrada por el fabricante. Cada sensor es calibrado individualmente en una cámara de precisión de humedad. Los coeficientes de calibración están programados en la memoria OTP (one-time programmable read-only memory) del dispositivo. Estos coeficientes son usados internamente por el sensor para calibrar la señal de salida. El apagado del sensor es automático y está diseñado para aplicaciones de bajo consumo de potencia.

²⁷ http://es.wikipedia.org/wiki/Humedad_del_suelo

²⁸ <http://www.colpos.mx/IRENAT/agm/instru/Agm620p03.ppt>

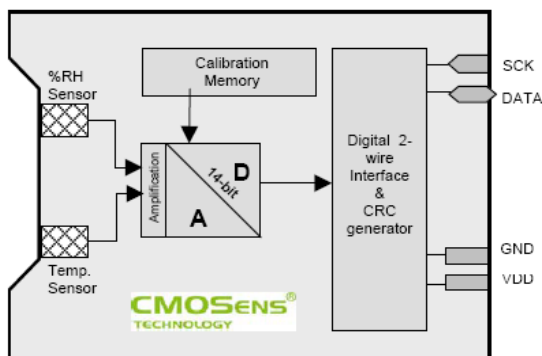
Figura 28. SHT15, sensor de humedad y temperatura



Fuente: Sensirion, <http://www.sensirion.com>

El SHT15 incluye una capacitancia de polímero para sensor la humedad relativa y un sensor de temperatura de bandgap. La resolución empleada por el sensor es de 8 ó 12 bits para medición de humedad y 12 ó 14 bits para medición de temperatura. El SHT15 envía los datos correspondientes a las mediciones por medio de una interfaz serial la cual consta de una señal de reloj (SCK) y una señal de datos (DATA). Además consta de un método de comprobación de correcta transmisión de datos, el cual utiliza una suma de comprobación a partir de los bits enviados.

Figura 29. Diagrama de bloques del sensor SHT15



Fuente: hoja de datos del SHT15

En la Figura 29, se puede observar el diagrama de bloques del sensor SHT15. El SHT15 está compuesto por el sensor de humedad y el de temperatura, un conversor A/D de 14 bits, la memoria OTP empleada para la calibración de las mediciones, la interfaz serial digital para envío de los datos y el generador de CRC utilizado para la comprobación de la correcta transmisión de datos.

Los cuatro terminales del sensor de humedad y temperatura correspondientes a las señales GND, DATA, SCK y VDD, son conectados a la tarjeta digital del prototipo MRS V2.0 por medio de los terminales 9, 10, 11 y 12 del conector

denominado “SEÑALES PULSADORES Y SENSOR” mostrado en la Figura 27. La señal GND del sensor es conectada a la misma tierra digital del DSP y la señal VDD se conecta a la alimentación de 3.3V.

La entrada de reloj serial (SCK) del sensor es utilizada para sincronizar la comunicación entre el DSP y el SHT15. Esta señal es generada por el terminal 1 del DSP denominado TC0/GPIOC6 configurado como salida de propósito general.

El pin de datos del sensor (DATA), es empleado tanto como entrada, como para salida de datos y se utiliza para transmitir al DSP las medidas de humedad y temperatura realizadas por el sensor. El terminal 64 del DSP denominado TC1/GPIOC5 configurado como entrada/salida de propósito general es utilizado para este fin.

En la medición de humedad y temperatura relativa, el prototipo MRS V2.0 utiliza una resolución de 12 y 14 bits respectivamente, proporcionada por el SHT15.

2.12.1 Transmisión de datos

Para la transmisión de datos del SHT15 al DSP es necesario emplear una rutina de inicialización. Esta rutina consiste en enviar un 0 lógico al pin DATO del sensor mientras el SCK este en alto, seguido de un bajo del SCK y posteriormente levantar la línea de datos a un 1 lógico cuando el SCK este de nuevo en alto. Esta rutina de inicialización es realizada por medio del DSP y se muestra gráficamente en la Figura 30.

Figura 30. Secuencia de inicio de transmisión



Fuente: Hoja de datos del SHT15.

Después de inicializada la transmisión, se pueden utilizar una serie de comandos los cuales consisten en tres bits de dirección (000) y 5 bits correspondientes al comando que va a ser ejecutado. En la Tabla 8 se pueden observar los comandos que pueden ser utilizados con su respectivo código en binario, según la hoja de datos del SHT15. Cada uno de los bits correspondientes al comando es cambiado después de un flanco de bajada del SCK y es válido en los flancos de subida de la señal de reloj. El SHT15 indica una correcta recepción de un comando colocando el pin de datos en bajo (bit ACK) después del octavo flanco de bajada del SCK. La línea de datos es soltada después del noveno flanco de bajada del SCK.

Tabla 8. Comandos del SHT15.

COMANDO	CODIGO
Reservado	0000X
Medición de Temperatura	00011
Medición de Humedad	00101
Leer registro de estado	00111
Escribir registro de estado	00110
Reservado	0101X – 1110X
Reset	11110

Fuente: Hoja de datos del SHT15.

Para indicar que se completó la medición, el SHT15 coloca un bajo en la línea de datos. El DSP debe esperar a esta señal antes de establecer el siguiente SCK para leer los datos. Los datos son guardados por el sensor hasta que sean leídos. El sensor envía dos bytes los cuales contienen la información sobre la medición realizada. Finalmente, para terminar la comunicación se debe mantener en alto la línea de datos. Para una mayor información sobre las rutinas de inicialización y de transmisión de datos, consultar la hoja de datos del sensor SHT15.

Una vez que las medidas de humedad y temperatura son enviadas al DSP por medio de la interfaz serial, estas deben ser convertidas a valores físicos según la información proporcionada por el fabricante del sensor en la hoja de datos del mismo.

Para compensar la no linealidad del sensor de humedad se debe emplear la ecuación [22], donde SO_{RH} corresponde a la medición enviada por el sensor y RH_{linear} corresponde al valor de humedad compensado. Esta ecuación solo es válida si se trabaja con una resolución de 12 bits.

$$RH_{linear} = -4 + 0.0405 * SO_{RH} - 2.8 * 10^{-6} * SO_{RH}^2 \quad [22]$$

Para convertir a valor físico, el dato de temperatura enviado por el señor SHT15 se debe emplear la ecuación [23], donde SO_T corresponde a la medición enviada por el sensor y T_{emp} corresponde al valor físico de temperatura medido en C°. Esta ecuación solo es válida si se emplea una resolución de 14 bits y una tensión de alimentación del sensor de 3.0 V.

$$T_{emp} = -39.6 + 0.01 * SO_T \quad [23]$$

Finalmente, si la temperatura relativa es significativamente diferente a 25°C, es recomendado realizarle otra compensación al valor de Humedad RH_{linear} . Esta compensación se lleva a cabo mediante la ecuación [24], en donde RH_{true} es el resultado obtenido de dicha compensación. Esta ecuación solo es válida para una resolución de 12 bits.

$$RH_{true} = (T_{emp} - 25) * (0.01 + 0.00008 * SO_{RH}) + RH_{linear}$$

[24] $RH_{true} = (T_{emp} - 25) * (0.01 + 0.00008 * SO_{RH}) + RH_{linear}$

2.13 DESCARGA DE DATOS DEL MRS V2.0 AL PC

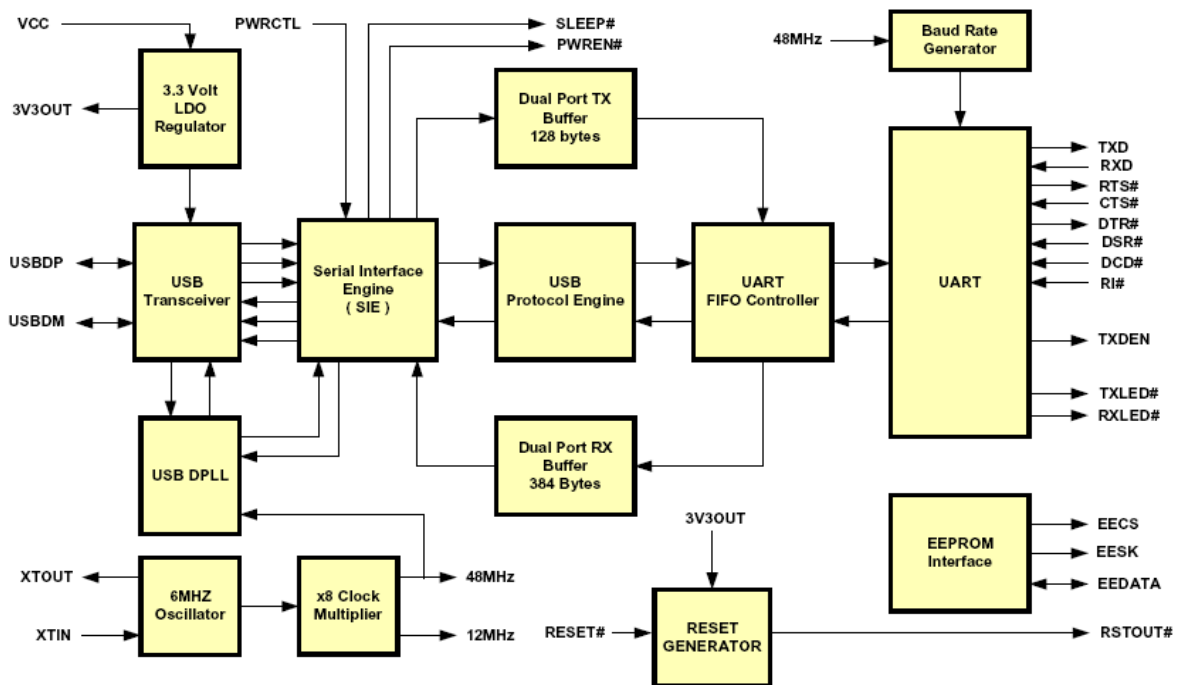
Para la transmisión de datos al computador se cuenta con tres posibilidades: por puerto paralelo, serial o USB. El puerto paralelo ofrece una alta velocidad de transmisión de datos al enviar simultáneamente 8 bits, pero la dificultad para sincronizarlo correctamente con el dispositivo externo lo convierte en un puerto incómodo por lo que no está siendo implementado en los computadores de última tecnología. El puerto serial es usado generalmente, ya que muchos dispositivos presentan facilidades para la transmisión a través del protocolo RS232, pero en los computadores portátiles ya están siendo discontinuados y reemplazados por puertos USB. El puerto USB en su versión 2.0 presenta una velocidad de transmisión de datos de 60 MB/s, además de facilidades para utilizar los dispositivos que se conecten a través de él, también permite que éstos se alimenten desde el PC y puede utilizar los protocolos de comunicación serial RS232 y RS485.

Por los motivos ya expuestos, se escoge una interfaz USB con el computador. El DSP posee una UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) y el compilador envía los datos usando el protocolo RS232 a través de ésta por lo que no se puede colocar una conexión directa entre el DSP y el puerto USB del computador.

Para usar el puerto USB con el protocolo RS232 es necesario utilizar un driver o una interfaz que convierta las señales entre ambos protocolos para que así sea posible una comunicación. Esta interfaz está dada por un circuito integrado de la empresa FTDI (Future Technology Devices International), el FT232BL, que realiza este cambio de señales entre protocolos y necesita pocos componentes externos para su funcionamiento.

El FT232BL es un chip con 32 terminales que permite la conversión de RS232 a USB y viceversa de acuerdo al diagrama de operación mostrado en la Figura 31.

Figura 31. Diagrama de operación del FT232BL



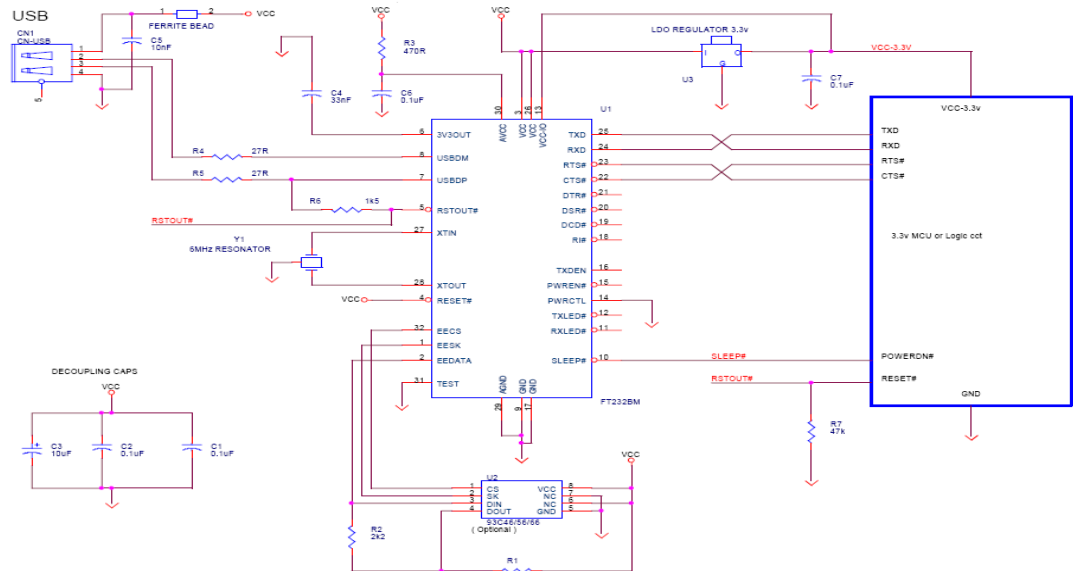
Fuente: FT232BL Datasheet

La UART interna permite interpretar los datos que provienen del DSP, que luego pasan por el controlador FIFO de la UART y el “USB protocol engine” que maneja el flujo de datos desde el punto final de control USB, hasta llegar al SIE, el cual efectúa la conversión de los bits para el acople entre los protocolos, así como las comprobaciones de redundancia cíclica (CRC5 y CRC16) en el flujo de datos USB, para llegar al transceiver USB que da la velocidad completa del protocolo USB 2.0. La interfaz EEPROM permite configurar la identificación de un dispositivo, un número de serial y una descripción pequeña. El oscilador de 6 MHz es un dispositivo externo que no está incluido en el chip y el regulador de 3.3 Volts permite acondicionar las señales del transceiver para que cumplan con el protocolo USB, Los bloques restantes son usados para sincronizar los relojes internos de los dispositivos para efectuar la comunicación²⁹. Para un correcto funcionamiento de la interfaz se deben añadir determinados elementos externos³⁰ y que son mostrados en la Figura 32.

²⁹ FT232BL Datasheet

³⁰ http://www.ftdichip.com/Documents/AppNotes/DG232_20.pdf

Figura 32. Circuito de la interfaz entre el DSP y el puerto USB



Fuente: http://www.ftdichip.com/Documents/AppNotes/DG232_20.pdf

En el prototipo MRS V2.0 se utiliza este circuito a excepción de la EEPROM ya que no se necesita un ID o un serial del dispositivo.

3 SOFTWARE

El prototipo MRS V2.0 cuenta con dos grandes aplicaciones de software, una encargada de todo lo relacionado con la configuración y programación del controlador digital de señales (DSP) y la otra aplicación es la que permite al usuario la descarga al PC de los datos almacenados en el prototipo para su posterior visualización y análisis mediante la gráfica de perfil de resistividad lo que se consigue mediante un programa desarrollado en el software *LabVIEW*.

El DSP es utilizado para controlar todas las funciones realizadas por el prototipo, tales como: Manejar la interfaz con el usuario (pantalla gráfica LCD y pulsadores), realizar la medición de la resistividad del terreno, manejar el sensor SHT15 para la medición de humedad y temperatura, guardar los datos de distancia y resistividad en su memoria flash de datos, observar y borrar los datos correspondientes a cada una de las pruebas, graficar el perfil de resistividad y enviar datos al computador. Para ejecutar cada una de estas funciones se emplearon diferentes módulos y periféricos proporcionados por el DSP y se elaboraron diferentes funciones empleando el lenguaje de programación C.

Para la programación del DSP se hace necesaria la utilización de un software de desarrollo. El paquete *CodeWarrior™ Development Studio for Freescale™ 56800/E Digital Signal Controllers v8.0* es empleado para tal propósito. Este paquete de software permite realizar funciones de compilación de programa, simulación en circuito y descarga del programa desde el PC hasta el DSP, entre otras. Además, proporciona una herramienta denominada *UNIS Processor Expert™*, la cual permite un rápido y fácil desarrollo de aplicaciones y programas. *UNIS Processor Expert™* emplea componentes denominados *embedded beans™* en los cuales son encapsulados diferentes elementos de la CPU, los periféricos del DSP y algunas otras funciones de software. Cada uno de los *beans* puede ser configurado por el usuario según sus requerimientos. *UNIS Processor Expert™* genera automáticamente el código C de los diferentes *beans* empleados por el usuario.

3.1 CONFIGURACION DE LOS MÓDULOS DEL DSP

En la aplicación de software realizada para la programación del DSP fue necesaria la utilización de algunos de los módulos ofrecidos por el DSP, tales como: La interfaz periférica serial (SPI), el modulador por ancho de pulso (PWM), el generador de pulsos programable (PPG), el convertidor analógico-digital (ADC), la memoria flash de datos (Intflash), la interfaz de comunicación serial (SCI),

interrupciones periódicas (TimerInt) y finalmente las entradas/salidas de propósito general (GPIO).

Para la configuración de los diferentes módulos del DSP se emplearon *Embedded beans* y en algunas ocasiones se manipularon directamente los registros pertenecientes al periférico o al módulo de interés.

3.1.1 Interfaz Periférica Serial (SPI)

Este módulo permite realizar una comunicación serial síncrona *full-dúplex* entre dos dispositivos, uno de ellos configurado como maestro y el otro como esclavo. Para poder efectuar dicha comunicación, la interfaz (SPI) emplea dos terminales del DSP, uno de estos es encargado de transmitir los datos (MOSIO) y el otro terminal se emplea como señal de reloj para sincronizar la transmisión de datos (SCLK).

El prototipo MRS V2.0 utiliza esta interfaz para el manejo de la pantalla gráfica, cuya transmisión de datos es realizada mediante una comunicación síncrona serial entre el DSP (configurado como maestro) y el registro de desplazamiento de referencia 74HC164 de entrada serie y salida paralela (utilizado como dispositivo esclavo).

Para el control y la configuración de la interfaz (SPI) se emplean cuatro registros: El registro de estado y control (SPSCR), el registro de control y tamaño de datos (SPDSR), el registro de datos transmitidos (SPDTR) y el registro de datos recibidos (SPDRR). Debido a que el DSP es configurado como dispositivo maestro, el registro de datos recibidos (SPDRR) no es utilizado. En la Figura 33 se pueden observar los registros de la interfaz (SPI) con sus respectivos bits.

Figura 33. Registros de la interfaz periférica serial (SPI).

Add. Offset	Register Name		15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
\$0	SPSCR	R	SPR			DSO	ERRIE	MOD FEN	SPRIE	SPMSTR	CPOL	CPHA	SPE	SPTIE	SPRF	OVRF	MODF	SPTIE
		W																
\$1	SPDSR	R	WOM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		W																
\$2	SPDRR	R	R15	R14	R13	R12	R11	R10	R9	R8	R7	R6	R5	R4	R3	R2	R1	R0
		W																
\$3	SPDTR	R	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		W	T15	T14	T13	T12	T11	T10	T9	T8	T7	T6	T5	T4	T3	T2	T1	T0

Fuente: 56F8300 Peripheral User Manual.

➤ Registro de estado y control (SPSCR)

Este registro es empleado para la selección de la tasa de baudios de transmisión del SPI, configuración del tipo de módulo como maestro o esclavo, habilitación de interrupciones, selección de la polaridad y fase de la señal de reloj e indicación del estado de la interfaz.

Los bits 13,14 y 15 (SPR) del registro SPSCR son empleados para seleccionar el divisor de la tasa de baudios de transmisión (DB). El valor de la tasa de baudios de transmisión queda determinado por [25].

$$TasadeBaudios = \frac{Re lojdelModulo}{DB} [25]$$

El bit 12 (DSO) es empleado para definir si el bit MSB o el bit LSB es transmitido o recibido primero.

0= MSB transmitido primero.

1= LSB transmitido primero.

Los bits 4 (SPTIE), 9 (SPRIE), 10 (MODFEN) y 11(ERRIE) son empleados para habilitación de interrupciones.

El bit 8 (SPMSTR) selecciona el tipo de módulo como maestro o esclavo.

0= Modo Esclavo.

1=Modo Maestro.

Los bits 6 (CPHA) y 7 (CPOL) se encargan de configurar la polaridad del reloj y su fase.

El bit 5 (SPE) se encarga de habilitar o inhabilitar el módulo.

0=módulo deshabilitado.

1=módulo habilitado.

Finalmente los bits 0(SPDSR), 1(MODF), 2(OVRF) y 3(SPRF) son de solo lectura y se utilizan para indicar el estado de la interfaz.

➤ Registro de control y tamaño de datos (SPDSR).

Este registro permite configurar la longitud de los datos para cada transmisión mediante los bits 0(DS0), 1(DS1), 2(DS2) y 3(DS3).

- Registro de datos transmitidos (SPDTR).

En este registro es cargado el dato que va a ser transmitido. Una vez el dato es cargado, este es transmitido inmediatamente.

En el prototipo MRS V2.0 se emplearon los terminales 24 (MOSIO) y 25 (SCLK0) del DSP para realizar la comunicación síncrona serial con el registro de desplazamiento 74HC164. El módulo SPI fue configurado de la siguiente manera:

- Divisor de la tasa de baudios de transmisión (DB) = 32.
- MSB transmitido primero.
- Interrupciones deshabilitadas.
- Modo maestro.
- Tamaño de datos por transmisión=16. De los 16 bits transmitidos solo 8 bits corresponden a información de manejo de la pantalla, los ocho restantes se utilizan como retardo de transmisión necesario para sincronizar el registro de desplazamiento y el DSP.

En el programa del DSP, la configuración del módulo se realizó de la siguiente manera:

```

setRegBit(GPIO_B_DDR,DD2); //Configuración del pin MOSIO como salida
setRegBit(GPIO_B_DDR,DD3); //Configuración del pin SCLK0 como salida.
setRegBit(GPIO_B_PER,PE2); //Configuración del pin MOSIO como periférico
del SPI.
setRegBit(GPIO_B_PER,PE3); //Configuración del pin SCLK0 como periférico
del SPI.
setRegBits(SPI0_SCR,33153); //Divisor de la tasa de baudios de transmisión
(DB) = 32.
//MSB transmitido primero, Modo maestro.
setRegBits(SPI0_DSR,0xF); //Tamaño de datos por transmisión=16
setRegBit(SPI0_SCR,SPE); //Habilitación del módulo SPI.

```

3.1.2 Modulador por ancho de pulso (PWM)

Este módulo implementa una modulación por ancho de pulso permitiendo generar señales con ciclo útil variable y frecuencia fija. Puede generar simultáneamente hasta 6 señales PWM independientes o 3 pares complementarios. Se utiliza un

mismo contador para los 6 canales PWM, por lo tanto, todas las señales PWM operan a la misma frecuencia.

En el prototipo MRS V2.0 se emplean 6 señales PWM independientes. Cuatro de estas señales PWM (PWM0, PWM1, PWM2 y PWM3) son utilizadas para controlar el encendido y apagado de los transistores M1, M2, M3 y M4 del puente inversor perteneciente a la etapa generadora de potencia del prototipo, cuya funcionalidad y forma de operación se detalla en la sección 2.5 del presente libro. Las otras dos señales PWM (PWM4 y PWM5) son empleadas para activar el circuito inversor encargado de generar las fuentes temporales del prototipo, cuya operación se expone en la sección 2.4.2.

Para la configuración de este módulo se emplearon *embedded beans*, los cuales proporcionan una interfaz gráfica que permite modificar sus propiedades según la necesidad del usuario. Las propiedades que fueron modificadas en cada uno de los beans PWM se describen en la Tabla 9. Para más información sobre el bean PWM consultar la ayuda proporcionada por el paquete *CodeWarrior™ V8.0*.

Tabla 9. Propiedades del bean PWM.

Propiedad	Descripción
Bean name	Nombre del bean
Output Pin	Pin de salida del DSP utilizado para la generación de la señal
Period	Periodo de la señal PWM de salida
Starting pulse width	Ancho del pulso inicial de la señal de salida.
Inicial Polarity	Polaridad inicial de la señal de salida (Alta o baja)

Fuente: los autores

Los *embedded beans* también proporcionan unas funciones denominadas métodos. Estos métodos permiten al usuario modificar algunas de las propiedades del bean y realizar diferentes tipos de funciones predeterminadas. Los métodos utilizados en el programa fuente del DSP para el control de las señales PWM se describen en la Tabla 10.

Tabla 10. Métodos del bean PWM

Métodos	Descripción
Enable	Habilita el bean, empieza la generación de la señal.
Disable	Deshabilita el bean, para la generación de la señal.
SetDutyUS	Permite modificar el ciclo útil en μ s de la señal de salida.
SetValue	Coloca en alto la polaridad de la señal de salida mientras esta se encuentra deshabilitada.
ClrValue	Coloca en bajo la polaridad de la señal de salida mientras esta se encuentra deshabilitada.

Fuente: los autores

➤ Beans PWM0, PWM1, PWM2 y PWM3:

La configuración seleccionada para los beans PWM0, PWM1, PWM2 y PWM3, se muestra en la Tabla 11. Se configuró una frecuencia de operación de 40 KHz, cuyo criterio de selección se expone en la sección 2.6 La polaridad inicial de los PWM se seleccionó alta debido a que el puente inversor debe estar apagado al momento de encender el prototipo.

Tabla 11. Configuración de los beans PWM.

Bean name	Output Pin	Nº Pin	Period [μ s]	Starting pulse width [μ s]	Inicial Polarity
PWM0	PWMA0_GPIOA0	3	25	23	High
PWM1	PWMA1_GPIOA1	4	25	2	High
PWM2	PWMA2_GPIOA2	7	25	2	High
PWM3	PWMA3_GPIOA3	8	25	23	High
PWM4	PWMA4_GPIOA4	9	25	12.5	High
PWM5	PWMA5_GPIOA5	10	25	12.5	Low

Fuente: los autores

Se colocó por defecto un valor de 2μ s de ancho del pulso inicial, sin embargo, al momento de realizar la medición de resistividad del terreno, el ancho de pulso de los PWM varía según la tensión de inyección seleccionada por el usuario. A continuación se muestra el código en C empleado para realizar esta modificación y los valores de ancho de pulso necesarios para generar la tensión de inyección seleccionada por el usuario (100, 200 o 300 V).

```
if(nivel_tension==100) //modificación ciclo útil para inyección de 100V
{
```

```

    PWM0_SetDutyUS(23);
    PWM1_SetDutyUS(2);
    PWM2_SetDutyUS(2);
    PWM3_SetDutyUS(23);
}
else
{
    if(nivel_tension==200)    //modificación ciclo útil para inyección de 200V
    {
        PWM0_SetDutyUS(22);
        PWM1_SetDutyUS(3);
        PWM2_SetDutyUS(3);
        PWM3_SetDutyUS(22);
    }
    else    //modificación ciclo útil para inyección de 300V
    {
        PWM0_SetDutyUS(14);
        PWM1_SetDutyUS(11);
        PWM2_SetDutyUS(11);
        PWM3_SetDutyUS(14);
    }
}
}

```

Para la obtención de un menor consumo de potencia, el puente inversor solo se activa al momento de realizar la medición de resistividad del terreno. Para que se obtenga un correcto funcionamiento de este puente, las señales proporcionadas por los beans PWM1 y PWM2 deben ser complementarias a las señales generadas por los beans PWM0 y PWM3. Por este motivo, al momento de encender el puente, es necesario cambiar la polaridad inicial de de las señales PWM1 y PWM2. A continuación se muestra el código en C empleado para cambiar la polaridad y habilitar los PWM.

```

PWM1_ClrValue();    //cambia polaridad inicial a la señal PWM1
PWM2_ClrValue();    //cambia polaridad inicial a la señal PWM2
PWM0_Enable();    //Habilita PWM0
PWM3_Enable();    //Habilita PWM3
PWM1_Enable();    //Habilita PWM1
PWM2_Enable();    //Habilita PWM2.

```

Al momento de terminar la generación de la tensión de inyección del terreno se deshabilitan los PWM y se cambia de nuevo su polaridad a alto. El código en C correspondiente se muestra a continuación:

```

PWM0_Disable();    //Des habilitación PWM0
PWM1_Disable();    //Des habilitación PWM1
PWM2_Disable();    //Des habilitación PWM2

```

```
PWM3_Disable(); //Des habilitación PWM3
PWM0_SetValue(); //polaridad señal PWM0 alta
PWM1_SetValue(); //polaridad señal PWM1 alta
PWM2_SetValue(); //polaridad señal PWM2 alta
PWM3_SetValue(); //polaridad señal PWM3 alta
```

➤ Beans PWM4 y PWM5:

La configuración seleccionada para los beans PWM4 y PWM5, se muestra en la Tabla 11. Debido a que todos los PWM utilizan el mismo contador, la frecuencia de operación de estas señales es también de 40 KHz. El ancho del pulso se seleccionó igual a la mitad del periodo.

Como las fuentes temporales solo se generan al momento de realizar la medición de resistividad del terreno, estas señales PWM se deben habilitar solo en esos instantes. La polaridad inicial de las señales PWM4 y PWM5 se seleccionó alta y baja, respectivamente, con el fin de mantener apagados los transistores del circuito inversor de las fuentes temporales explicadas en la sección 2.4.2

Para el correcto funcionamiento del circuito inversor, los PWM4 y PWM5 deben generarse en fase, por lo que se hace necesario colocar la misma polaridad inicial a ambas señales al momento de habilitarlas. A continuación se muestra el código en C empleado para el cambio de polaridad y habilitación de los PWM4 y PWM5.

```
PWM4_ClrValue(); //cambio de polaridad inicial del PWM4
PWM5_ClrValue(); //cambio de polaridad inicial del PWM5
PWM4_Enable(); //habilitación PWM4
PWM5_Enable(); //habilitación PWM5
```

3.1.3 Generador de pulsos programable (PPG)

Este módulo permite generar señales con ciclo útil y frecuencia variable. El PPG utiliza un contador diferente al usado por el módulo PWM, por lo tanto la frecuencia de operación de la señal de salida puede ser diferente y variable.

En el prototipo MRS V2.0 el PPG se utiliza para generar una señal de pulsos periódica empleada para controlar el circuito inversor encargado de generar las fuentes constantes del prototipo, cuya forma de operación y funcionamiento se exponen en la sección 2.4.1

Para la configuración de este módulo se empleó el bean llamado PPG, el cual también proporciona una interfaz gráfica que permite modificar sus propiedades.

Las propiedades que fueron modificadas en este bean con su respectiva configuración se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Propiedades y configuración del bean PPG

Propiedad	Descripción	Configuración
Bean name	Nombre del bean	PPG1
Output pin	Pin de salida del DSP utilizado para la generación de la señal	TC3_GPIOC4 PIN numero 63
Period	Periodo de la señal de salida	25 μ s
Starting pulse width	Ancho del pulso de la señal de salida.	12.5 μ s
Inicial polarity	Polaridad inicial de la señal de salida	Low

Fuente: los autores

Debido a que las fuentes constantes deben estar activadas desde el momento en el que el prototipo se encienda hasta que se apague, la señal generada por el módulo PPG debe estar habilitada todo este tiempo. El único método del bean PPG empleado en el programa fuente del DSP es el llamado "Enable". Este método se encuentra encargado de habilitar la señal de salida del PPG apenas se enciende el equipo. A continuación se muestra el código en C empleado para tal propósito:

```
PPG1_Enable(); //Habilitación del PPG1
```

3.1.4 Convertidor analógico-digital (ADC)

El conversor analógico-digital del DSP proporciona 8 canales y permite realizar conversiones con una resolución máxima de 12 bits.

En el prototipo MRS V2.0 se utilizan 5 canales del ADC, los cuales son empleados para realizar diferentes tipos de mediciones. El canal 0, se utiliza para medir la corriente a través de los electrodos de inyección (A y B) en el momento en que se realiza la medición de la resistividad del terreno. El canal 1, se encuentra encargado de medir la tensión de la batería con el fin de indicar al usuario el porcentaje de carga de ésta. Los canales 4, 5 y 6 del ADC se encargan de medir la tensión entre los electrodos de medida (M y N) en el momento en el que se realiza la medición de la resistividad del terreno, según el rango en el que se encuentre dicha tensión.

Los canales 2 y 3 del ADC se utilizaron inicialmente en el prototipo para medir la tensión de salida entre los electrodos inyectores (A y B) y a partir de este valor

modificar el ciclo útil de las señales PWM0, PWM1, PWM2 y PWM3 para controlar el nivel de tensión de inyección, sin embargo, en el prototipo final no fue necesaria la utilización de estos canales debido a que se definió un ciclo útil fijo para cada nivel de tensión (100, 200 o 300 V).

Para la configuración del convertidor analógico-digital se empleó el bean llamado ADC. Este bean cuenta con una interfaz gráfica para observar sus propiedades. Las propiedades del bean que fueron modificadas con su respectiva configuración se describen en la Tabla 13.

Tabla 13. Propiedades y configuración del bean ADC

Propiedad		Descripción	Configuración
Bean name		Nombre del bean	AD1
A/D Channels		Número de canales del ADC	7
Channel 0	A/D channel pin	Pin de salida del canal 0	ANA0 / Pin N° 26
Channel 1	A/D channel pin	Pin de salida del canal 1	ANA1 / Pin N° 27
Channel 2	A/D channel pin	Pin de salida del canal 2	ANA2 / Pin N° 28
Channel 3	A/D channel pin	Pin de salida del canal 3	ANA3 / Pin N° 29
Channel 4	A/D channel pin	Pin de salida del canal 4	ANA4 / Pin N° 30
Channel 5	A/D channel pin	Pin de salida del canal 5	ANA5 / Pin N° 31
Channel 6	A/D channel pin	Pin de salida del canal 6	ANA6 / Pin N° 32
Mode Select		Selecciona entre modo solo o diferencial para cada canal	Single ended (Para todos los canales)
Modo		Permite seleccionar entre los modos secuencial y simultáneo	Sequential
Sample 0	Channel	Canal que utiliza el muestreo 0	Canal 0
Sample 1	Channel	Canal que utiliza el muestreo 1	Canal 1
Sample 2	Channel	Canal que utiliza el muestreo 2	Canal 2
Sample 3	Channel	Canal que utiliza el muestreo 3	Canal 3
Sample 4	Channel	Canal que utiliza el muestreo 4	Canal 4
Sample 5	Channel	Canal que utiliza el muestreo 5	Canal 5
Sample 6	Channel	Canal que utiliza el muestreo 6	Canal 6
High Limit		Permite seleccionar el límite superior del muestreo para cada canal	32760 (Para todos los canales)

Low Limit	Permite seleccionar el límite inferior del muestreo para cada canal	0 (Para todos los canales)
Offset	Permite seleccionar el nivel de offset del muestreo para cada canal	0 (Para todos los canales)
Conversion time	Tiempo en realizar una conversión	5 [µs]
Number of conversion	Número de conversiones para cada medición	1

Fuente: los autores

Los métodos utilizados en el programa fuente del DSP para realizar las mediciones por medio del ADC fueron:

- AD1_MeasureChan: Este método permite realizar la medición de un canal.
- AD1_GetChanValue16: Este método permite obtener el valor de la última medición de un canal. Este valor siempre se encuentra justificado a la izquierda.

Un ejemplo del código en lenguaje C empleado para realizar una medición por medio del canal 0 se muestra a continuación:

```
AD1_MeasureChan(1,0);           //Realizar medición con el canal 0.
AD1_GetChanValue16(0,&muestra); //Guardar el valor de la última medición del
                                // canal 0 en la variable muestra
```

Según el manual del usuario de periféricos del 56F8300, el valor de la medición realizada por el ADC está relacionado con la tensión de entrada al canal mediante la ecuación [26].

$$Singleendedvalue = round\left(\frac{V_{IN} - V_{REFLO}}{V_{REFH} - V_{REFLO}} * 4095\right) * 16 \quad [26]$$

Donde:

V_{IN} = tensión aplicada en el terminal de entrada del ADC.

V_{REFH} = Tensión de referencia alta del ADC. En el prototipo MRS V2.0, esta referencia del ADC se encuentra conectada a la tensión de alimentación del DSP ($\approx 3.2V$).

V_{REFLO} = Tensión de referencia baja del ADC. En el prototipo, esta referencia se encuentra conectada a la tierra del DSP (tierra digital).

De acuerdo a la anterior relación, es posible obtener el valor de la tensión de entrada a cualquier canal del ADC a partir de la medición realizada por este. Como ejemplo de lo anterior, se muestra a continuación el código en lenguaje C empleado para calcular la tensión en el terminal de entrada del canal 0 (corriente) a partir del valor medido por el convertidor (muestra).

```
corriente=((muestra/16.0)*3.2)/4095; //cálculo de la tensión de entrada del canal 0
// del ADC
```

Para realizar cualquiera de las mediciones, el prototipo MRS V2.0 emplea un promediado de 50 valores correspondientes a 50 mediciones realizadas por el ADC. Este promediado se realiza con el fin de aumentar la confiabilidad de la medición. A continuación se muestra el código en lenguaje C empleado para realizar las 50 mediciones, el promediado y el cálculo de la tensión de entrada del canal 0.

```
muestra_0=0;
for(i=0;i<50;i++)
{
    AD1_MeasureChan(1,0); //Realizar medición con el canal 0.
    AD1_GetChanValue16(0,&muestra); //Guardar el valor de la ultima
    muestra_0=muestra_0+muestra; // medición del canal 0 en la variable
    // muestra
}
muestra_0=muestra_0/50.0; //promediado
corriente=((muestra_0/16.0)*3.2)/4095; //cálculo de la tensión de entrada del canal
//0 del ADC
```

3.1.5 Memoria flash de datos

El DSP 56F8323 cuenta con una memoria flash de datos de 8 KB, la cual se encuentra distribuida desde la dirección X:\$001000 a la dirección X:\$001FFF de la memoria de datos del DSP cuyo mapa de direcciones se observa en la Figura 34.

Figura 34. Distribución de la memoria de datos del DSP 56F8323

Begin/End Address	Memory Allocation
X:\$FF FFFF X:\$FF FF00	EOnCE 256 locations allocated
X:\$FF FEFF X:\$01 0000	RESERVED
X:\$00 FFFF X:\$00 F000	On-Chip Peripherals 4096 locations allocated
X:\$00 EFFF X:\$00 2000	RESERVED
X:\$00 1FFF X:\$00 1000	On-Chip Data Flash 8KB
X:\$00 0FFF X:\$00 0000	On-Chip Data RAM 8KB ²

1. All addresses are 16-bit Word addresses.

2. The Data RAM is organized as a 2K x 32-bit memory to allow single-cycle, long-word operations.

Fuente: Hoja de datos del DSP 56F8323

La memoria flash de datos se encuentra particionada en 16 sectores. Cada uno de estos sectores tiene un tamaño de 256 x 16 bits y puede ser borrado sin necesidad de modificar los demás.

El prototipo MRS V2.0 utiliza la memoria flash de datos para guardar 14 pruebas de 50 mediciones. Cada prueba es almacenada en un sector diferente de la memoria flash con el fin de que cada una pueda ser borrada por separado sin necesidad de modificar las demás. Los dos primeros sectores de la memoria flash de datos no son empleados para almacenar ninguna de las pruebas debido a que en estos espacios de memoria son guardadas algunas constantes del programa fuente del DSP.

Cada una de las 14 pruebas tiene la capacidad de guardar la siguiente información:

- 50 datos de resistividad (Tamaño de cada dato = 4 Bytes.)
- 50 datos de distancia (Tamaño de cada dato = 2 Bytes)
- 1 dato de Humedad (Tamaño del dato = 4 Bytes)
- 1 dato de Temperatura (Tamaño del dato = 4 Bytes)

En la Figura 35 se ilustra la distribución realizada a la memoria flash de datos para cada una de las pruebas.

Figura 35. Distribución de la memoria flash de datos del DSP.

Direcciones Inicio/Final	Sector	Prueba	Direcciones Inicio/Final	Datos guardados
0x001200 0x0012FF	3	1	0x001200 0x001263	50 datos de resistividad (Tamaño de dato = 4 Bytes)
			0x001264 0x001295	50 datos de distancia (Tamaño de dato = 2 Bytes)
			0x001296 0x001297	1 dato de humedad (Tamaño dato = 4 Bytes)
			0x001298 0x001299	1 dato de Temperatura (Tamaño dato = 4 Bytes)
			0x00129A 0x0012FF	Espacio de memoria no usada
0x001300 0x0013FF	4	2	0x001300 0x001363	50 datos de resistividad (Tamaño de dato = 4 Bytes)
			0x001364 0x001395	50 datos de distancia (Tamaño de dato = 2 Bytes)
			0x001396 0x001397	1 dato de humedad (Tamaño dato = 4 Bytes)
			0x001398 0x001399	1 dato de Temperatura (Tamaño dato = 4 Bytes)
			0x00139A 0x0013FF	Espacio de memoria no usada
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0x001F00 0x001FFF	16	14	0x001F00 0x001F63	50 datos de resistividad (Tamaño de dato = 4 Bytes)
			0x001F64 0x001F95	50 datos de distancia (Tamaño de dato = 2 Bytes)
			0x001F96 0x001F97	1 dato de humedad (Tamaño dato = 4 Bytes)
			0x001F98 0x001F99	1 dato de Temperatura (Tamaño dato = 4 Bytes)
			0x001F9A 0x001FFF	Espacio de memoria no usada

Fuente: los autores

El prototipo MRS V2.0 realiza diferentes tipos de funciones relacionadas con la memoria flash de datos. Entre estas funciones se encuentran: Escritura de datos en memoria, borrado de cada una de las pruebas y lectura de los datos almacenados en la memoria. Para un fácil acceso y manejo de la memoria flash de datos, se empleó el bean llamado IntFlash. Las propiedades del bean que fueron modificadas con su respectiva configuración se observan en la Tabla 14.

Tabla 14. Propiedades y configuración del bean IntFlash

Propiedad	Descripción	Configuración
Bean name	Nombre del bean	IFsh1
Flash	Permite escoger la memoria a utilizar por el bean (Data Flash o Program Boot Flash)	Data_Flash
Write method	Método de escritura en la flash.	Safe write (with save & erase)

Fuente: los autores

Para realizar las funciones de borrado de pruebas, escritura y lectura de datos, el bean IntFlash proporciona cuatro métodos los cuales se describen en la Tabla 15.

Tabla 15. Métodos del bean IntFlash

Método	Descripción
IFsh1_SetGlobalProtection	Permite colocar o remover la protección de la flash.
EraseSector(dWord Addr)	Borra el sector al cual pertenece la dirección (Addr)
GetWordFlash	Lee una palabra (16 bits) de una dirección de la flash.
SetWordFlash	Escribe una palabra (16 bits) en una dirección de la flash

Fuente: los autores.

Para poder realizar cualquier acceso a la memoria flash de datos es necesario remover su protección. En el prototipo MRS V2.0 la protección de la memoria flash es removida desde el inicio del programa fuente del DSP con el fin de poder acceder a esta memoria en cualquier instante. El código en lenguaje C utilizado para realizar esta operación se muestra a continuación:

```
IFsh1_SetGlobalProtection(FALSE); //remueve la protección de la memoria flash de datos.
```

El prototipo proporciona al usuario la opción de borrado de cada una de las pruebas. Esta operación se lleva a cabo mediante el método “EraseSector” el cual permite borrar cada sector por separado. El código en lenguaje C empleado para llevar a cabo esta función se muestra a continuación. El sector a ser borrado depende de la prueba escogida por el usuario la cual se indica por medio de la variable “prueba_bor”.

```
IFsh1_EraseSector((0x1100+prueba_bor*256)); //Se borra el sector donde se encuentra
```

//almacenada la prueba_bor.

Después de borrado un sector, el valor por defecto de cada byte es 0xFF. Cabe resaltar, que para realizar una operación de escritura sobre un byte de la memoria flash de datos, este deber ser borrado previamente.

Los datos de resistividad son guardados por orden de medición en la prueba escogida por el usuario, con el fin de que el prototipo pueda ser apagado en cualquier momento durante la realización de la prueba. El DSP tiene la capacidad de saber en qué posición de memoria debe guardar la siguiente medición inspeccionando previamente los bytes de la prueba que se encuentran vacíos. Cuando las 50 mediciones son guardadas, se indica en pantalla que la prueba está llena. Es necesario realizar previamente la operación de borrado de prueba, en caso que se quiera volver a utilizar una prueba llena. Un ejemplo del código en lenguaje C empleado en el programa fuente del DSP para realizar ordenadamente el guardado de datos de resistividad y distancia a, se muestra a continuación.

```
for(i=0;i<50;i++)
{
    IFsh1_GetWordFlash((0x1100+prueba*256+2*i),&sample1);
    IFsh1_GetWordFlash((0x1101+prueba*256+2*i),&sample2);
    if(sample1==65535 & sample2==65535) //pregunta si la posición de
    { // memoria está vacía.
        res_32=resistividad*1000; //escalado por 1000
        dis_16=DISTANCIA__A*10; //escalado por 10
        IFsh1_SetWordFlash((0x1100+prueba*256+2*i),res_32); //guarda
        IFsh1_SetWordFlash((0x1101+prueba*256+2*i),res_32>>16); //resistividad
        IFsh1_SetWordFlash((0x1164+prueba*256+i),dis_16); //guarda distancia
        acon=1;
        ESCRIBIR_TEXTO(DATOS_GUARDADOS,0x0180,32); //datos
        guardados
        TEMPORIZACION(0x1388);
        i=51;
    }
}
if(acon==0) //prueba llena
{
    ESCRIBIR_TEXTO(PRUEBA_LLENA,0x0180,32); //indica en pantalla que la
    prueba //está llena
    TEMPORIZACION(0x1388);
}
```

Antes de guardar en la memoria flash los datos correspondientes a resistividad del terreno y a distancia entre los electrodos, estos datos son escalados por un factor de 1000 y 10, respectivamente. Este escalado se realiza con el fin de poder

guardar 3 cifras decimales para los datos de resistividad y 1 cifra decimal para los datos de distancia.

Los datos de humedad y temperatura solo pueden ser guardados una sola vez en cada una de las pruebas y son escalados por un factor de 1000 con el fin de guardar 3 cifras decimales de cada uno de ellos. Si se quiere guardar de nuevo en cada prueba los datos de humedad y temperatura es necesario realizar previamente una operación de borrado de prueba. El código en lenguaje C empleado para guardar los datos de humedad y temperatura en la prueba_ht se observa a continuación:

```
IFsh1_GetWordFlash((0x1196+prueba_ht*256),&sample1);      //revisa que los
datos no
IFsh1_GetWordFlash((0x1197+prueba_ht*256),&sample2);      //hayan sido
guardados
IFsh1_GetWordFlash((0x1198+prueba_ht*256),&sample3);      //previamente
IFsh1_GetWordFlash((0x1199+prueba_ht*256),&sample4);
if(sample1==65535 & sample2==65535 & sample3==65535 & sample4==65535)
{
    HUM_32=HUM_L*1000;                                     //escalado por 1000
    TEM_32=TEM*1000;                                       //escalado por 1000
    IFsh1_SetWordFlash((0x1196+prueba_ht*256),HUM_32);    //guarda humedad
    IFsh1_SetWordFlash((0x1197+prueba_ht*256),HUM_32>>16);
    IFsh1_SetWordFlash((0x1198+prueba_ht*256),TEM_32);    //guarda temperatura
    IFsh1_SetWordFlash((0x1199+prueba_ht*256),TEM_32>>16);
    ESCRIBIR_TEXTO(DATOS_GUARDADOS,0x01A0,32);           //datos guardados
    TEMPORIZACION(0x1388);
}
else
{
    ESCRIBIR_TEXTO(MEDIDA_GUARDADA,0x01A0,32);           //indica que la medida
    TEMPORIZACION(0x1388);                               //fue guardada anteriormente
}
}
```

Finalmente el DSP también proporciona dos opciones correspondientes a observar prueba y descarga de datos al computador. Para realizar estas dos funciones, los datos a observar o a enviar son leídos de la memoria flash por medio del método GetWordFlash. A continuación se muestra un ejemplo del código en C empleado para leer el dato de humedad de la prueba_obs seleccionada por el usuario.

```
IFsh1_GetWordFlash((0x1196+prueba_obs*256),&sample1);     //leer datos de
humedad
```

IFsh1_GetWordFlash((0x1197+prueba_obs*256),&sample2); //de la prueba_obs

3.1.6 Interfaz de comunicación serial (SCI)

Este módulo permite la comunicación serial asíncrona del DSP con periféricos y otros controladores.

En el prototipo MRS V2.0 la interfaz SCI se utiliza para enviar las pruebas almacenadas en la memoria flash de datos del DSP al computador por medio del chip FT232BL, cuyo funcionamiento se explica en la sección 2.13. La interfaz de recepción de datos en el PC se realizó en el software LabVIEW cuya programación se expone en la sección 3.3.

Para la configuración de este módulo se utilizó el bean AsynchroSerial que presenta una interfaz gráfica que permite modificar sus propiedades. Las propiedades que se cambiaron con respecto a su valor por defecto y su configuración se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Propiedades y configuración del bean AsynchroSerial

Propiedad	Descripción	Configuración
Channel	Nombre del canal de comunicación serial	SC1
Stop Bit	Cantidad de bits que determinan el fin de la comunicación	2
Width	Numero de bits de información	8
Baud Rate	Rata de baudios para la transmisión	9590.793 Baudios
RxD	Pin del DSP usado para recibir los datos	RXD1_GPIOB1 Pin N° 22
TxD	Pin del DSP usado para transmitir los datos	TXD1_GPIOB0 Pin N° 21

Fuente: los autores.

La comunicación serial se utiliza solamente cuando el usuario accede a la opción “DESCARGA DE DATOS A LABVIEW” por lo que esta deshabilitada mientras se ejecuta el resto del programa. Solo se utilizan dos métodos de este bean llamados “RecvChar” y “SendChar” quienes tienen la función de recibir y enviar datos de 8 bits, respectivamente. El método RecvChar se utiliza por el DSP para recibir la señal de inicio de comunicación enviada por el PC a través del terminal RxD. El

código en lenguaje C empleado para este propósito se muestra a continuación. Las variables “enviar_datos” y “esperar_senal” son utilizadas para realizar el control del inicio de la comunicación.

```

if(esperar_senal==0) //Espera del dato de confirmación del PC
{
    if(AS1_RecvChar(FALSE)){ // recepción del dato enviado por el PC
    else
    {
        enviar_datos=1; // Cambia las variables de control al
        esperar_senal=1; // recibir la señal de inicio de comunicación.
    }
}
}

```

Cuando el DSP recibe el dato de inicio de comunicación por parte del PC, este envía todos los datos correspondientes a todas las pruebas almacenadas en la memoria flash de datos utilizando el método “SendChar”. Dado que los datos leídos de la memoria flash tienen una longitud de 16 bits es necesario descomponer cada valor en dos datos de 8 bits para enviarlos. Además se hace necesaria la utilización de un retardo entre cada dato enviado con el fin de impedir un error de envío. El código en lenguaje C empleado para este propósito es el siguiente:

```

if(enviar_datos==1) //Envío de los datos al PC
{
    enviar_datos=0; //Confirmación para que solo envíe una vez
    for(i=1;i<15;i++)
    {
        for(j=0;j<154;j++)
        {
            IFsh1_GetWordFlash((0x1100+i*256+j),&sample1); // Obtención
            // de los datos de la flash
            AS1_SendChar(sample1); // Envió de los primeros 8 bits del
            // dato
            for (k=0;k<20000;k++){ // Retardo entre envíos consecutivos
            AS1_SendChar(sample1>>8); //Envió de los otros 8 bits del
            // dato.
            for (k=0;k<20000;k++){ //Retardo entre envíos.
            }
        }
    }
}
}

```

3.1.7 Interrupciones periódicas (TimerInt)

El módulo generador de interrupciones periódicas se emplea en el prototipo MRS V2.0 para realizar diferentes tipos de esperas en varias partes del programa fuente del DSP. El prototipo emplea 2 interrupciones periódicas, una de estas configurada con un periodo de 1 [ms] y la otra con uno de 10 [µs].

Para la utilización de estas interrupciones se emplearon dos beans TimerInt, los cuales fueron configurados de la siguiente manera:

- Nombre del bean = TI1.
Periodo de interrupción = 1 [ms].
Prioridad de la interrupción = Media
- Nombre del bean = TI2.
Periodo de interrupción = 10 [µs].
Prioridad de la interrupción = Media

En la generación de las esperas solo se utilizan dos métodos llamados “Enable” y “Disable”, los cuales son empleados para habilitar e inhabilitar las interrupciones como sus nombres lo indican. Como ejemplo de la utilización de estos métodos, a continuación se muestra el código en lenguaje C empleado para producir una espera de 1 segundo. La variable “espera” indica la ocurrencia de la interrupción. Esta variable se coloca en 1 en el momento en que se genera la interrupción, en el módulo llamado Events.c.

```
for (i=0;i<1000;i++)           //espera de 1000 ms
{
    TI1_Enable();               //Habilitación del bean TI1
    while (espera==0){}         //Espera a que ocurra la interrupción
    TI1_Disable();              //Deshabilitación del bean TI1
    espera=0;                   //Coloca en cero la variable de interrupción
}
```

3.1.8 Entradas y salidas de propósito general (GPIO)

Este módulo permite configurar 27 terminales del DSP como entradas/salidas de propósito general. El DSP 56F8323 contiene 3 puertos GPIO. El ancho de cada puerto y su respectiva función periférica se puede observar en la Figura 36, según la hoja de datos del fabricante.

Figura 36. Puertos GPIO del DSP56F8323

GPIO Port	Port Width	Available Pins in 56F8323	Peripheral Function	Reset Function
A	12	12	PWM, SPI 1	PWM
B	8	8	SPI 0, DEC 0, TMRA, SCI 1	SPI 0, DEC 0
C	7	7	XTAL, EXTAL, CAN, TMRC, SCI 0	XTAL, EXTAL, CAN, TMRC

Fuente: Hoja de datos del DSP 56F8323.

El prototipo MRS V2.0 emplea 11 terminales del DSP configurados como entradas/salidas de propósito general. Para la configuración y utilización de estos terminales se utilizaron 11 beans BitIO cuyas principales propiedades se describen en la Tabla 17.

Tabla 17. Propiedades del bean BitIO

Propiedad	Descripción
Bean name	Nombre del bean
Pin for I/O	Pin del DSP usado por el bean
Direction	Dirección del bean (entrada, salida ó entrada/salida)
Init. Value	Valor de la salida Inicial (0 ó 1)

Fuente: los autores

Cada uno de estos 11 terminales del DSP cumple con una función específica. En la Tabla 18 se expone la configuración realizada a cada uno de los beans BitIO con su respectiva funcionalidad.

Tabla 18. Configuración y funcionalidad de los beans BitIO

Nombre del Bean	Pin I/O	Nº Pin	Dirección	Valor inicial	Funcionalidad
WR	GPIOB7	52	Salida	1	Señal de escritura de la pantalla LCD
A0	GPIOB6	51	Salida	1	Señal de selección del tipo de datos de la pantalla LCD
ARRIBA	GPIOC2	61	Entrada	--	Señal del pulsador ARRIBA
ABAJO	GPIOC3	62	Entrada	--	Señal del pulsador ABAJO
ATRÁS	GPIOA1	18	Entrada	--	Señal del pulsador ATRÁS

	0				
ENTER	GPIOA9	16	Entrada	--	Señal del pulsador ENTER
SCK	GPIOC6	1	Salida	0	Señal de reloj para la comunicación con el sensor de humedad y temperatura
DATA_SENSOR	GPIOC5	64	Entrada/Salida	1	Señal de datos para la comunicación con el sensor de humedad y temperatura
INYECCION	GPIOA11	19	Salida	1	Señal para habilitar la inyección de corriente al terreno.
POLARIDAD	GPIOB5	50	Entrada	--	Señal que indica la polaridad de la tensión entre los electrodos de medición
CAMBIA_POLARIDAD	GPIOB4	49	Salida	0	Señal encargada de controlar la polaridad de la tensión de los electrodos de medición.

Fuente: los autores

Para cambiar el nivel de tensión de los terminales del DSP configurados como salidas de propósito general, se utilizan los métodos "ClrVal" y "SetVal" los cuales permiten cambiar la tensión a 0V (nivel bajo) o a 3.3V (nivel alto), respectivamente.

El método "GetVal" es utilizado en el programa para obtener el valor del estado lógico de la señal de entrada de acuerdo al nivel de tensión en dicho terminal.

3.2 PROGRAMA FUENTE DEL CONTROLADOR DIGITAL DE SEÑALES (DSP)

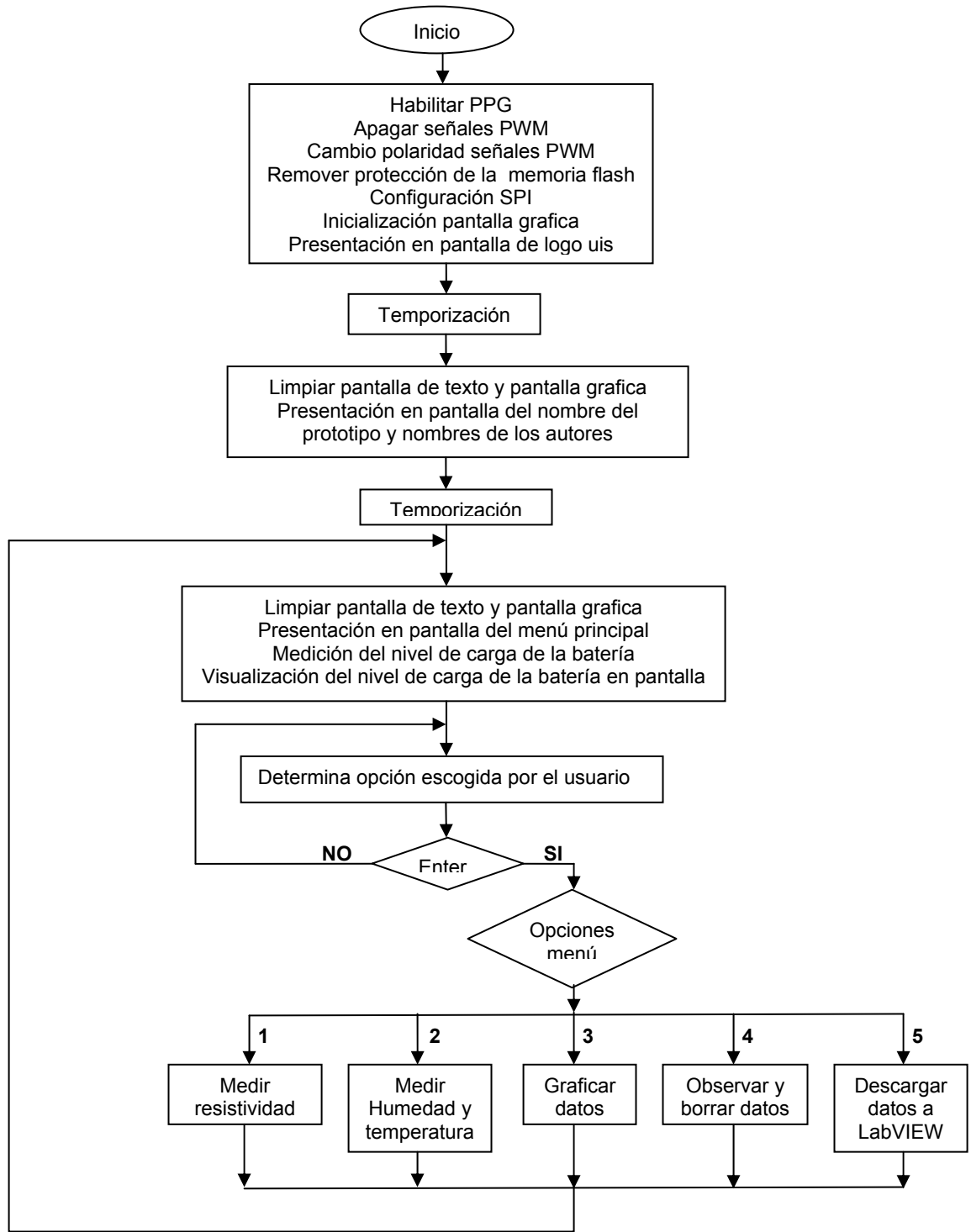
En esta sección se describe la aplicación de software empleada para la programación del DSP, dispositivo encargado de controlar todas las funciones realizadas por el prototipo. El programa fuente del controlador (Ver anexo D) está compuesto por una rutina principal y varias subrutinas adicionales, las cuales se encargan de ejecutar las diferentes opciones que ofrece el MRS V2.0.

En la primera parte del programa, se incluye la configuración de todos los módulos explicados en la sección 3.1, se inicializan las variables globales utilizadas en el transcurso del programa y se definen las subrutinas adicionales al programa principal.

En la Figura 37, se presenta un diagrama de flujo simplificado del programa fuente del DSP. En general, este programa está encargado de realizar las siguientes funciones:

- Habilitación del generador de pulsos programable (PPG).
- Apagado de las señales PWM.
- Cambio de la polaridad inicial de las señales PWM.
- Remover la protección de la memoria flash de datos.
- Configuración de la interfaz periférica serial (SPI).
- Inicialización de la pantalla gráfica.
- Presentación en pantalla del logo UIS, del nombre del prototipo, de los nombres de los autores, del menú principal y de textos y gráficos empleados en las diferentes opciones que ofrece el prototipo.
- Limpiado de la pantalla de texto y de la pantalla gráfica.
- Temporizaciones.
- Medición del nivel de carga de la batería y visualización de dicho nivel en pantalla.
- Control del ingreso a las diferentes opciones del menú principal.
- Ejecución de las opciones principales proporcionadas por el prototipo en el menú principal:
 - ✓ Medición de resistividad del terreno
 - ✓ Medición de humedad y temperatura
 - ✓ Observar y borrar datos
 - ✓ Graficar datos
 - ✓ Envío de datos al computador

Figura 37. Diagrama de flujo del programa principal del DSP.



Fuente: los autores.

Con el fin de proporcionar una mejor comprensión de la programación del DSP, el programa fuente es explicado mediante 8 grandes ítems los cuales relacionan las diferentes funciones y opciones proporcionadas por el prototipo con las subrutinas empleadas en el programa. Los diferentes ítems con sus respectivas subrutinas se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Ítems y subrutinas del programa fuente del DSP.

Ítem	Subrutinas	Descripción
Inicialización y manejo de la pantalla gráfica	ESCRIBIR_DATO	Envía datos a la pantalla
	ESCRIBIR_COMANDO	Envía comandos a la pantalla
	LIMPIAR_PANTALLA_TEXTO	Borra toda la pantalla de texto
	LIMPIAR_PANTALLA_GRAFICA	Borra toda la pantalla gráfica
	POSICION_CURSOR	Selecciona la posición y dirección de movimiento del cursor.
	ESCRIBIR_TEXTO	Desplegar textos en la pantalla
	LOGOS	Permite visualización el logo UIS y el nombre del prototipo en la pantalla
Menú principal	MENU_PRINCIPAL	Escribe el menú principal en la pantalla, mide el nivel de carga de la batería y permite su visualización en la pantalla
Medición de resistividad	MEDIR_RESISTIVIDAD	Permite seleccionar el método de medida y el nivel de tensión de inyección.
	METODOWENNER_TEXTO	Presenta en pantalla los textos del método Werner y la gráfica de conexión de los electrodos
	METODOWENNER	Permite seleccionar la distancia entre los electrodos e inicializar la medición de la resistividad utilizando el método Wenner.

	METODOSCHLUMBERGER_TEXTO	Presenta en pantalla los textos del método Schlumberger y la gráfica de conexión de los electrodos
	METODOSCHLUMBERGER	Permite seleccionar la distancia entre los electrodos e inicializar la medición de la resistividad utilizando el método Schlumberger.
	MEDICION_WENNER_SCH	Ejecuta la medición de la resistividad del terreno.
	MEDICIÓN	Realiza las mediciones de corriente y tensión entre los electrodos.
	CODIGO_DISTANCIA	Genera el código ASCII correspondiente al valor de distancia
	CODIGO_RESISTIVIDAD	Genera el código ASCII correspondiente a los valores de resistividad y resistencia.
Medición de Humedad y temperatura	MEDIR_HUMEDAD_TEMPERATURA	Controla la transmisión de datos entre el DSP y el sensor SHT15, calcula la humedad y temperatura relativa y permite guardar las mediciones en la memoria flash
	INICIALIZAR_MEDIDA_HT	Inicializa la transmisión de datos entre el SHT15 y el DSP
	MIDA_HUMEDAD_TEMPERATURA	Recibe los bytes correspondientes a la medición de humedad o temperatura
	COMANDO_TEMPERATURA	Envía el comando de temperatura al SHT15
	COMANDO_HUMEDAD	Envía el comando de humedad al SHT15
	CÓDIGO	Genera el código ASCII correspondiente a los valores de humedad y

		temperatura
	ESCRIBIR_MEDIDA	Escribe en pantalla el código ASCII de los valores de humedad y temperatura.
Graficar datos	GRAFICAR_DATOS	Constituye el programa principal de la opción graficar datos
	EJES	Grafica los ejes de la gráfica
	ORDEN_D_Y_R	Ordena datos de resistividad y distancia. Elimina mediciones no guardadas en la prueba.
	INTERVALOS	Calcula y presenta en pantalla los intervalos de los ejes.
	CODIGO_GRAFICA	Genera el código ASCII de los valores de inicio y fin de cada intervalo.
	numero_D_final	Calculan la posición en la pantalla de los puntos de la gráfica.
	numero_R_final	
	case_escribir_mandar	Modifica los bits del vector filas donde se encuentran los puntos de la gráfica.
	enviar_columnas	Envía a la pantalla los datos almacenados en el vector filas.
	limpiar_byte_filas	Borra el vector filas
Observar y borrar datos	OBSERVAR_DATOS	Permite observar y borrar las 14 pruebas guardadas en la memoria flash de datos.
Descargar datos a LabVIEW	DESCARGAR_LABVIEW	Descarga al computador los datos correspondientes a las 14 pruebas guardadas en la memoria flash.
Otras subrutinas	TEMPORIZACION	Genera esperas de duración mayor o igual a 1 [ms].
	TEMPORIZACION_US	Genera esperas de duración mayor o igual a

		10 [μ s]
	pulsadores	Modificar el número de la prueba de interés seleccionada por el usuario en las diferentes opciones del prototipo.

Fuente: los autores.

A continuación se presenta la descripción de cada uno de los ítems con sus respectivas funciones y subrutinas empleadas.

3.2.1 Inicialización y manejo de la pantalla gráfica LCD

La pantalla gráfica debe ser inicializada y manejada por medio de una serie de comandos proporcionados por el fabricante del controlador SED133F, en la hoja de datos. Por medio de estos comandos es posible realizar diferentes funciones que garanticen el correcto funcionamiento de la pantalla. Dentro de estas funciones se encuentran la inicialización de la pantalla, la configuración de sus capas, selección del generador de caracteres, control de la pantalla, configuración del cursor y control de memoria, entre otras. En la Tabla 20 se puede encontrar una breve descripción de estos comandos con su respectivo código en binario.

Tabla 20. Descripción de los comandos del controlador de la pantalla.

CLASE	COMANDO	CODIGO EN BINARIO								DESCRIPCIÓN
		D 7	D 6	B 5	D 4	D 3	D 2	D 1	D 0	
Control del sistema	SYSTEM SET	0	1	0	0	0	0	0	0	Inicializa el dispositivo, selecciona el generador de caracteres y el método de manejo de la LCD, configura el tamaño de los caracteres y el tamaño de ventana, entre otras.
	SLEEP IN	0	1	0	1	0	0	1	1	Detiene todas las operaciones internas de la LCD.
Control del Display	DISP ON/OFF	0	1	0	1	1	0	0	D	Prende o apaga la pantalla. Habilita o deshabilita el cursor y selecciona su tasa de destello.

	SCROLL	0	1	0	0	0	1	0	0	Selecciona la dirección de inicio de cada bloque de la pantalla y el número de líneas por bloque.
	CSRFORM	0	1	0	1	1	1	0	1	Selecciona el tamaño del cursor, su modo de display.
	CGRAM ADR	0	1	0	1	1	1	0	0	Selecciona la dirección de inicio de la RAM generadora de caracteres.
	CSRDIR	0	1	0	0	1	1	$\begin{matrix} C \\ D \end{matrix}$	$\begin{matrix} C \\ D \end{matrix}$	Selecciona la dirección del movimiento del cursor.
	HDOT SCR	0	1	0	1	1	0	1	0	Permite a la pantalla hacer un barrido horizontal por píxeles.
	OVLAY	0	1	0	1	1	0	1	1	Selecciona el método de composición en capas de la pantalla y el modo de cada una de sus capas.
Control de dibujo	CSRW	0	1	0	0	0	1	1	0	Se utiliza para seleccionar la posición del cursor.
	CSRR	0	1	0	0	0	1	1	1	Es utilizado para leer la dirección de cursor.
Control de memoria	MWRITE	0	1	0	0	0	0	1	0	Escribe en la memoria de la pantalla.
	MREAD	0	1	0	0	0	0	1	1	Lee desde la memoria de la pantalla.

Fuente: SED1330F/1335F/1336F, LCD Controller ICs Technical Manual.

➤ Configuración de la pantalla gráfica

La pantalla LCD se encuentra compuesta de tres capas superpuestas. La primera capa puede ser configurada como pantalla de texto o gráfica y las otras dos capas sólo pueden ser configuradas como pantallas gráficas. Sin embargo, si se configura la primera capa como pantalla de texto, la tercera capa no puede ser utilizada.

Con el fin de poder combinar tanto texto como gráficas, el prototipo MRS V2.0 emplea la capa 1 de la pantalla configurada como texto y la capa 2 como pantalla gráfica. La capa 3 no es utilizada. Esta configuración se realiza mediante el comando OVLAY descrito en la Tabla 20.

El método de composición de las capas de la pantalla puede ser OR, AND, Exclusive-OR o Priority-OR. En la Tabla 21, se muestran las funciones que

realizan cada uno de estos métodos según el manual técnico del controlador de la pantalla.

Tabla 21. Método de composición de la pantalla.

Método de composición	Función
OR	$L1 \sqcup L2 \sqcup L3$
Exclusive-OR	$(L1 \sqcup L2) \sqcap L3$
AND	$(L1 \sqcap L2) \sqcap L3$
Priority-OR	$L1 > L2 > L3$

L1: Primera capa. Puede ser de texto o gráfica. Si se selecciona texto, la capa 3 no puede ser utilizada.
 L2: Segunda capa. Solo gráfica.
 L3: Tercera capa. Solo gráfica

Fuente: SED1330F/1335F/1336F, LCD Controller ICs Technical Manual.

El método que se utiliza en el prototipo es el OR con el fin de poder presentar gráficas y textos al mismo tiempo en la pantalla. Este método también se configura mediante el comando OVLAY.

El prototipo MRS V2.0 utiliza el generador interno de caracteres, el cual es configurado mediante el comando SYSTEM SET descrito en la Tabla 20. Este generador contiene 160 caracteres diseñados previamente por el fabricante del controlador con un formato de visualización de carácter de 5x7 píxeles. En la Figura 38, se observan los 160 caracteres con su respectivo código hexadecimal. Para una mayor facilidad, es posible trabajar internamente con el código ASCII de cada uno de estos caracteres.

Figura 38. Caracteres proporcionados por el generador interno.

		Character code bits 0 to 3																	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F		
Character code bits 4 to 7	2	!	"	#	\$	%	&	'	()	*	+	,	-	.	/			
	3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?		
	4	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O		
	5	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[\]	^	_		
	6	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o		
	7	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{		}	~	*		
	A	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F		
	B	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F		
	C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F		
	D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F		
	1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F		

Fuente: Manual Técnico del controlador SED1330F.

Figura 40. Configuración de la pantalla gráfica.



Fuente: los autores.

➤ Rutina de inicialización de la pantalla gráfica

Para inicializar la pantalla LCD es necesario seguir una rutina propuesta por el fabricante del controlador SED133F en la hoja de datos. Este procedimiento de inicialización también se encarga de configurar la pantalla según el interés del usuario.

El procedimiento empleado en el prototipo MRS V2.0 para inicializar la pantalla se describe en la Tabla 22.

Tabla 22. Rutina de inicialización de la pantalla gráfica.

Comando/Dato	Descripción
<p>SYSTEM SET C = 0x40 P1 = 0x30</p> <p>P2 = 0x87 P3 = 0x07 P4 = 0x4F P5 = 0x52 P6 = 0x7F P7 = 0x20 P8 = 0x00</p>	<p>Inicialización del dispositivo</p> <p>Selecciona el generador interno de caracteres Alto carácter = 8 píxeles Manejo de panel sencillo Modo : LCD Ancho del carácter = 8 píxeles. Alto del carácter = 8 píxeles.</p> <p>Líneas de display = 128 Pantalla virtual de 32 direcciones</p>
<p>SCROLL C = 0x44 P1 = 0x00 P2 = 0x00 P3 = 0x7F P4 = 0x00 P5 = 0x10 P6 = 0x7F P7 = 0x00 P8 = 0x20</p>	<p>Escoge la dirección de inicio de cada bloque de la pantalla y el número de líneas por bloque</p> <p>Dirección de inicio pantalla 1</p> <p>Número de líneas pantalla 1= 128 Dirección de inicio pantalla 2</p> <p>Número de líneas pantalla 2= 128 Dirección de inicio pantalla 3</p>
<p>HDOT SCR C = 0x5A P1=0x00</p>	<p>Tamaño barrido horizontal</p> <p>Ajusta el tamaño de barrido horizontal a 0</p>
<p>OVLAY C= 0x5B P1=0x01</p>	<p>Composición de la pantalla</p> <p>Método de composición OR Composición de dos capas Capa 1 = texto, Capa 2=gráfica.</p>
<p>DIS ON/OFF C = 0x58 P1 = 0x56</p>	<p>Apaga o prende el display y el cursor.</p> <p>Apaga el display Habilita el cursor, destello a 2Hz. Selecciona que el Display no destelle.</p>
<p>LIMPIAR_PANTALLA_TEXTO LIMPIAR_PANTALLA_GRAFICA</p>	<p>Llena la capa de texto de espacios Llena la pantalla gráfica de 0x00</p>

CSRFORM C = 0x5D P1 = 0x04 P2 = 0x86	Selecciona el tipo de cursor Ancho del cursor = 5 píxeles Forma del cursor = bloque Alto del cursor = 7 píxeles
CSRDIR C = 0x4C	Selecciona la dirección de movimiento del cursor Dirección = derecha
DISP ON/OFF C = 0x59 P1 = 0x54	Habilita el Display

Fuente: Hoja de datos del controlador SED133F.

➤ Subrutina ESCRIBIR_DATO:

Esta subrutina se encuentra encargada del envío de datos a la pantalla gráfica, lo cual se consigue por medio de la utilización de la interfaz periférica serial (SPI) y por dos terminales de salida, A0 y WR, configurados como salidas de propósito general.

➤ Subrutina ESCRIBIR_COMANDO

Esta subrutina se encuentra encargada del envío de comandos a la pantalla gráfica. Para el envío de estos comandos también se emplea el módulo SPI y los terminales de salida A0 y WR configurados como salidas de propósito general.

➤ Subrutina LIMPIAR_PANTALLA_TEXTO

Esta subrutina se emplea para borrar toda la pantalla de texto, lo cual se consigue enviando a todas las posiciones de dicha pantalla datos de valor 0x20.

➤ Subrutina LIMPIAR_PANTALLA_GRAFICA

Esta subrutina se utiliza para borrar la pantalla gráfica. Esta operación se consigue enviando a todas las posiciones de dicha pantalla datos de valor 0x00.

➤ Subrutina POSICION_CURSOR

La subrutina POSICION_CURSOR se emplea para seleccionar la posición y la dirección de movimiento del cursor. Para seleccionar la posición del cursor se emplea el comando CSRW. Para escoger la dirección de movimiento es usado el comando CSRDIR. Estos dos comandos se exponen en la Tabla 20.

➤ Subrutina ESCRIBIR_TEXTO

Esta subrutina es utilizada para escribir textos en cualquier posición de la pantalla, lo cual se consigue enviando el código en ASCII de cada uno de los caracteres que se necesita desplegar. Es posible utilizar los 160 caracteres del generador interno proporcionado por el controlador SED133F, los cuales se muestran en la Figura 38.

➤ Subrutina LOGOS

Mediante esta subrutina es posible graficar en pantalla el logo de la UIS y el nombre del prototipo MRS V2.0.

Para realizar la gráfica del logo UIS se emplean los vectores de bytes UNIV y UIS definidos al inicio del programa. Estos vectores contienen los datos que deben ser enviados a la pantalla para graficar el logo. En la Figura 41, se puede observar el logo UIS graficado en la pantalla. Este logo es presentado en pantalla en el momento en que se enciende el equipo.

Figura 41. Visualización del Logo UIS en la pantalla gráfica.



Fuente: los autores.

Para realizar la gráfica del nombre del prototipo MRS V2.0 se emplea el vector de bytes MRS que también es definido al inicio del programa. El nombre del MRS es presentado en pantalla junto con los nombres de los autores del prototipo según se observa en la Figura 42. Esta visualización en pantalla es presentada después de que el logo UIS es borrado.

Figura 42. Visualización del nombre del MRS V2.0 y de los nombres de sus autores.



Fuente: los autores.

3.2.2 Menú principal

El menú principal es empleado para realizar en general dos funciones:

- Permitir al usuario el ingreso a las 5 opciones principales del prototipo (Medición de resistividad del terreno, medición de humedad y temperatura, observar y borrar datos, graficar datos y descargar datos a LabVIEW).
- Medir el nivel de carga de la batería y permitir su visualización en pantalla.

Mediante el uso de los pulsadores ARRIBA y ABAJO, el usuario tiene la posibilidad de escoger la opción que desea realizar. Para ingresar a la opción escogida es necesario oprimir el pulsador ENTER. Este control de ingreso a las diferentes opciones del prototipo se realiza en el programa principal del DSP.

- Subrutina MENU_PRINCIPAL

Esta subrutina se encuentra encargada de realizar las siguientes funciones:

- ✓ Desplegar en la pantalla el texto correspondiente al menú principal el cual incluye las 5 opciones ofrecidas por el prototipo, tal como se observa en la Figura 43.
- ✓ Realizar la medición del nivel de carga de la batería y permitir la visualización del porcentaje de carga en la pantalla, tal como se observa en la Figura 43.

Figura 43. Visualización del menú principal y del porcentaje de carga de la batería



Fuente: los autores.

La medición del nivel de carga de la batería se realiza mediante el uso del canal 1 del convertidor analógico-digital. Según el nivel de tensión medido por el convertidor, se despliega en la pantalla el porcentaje de carga de la batería, el cual puede tomar sólo 5 posibles valores: 100% (si la tensión de batería es mayor a 13V), 75% (si la tensión se encuentra entre 12.5 y 13 V), 50% (si la tensión se encuentra entre 12 y 12.5 V), 25% (si la tensión se encuentra entre 11.5 y 12V) o 0% (si la tensión es menor a 11.3 V).

3.2.3 Medición de resistividad

Esta opción permite al usuario realizar la medición de la resistividad del terreno, ya sea por medio del método Wenner o por el método Schlumberger. Además proporciona una interfaz amigable en la pantalla gráfica la cual facilita al usuario la interacción con las diferentes opciones de medida, tales como: selección del método de medida y del nivel de tensión de inyección, selección de la distancia entre los electrodos y del guardado de datos en la memoria flash, entre otras.

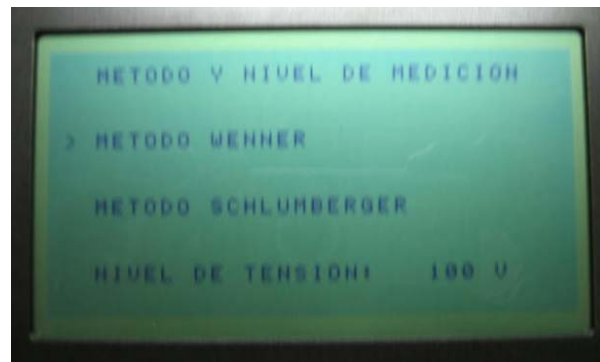
Las subrutinas empleadas para llevar a cabo la medición de la resistividad del terreno se describen a continuación:

➤ Subrutina MEDIR_RESISTIVIDAD

Esta subrutina tiene por función permitir al usuario escoger el método de medida empleado para realizar la medición de resistividad y seleccionar el nivel de tensión de inyección al terreno.

Para la selección de cada una de las opciones de medida se emplean los 4 pulsadores y una interfaz realizada en la pantalla gráfica que facilita al usuario la selección. En la Figura 44, se puede observar la interfaz gráfica empleada para tal propósito.

Figura 44. Interfaz empleada para seleccionar el método de medición y el nivel de tensión de inyección



Fuente: los autores

Los métodos de medición ofrecidos por el prototipo son: El método Wenner y el método Schlumberger. Si el usuario selecciona el método wenner, la subrutina próxima a ejecutarse en el programa es la denominada “METODOWENNER”. Si de lo contrario, el método escogido es el Schlumberger, la subrutina a ejecutarse será la denominada “METODOSCHLUMBERGER”. Estas subrutinas se explican más adelante en esta misma sección.

Los niveles de tensión de inyección al terreno que ofrece el prototipo son: 100, 200 y 300 [V]. Este nivel de tensión es guardado en la variable global “nivel_tensión” y es utilizado más adelante para calcular el ancho de los pulsos de las señales PWM que controlan el puente inversor encargado de la generación de dicha tensión.

➤ Subrutinas METODOWENNER y METODOWENNER_TEXTO

Estas subrutinas están encargadas de permitirle al usuario seleccionar la distancia entre los electrodos de medida e inicializar la medición de la resistividad del terreno utilizando el método Werner.

La subrutina “METODOWENNER_TEXTO” tiene por función presentar en pantalla los textos relacionados con el método de medición Werner y la gráfica correspondiente a la forma de conexión de los electrodos de medida. La presentación en pantalla realizada por esta subrutina se puede observar en la Figura 45.

Figura 45. Visualización en pantalla del Método Wenner.



Fuente: los autores

Mediante la subrutina “METODOWENNER” el usuario tiene la posibilidad de modificar la distancia “a” entre los electrodos de medida. Para realizar dicha modificación se deben emplear los pulsadores. La distancia puede ser aumentada o disminuida con un paso de 0.5 [m].

La subrutina “METODOWENNER” también permite la inicialización de la medición de la resistividad del terreno por medio de la opción denominada “MEDIR RESISTIVIDAD”. Al escoger esta opción la subrutina próxima a ejecutarse es la llamada “MEDICION_WENNER_SCH”, la cual se describe más adelante en esta misma sección.

➤ Subrutinas METODOSCHLUMBERGER y METODOSCHLUMBERGER_TEXTO

Estas subrutinas le permiten al usuario seleccionar las distancias (a y b) entre los electrodos de medida e inicializar la medición de la resistividad del terreno utilizando el método Schlumberger.

La subrutina “METODOSCHLUMBERGER_TEXTO” presenta en pantalla los textos relacionados con el método de medición Schlumberger y la gráfica correspondiente a la forma de conexión de los electrodos de medida. La presentación en pantalla realizada por esta subrutina se muestra en la Figura 46.

Mediante la subrutina “METODOSCHLUMBERGER” es posible modificar las distancias “a” y “b” entre los electrodos de medida. Esta modificación también se realiza mediante el empleo de los pulsadores. Las distancias pueden ser aumentadas o disminuidas con un paso de 0.5 [m].

Figura 46. Visualización en pantalla del Método Schlumberger.



Fuente: los autores.

Al igual que para el método Wenner, la subrutina “METODOSCHLUMBERGER” permite inicializar la medición de la resistividad del terreno por medio de la opción “MEDIR RESISTIVIDAD”. Al escoger esta opción, la subrutina próxima a ejecutarse también es la llamada “MEDICION_WENNER_SCH”.

➤ Subrutinas MEDICION_WENNER_SCH y MEDICION

Por medio de estas subrutinas se lleva a cabo la medición de la resistividad del terreno. En general, estas rutinas se encuentran encargadas de realizar los siguientes pasos:

- ✓ Encender las fuentes de alimentación temporales.
- ✓ En caso de que la tensión entre los electrodos de medida sea negativa, se debe conmutar el relé encargado del cambio de la polaridad.
- ✓ Medir el voltaje de polarización espontánea del terreno.
- ✓ Configurar el ancho del pulso de las señales PWM del puente inversor según el nivel de tensión de inyección escogida por el usuario.
- ✓ Habilitar las señales PWM del puente inversor para cargar el condensador.
- ✓ Esperar 8 segundos a que el condensador sea cargado.
- ✓ Colocar la señal de INYECCION en bajo para inyectar la tensión al terreno.
- ✓ Apagar las señales PWM del puente.
- ✓ Esperar 75 ms para verificar la polaridad de la tensión entre los electrodos de medida.
- ✓ En caso de que la tensión entre los electrodos de medida sea negativa, se debe conmutar el relé encargado de cambiar la polaridad.
- ✓ Esperar 75 ms para realizar la medición.
- ✓ Realizar 50 mediciones por medio de los canales 0, 4, 5 y 6 del ADC.
- ✓ Promediar las mediciones realizadas por el ADC.

- ✓ A partir del valor medido por el canal 0 del ADC, se calcula el valor de la corriente entre los electrodos de inyección.
- ✓ A partir del valor medido por los canales 4,5 y 6 del ADC, se calcula el valor de la tensión entre los electrodos de medición, para cada uno de los rangos de medida.
- ✓ Selecciona el rango de medición de tensión.
- ✓ Coloca la señal de INYECCION en alta.
- ✓ Apaga las fuentes de alimentación temporales.
- ✓ Realiza la compensación del voltaje de polarización espontáneo.
- ✓ Calcula la resistencia y la resistividad del terreno dependiendo del método de medición utilizado (Wenner o Schlumberger).
- ✓ Presenta en pantalla los datos de distancia, resistencia y resistividad del terreno.

Al finalizar la medición, la rutina presenta al usuario la opción de guardar las mediciones en la memoria flash. El usuario tiene la opción de escoger la prueba en la cual desea guardar los datos.

➤ Subrutina CODIGO_DISTANCIA

Esta subrutina se emplea para generar el código ASCII correspondiente a la distancia (a o b) escogida por el usuario en los métodos de medición, con el fin de poder presentar su valor en la pantalla.

➤ Subrutina CODIGO_RESISTIVIDAD

Esta subrutina se encarga de generar el código ASCII correspondiente a las medidas de resistividad y resistencia, con el fin de poder presentar dichos valores en la pantalla.

3.2.4 Medición de humedad y temperatura

Esta opción permite al usuario realizar la medición de la humedad y de la temperatura relativa del terreno y ofrece la posibilidad de guardar estas mediciones en la memoria flash de datos del DSP. La medición de estas variables se realiza mediante el sensor SHT15. En la sección 2.12.1 se describe detalladamente la transmisión de datos necesaria entre el DSP y el SHT15, para poder efectuar dichas mediciones.

Las subrutinas empleadas para llevar a cabo la medición de la humedad y de la temperatura se describen a continuación:

➤ Subrutina MEDIR_HUMEDAD_TEMPERATURA

Esta subrutina se encarga de ejecutar las siguientes funciones: Controlar la transmisión de datos entre el DSP y el SHT15, calcular los valores físicos de la humedad y de la temperatura relativa a partir de los datos enviados por el sensor, presentar en pantalla los resultados de las mediciones y permitir al usuario la posibilidad de guardar los datos en la memoria flash. Para llevar a cabo todas estas funciones, esta rutina hace uso de las siguientes subrutinas: "INICIALIZAR_MEDIDA_HT", "MIDA_HUMEDAD_TEMPERATURA", "COMANDO_TEMPERATURA", "COMANDO_HUMEDAD", "CODIGO" y "ESCRIBIR_MEDIDA", las cuales se exponen más adelante en esta misma sección.

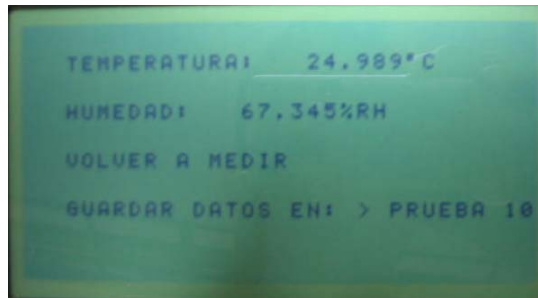
Los pasos realizados por la subrutina son:

- ✓ Inicializar la comunicación entre el DSP y el SHT15.
- ✓ Enviar el comando de temperatura al SHT15 para que este ejecute la medición.
- ✓ Esperar el ACK de confirmación, enviado por el sensor para confirmar la recepción del comando. Si el ACK no es enviado, la subrutina informa al usuario la ocurrencia de un error en la transmisión y finaliza la medida.
- ✓ Recibir dos bytes enviados por el SHT15 correspondientes a la medición de la temperatura.
- ✓ Finalizar la transmisión de la medición.
- ✓ Inicializar de nuevo la comunicación entre el DSP y el SHT15.
- ✓ Enviar el comando de humedad al SHT15 para que este ejecute la medición.
- ✓ Esperar de nuevo el ACK de confirmación, enviado por el sensor para confirmar la recepción del comando. Si el ACK no es enviado, la subrutina informa al usuario la ocurrencia de un error en la transmisión y finaliza la medida.
- ✓ Recibir dos bytes enviados por el SHT15 correspondientes a la medición de la humedad.
- ✓ Finalizar la transmisión de datos entre el DSP y el SHT15.
- ✓ Calcular los valores físicos de la humedad y de la temperatura relativa.
- ✓ Presentar en pantalla los resultados de las mediciones.

Al finalizar la medición, esta subrutina presenta al usuario dos opciones: Guardar las mediciones en la memoria flash y volver a realizar la medición. En la opción encargada de guardar la medición, el usuario puede escoger la prueba en la cual desea guardar los datos.

En la Figura 47, se muestra un ejemplo de la presentación en pantalla de los resultados de una medición de humedad y temperatura.

Figura 47. Presentación en pantalla de las mediciones de Humedad y temperatura



Fuente: los autores.

➤ Subrutina INICIALIZAR_MEDIDA_HT

Esta subrutina tiene como función inicializar la transmisión de datos entre el sensor SHT15 y el DSP.

➤ Subrutina COMANDO_TEMPERATURA

Mediante esta subrutina se envía el comando de temperatura (0000011) al SHT15 para que este ejecute la medición.

➤ Subrutina COMANDO_HUMEDAD

Esta subrutina está encargada de enviar el comando de humedad (00000101) al SHT15 para que este ejecute la medición.

➤ Subrutina MIDA_HUMEDAD_TEMPERATURA

Mediante esta subrutina son recibidos los dos bytes de información enviados por el sensor SHT15 al DSP. Estos dos bytes traen los resultados de la medición de temperatura o de humedad.

Esta subrutina también se encarga de finalizar la transmisión de datos entre el SHT15 y el DSP, lo cual se logra colocando un alto en la línea de datos.

➤ Subrutina CODIGO

Esta subrutina se emplea para generar el código ASCII correspondiente a las medidas de humedad y temperatura, con el fin de poder presentar dichos valores en la pantalla.

➤ Subrutina ESCRIBIR_MEDIDA

Esta subrutina tiene como función escribir en la pantalla de texto el código en ASCII correspondiente a las medidas de humedad y temperatura.

3.2.5 Graficar datos

Esta opción permite al usuario graficar el perfil de resistividad de cualquiera de las 14 pruebas guardadas en la memoria flash de datos.

La gráfica del perfil de resistividad presenta en el eje de las abscisas, los datos de la distancia entre los electrodos de medida y en el eje de las ordenadas, los datos de resistividad.

Los datos de distancia empleados para graficar el perfil de resistividad dependen del método empleado para realizar la prueba. En el caso del método Werner, se grafica la distancia a y en el caso del método Schlumberger se grafica la distancia b.

A continuación se describen las subrutinas empleadas para graficar dicho perfil.

➤ Subrutina GRÁFICAR_DATOS

Esta subrutina constituye el programa principal de la opción graficar datos y está encargada de realizar el perfil de resistividad de la prueba seleccionada por el usuario. Para llevar a cabo esta función, esta rutina hace uso de las demás subrutinas explicadas en esta misma sección.

Los pasos realizados por la subrutina “GRAFICAR_DATOS” se describen a continuación:

- ✓ Permite al usuario la selección de la prueba a graficar.
- ✓ Obtiene los datos de resistividad y distancia de la memoria flash.
- ✓ Escribe en pantalla el nombre de los ejes y sus unidades.
- ✓ Grafica los ejes.
- ✓ Elimina los ceros de los datos de resistividad y distancia los cuales corresponden a mediciones no guardadas por el usuario.
- ✓ Ordena los datos de resistividad y distancia de menor a mayor.
- ✓ Calcula los intervalos de los ejes y los escribe en la pantalla.

- ✓ Calcula el paso de distancia y el paso de resistividad con el fin de identificar a cuanta distancia y a cuanta resistividad equivale cada píxel de la pantalla.
- ✓ Realiza la gráfica del perfil de resistividad. Para calcular todos los puntos (píxeles) por los cuales pasa la gráfica, se realiza una interpolación lineal, es decir, se calcula la ecuación de la recta que pasa por cada dos puntos consecutivos (datos de resistividad y distancia) y a partir de esta ecuación, se obtienen los demás puntos de la gráfica.

En la Figura 48, se presenta un ejemplo de la gráfica correspondiente a un perfil de resistividad.

Figura 48. Gráfica del perfil de resistividad



Fuente: los autores.

➤ Subrutina EJES

Mediante esta subrutina se grafican los dos ejes (eje de las abscisas y eje de las ordenadas) en la pantalla. Estos ejes siempre son fijos para todas las gráficas.

➤ Subrutina ORDEN_D_Y_R

Esta subrutina se emplea para ordenar los datos de resistividad y distancia de menor a mayor, con el fin de obtener un orden fijo para poder realizar posteriormente la grafica.

Por medio de esta subrutina también se eliminan los datos de valor cero, los cuales corresponden a mediciones no guardadas por el usuario en la prueba.

➤ Subrutina INTERVALOS

Mediante esta subrutina se calculan los intervalos correspondientes a los dos ejes. Para el eje de las distancias se calculan 6 intervalos y para el eje de la resistividad

se calculan 5. Después de realizado dicho cálculo, se escriben en la pantalla los valores de inicio y fin de cada intervalo, para cada uno de los ejes.

➤ Subrutina CODIGO_GRAFICA

Esta subrutina se emplea para generar el código ASCII correspondiente a los valores de inicio y fin de cada intervalo, con el fin de poder presentar dichos valores en la pantalla.

➤ Subrutina numero_D_final y numero_R_final

Estas subrutinas son empleadas para calcular la posición en la pantalla de los puntos de la gráfica encontrados por medio de la interpolación lineal.

➤ Subrutina case_escribir_mandar

El vector denominado “filas” contiene la información de los datos que se deben escribir en la pantalla para poder lograr la gráfica del perfil de resistividad. La subrutina “case_escribir_mandar” se encuentra encargada de colocar en uno de los bits del vector filas que corresponden a los puntos de la gráfica.

➤ Subrutina enviar_columnas

Esta subrutina se encarga de enviar a la pantalla los datos almacenados en el vector filas con el fin de presentar en la pantalla los puntos pertenecientes a la gráfica del perfil de resistividad.

➤ Subrutina limpiar_byte_filas

Esta subrutina tiene como función borrar por completo todas las posiciones del vector filas.

3.2.6 Observar y borrar datos

Esta opción es ejecutada por medio de la subrutina OBSERVAR_DATOS.

➤ Subrutina OBSERVAR_DATOS

La subrutina OBSERVAR_DATOS está encargada de proporcionar al usuario la posibilidad de observar y borrar las 14 pruebas guardadas en la memoria flash de datos.

El usuario debe seleccionar la prueba que desea observar o borrar, lo cual se consigue por medio de los pulsadores (ENTRAR, ATRÁS, ARRIBA y ABAJO).

Si se selecciona la opción observar prueba, los datos correspondientes a la prueba seleccionada (50 datos de resistividad, 50 datos de distancia, 1 dato de humedad y 1 dato de temperatura) son mostrados en la pantalla gráfica.

Si la opción que se selecciona es la de borrar prueba, el sector de la memoria flash en el cual se encuentra guardada la prueba seleccionada, es borrado.

3.2.7 Descargar datos a LabVIEW

Esta opción es ejecutada por medio de la subrutina DESCARGAR_LABVIEW.

➤ Subrutina DESCARGAR_LABVIEW

Esta subrutina tiene como función enviar al computador los datos almacenados en la memoria flash del DSP.

Para realizar el envío de datos, se emplea la interfaz de comunicación serial (SCI), la cual permite realizar una comunicación serial asíncrona entre el DSP y el computador. Los datos son recibidos en el PC por medio de una aplicación de software realizada en LabVIEW, la cual se describe en la sección 3.3.

Los pasos realizados por esta subrutina para descargar los datos al PC son:

- ✓ Indicar al usuario que el DSP se encuentra listo para transferir datos.
- ✓ Esperar la señal de inicio de descarga de datos enviada por el PC.
- ✓ Enviar los datos correspondientes a las 14 pruebas e indicar al usuario que el DSP se encuentra transfiriendo los datos al PC.
- ✓ Indicar al usuario que los datos fueron descargados.

En la Figura 49 se puede observar la interfaz gráfica realizada en la pantalla LCD para realizar la descarga de datos.

Figura 49. Interfaz gráfica de la descarga de datos al PC.



Fuente: los autores.

3.2.8 Otras subrutinas

Las siguientes subrutinas son empleadas en el transcurso del programa fuente del DSP:

➤ Subrutinas TEMPORIZACION y TEMPORIZACION_US

Mediante estas subrutinas es posible generar esperas de diferentes duraciones. Para conseguir dichas esperas se emplean las interrupciones periódicas TI1 y TI2, las cuales se exponen en la sección 3.1.7. La subrutina TEMPORIZACION genera esperas de duración mayor o igual a 1 [ms] y la subrutina TEMPORIZACION_US genera esperas de duración mayor o igual a 10 [μs].

➤ Subrutina pulsadores

La subrutina pulsadores es empleada por las diferentes opciones ofrecidas por el prototipo para modificar el número de la prueba de interés seleccionada por el usuario.

3.3 APLICACIÓN EN LABVIEW

La aplicación de LabVIEW recibe todos los datos almacenados en la memoria flash de datos del MRS, los muestra en una gráfica y realiza la corrección de Albretch.

Una gran ventaja de LabVIEW sobre otros programas de recepción de datos es que una aplicación de gran tamaño se puede reducir en un solo cuadro con sus respectivas entradas y salidas, conocido como subVI, lo cual permite una mejor visualización de las etapas del mismo, además posee una opción que permite ver

los pasos que sigue el programa, el tamaño de los vectores si los hay, los valores individuales de variables en cada parte del proceso, etc. Para mayor información de LabVIEW y los subVIs propios del programa por favor refiérase al anexo C

3.3.1 SubVI utilizado:

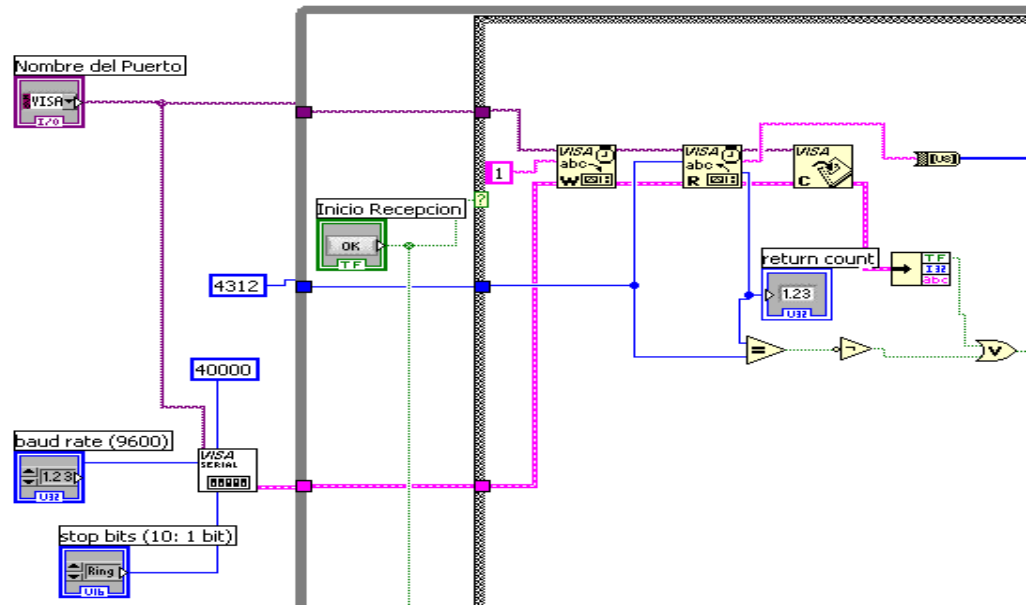
RECEPCION DE DATOS

Recepcion.VI: Permite recibir y ordenar todos los datos provenientes del dispositivo en vectores individuales según sea su orden de llegada, además los “empaca” en clusters independientes; posee 2 entradas y 15 salidas que están distribuidas de la siguiente forma: una entrada es el nombre del puerto al cual está conectado el dispositivo y la otra es una señal que debe dar el usuario presionando un interruptor para iniciar la descarga ya que sin ella el aplicación se ejecutaría a la velocidad del computador y no permitiría la elección del puerto correcto. Las salidas son 14 clusters en los que van “empacados” los datos de resistividad, distancia, humedad y temperatura de cada prueba y una salida booleana que sirve para detener la ejecución del aplicación en caso de un error en la comunicación con el dispositivo.

3.3.2 Software para la recepción de datos:

Para la recepción de los datos se utilizó el algoritmo mostrado en la Figura 50.

Figura 50 Algoritmo utilizado para la recepción de los datos.



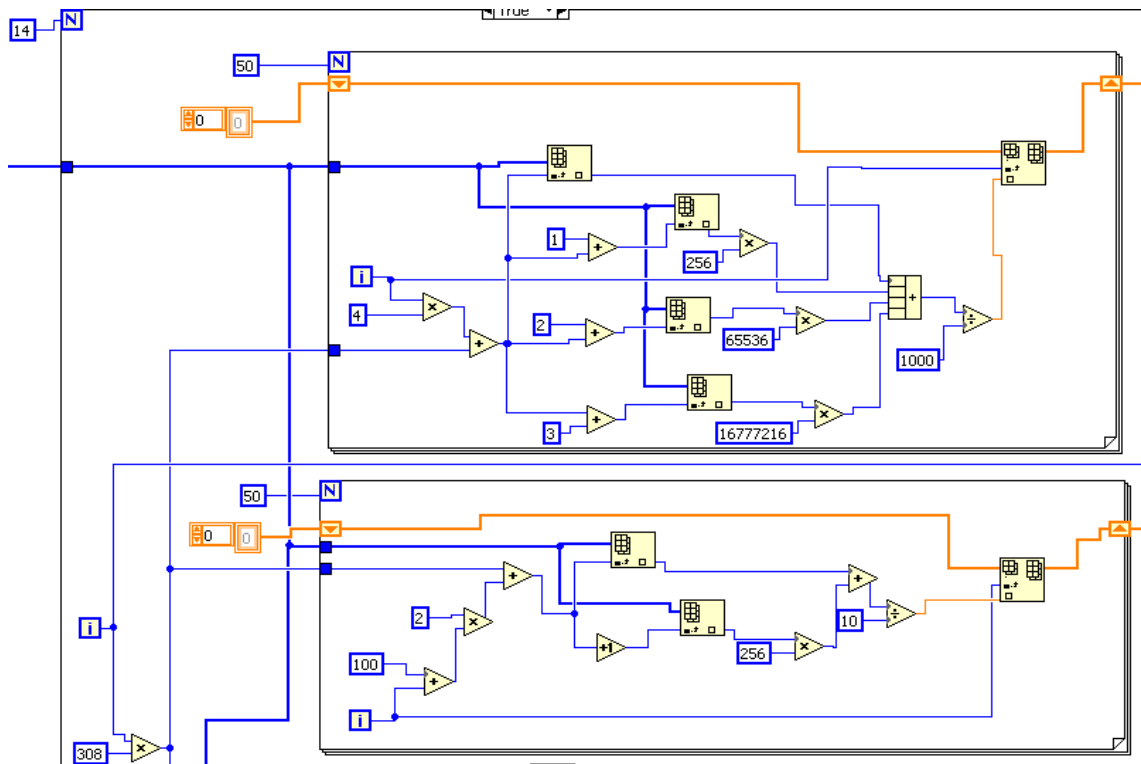
Fuente: los autores.

Se reciben en total 4312 datos del equipo, en paquetes de 8 bits, los cuales equivalen cada uno a una letra en código ASCII, y cada valor enviado desde el equipo, ya sea de resistividad, distancia, humedad o temperatura tiene una cantidad de bytes asignados determinada de acuerdo a la precisión necesaria, además se recibe el valor máximo del byte cuando en éste no se ha escrito nada. Para iniciar la descarga el PC le envía el código ASCII equivalente del número 1 al dispositivo para iniciar la transmisión. Se configura el puerto escogido de manera que espere los datos 40 segundos, que use dos bits de parada, que use una velocidad de 9600 baudios, y también tiene dos señales de control para verificar si la comunicación fue exitosa los cuales son: Probar si el numero de bytes recibidos es igual al número de los bytes que se esperaba recibir o mandar un booleano con valor falso si la configuración del puerto no fue exitosa.

3.3.3 Software para el tratamiento de los datos recibidos:

Para el tratamiento de los datos se utiliza el esquema mostrado en la Figura 51.

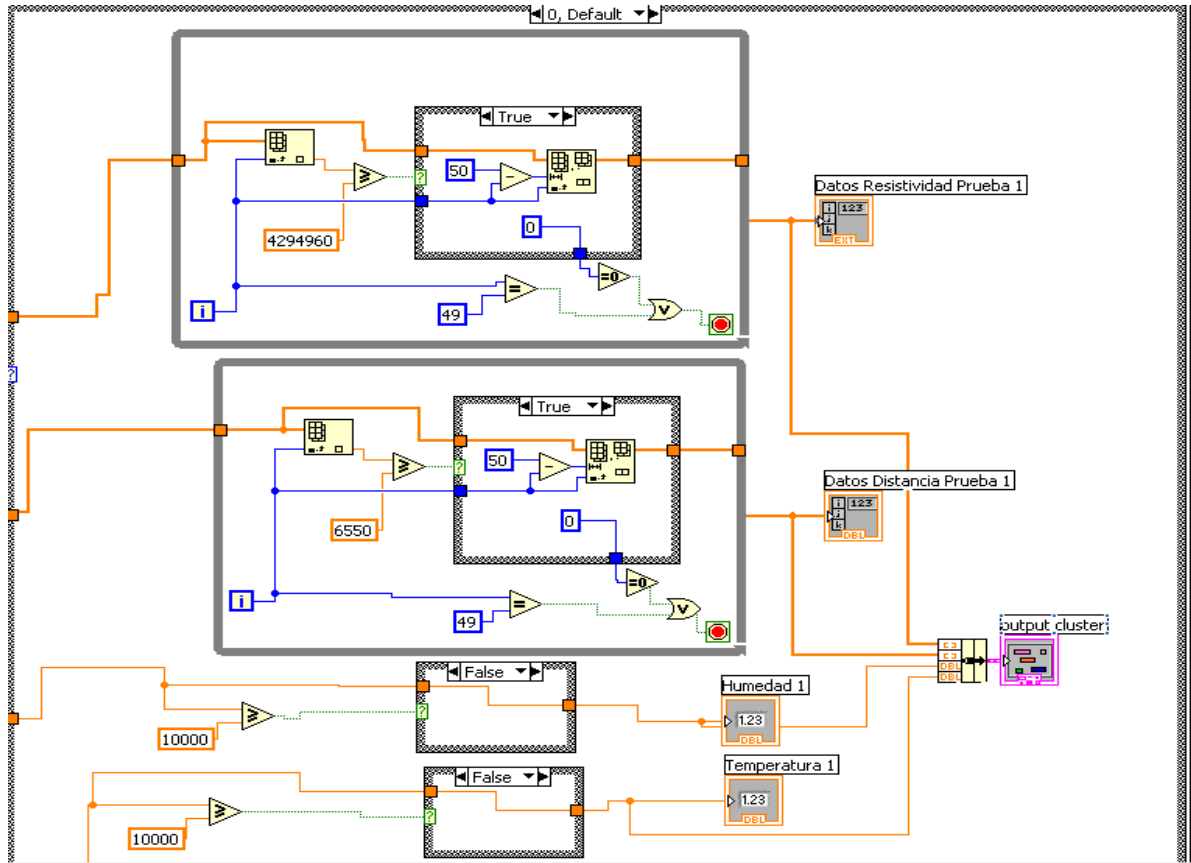
Figura 51. Tratamiento de los datos recibidos



Fuente: los autores.

Se usa el siguiente orden para la recepción: Los primeros 200 bytes equivalen a un dato de resistividad, los siguientes 100 bytes representan la distancia a la cual se toma, 4 bytes del valor de temperatura y 4 bytes del valor de humedad. Éste orden se utiliza para cada una de las pruebas, obteniendo así el total de bytes, luego se toman los primeros 308 bytes recibidos y se concatenan los bytes de resistividad, en grupos de 4, y se dividen entre 1000 para formar los 50 datos originales, luego se reúnen los bytes de distancia en grupos de 2, se dividen entre 10 y se forma el vector original de distancias, luego se reciben 4 bytes de humedad y 4 de temperatura sobre los cuales se efectúa el mismo proceso que se aplicó sobre los de resistividad y así se obtienen todos los datos de una prueba, después se eliminan los datos que no sirven para graficar el perfil de resistividad, es decir los datos que se enviaron desde el DSP pero que no fueron escritos por el usuario, y estos se almacenan en un cluster individual como se indica en la Figura 52.

Figura 52. Eliminación de datos no usados y “empacamiento” de los datos de cada prueba



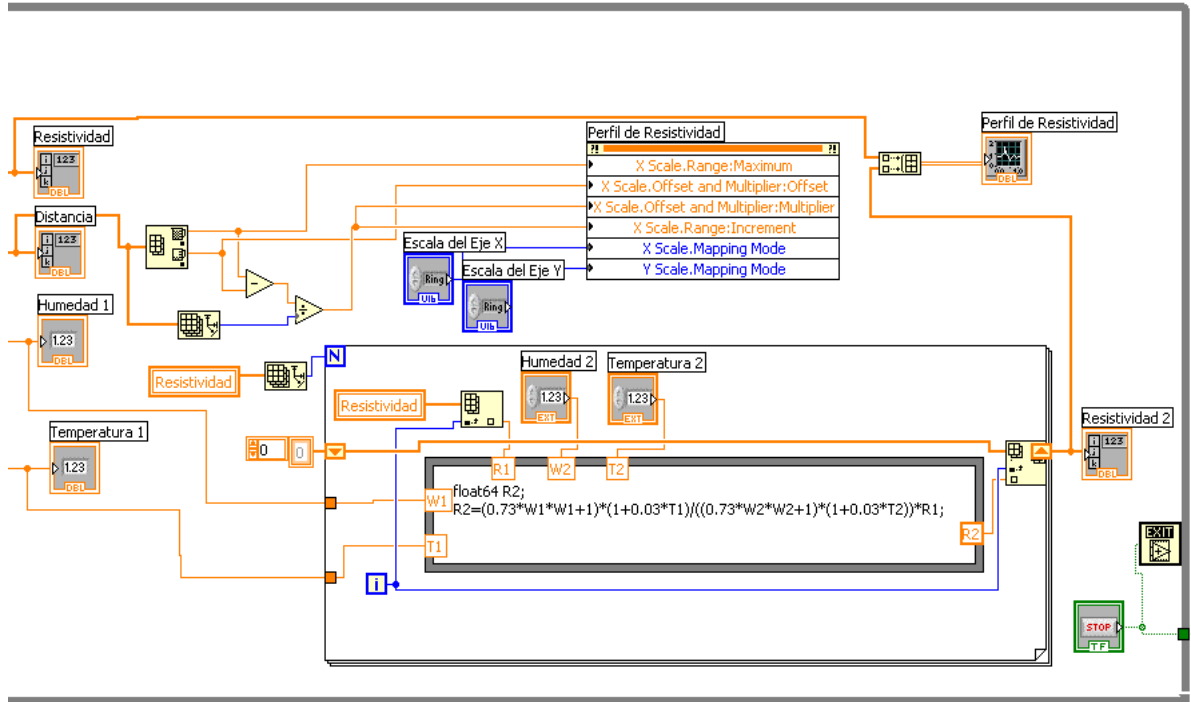
Fuente: los autores.

El mismo proceso se repite 14 veces y se obtienen los datos de las pruebas en clusters individuales, estos datos se muestran en pantalla por medio de vectores en forma de columna que indican los primeros datos de resistividad y distancia, posteriormente se aplica la formula de Albrecht a los datos de resistividad, tomando como T2 y W2 los valores que el usuario ingrese.

3.3.4 Software para la muestra de datos y perfil de resistividad

Con los vectores de resistividad, resistividad modificada y distancia se realiza una gráfica, debidamente escalada de acuerdo a los valores de distancia recibidos, para que el usuario realice un análisis comparativo visual. El algoritmo de esta sección se muestra en la Figura 53.

Figura 53. Corrección de Albretch y realización de una gráfica con fines comparativos

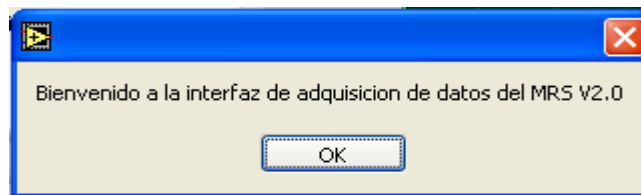


Fuente: los autores.

3.3.5 Descripción del programa

A medida que el programa se ejecuta el usuario observa unos mensajes en pantalla acordes con la acción que debe realizar para continuar la correcta ejecución del mismo. El programa inicia con el mensaje mostrado en la Figura 54.

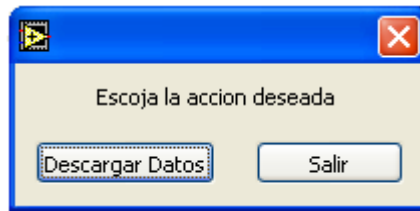
Figura 54. Mensaje inicial



Fuente: los autores.

Tras este mensaje se presenta el menú principal que consiste en dos opciones, descargar datos desde el equipo o salir del programa.

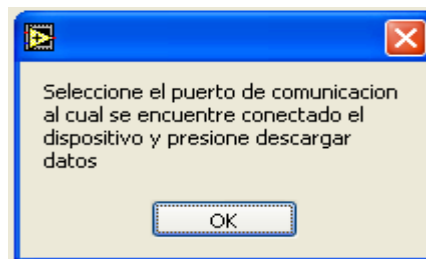
Figura 55. Menú principal de la aplicación



Fuente: los autores.

Cuando el usuario desee descargar los datos aparecerá otro mensaje para indicar que acción debe realizar sobre el panel frontal para continuar operando.

Figura 56. Mensaje indicador de acción a seguir.

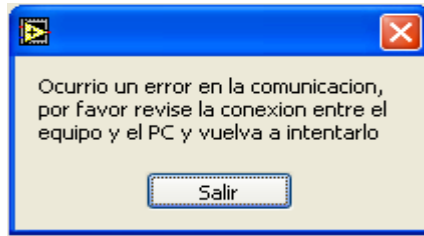


Fuente: los autores.

Una vez seleccionado el puerto e iniciada la comunicación ocurrirán los procesos ya mencionados y el usuario puede seleccionar que prueba desea visualizar, los valores de temperatura y humedad que quiera comparar contra los actuales, el mapeo de los ejes de la gráfica, mientras observa el perfil de resistividad y el perfil de resistividad modificada por la formula de Albretch contra distancia, en cualquier momento puede retornar al menú principal, o salir. Esta última parte está ubicada dentro de un ciclo while para que se puedan efectuar cambios en los controles e inmediatamente se vean reflejados en la gráfica, además se tienen dos cursores que permiten ubicar un punto específico dentro de la gráfica para análisis más precisos.

En caso de un error en la comunicación, ya sea debido a que no se encontró el puerto indicado por el usuario, una llegada incorrecta de datos o una mala conexión del dispositivo, se muestra en pantalla un mensaje de advertencia.

Figura 57. Mensaje en caso de un error de comunicación



Fuente: los autores.

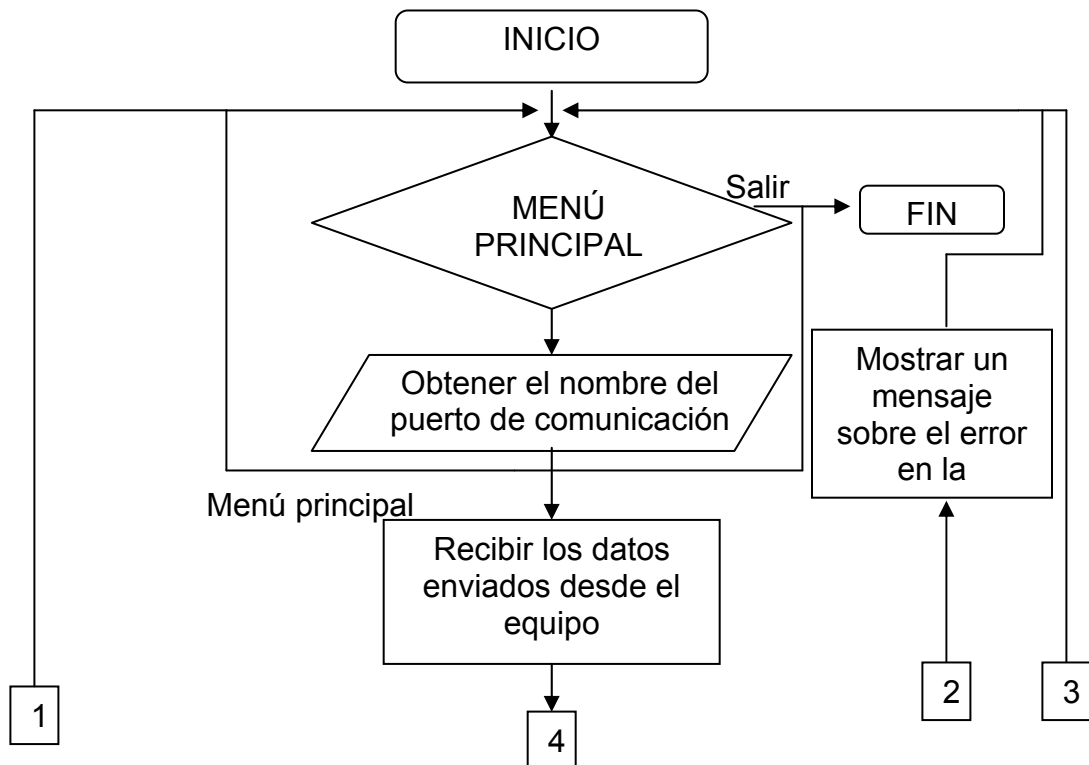
En este caso el programa retorna al menú principal.

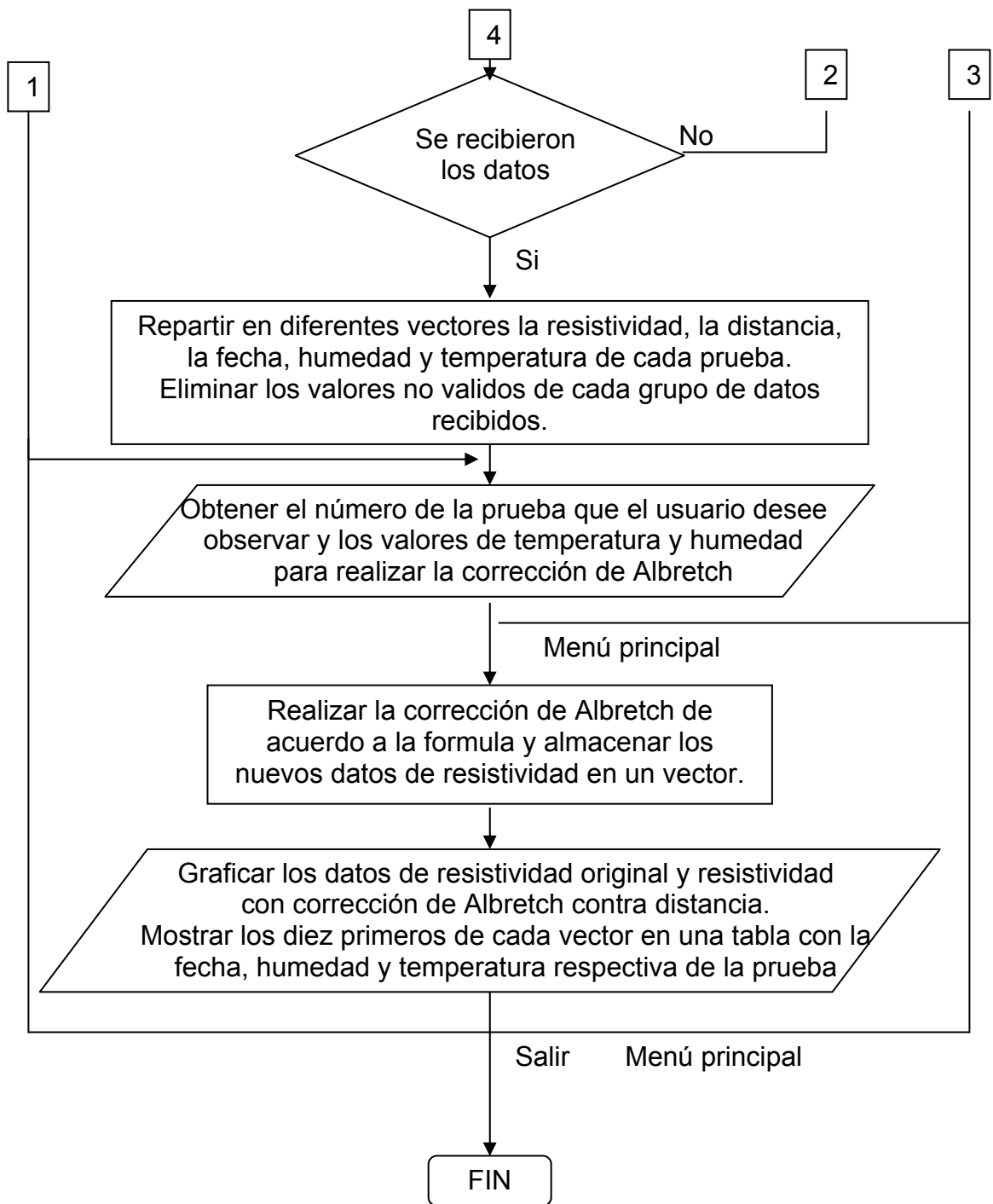
Si el usuario ejecuta las acciones indicadas correctamente el proceso se llevará a cabo satisfactoriamente y se obtendrá la gráfica y los resultados deseados.

3.3.6 Esquema de operación de la aplicación

El esquema de operación aplicado en el programa se indica en la Figura 58

Figura 58. Esquema de operación de la aplicación en LabVIEW.





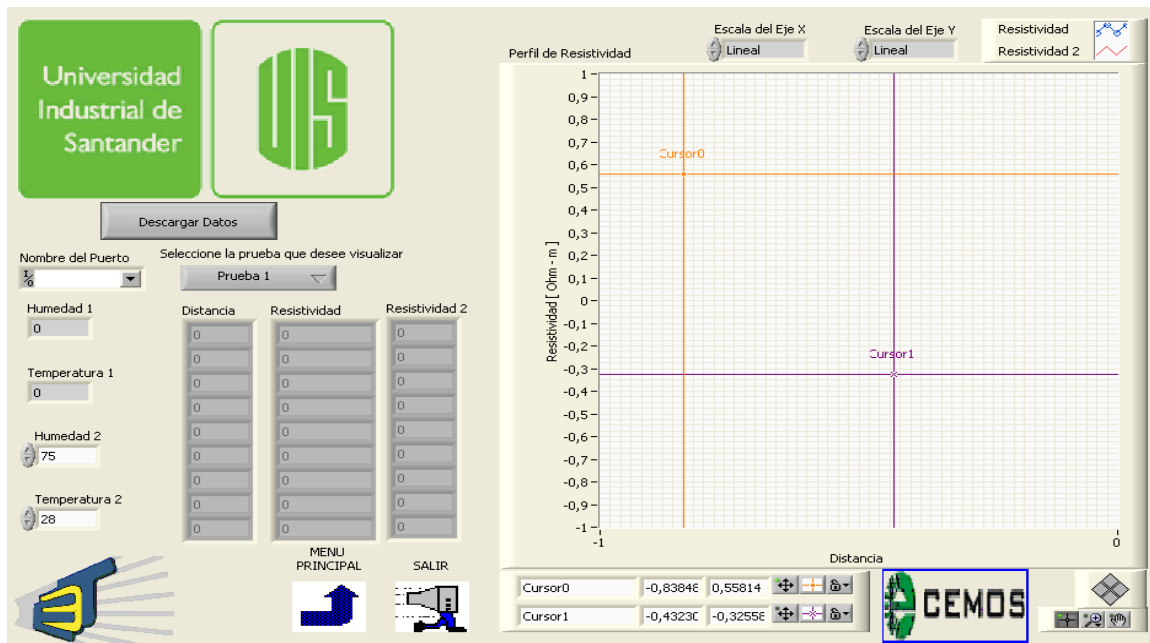
Fuente: los autores.

3.3.7 Presentación de los datos

La presentación de los datos se realiza en el panel frontal mostrado en la Figura 59 que cuenta con los siguientes elementos:

- ✓ Una gráfica de resistividad contra distancia en donde se puede observar el perfil de resistividad de la prueba y la predicción de Albretch para otras condiciones de temperatura y humedad, además cuenta con dos cursores que indican su posición en X y Y en todo momento.
- ✓ Dos controles de selección de escala lineal o logarítmica en cualquiera de los ejes de forma independiente.
- ✓ Un control de cursores que permite seleccionar entre un arrastre libre o un arrastre estrictamente sobre los puntos de la gráfica.
- ✓ Una tabla de 9 datos que permite al usuario observar que valores de resistividad y resistividad modificada se están graficando y su respectiva distancia.
- ✓ Dos indicadores de humedad y temperatura de la prueba respectiva.
- ✓ Un menú desplegable para seleccionar la prueba que se desea visualizar.
- ✓ Dos botones con función de ir a menú principal y salir.
- ✓ Dos controles numéricos para que se introduzcan valores de temperatura y humedad con el fin de realizar la fórmula de Albretch para predecir el comportamiento de la gráfica observada bajo otras condiciones climáticas.

Figura 59. Panel frontal de la aplicación en LabVIEW



Fuente: los autores.

4 RESULTADOS

En los capítulos 2 y 3, se expusieron cada uno de los componentes de hardware que constituyen el MRS V2.0, las diferentes funciones que éste realiza y las aplicaciones de software empleadas para la realización del prototipo. En la Figura 60 se puede apreciar el prototipo definitivo construido como resultado de la integración de las etapas desarrolladas en este trabajo de grado.

Figura 60. Prototipo MRS V2.0



Fuente: los autores.

Para la validación del desempeño del prototipo, se realizaron pruebas en campo las cuales se compararon con mediciones hechas con el equipo METREL de la E3T. En este capítulo presentan los resultados de estas pruebas y finalmente se realiza una recopilación de las conclusiones obtenidas del trabajo de grado y las recomendaciones propuestas por los autores para tener en cuenta en la realización de futuros trabajos relacionados con el tema.

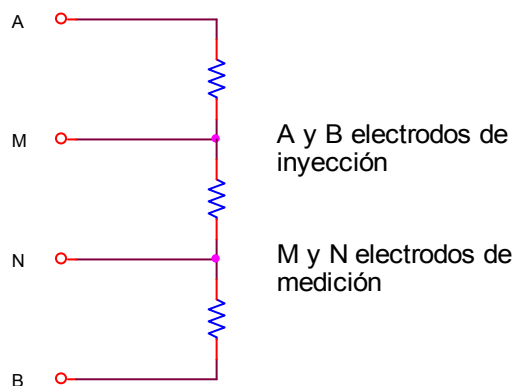
4.1 PRUEBAS

Inicialmente se realizó la caracterización de cada uno de los sensores del prototipo (sensores de corriente, tensión, humedad y temperatura), con el objetivo de calibrarlos y realizar los ajustes necesarios por *software* con el fin de obtener mediciones lo mas exactas posibles. Posteriormente se compararon los resultados de los sensores de tensión y corriente con mediciones realizadas con multímetros,

amperímetros y osciloscopios de los laboratorios de la E3T, validando de esta forma el desempeño de estos. Para aprobar el desempeño del sensor de humedad y temperatura, se compararon sus medidas con las del Psicrómetro Haenni de la escuela E3T.

Para realizar la prueba de campo, primero se simuló el comportamiento del suelo mediante un arreglo de resistencias como el que se muestra en la Figura 61, permitiendo con ello simular diferentes condiciones de terreno.

Figura 61. Modelo resistivo del suelo



Fuente: los autores

4.1.1 Pruebas de campo

Las pruebas de campo que se le realizaron al MRS V2.0 se hicieron en la parte posterior del edificio de los laboratorios de diseño industrial. Se ejecutaron tres pruebas, en las cuales se inyectaron los tres diferentes niveles de tensión que permite el MRS V2.0 y se compararon con mediciones hechas paralelamente con el METREL de la E3T, el cual inyecta una tensión sinusoidal de 40 Vp a 125 Hz.

A continuación se muestran cada una de estas pruebas con sus respectivos análisis y gráficos tanto de Excel, LabVIEW y pantalla MRS V2.0.

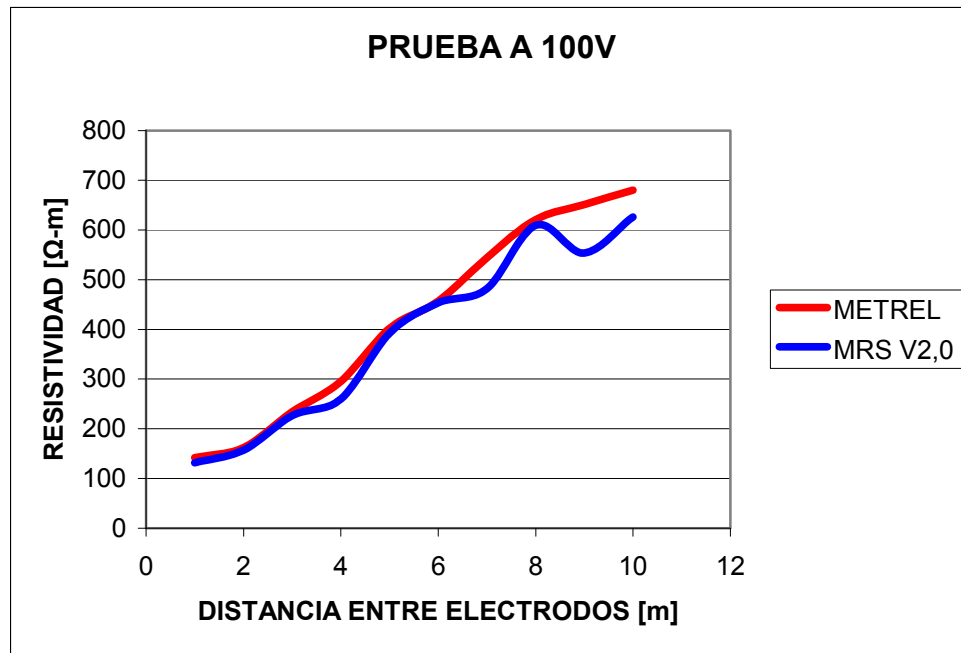
➤ Prueba a 100V

Tabla 23. Mediciones realizadas a 100V

DISTANCIA [m]	METREL [Ω -m]	MRS V2,0 [Ω -m]	R [Ω]	ERROR %	
1	141,7	131,327	20,901	7,3203952	
2	162,3	157,045	12,497	3,23783118	
3	234	226,628	12,023	3,15042735	
4	295	260,094	10,348	11,8325424	
5	402	392,362	12,489	2,39751244	
6	457	453,632	12,132	0,73698031	
7	544	482,026	10,959	11,3922794	
8	621	609,37	12,123	1,87278583	
9	651	553,778	9,792	14,934255	
10	680	626,353	9,968	7,88926471	
				ERROR PROMEDIO	6,47642738

Fuente: los autores

Figura 62. Análisis grafico de los datos a 100V



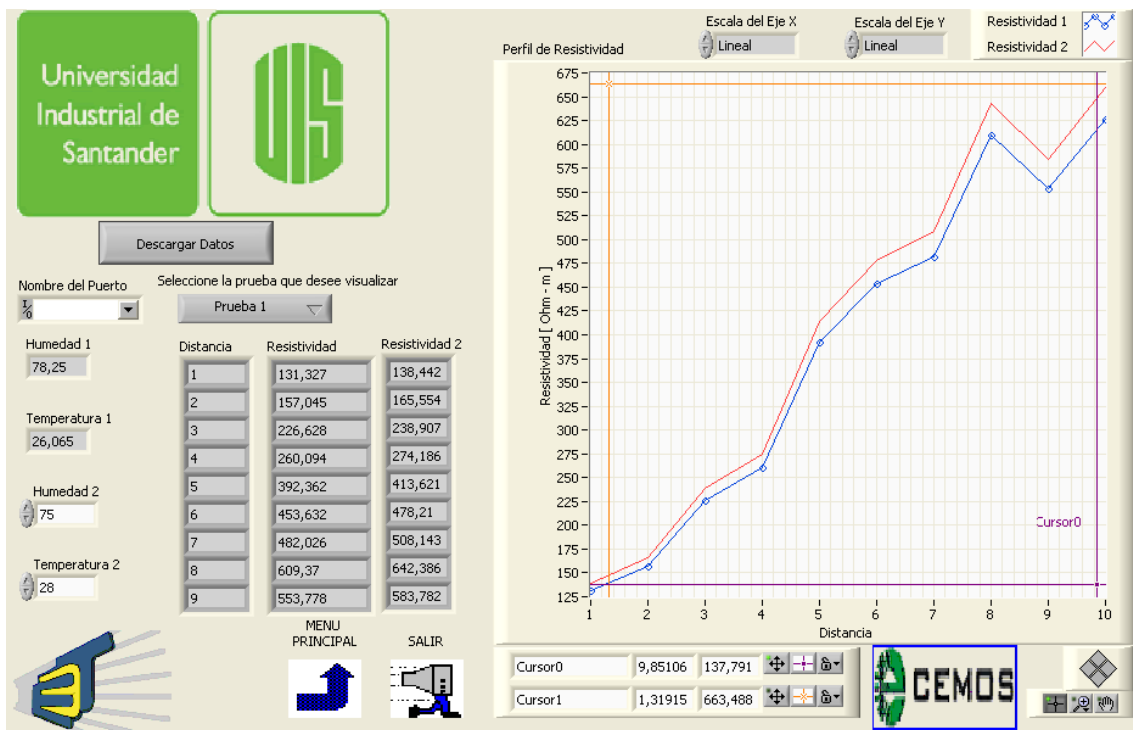
Fuente: los autores

Figura 63. Perfil de resistividad a 100 V obtenido en la pantalla del dispositivo.



Fuente: los autores

Figura 64. Perfil de resistividad con inyección de 100 V



Fuente: los autores.

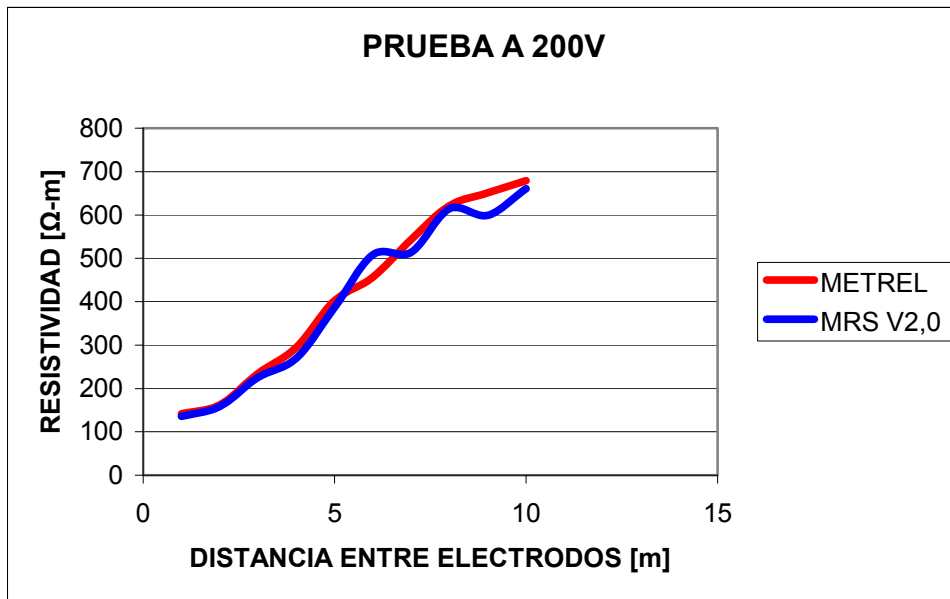
➤ Prueba a 200V

Tabla 24. Mediciones realizadas a 200V

PRUEBA 2 A 200V				
DISTANCIA [m]	METREL [Ω -m]	MRS V2,0 [Ω -m]	R [Ω]	ERROR %
1	141,7	135,478	21,562	4,390967
2	162,3	158,638	12,624	2,256315
3	234	225,657	11,971	3,565385
4	295	269,324	10,716	8,703729
5	402	386,864	12,314	3,765174
6	457	508,173	13,479	-11,19759
7	544	514,543	11,698	5,41489
8	621	614,648	12,228	1,022866
9	651	598,954	10,591	7,994777
10	679	660,559	10,513	2,715906
ERROR PROMEDIO				2,863242

Fuente: los autores

Figura 65. Análisis grafico de los datos a 200V



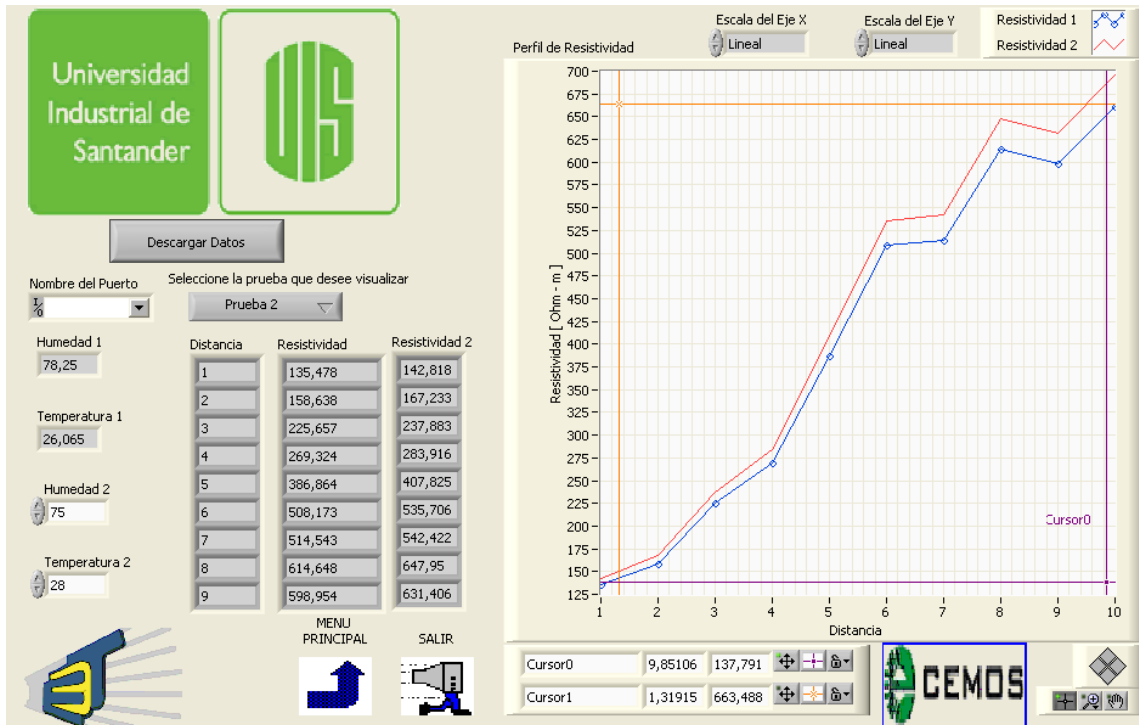
Fuente: los autores

Figura 66. Perfil de resistividad a 200 V obtenido en la pantalla del dispositivo.



Fuente: los autores

Figura 67. Perfil de Resistividad con inyección de 200 V



Fuente: los autores

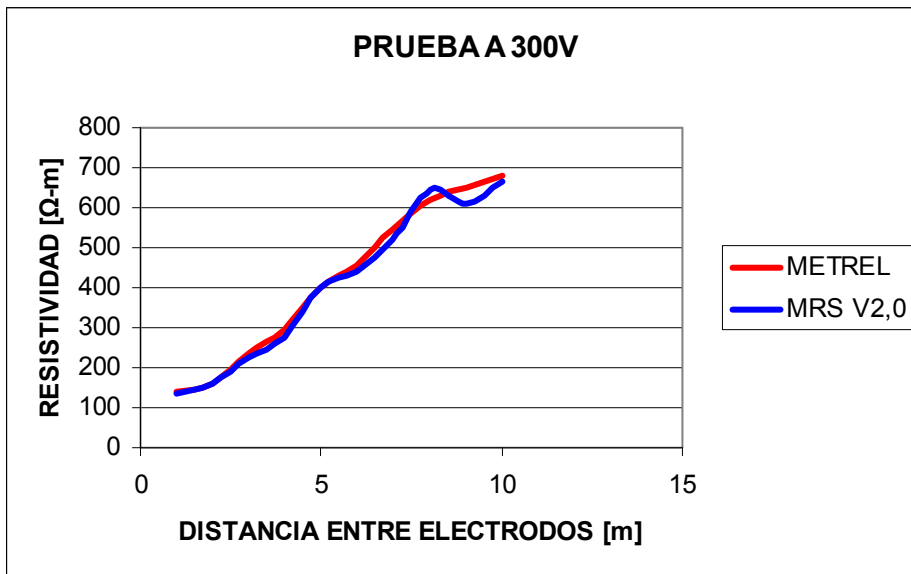
➤ Prueba a 300V

Tabla 25. Mediciones realizadas a 300V

PRUEBA 3 A 300V				
DISTANCIA [m]	METREL [Ω-m]	MRS V2,0 [Ω-m]	R [Ω]	ERROR %
1	141,7	135,828	21,617	4,14396613
2	162,2	158,466	12,608	2,30209618
3	234	225,963	11,987	3,43461538
4	295	276,732	11,01	6,19254237
5	402	401,537	12,781	0,11517413
6	457	440,048	11,672	3,70940919
7	544	518,825	11,796	4,62775735
8	621	642,891	12,789	-
9	651	611,788	10,818	6,02334869
10	679	666,678	10,61	1,81472754
ERROR PROMEDIO				2,88385162

Fuente: los autores

Figura 68. Análisis grafico de los datos a 300V



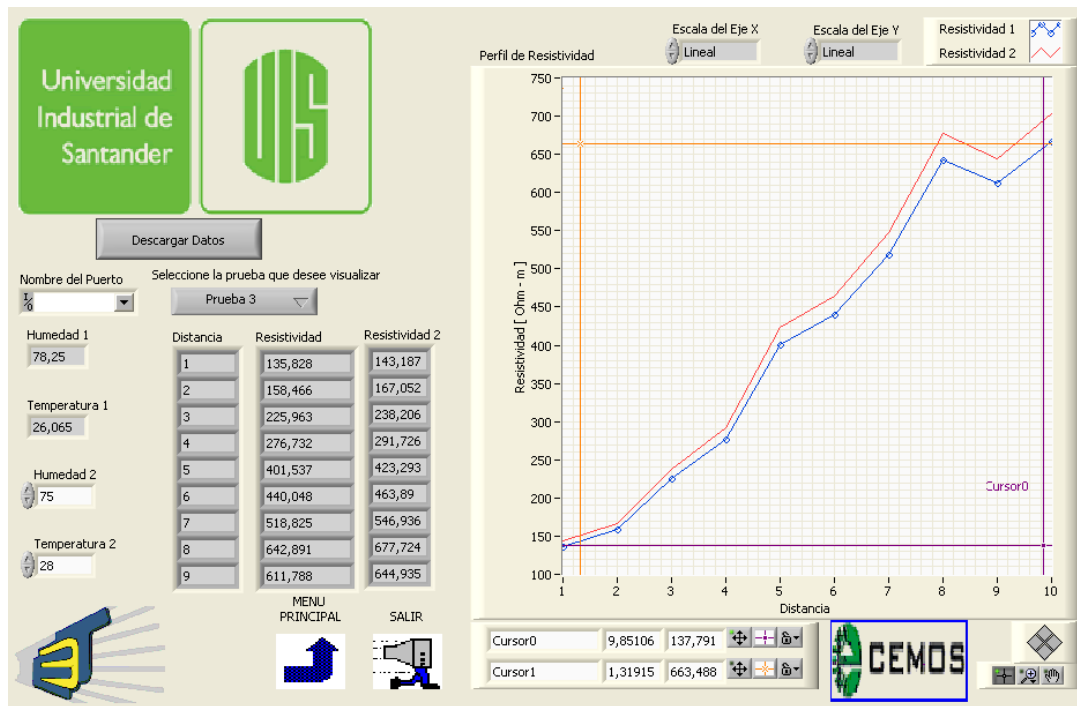
Fuente: los autores

Figura 69 Perfil de resistividad a 300 V obtenido en la pantalla del dispositivo.



Fuente: los autores.

Figura 70. Perfil de Resistividad con inyección de 300 V

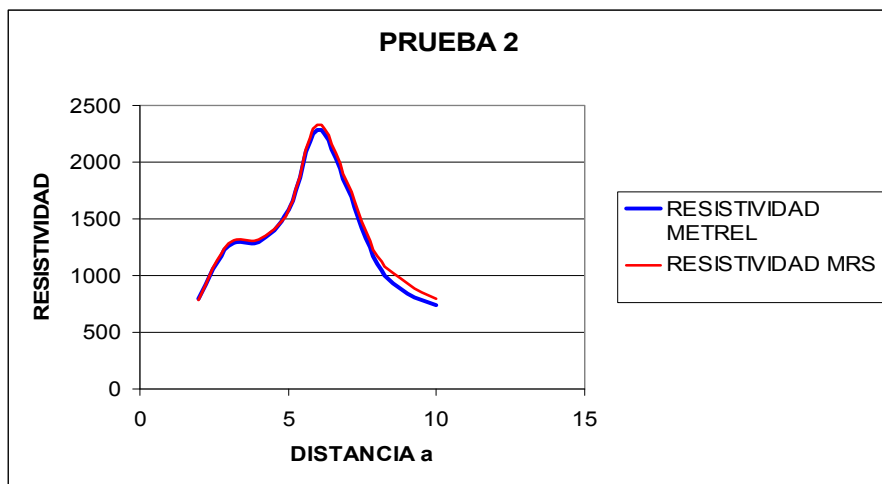


Fuente: los autores.

Debido a que los dos equipos (MRS V2.0 y METREL) inyectan tensiones de excitación al terreno muy diferentes, es de esperarse que los resultados obtenidos tengan un grado de similitud con porcentajes de error no tan elevados. Según los resultados consignados en la Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25 se evidencia un

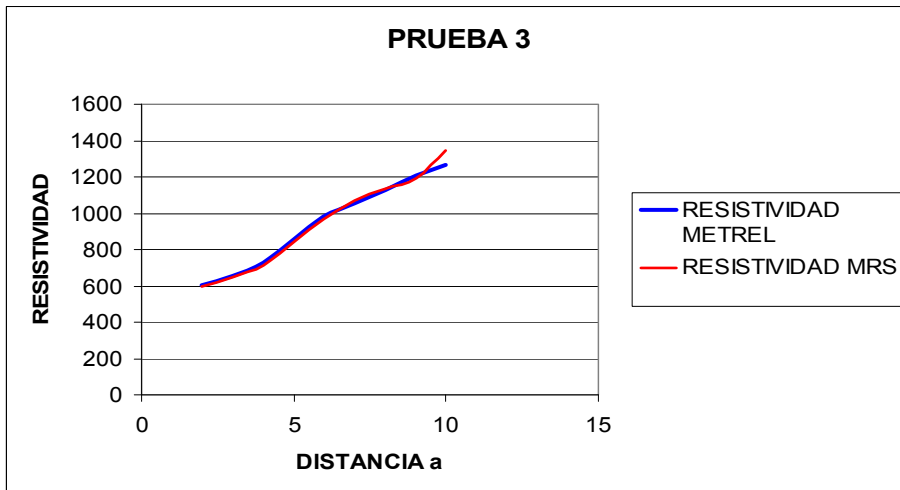
porcentaje de error relativamente alto (error promedio del 5% aproximadamente). Por tal motivo, se hizo una revisión de los circuitos de medición encontrando que uno de los rangos de medición de tensión se había caracterizado erróneamente. Posteriormente se volvió a calibrar dicho rango y se realizaron nuevas pruebas de campo las cuales arrojaron porcentajes de error promedio menores al 1.5%. En la Figura 71 y Figura 72 se muestran los resultados gráficos de las pruebas realizadas.

Figura 71. Prueba de resistividad del terreno contiguo al Luis A. Calvo.



Fuente: los autores.

Figura 72. Prueba de resistividad del terreno de la parte posterior de la escuela de eléctrica



Fuente: los autores.

4.2 CONCLUSIONES

- En este proyecto de grado se construyó un prototipo portátil en capacidad de realizar la medición de la resistividad del terreno para diferentes niveles de tensión de inyección (100, 200 y 300V), almacenar 14 pruebas de 50 mediciones cada una, graficar el perfil de resistividad de cada una de las pruebas, realizar la medición de humedad y temperatura del ambiente donde se realiza la prueba, presentar datos en pantalla y ofrecer la posibilidad de descarga de datos al computador por medio del puerto USB.
- En el prototipo MRS V2.0 se emplea la topología de puente inversor como una alternativa de conversión DC/DC encargada de generar el nivel de tensión que se inyecta al terreno. Al trabajar con esta topología se presentaron pérdidas del 22 % en el convertidor lo cual se toma como aceptable según su desempeño teórico.
- Debido a que el prototipo MRS V2.0 se alimenta por medio de una batería recargable se buscó diseñar un sistema con bajo consumo de potencia. Por tal motivo, el sistema de alimentación se implementó con reguladores LDO que son activados únicamente durante los momentos en que se hace la medición.
- El MRS V2.0 presenta un desempeño aceptable de acuerdo con las pruebas realizadas en campo consignadas en este capítulo, en donde se evidenció un error promedio en la medición de aproximadamente 1.5%.
- Se utilizó una pantalla gráfica por píxeles que proporciona una interfaz amigable con el usuario y que además permite trazar el perfil de resistividad del terreno, ofreciendo un criterio instantáneo de validación de la curva y haciendo del MRS V2.0 un equipo completamente independiente del computador. El funcionamiento de dicha pantalla es el adecuado acorde a las especificaciones de funcionamiento del prototipo en general.
- El MRS V2.0 está equipado con un sensor que permite registrar los valores de humedad y temperatura del ambiente bajo el cual se desarrolla la prueba.
- Se elaboró un documento en el que se consignó una metodología de diseño de transformadores con núcleo de ferrita la cual puede ser utilizada en otros proyectos en los que sea necesario el diseño de un transformador de este tipo.
- Se implementó una aplicación que permite comunicar el DSP y el computador por medio del puerto USB. Este aspecto hace del MRS V2.0 un equipo capaz de comunicarse con cualquier computador que se encuentra actualmente en el mercado.

- La aplicación de software empleada para programar el DSP se realizó en lenguaje C, el cual facilita las operaciones en coma flotante utilizadas para el cálculo de la resistividad, humedad y temperatura.
- La topología implementada para inyectar la tensión al terreno posee la ventaja de no necesitar la implementación de una protección contra cortocircuito debido a que la energía que se almacena en el condensador no es suficiente para producir daños al equipo. Igualmente la protección contra sobre tensiones internas no es necesaria ya que siempre se asegura que al momento de cargar el condensador, éste se encuentre conectado en paralelo a una resistencia que evita la sobrecarga.
- Se realizó una aplicación en LabVIEW la cual permite realizar la corrección de Albretch y graficar los datos descargados del equipo.

4.3 RECOMENDACIONES

Desde el punto de vista de los autores se plantea la opción de utilizar este proyecto de grado como punto de partida para la optimización y adecuación del mismo. Se presentan algunas recomendaciones para el desarrollo de versiones mejoradas del prototipo elaborado en este trabajo de grado.

- Seleccionar el procesador óptimo para esta aplicación que ofrezca un módulo de comunicación USB el cual le permita al equipo alcanzar una mayor velocidad de transmisión de datos al computador y prescindir del uso de dispositivos externos como el FT232BL, ya que esto incrementa los costos y el consumo de potencia.
- Se propone optimizar la topología de inyección de tensión al terreno con el fin de construir un equipo capaz de inyectar tensiones de diferentes amplitudes y frecuencias que permitan estudiar el comportamiento del suelo ante variaciones de estos parámetros. Además es interesante analizar las diferentes posibilidades que presenta una inyección de múltiples voltajes al terreno tales como: efectuar un barrido de los voltajes aplicados para observar cual es el menor voltaje al cual el terreno se polariza o estudiar la variación de la resistividad del suelo de acuerdo a la intensidad del voltaje aplicado.
- Para mejorar la interfaz con el usuario, se recomienda utilizar una pantalla a color que posea una resolución mayor que la de la pantalla utilizada en este prototipo, la cual permita graficar simultáneamente dos o más perfiles de resistividad que pueden ser utilizados para realizar comparaciones entre

pruebas, ya sea para observar las diferencias entre las mediciones o para compararlas con un patrón de resistividad ya grabado en la memoria del equipo.

- Debido a que el PH es un factor influyente en el valor de la resistividad del terreno, se plantea realizar una aplicación que mida el PH del terreno en el cual se realiza la prueba. Actualmente existen dispositivos electrónicos que realizan la medición de esta variable pero la mayoría son costosos por lo que se debe evaluar si la inversión es justificable.
- Se sugiere realizar un estudio de algunos tipos de terreno según la aplicación deseada para encontrar las especificaciones eléctricas mínimas requerida con las cuales se puedan realizar las mediciones de la resistividad del suelo.
- Se recomienda seleccionar adecuadamente la batería apropiada para el prototipo según las especificaciones eléctricas necesarias. Igualmente se plantea realizar el diseño del cargador de dicha batería teniendo en cuenta las curvas de carga y descarga para minimizar la degradación de ésta.
- Desarrollar un modelo más adecuado del terreno el cual permita realizar un estudio más detallado del comportamiento eléctrico del suelo.
- En las fuentes de alimentación de DC elaboradas en este proyecto se recomienda implementar filtros LC y realimentaciones que permitan mantener la corriente de salida y el nivel de tensión lo más constantes posible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] PRESSMAN, Abraham. *Switching Power Supply Design*. Second Edition. McGraw-Hill.
- [2] ANGULO JULIO, Carlos Andrés – FIALLO ARIAS, Jaime Andrés – NUÑEZ GUALDRON, Omar Leonardo. *Diseño y construcción de prototipo de un medidor de resistividad de suelos para el laboratorio de corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica*. Trabajo de Grado. UIS. 2003.
- [3] BRAVO BOHADA, Liliana – HURTADO PARRA, Juan Carlos. *Resistenciómetro para Aguas: Que determina la localización de depósitos de aguas subterráneas empleando medidas de resistividad del terreno*. Trabajo de Grado. UIS. 1997.
- [4] BRETT, Christopher M. OLIVEIRA BRETT, Ana Maria; *Electrochemistry Principles, Methods and Applications*; Editorial Oxford University Press.
- [5] COUGHLIN, Robert F. DRISCOLL, Frederick F. *Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits*. U.S.A: Prentice Hall, 1988. 450p.
- [6] DEWAN, S.B.; *Power Semiconductors Circuits*. 523p.
- [7] FONTANA, Mars G. & GREENE, Norbert D, *Corrosion Engineering*. Mc Graw Hill Book Company, 2a Edición, 1978.
- [8] JONES, Denny A. *Principles and Prevention of Corrosion*. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [9] *LabVIEW*, Manuales y Ejemplos incluidos en el tutorial del programa.
- [10] LÁZARO, Antonio Manuel; *LabVIEW: Programación Gráfica para el Control de Instrumentación*; Editorial Paraninfo; Primera Edición, 1997.

- [11] MOHAN, Ned-Undeland, Tore M.-Robbins, William P.; *Power Electronics: Converters, Applications And Design*, Second Edition 802p.
- [12] *National Semiconductors. National Analog and Interface Products Databook*. U.S.A. 2002. 1870p.
- [13] Normas ANSI/IEEE (*Institute for Electrical and Electronics Engineer*):
Std 80. *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity*.
- [14] Normas ASTM Standards. (*American Society For Testing and Materials*):
G3. *Practice for Conventions Aplicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing*.
G15. *Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing*.
G51. *Standard Test Method for pH of Soil for Use in Corrosion Testing*.
G57. *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*.
- [15] RASHID, Muhammad H.; *Electrónica de Potencia*; Editorial Pearson Education; Segunda Edición, 1995.
- [16] GALVIS CASTRELLÓN, Jorge Leonardo. *Generador electrónico de pulsos de voltaje para su aplicación en pruebas dinámicas sobre medios porosos*. Trabajo de Grado. UIS. 2006.
- [17] AMARIS DOMINGUEZ, Jean Pierre - LOPEZ PATIÑO, José Alberto. *Elaboración de software para la caracterización de una celda electroquímica utilizando DSP familia 56800 de Motorola*. Trabajo de Grado. UIS. 2004.
- [18] RUIDÍAZ PALOMINO, Yair de Jesús - TÍJARO ROJAS, Omar Javier. *Analizador de espectros portátil utilizando la familia DSP5680X de Motorola*. Trabajo de Grado. UIS. 2005.
- [19] Hyundai. LCD hg25504ng-01. Data Sheet.
- [20] Motorola, Inc. 56F8323 Preliminary Technical Data. MC56F8323/D Revision11.0.2004.

[21] Motorola, Inc. MC56F8300 Peripheral User Manual. MC56F8300UM/D Revision 6.0.2004.

[22] Motorola, Inc. 56F8300 Demostration Board. MC56F8300DBUM/D Revision 3.0.2003.

[23] Motorola, Inc. Targeting Motorola 56F8300 Demostration Board. MC56F8323TUM/D Revision 3.0.2004.

[24] <http://www.allelectronics.com>

[25] http://www.ftdichip.com/Documents/AppNotes/DG232_20.pdf

[26] http://www.sensirion.com/en/pdf/product_information/Data_Sheet_humidity_sensor_SHT1x_SHT7x_E.pdf

[27] http://www.mag-inc.com/pdf/2006_ferrite_catalog/2006_design_information.pdf

[28] Enlaces adicionales:

www.analog.com	⇒	<i>Analog Devices, Inc.</i>
www.ti.com	⇒	<i>Texas Instruments.</i>
www.irf.com	⇒	<i>International Rectifier, Inc.</i>
www.ixys.com	⇒	<i>IXYS Corporation.</i>
www.national.com	⇒	<i>National Semiconductors.</i>
www.corrosion-doctors.org	⇒	Conceptos de Corrosión.
www.corrosionsources.com	⇒	Conceptos de Corrosión.
www.nace.org	⇒	<i>National Association of Corrosion Engineers.</i>
www.giscogeon.com	⇒	GISCO. Modelos Comerciales.

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES

A.1 RESISTENCIA DE 1 Ω

Esta resistencia se utiliza para medir la corriente que circula por el terreno cuando se le inyecta tensión. Las pruebas se realizaron en el laboratorio, midiendo tensión y corriente que pasan por la resistencia y los valores se muestran en la Tabla 26.

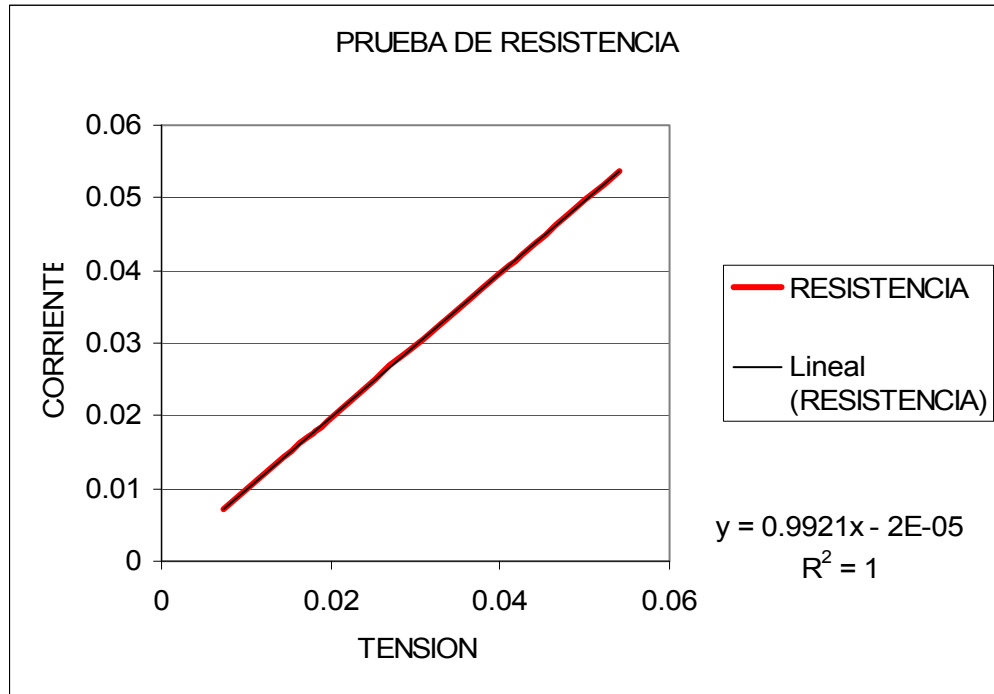
Tabla 26. Característica de tensión y corriente en la resistencia de 1 Ω

TENSIÓN [V]	CORRIENTE [A]
0.0073	0.00724
0.0108	0.01069
0.0144	0.01428
0.0179	0.0177
0.0181	0.01792
0.0215	0.02132
0.0252	0.025
0.0288	0.02856
0.0328	0.03249
0.0362	0.03591
0.0397	0.03934
0.0426	0.0422
0.0466	0.0462
0.0541	0.0537

Fuente: los autores

Estos datos se muestran gráficamente en la Figura 73 en donde se compara con una regresión lineal y se determina experimentalmente que la resistencia es de 0.9921 Ω .

Figura 73. Prueba de resistencia



Fuente: los autores

A.1.1 Rango 1 de tensión

A continuación se muestran los datos tomados a este circuito en la Tabla 27 y su gráfica en la Figura 74.

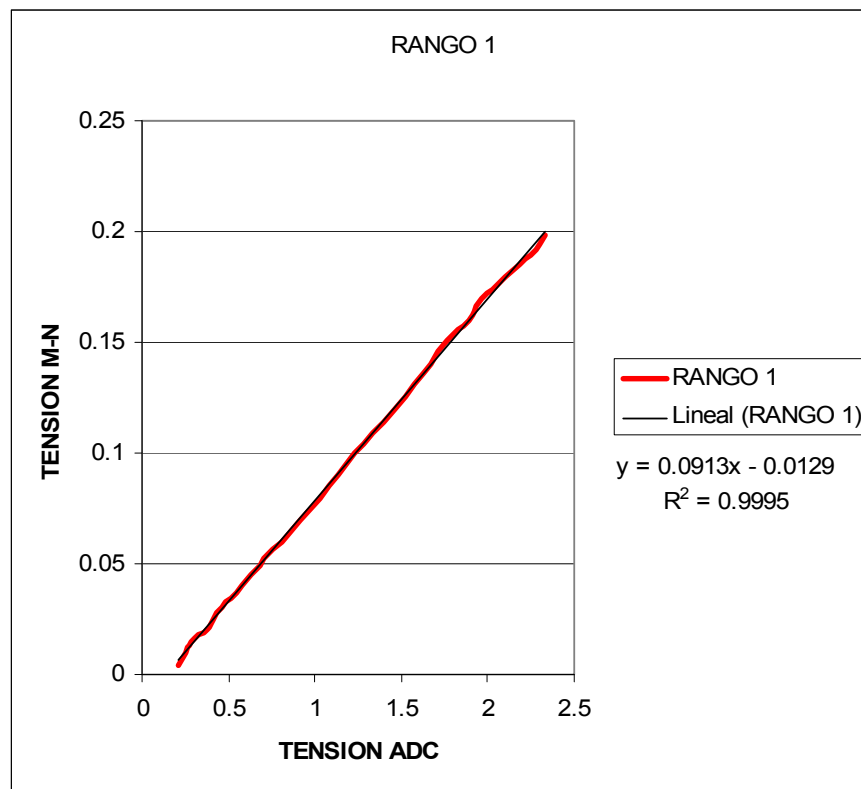
Tabla 27. Caracterización del rango 1 de tensión

ENTRADA AD8221 [V]	SALIDA AD8221 [V]	DIVISOR DE TENSION [V]	GANANCIA 47 V/V	RANGO 1 [V]
0.0043	0.0058	0.0034	0.168	0.21
0.0095	0.0091	0.0042	0.226	0.247
0.0145	0.0133	0.0052	0.267	0.287
0.0208	0.019	0.0068	0.339	0.377
0.0245	0.0213	0.0073	0.363	0.408
0.03	0.0249	0.0082	0.396	0.464
0.0347	0.0282	0.0089	0.439	0.519
0.0399	0.0318	0.0099	0.483	0.576
0.0447	0.034	0.0106	0.51	0.629
0.0494	0.0384	0.0116	0.563	0.679
0.0532	0.0399	0.012	0.584	0.712
0.0596	0.0462	0.0133	0.656	0.806

0.0695	0.0528	0.0151	0.73	0.915
0.0795	0.0598	0.0168	0.818	1.028
0.09	0.0689	0.0195	0.945	1.13
0.0999	0.0738	0.0206	0.972	1.228
0.1094	0.0842	0.0231	1.13	1.33
0.1198	0.1002	0.0271	1.264	1.463
0.131	0.106	0.0287	1.4	1.58
0.1405	0.113	0.0303	1.457	1.675
0.1512	0.1212	0.0322	1.59	1.767
0.1597	0.129	0.0345	1.707	1.887
0.1698	0.136	0.0354	1.784	1.965
0.1893	0.1763	0.0459	2.12	2.25
0.1984	0.1865	0.0486	2.32	2.33

Fuente: los autores

Figura 74. Rango 1 de tensión



Fuente: los autores

A.1.2 Rango 2 de tensión

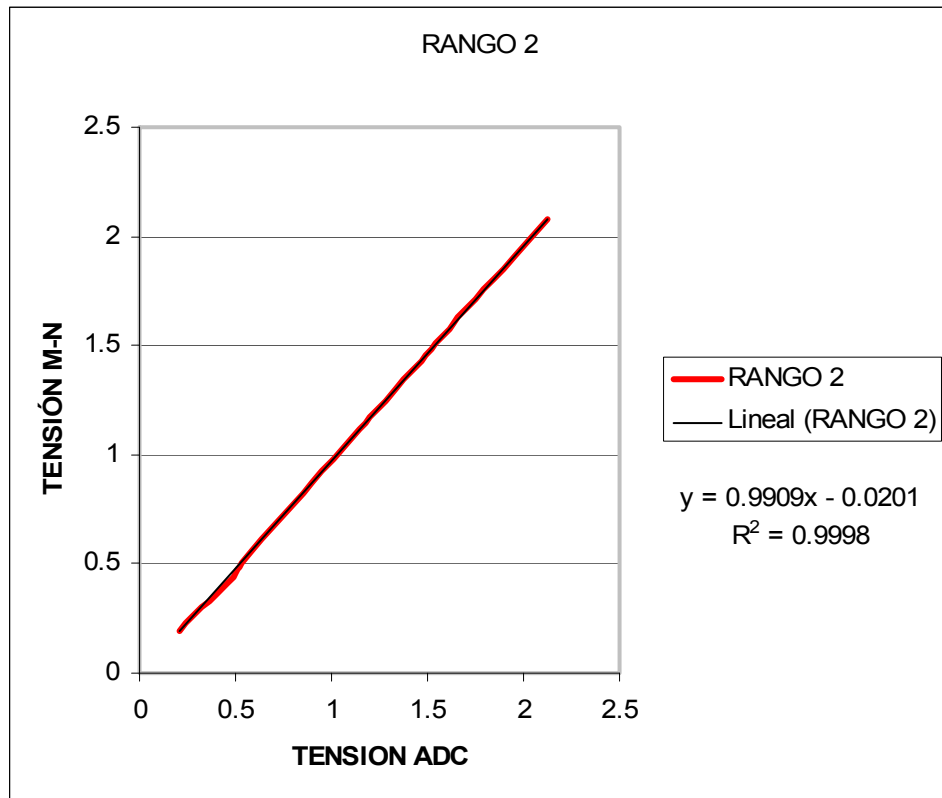
A continuación se muestran los datos tomados a este circuito en la Tabla 28 y su gráfica en la Figura 75.

Tabla 28. Caracterización del rango 2 de tensión

ENTRADA AD8221 [V]	SALIDA AD8221 [V]	DIVISOR RESISTIVO [V]	GANANCIA 4 V/V	RANGO 2 [V]
0.196	0.188	0.049	0.192	0.211
0.252	0.243	0.063	0.246	0.268
0.302	0.291	0.075	0.294	0.319
0.436	0.39	0.1	0.393	0.494
0.507	0.488	0.124	0.49	0.528
0.615	0.592	0.15	0.596	0.639
0.722	0.698	0.177	0.704	0.747
0.827	0.798	0.202	0.805	0.853
0.924	0.893	0.226	0.901	0.952
1.04	1.006	0.254	1.02	1.068
1.17	1.13	0.29	1.15	1.2
1.21	1.17	0.295	1.189	1.242
1.385	1.338	0.339	1.367	1.419
1.412	1.369	0.345	1.395	1.446
1.512	1.468	0.37	1.495	1.545
1.557	1.512	0.381	1.541	1.592
1.604	1.535	0.385	1.57	1.64
1.716	1.653	0.416	1.68	1.752
1.803	1.75	0.44	1.785	1.84
1.918	1.862	0.469	1.9	1.954
2.08	2.03	0.51	2.07	2.12

Fuente: los autores

Figura 75. Rango 2 de tensión



Fuente: los autores

A.1.3 Rango 3 de tensión

A continuación se muestran los datos tomados a este circuito en la Tabla 29 y su gráfica en la Figura 76.

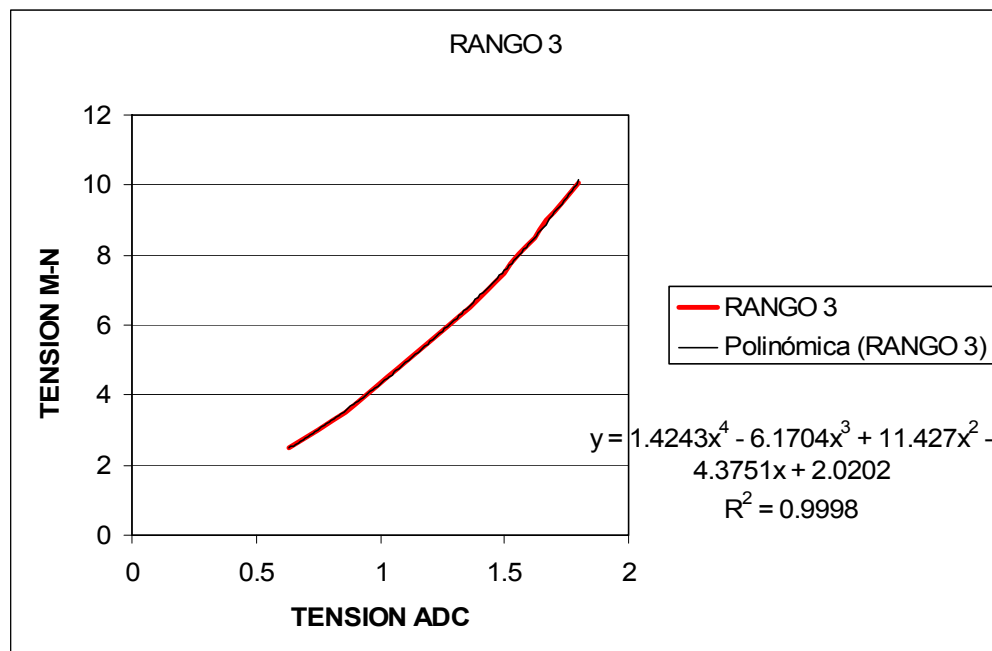
Tabla 29. Caracterización del rango 3 de tensión

ENTRADA AD8221 [V]	SALIDA AD8221 [V]	DIVISOR DE TENSION	RANGO 3 [V]
2.5	2.44	0.62	0.63
2.99	2.94	0.74	0.75
3.53	3.47	0.85	0.86
3.99	3.94	0.93	0.94
4.52	4.47	1.02	1.03
5	4.95	1.1	1.11
5.5	5.44	1.18	1.19
6	5.94	1.27	1.28
6.53	6.46	1.35	1.36

7.02	6.9	1.43	1.43
7.5	7.44	1.49	1.5
8.01	7.94	1.55	1.56
8.5	8.43	1.61	1.62
8.99	8.93	1.67	1.67
9.5	9.43	1.73	1.73
10.08	10.01	1.8	1.8

Fuente: los autores

Figura 76. Rango 3 de tensión



Fuente: los autores

A.2 SENSOR DE CORRIENTE

A continuación se muestran los datos tomados a este circuito en la Tabla 30 y su gráfica en la Figura 77.

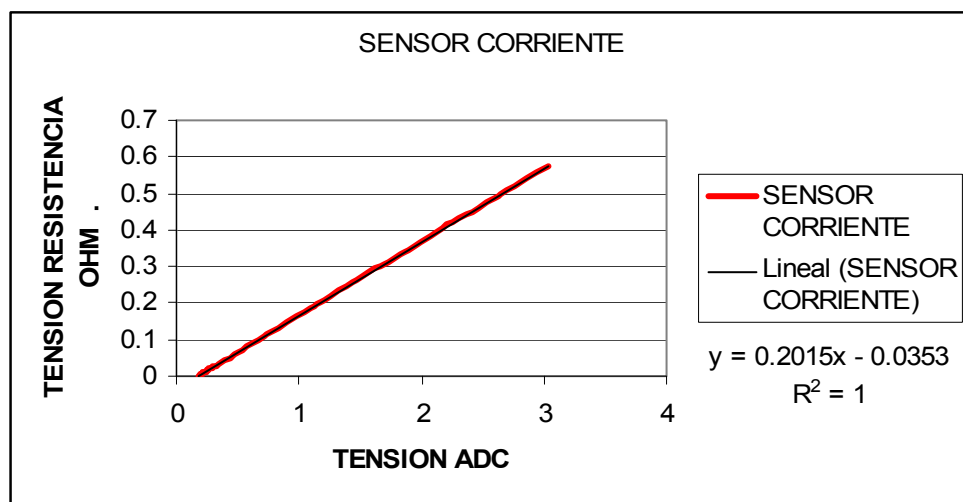
Tabla 30. Caracterización del sensor de corriente

ENTRADA ISO122 [V]	SALIDA ISO122 [V]	GANANCIA 5 V/V	ENTRADA ADC [V]
0.0023	0.037	0.185	0.185
0.0048	0.0395	0.197	0.197
0.0056	0.0403	0.201	0.201
0.0076	0.0422	0.211	0.211
0.0086	0.0433	0.216	0.216
0.0105	0.0452	0.226	0.226
0.0112	0.0458	0.229	0.229
0.013	0.0478	0.239	0.239
0.016	0.0507	0.253	0.253
0.0172	0.0518	0.259	0.259
0.0177	0.0523	0.261	0.261
0.0189	0.0536	0.268	0.268
0.0213	0.0559	0.28	0.28
0.0228	0.0574	0.288	0.288
0.0236	0.0583	0.291	0.291
0.0243	0.0589	0.294	0.294
0.0265	0.0611	0.306	0.306
0.0282	0.0627	0.314	0.314
0.0354	0.701	0.35	0.35
0.0422	0.0767	0.384	0.384
0.0503	0.0847	0.443	0.443
0.0607	0.0951	0.476	0.476
0.0716	0.1062	0.531	0.531
0.0849	0.1193	0.597	0.597
0.0994	0.1337	0.67	0.67
0.1086	0.1427	0.714	0.714
0.1185	0.1527	0.764	0.764
0.145	0.179	0.895	0.895
0.175	0.209	1.046	1.046
0.191	0.225	1.123	1.123
0.2	0.234	1.17	1.17
0.218	0.252	1.26	1.26
0.246	0.279	1.395	1.395
0.26	0.294	1.467	1.467
0.282	0.315	1.574	1.574
0.299	0.332	1.661	1.661
0.313	0.347	1.733	1.733
0.332	0.365	1.823	1.823
0.347	0.38	1.899	1.899
0.365	0.398	1.989	1.989
0.384	0.417	2.08	2.08
0.402	0.434	2.17	2.17

0.421	0.454	2.26	2.26
0.441	0.473	2.36	2.36
0.461	0.492	2.46	2.46
0.486	0.518	2.59	2.59
0.5	0.532	2.65	2.65
0.521	0.553	2.76	2.76
0.541	0.572	2.86	2.86
0.574	0.606	3.03	3.03

Fuente: los autores

Figura 77. Sensor corriente

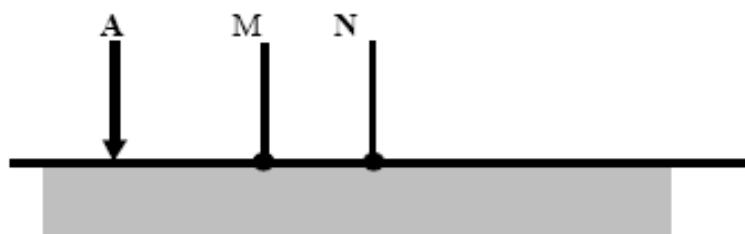


Fuente: los autores

ANEXO B. MÉTODOS ALTERNATIVOS PARA LA MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD

Existen otros métodos de medición de resistividad aparte de los nombrados en este proyecto, como el polo dipolo, basado en la topología de 4 electrodos pero llevando el electrodo B a una distancia muy grande, prácticamente el infinito como se indica en la Figura 78

Figura 78 Esquema de la medición polo-dipolo



Fuente: <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/forum/FEEL0602.pdf>

En este caso el factor geométrico g es:

$$g = 2\pi \frac{b(b+a)}{a}$$

Si además se mueve el electrodo de potencial hasta el infinito se modifica el valor del factor geométrico a $g = 2\pi b$, que se parece al factor de Wenner por lo que se conoce como semi-wenner.

Otro método llamado doble dipolo consiste en separar los electrodos A y B de los electrodos M y N como se indica en la Figura 79 para formar dos dipolos.

Figura 79. Esquema de conexión del método doble dipolo



Fuente: <http://www.edicionsupc.es/ftppublic/forum/FEEL0602.pdf>

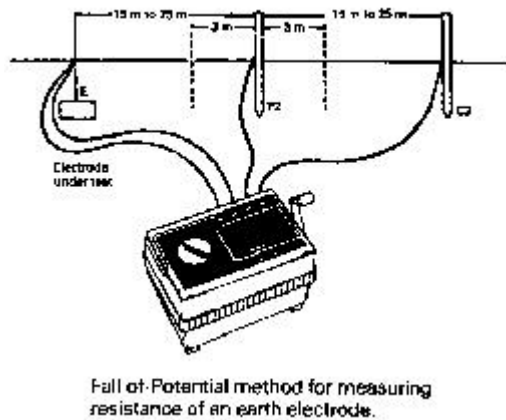
El factor geométrico de este dispositivo es:

$$g = -\pi n(n+1)(n+2)a$$

Generalmente se trabaja con $n \gg 1$ en donde A y B actúan como un dipolo de tensión y M y N como uno de corriente. Un inconveniente de este dispositivo es que necesita detectores más sensibles en comparación con los demás métodos.

El método de caída de potencial o de los tres puntos que sirve para las aplicaciones de sistema a tierra, el cual consiste en hacer circular una corriente eléctrica a través del sistema de tierra objeto de estudio, midiendo al mismo tiempo los valores de caída de potencial que el paso de esta corriente provoca entre el sistema y un electrodo de potencial utilizado como referencia para la medición. Además del electrodo de potencial el circuito está constituido por un electrodo de corriente cuya finalidad es cerrar el circuito que permite circular la corriente por el sistema a medir. El esquema de medición es el indicado en la Figura 80.

Figura 80 Esquema de medición del método de tres puntos



Fuente: Pagina Inin³¹

La ubicación del electrodo de corriente, estará en función de las dimensiones del sistema de tierra a medir, de forma tal que se considere en el infinito. Un criterio empírico presupone una distancia mínima de partida igual a 5 veces la diagonal mayor del sistema a medir. La distancia del electrodo de potencial depende de la ubicación del electrodo de corriente. Si se tiene en cuenta la interacción mutua

³¹ <http://www.ininin.com.mx/>

masa –electrodo de potencial –electrodo de corriente, su ubicación más factible desde el punto de vista teórico es 0.62 la distancia del electrodo de corriente.

ANEXO C. GENERALIDADES DE LABVIEW

LabVIEW es “un ambiente de desarrollo gráfico para crear rápidamente aplicaciones flexibles y escalables de diseño, control y pruebas a un menor costo”³², que permite interactuar al usuario con las señales externas. Su desarrollo es rápido y sencillo, aproximadamente 4 a 10 veces más rápido que cualquier otro lenguaje de programación. Es una herramienta usada por industrias de nivel automotriz, aeroespacial, control y biomédica para aumentar la productividad.

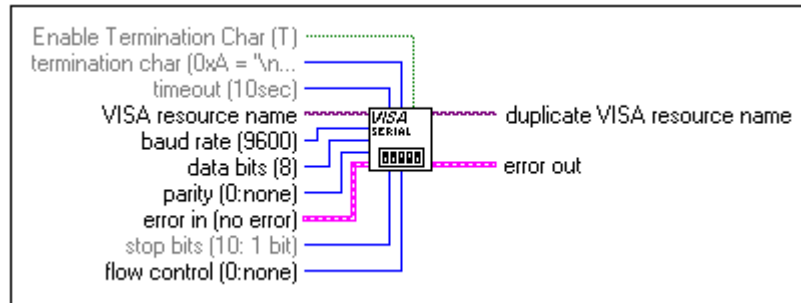
Su funcionamiento se basa en VIs que es el equivalente a una función en programación en C donde cada VI tiene dos pantallas principales, el panel frontal y el diagrama de bloques. En el panel frontal se colocan todos los controles y gráficas que se deseen observar, manejar y obtener, además posee una amplia gama de herramientas para colocar breakpoints, cambiar el color de los elementos, introducir texto entre otras. En el diagrama de bloques se realizan las interconexiones entre los controles, constantes e indicadores finales, en esta pantalla se pueden realizar todas las operaciones lógicas, matemáticas o combinaciones de palabras y números, además permite efectuar los eventos de programación más conocidos como los if, los ciclos for, while, así como retardos programados, recepción de datos desde dispositivos externos, control de los elementos visibles, colores, y muchas funciones más fácilmente asequibles por la barra de herramientas y además permite crear los VIs que el usuario desee y utilizarlos en otro VI. Cada aplicación requiere unos VIs específicos, ya sean proporcionados por el programa o creados por el usuario.

En este proyecto se utilizaron los VIs que se describen a continuación cada uno junto a una gráfica que muestras sus entradas y salidas de datos.

➤ **VISA configure serial port.VI:** Permite configurar cada parámetro del puerto que se va a utilizar, incluyendo la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de paridad, el tiempo que espera sin recibir datos, los bits de parada y el control de flujo. Se utiliza para configurar los bits de parada, la velocidad de transmisión y el tiempo de espera de los datos de acuerdo a la forma de envío de datos desde el DSP.

³² <http://www.ni.com/labview/esa/faq.htm#1>

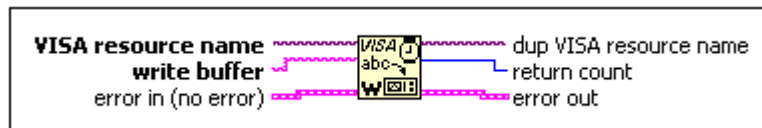
Figura 81. Configuración del VI configure serial port



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

- **VISA Write.VI:** Permite escribir una palabra al buffer del puerto serial correspondiente, de donde ira hacia el dispositivo externo, tiene un indicador que muestra cuantos bytes escribe. Se utiliza para enviar la señal de inicio de comunicación al dispositivo.

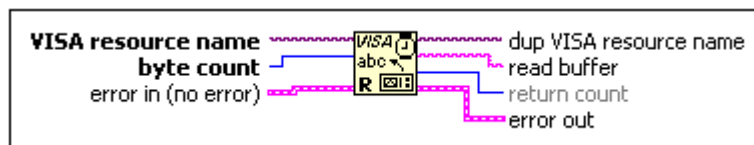
Figura 82. Configuración del VI Write



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

- **VISA Read.VI:** Lee los datos almacenados en el buffer del puerto serial y los entrega en forma de texto, ya que le llegan bytes de palabras. Tiene un control para determinar cuántos bytes espera leer y un indicador de cuantos bytes lee. Se utiliza para leer los datos enviados desde el MRS

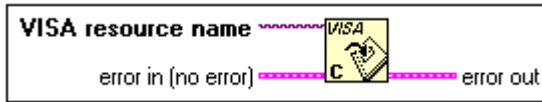
Figura 83. Configuración del VI Read



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

- **VISA Close.VI:** Cierra el puerto indicado finalizando la transmisión y recepción de datos. Se utiliza para que se reenvíen los datos o que se introduzcan tensiones no deseadas al MRS.

Figura 84. Configuración del VI Close



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

- **One Button Dialog.VI:** Muestra un dialogo en el centro de la pantalla, junto con un único botón que al presionarlo envía un verdadero como señal de salida booleana. Es utilizado para indicar al usuario las acciones que debe realizar durante la ejecución de la aplicación.

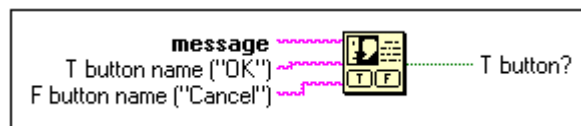
Figura 85. Configuración del VI One button dialog



Fuente Archivo de Ayuda de LabVIEW

- **Two Button Dialog.VI:** Muestra un dialogo con dos botones que proporcionan una salida booleana verdadera y una falsa, los diálogos sobre los botones se pueden variar. Se utiliza para definir el menú principal con sus opciones respectivas.

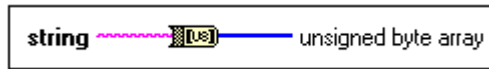
Figura 86. Configuración del VI Two button dialog



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

- **String To Byte Array.VI:** Convierte las letras de una palabra en bytes numéricos de acuerdo al código ASCII. Es utilizado para convertir las palabras recibidas del buffer en números que se puedan trabajar con las demás herramientas.

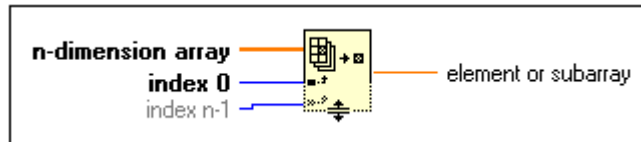
Figura 87. Configuración del VI String to Byte Array



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

➤ **Index Array.VI:** Arroja el valor del vector en la posición indicada por "index 0", puede arrojar varios valores en un nuevo vector. Se utiliza para descomponer el vector principal en pequeñas subsecciones que son los valores de los datos enviados.

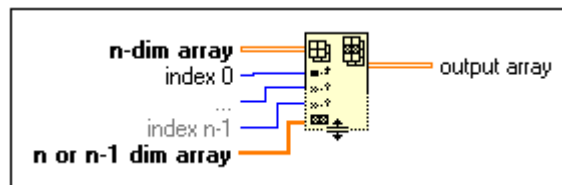
Figura 88. Configuración del VI Index Array



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

➤ **Insert Into Array.VI:** Inserta un elemento o un vector dentro de otro de mayor tamaño en la posición indicada por "index 0". Se utiliza para elaborar un vector de datos que sirve para efectuar las operaciones y gráficas subsecuentes.

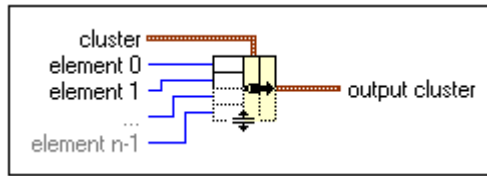
Figura 89. Configuración del VI Insert into Array



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

➤ **Bundle.VI:** Compila los datos individuales en un cluster único de salida, esto sirve para reducir el número de líneas entre una parte del programa y otra. Se utiliza para simplificar el manejo de los valores que posee cada prueba.

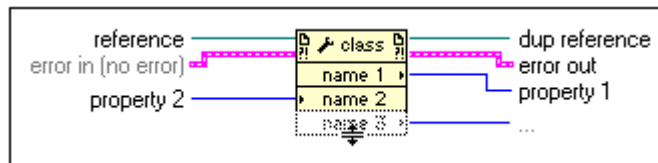
Figura 90. Configuración del VI Bundle



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

➤ **Property Node:** Herramienta utilizada para cambiar u obtener las propiedades de los controles, las gráficas, y en general de todo lo que aparece en el panel frontal. Las propiedades que se pueden cambiar dependen del objeto pero las más comunes es la posibilidad de verlo, su color, su tamaño, etc. Se utiliza para acomodar las escalas de la gráfica.

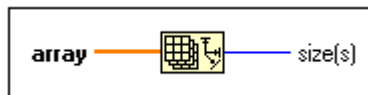
Figura 91. Configuración del VI Property Node



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

➤ **Array Size.VI:** Obtiene el tamaño del vector que tiene en la entrada. Se utiliza para obtener la cantidad de datos que se van a graficar.

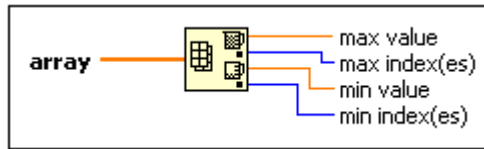
Figura 92. Configuración del VI Array Size



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

➤ **Array Max & Min.VI:** Obtiene los valores máximo y mínimo del vector de entrada, así como su posición si es un vector de una sola dimensión. Se usa para obtener los límites de la gráfica de resistividad contra distancia.

Figura 93. Configuración del VI Array Max y Min



Fuente: Archivo de Ayuda de LabVIEW

Junto con estos VIs se utilizaron varios controles creados por los autores adecuados para la correcta operación de esta aplicación. LabVIEW permite al usuario cambiar la forma, el color, la acción mecánica, los textos y demás propiedades de los controles de tal forma que cada aplicación es única y personal. Los controles usados en este proyecto son sencillamente interruptores on/off, controladores numéricos y controladores desplegables.