



**INSTRUMENTACIÓN ELECTROQUÍMICA:
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS
PARA EL LABORATORIO DE CORROSIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA
METALÚRGICA.**

JOSÉ ALEJANDRO AMAYA PALACIO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
MESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Bucaramanga
2009**

**INSTRUMENTACIÓN ELECTROQUÍMICA:
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS
PARA EL LABORATORIO DE CORROSIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA
METALÚRGICA.**

JOSÉ ALEJANDRO AMAYA PALACIO

**Trabajo de Investigación para optar al título de
MAGÍSTER EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

Director

MPE. JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

Codirector

MSC. CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

Bucaramanga

2009

Este trabajo y todas las situaciones vividas para lograr culminarlo, los dedico principalmente a DIOS por ser mi guía y fuerza espiritual.

A mi mamá por su amor, motivación y confianza.

A mi querida esposa Esperanza que a pesar de todos los inconvenientes siempre me ha brindado su apoyo.

A mis hijos Jesús Alejandro y José David, mis mejores amigos y fuerza para seguir adelante.

Y por último a toda mi familia y amigos que me acompañan en este camino.

JOSÉ ALEJANDRO AMAYA PALACIO

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a

DIOS por su misericordia, inspiración y bondad.

Profesor JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ, Director de este proyecto, por su colaboración y apoyo, por sus indicaciones y sugerencias y por la orientación profesional llena de confianza en mi trabajo.

Profesores CUSTODIO VÁSQUEZ QUINTERO e IVÁN URIBE, de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por su paciencia, compromiso y apoyo en un proyecto que aún requiere ser continuado.

Finalmente a todos los profesores de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, por su invaluable apoyo y motivación, bendiciones para todos, maestros y amigos.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y TRABAJOS DESARROLLADOS PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN | 3 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 3 |
| 1.2 METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN | 4 |
| 1.2.1. Documentación y fundamentación con respecto a los ensayos de corrosión | 4 |
| 1.2.2. Principios de Funcionamiento de cada equipo. | 5 |
| 1.2.3. Estudio de la configuraciones circuitales para montaje de prototipos de acuerdo con la operación y puesta en funcionamiento. | 5 |
| 1.2.4. Análisis de algoritmos a implementar para desarrollo de cálculos y procesamiento de datos. | 5 |
| 1.2.5. Estudio y selección de circuitos integrados para configurar memoria, visualización de datos y comunicación con el PC. | 5 |
| 1.2.6. Selección de Pantallas de cristal líquido LCD. | 5 |
| 1.2.7. Realización de pruebas para evaluación de desempeño de los prototipos..... | 5 |
| 1.2.8. Implementación de ajustes y cambios de acuerdo con los resultados de las pruebas. | 6 |
| 1.2.9. Implementación del equipo. | 6 |
| 1.2.10. Elaboración del informe final. | 6 |
| 1.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DESARROLLADO | 6 |
| 2. SISTEMA POTENCIOSTATO – GALVANOSTATO AUTÓNOMO SPGA | 10 |
| 2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SPGA | 10 |

| | |
|--|----|
| 2.2. CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SPGA | 11 |
| 3. MEDIDOR DE RESISTIVIDAD DE SUELOS MRS. | 12 |
| 3.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MRS..... | 12 |
| 3.2. CONFIGURACIÓN GENERAL DEL MRS | 13 |
| 3.3. FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA DEL MRS | 14 |
| 4. MEDIDOR DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA – MIE..... | 20 |
| 4.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MIE | 20 |
| 4.2. CONFIGURACIÓN GENERAL DEL MIE..... | 20 |
| 4.3. FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA DEL MIE..... | 22 |
| 4.3.1. Regresión Senoidal | 22 |
| 4.3.2. REGRESIÓN CIRCULAR PARA EL MIE | 24 |
| 5. CONCLUSIONES | 30 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 34 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Estructura básica del Potenciostato | 7 |
| Figura 2. Primer Desarrollo de la estructura básica del Potenciostato. | 7 |
| Figura 3. Tarjeta desarrollada Sistema Potenciostato Galvanostato Autónomo SPGA. | 8 |
| Figura 4. Primer prototipo desarrollado del Sistema Potenciostato Galvanostato Autónomo..... | 8 |
| Figura 5. Pantalla del software implementado en Labview para análisis y visualización de datos del SPGA. | 9 |
| Figura 6. Conjunto de 8 de los 10 prototipos implementados del SPGA..... | 9 |
| Figura 7. Diagrama de Bloques del SPGA | 11 |
| Figura 8. Imagen del prototipo SPGA implementado. | 12 |
| Figura 9. Esquema básico de un Medidor de Resistividad de Suelos | 13 |
| Figura 10. Diagrama de bloques del MRS..... | 14 |
| Figura 11. Definición de la resistividad aparente..... | 18 |
| Figura 12. Imagen del Primer MRS desarrollado..... | 19 |
| Figura 13. Imagen del Prototipo mejorado del MRS | 19 |
| Figura 14. Diagrama de Bloques del Medidor de Impedancia Electroquímica | 21 |
| Figura 15. Grafico representativo del algoritmo de regresión circular | 29 |

RESUMEN

TÍTULO

INSTRUMENTACIÓN ELECTROQUÍMICA: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS PARA EL LABORATORIO DE CORROSIÓN DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA*

AUTOR

JOSÉ ALEJANDRO AMAYA PALACIO**

PALABRAS CLAVES

Impedancia Electroquímica, corrosión, Diagrama de Bode, Diagrama de Ntquist, resistividad de suelos, potencióstato, galvanostato.

DESCRIPCIÓN

Las actuales circunstancias motivan a la Universidad a aplicar políticas de sustitución de importaciones y estrategias para minimizar el costo de equipos, de su mantenimiento y su reparación. De común acuerdo las escuelas de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) y de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales (EIMCM), están desarrollando actualmente un proyecto para la construcción de equipos UIS, que permitan realizar actividades de laboratorios y de investigación que puedan ser revisados y reparados in situ. El presente informe expone el proceso seguido para el diseño y construcción de prototipos para ser implementados en el laboratorio de corrosión de la EIMCM, se han denominado Sistema Potenciostato – Galvanostato Autónomo (SPGA), Medidor de Resistividad de Suelos (MRS) y Medidor de Impedancia Electroquímica (MIE).

Un Medidor de Impedancia Electroquímica se define como un equipo que permite realizar pruebas electroquímicas en corriente alterna con propósitos de valorar la corrosión en un material. Para esto, suministra una diferencia de potencial controlada a diferentes valores de frecuencia y adquiere el valor de la corriente que circula a través de la celda electroquímica. Un Medidor de Resistividad de Suelos es un dispositivo que permite inyectar una señal de tensión al terreno y medir el valor de la corriente resultante, de esta forma calcular la resistencia y resistividad del suelo. Finalmente, un Sistema Potenciostato – Galvanostato Autónomo se describe como un equipo que puede suministrar una variable eléctrica fija ó controlada (Tensión ó Corriente) y medir la respuesta correspondiente (Corriente ó Tensión) con el fin de realizar pruebas de corrosión.

* Trabajo de Investigación en la modalidad de investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Maestría en Ingeniería Electrónica. Director: MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirector: MsC. Custodio Vásquez Quintero.

SUMMARY

TITTLE

Electrochemical Instrumentation: Theoretical Fundamentals for carried out Equipments for laboratory of corrosion of Metallurgical School.*

AUTHOR

JOSÉ ALEJANDRO AMAYA PALACIO**

KEY WORDS

Electrochemical Impedance, corrosion, Bode`s Diagram, Nyquist`s Diagram, resistivity of soil, potentiostat, galvanostat.

DESCRIPTION

Current circumstances motivate University to implement import substitution policies in order to minimize cost of equipment, maintenance and repair. In agreement, schools of Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones y de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, are developing a project for the construction of equipment, oriented to academic and research activities, that can be checked and repaired in situ. This paper presents the design and construction of prototypes that has been called Autonomous Potentiostat – Galvanostat System (SPGA), Resistivity of Soil Meter (MRS) and Electrochemical Impedance Meter (MIE) to be implemented in the laboratory of corrosion of the EIMCM.

An Electrochemical Impedance Meter is defined as a computer that allows electrochemical test with alternate current, in order to determinate corrosion on a material, providing a controlled voltage difference at different values of frequency and acquiring the value of current flowing through an electrochemical cell. A Resistivity of Soil Meter is a device that supply voltage in to soil and register the value of resultant flow current, in this way compute the resistance and Resistivity of Soil. Finally, a Potentiostat - Galcanostat Autonomous System it has described like a equipment that supply a fixed or controlled electrical variable (voltage or Flow Current) and register the response (Flow Current or Voltage) for execute corrosion tests.

* Master Degree Project under research modality

** Faculty of Physics-Mechanical Engineering. Master in Electronic Engineering. Electrical and Electronic Engineering and of Telecommunication School. Director: MPE. Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirector: MsC. Custodio Vásquez Quintero.

INTRODUCCIÓN

En el presente informe de trabajo de Investigación se presenta en forma resumida y sencilla el trabajo realizado a través de múltiples trabajos de grado para lograr la configuración de equipos para ensayos de corrosión.

Este trabajo de investigación: “Instrumentación Electroquímica: Fundamentación teórica para la construcción de equipos para ensayos de Corrosión”, hace parte de un convenio establecido entre la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales (EIMCM) y la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T) enmarcado dentro del proyecto “Repotenciación de los laboratorios de la escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales” financiado por el fondo estampilla pro – UIS.

Es indiscutible el desarrollo de la Instrumentación que hoy en día utiliza grandes herramientas como la programación, procesamiento analógico de señales (amplificación, filtrado, etc), procesamiento digital de señales (conversión A/D, conversión D/A, FFT), microcontroladores etc. Campos en los que la E3T de la UIS a través del grupo de investigación CEMOS, posee experiencia y puede aprovechar para continuar desarrollos en esta área.

Se han publicado tres artículos directamente relacionados con los prototipos implementados.

Este Trabajo de investigación plantea una propuesta de desarrollo de equipos para ensayos de corrosión para la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, aplicando la utilización de circuitos integrados, microcontroladores, DSP's y técnicas que permitan como producto final un equipo adecuado para

prácticas de laboratorio y con facilidades de comunicación con el PC, fácil puesta en funcionamiento, medición de valores pequeños en tensión y corriente, amplia variación en frecuencia, etc.

La presentación profunda y completa de cada uno de los prototipos implementados (Sistema Potenciostato – Galvanostato Autónomo SPGA, Medidor de Resistividad de Suelos MRS y Medidor de Impedancia Electroquímica MIE) se realiza en cada uno de los informes de los trabajos de grado realizado. En el presente informe se resumen los conceptos fundamentales de cada prototipo y se expone la forma en que se organizó el desarrollo de los trabajos.

En el primer capítulo se describen los trabajos de grado realizados para el desarrollo de cada prototipo y la metodología seguida para lograrlo. En los siguientes tres capítulos (segundo, tercero y cuarto) se presenta cada uno de los prototipos implementados siguiendo la estructura de definición, principio de funcionamiento, fundamentación matemática y resultados obtenidos.

1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y TRABAJOS DESARROLLADOS PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes

En el año de 1992 se realizó la tesis de grado “**Desarrollo de un Potenciostato Basado en un IBM-AT o Compatible**”, por Ramón Pradilla y Fidole Villamizar , estudiantes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica. Dicha tesis tenía como objetivo principal: “construir un Potenciostato para ser comandado desde un computador IBM-AT o compatible, facilitando la toma de datos para la construcción de curvas de polarización en el marco de un proceso confiable y automático”. Al conjunto de programas y circuitos desarrollados se les dio el nombre se Sistema TCP (Trazador de curvas Potenciostáticas).

En 1992 entre las escuelas de ingeniería eléctrica y de Física de la UIS se realizó el proyecto de grado: “Desarrollo De Un Potenciostato A Partir Del Commodore 64”. Por Carlos Orlando Araque Parada, y Héctor Josué Quintero Jaimes, de la escuela de Ingeniería Eléctrica; Dirigidos por Yesid Torres de la Escuela de Física.

En el año de 1997 se realizó la tesis de grado “**Resistenciómetro para aguas: Diseño y Construcción, que determina la localización de depósitos de aguas subterráneas empleando medidas de resistividad del terreno**”, realizada por Liliana Bravo Bohada y Juan Carlos Hurtado Parra, estudiantes que optaban al título de Ingenieros Electricistas, el objetivo principal de su trabajo era: “Diseño y Construcción de un Resistenciómetro para aguas, facilitando la toma de pruebas de campo, basado en un sistema completamente automático de alta confiabilidad”.

En 1998 en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T), se desarrolló por parte de los estudiantes Salus Eudoro Silva y Fredy Alberto Abaunza la tesis de grado denominada “**Potenciostato. Diseño y**

Construcción”, la cual tenía como objetivos: “ Diseñar y construir una fuente de tensión o corriente regulada”. Como fuente de tensión (Potenciostato Electrónico) puede operar en dos rangos, entre 1 y 25V D.C. a una corriente máxima de 4 A D.C., o entre 25 y 60V D.C. con una corriente máxima de 10 A D.C. Como fuente de corriente (Galvanostato Electrónico) suministra una corriente entre 1 y 4 A D.C. con variaciones de tensión entre 0 y 60V D.C.

En 1998 en la Escuela de Ingeniería de Sistemas con el apoyo de la Corporación para la Investigación de la Corrosión (CIC),se desarrolló la tesis de grado **“Sistema Integrado de Adquisición de Datos para un Potenciostato Princeton Modelo 363”**, fundamentado en la realización del software necesario para el manejo de una tarjeta de adquisición de datos acoplada al PC y la representación gráfica de los datos capturados para un posterior análisis.

Finalmente en el año 2001,se desarrolló el proyecto de grado **“Sistema de Adquisición y Control de Señales para Monitoreo de Corrosión en Suelos. Diseño y Construcción”** por Javier Enrique Serrano Porras y Abdón Giovanni López Hernández, estudiantes de la E3T, en asocio con la CIC. Este tenía como objetivo principal: “Diseñar y construir un equipo capaz de controlar y recolectar eficientemente los datos y señales necesarias para el estudio de las características corrosivas en el suelo circundante a las bases de las torres de transmisión de energía”. Este equipo es totalmente autónomo y portátil, y tiene como nombre SMCS.

1.2 Metodología del Trabajo de Investigación

1.2.1. Documentación y fundamentación con respecto a los ensayos de corrosión

Estudio de normas y documentos que clarifiquen el funcionamiento de los equipos y los requerimientos para realizar un ensayo de corrosión en forma adecuada.

1.2.2. Principios de Funcionamiento de cada equipo.

Indagar sobre las características que deben satisfacer los equipos para la realización de los ensayos.

1.2.3. Estudio de la configuraciones circuitales para montaje de prototipos de acuerdo con la operación y puesta en funcionamiento.

Analizar la estructura básica de los equipos para decidir su configuración y los elementos constituyentes.

1.2.4. Análisis de algoritmos a implementar para desarrollo de cálculos y procesamiento de datos.

Estudio del funcionamiento de μ C, LCD, precisión, velocidad para establecer un algoritmo que permita realizar los cálculos y visualización en forma precisa y rápida.

1.2.5. Estudio y selección de circuitos integrados para configurar memoria, visualización de datos y comunicación con el PC.

Análisis de CI para conformar la memoria, visualización y comunicación con PC. Esquema de conexiones y programas.

1.2.6. Selección de Pantallas de cristal líquido LCD.

Para satisfacer requerimientos de facilidad en la comprensión de los menús, formato de presentación de los datos y características de la visualización.

1.2.7. Realización de pruebas para evaluación de desempeño de los prototipos.

De común acuerdo con la escuela de Metalúrgica y con base en las Normas ASTM, estructurar pruebas que permitan validar el funcionamiento de los equipos, ya sea a nivel general o para el desarrollo de alguna prueba en particular.

1.2.8. Implementación de ajustes y cambios de acuerdo con los resultados de las pruebas.

Para adaptarse a las necesidades particulares del laboratorio de corrosión se pueden implementar ajustes para mejorar los prototipos.

1.2.9. Implementación del equipo.

Montaje y puesta en funcionamiento de los equipos.

1.2.10. Elaboración del informe final.

Se redacta en forma concisa el trabajo desarrollado, los resultados obtenidos y líneas de desarrollo.

1.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRABAJO DESARROLLADO

Con el fin de ilustrar este concepto se presentará como ejemplo el caso desarrollado para la Implementación del Sistema Potenciostato Galvanostato Autónomo SPGA. La información completa relacionada con el desarrollo del SPGA está disponible en [1].

Básicamente para configurar un equipo se requiere solucionar cuatro grandes infraestructuras constitutivas del mismo: La infraestructura del principio de funcionamiento o fundamentación teórica, la infraestructura Hardware que es el conjunto óptimo de dispositivos que pueden lograr la funcionalidad deseada, la infraestructura software o programación necesaria para la ejecución de tareas

automatizadas y la infraestructura tecnológica o aquella que permita facilidad de interacción con el usuario y desarrollo de pruebas.

Para lograr esto se propuso la definición de una estructura básica (entendida como la configuración más sencilla para apropiarse del principio de funcionamiento del equipo). Para el caso del potenciómetro se definió una estructura básica de acuerdo con su definición y se presenta en la Figura 1.

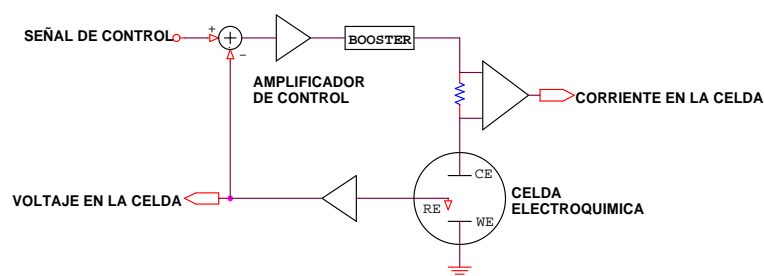


Figura 1. Estructura básica del Potenciostato

Fuente: Autores SPGA.

Con base en esta estructura básica se configuró la primera tarjeta o primer desarrollo (esta es la denominada infraestructura Hardware) y se presenta en la Figura 2.

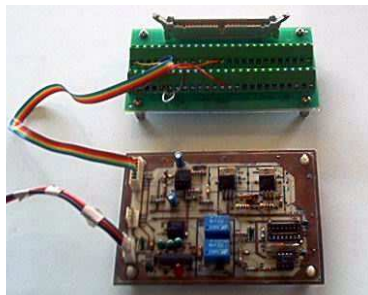


Figura 2. Primer Desarrollo de la estructura básica del Potenciostato.

Luego de la realización de pruebas y de la configuración de programas de computador se desarrolló la tarjeta mejorada para el Sistema Potenciostato – Galvanostato, esta tarjeta se presenta en la Figura 3.



Figura 3. Tarjeta desarrollada Sistema Potenciostato Galvanostato Autónomo SPGA.

Luego se realizó el desarrollo de las otras funcionalidades que se requieren para la operación del equipo, elaboración de los algoritmos y programas para la ejecución de las diferentes tareas, uso de teclado y visualización. Una vista del primer prototipo desarrollado se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Primer prototipo desarrollado del Sistema Potenciostato Galvanostato Autónomo

Aquí se puede apreciar la infraestructura tecnológica, la cual se complementa con la comunicación con el computador y el software de visualización y análisis de datos como se muestra en la Figura 5.

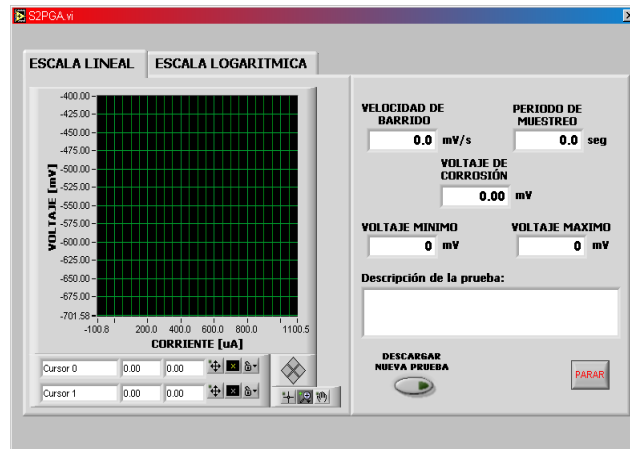


Figura 5. Pantalla del software implementado en Labview para análisis y visualización de datos del SPGA.

Mediante un proceso continuo de retroalimentación y mejora se fueron mejorando las diferentes etapas de los equipos para lograr una estructura modular y reproducible. Para el Sistema Potenciostato Galvanostato Autónomo se realizaron mejoras y se implementaron 10 ejemplares del prototipo, lo cual se puede evidenciar en la Figura 6.



Figura 6. Conjunto de 8 de los 10 prototipos implementados del SPGA.

De esta forma se puede garantizar la reproducibilidad y el funcionamiento estable y coherente de los diferentes prototipos construidos.

Una metodología similar se aplicó con los otros dos equipos considerando las variantes y aplicaciones particulares de cada uno.

2. SISTEMA POTENCIOSTATO – GALVANOSTATO AUTÓNOMO SPGA.

El *SPGA* es un sistema autónomo que opera como Potenciostato o Galvanostato, para el desarrollo de pruebas de laboratorio, en el estudio de los fenómenos electroquímicos de la corrosión. Este sistema tiene la capacidad de desarrollar pruebas sin la necesidad de un equipo auxiliar (como un PC), almacenando el resultado de estas, para su posterior visualización, análisis y estudio por medio de un **software** en un computador.

2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SPGA

El principio de funcionamiento del SPGA se basa fundamentalmente en mantener controlada una variable (tensión o corriente) aplicada a una celda electroquímica a la vez que permita la variación aportada por la celda de la otra variable (corriente o tensión). Es decir, cuando opera en modo POTENCIOSTATO, se suministra una tensión controlada a la celda electroquímica, de acuerdo con los fenómenos de polarización y conducción que ocurran al interior de la celda electroquímica, va a desarrollarse la circulación de determinada cantidad de corriente, el prototipo debe estar en capacidad de permitir la circulación de la corriente establecida por la celda y adquirir el valor de la misma. Cuando opera en modo GALVANOSTATO,

se suministra un valor de corriente especificado al tiempo que se mide la tensión resultante entre los terminales de la celda.

2.2. CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SPGA

Para tener una mejor comprensión del funcionamiento del sistema, éste se puede dividir en tres módulos básicos, que se observan en la Figura 7.

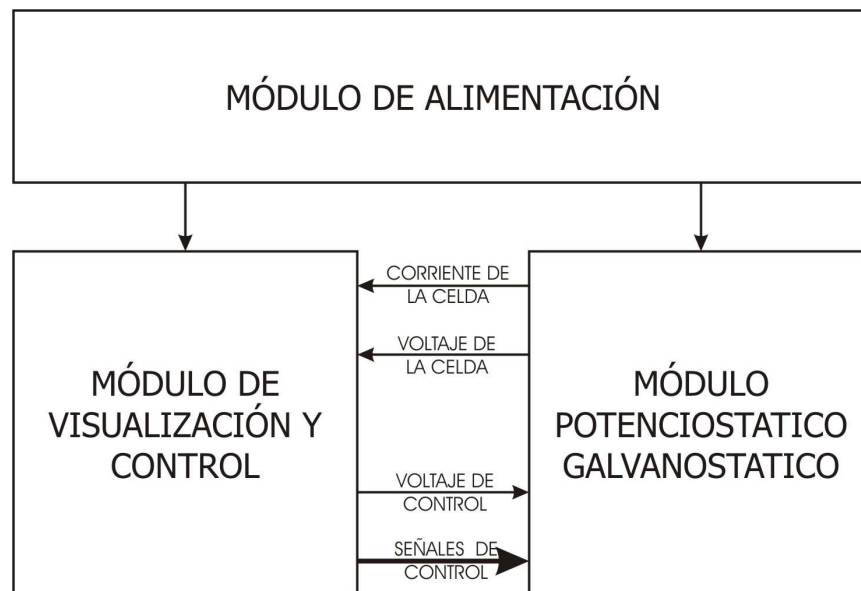


Figura 7. Diagrama de Bloques del SPGA

Fuente: Diseño de los autores del proyecto SPGA.

En la Figura 8 se muestra una imagen del prototipo del SPGA implementado.



Figura 8. Imagen del prototipo SPGA implementado.

3. MEDIDOR DE RESISTIVIDAD DE SUELOS MRS.

El medidor de resistividad eléctrica debe proveer una medida de resistencia obtenida con cuatro electrodos tal como lo describe la Norma IEEE-80.

En términos generales se puede dividir la descripción de un telurímetro en dos grandes secciones: el circuito inyector y el circuito de medición.

3.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MRS

El principio de funcionamiento se basa en que determinando la relación tensión – corriente, aportada por algunas de las configuraciones electrónicas presentadas, es posible calcular aproximadamente la resistividad aparente del terreno. Se requiere que la corriente inyectada pueda fluir a través del terreno y el gradiente de potencial generado pueda ser monitoreado por el circuito de medición.

3.2. CONFIGURACIÓN GENERAL DEL MRS

En términos generales se puede dividir la descripción de un telurímetro en dos grandes secciones: el circuito inyector y el circuito de medición. Tal y como se presenta en la Figura 9.

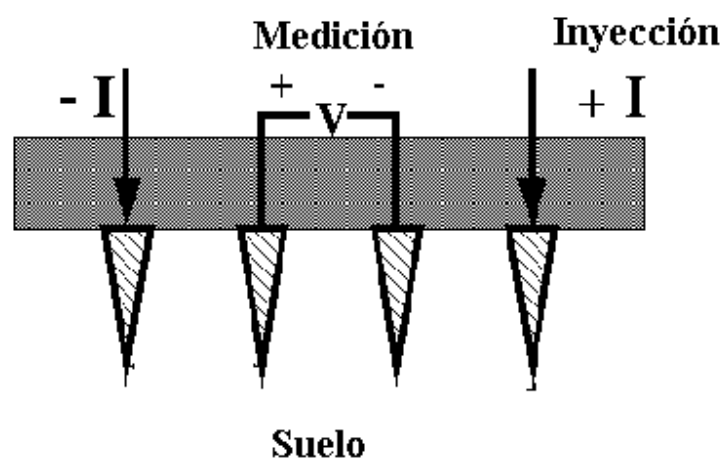


Figura 9. Esquema básico de un Medidor de Resistividad de Suelos

En la Figura 10 se presenta el diagrama de bloques del Medidor de Resistividad de Suelos, donde se destacan sus principales secciones como son: circuito generador, sistema de protecciones, etapa de control, etapa de adquisición y acondicionamiento de señales, cargador de batería, display y teclado, e interfaz de comunicación.

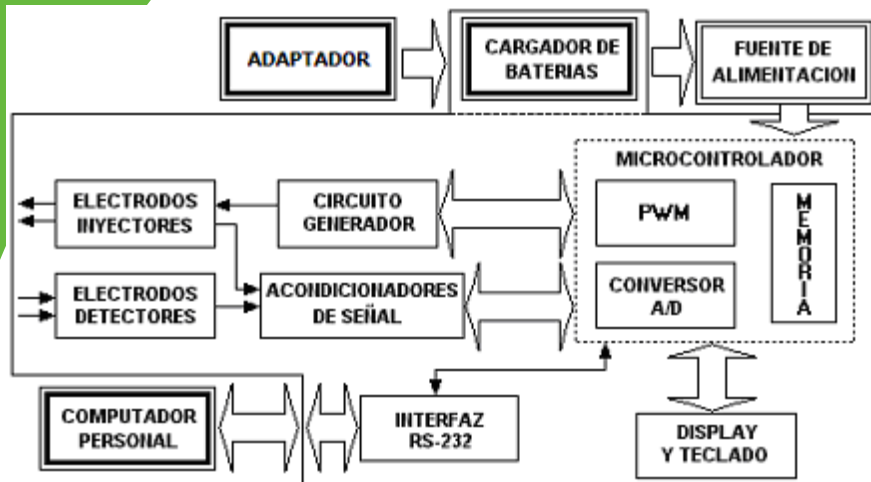


Figura 10. Diagrama de bloques del MRS.

3.3. FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA DEL MRS

COMO EN OTROS CASOS, TAMBIÉN EN GEOELECTRICIDAD DEBEN HACERSE CONSIDERACIONES IDEALIZADAS DE UNA REALIDAD, COMO SON, ENUNCIAR HOMOGENEIDADES EN LAS CAPAS DEL SUELO, ASUMIR QUE EL CONTACTO ENTRE LOS ESTRATOS ES PERFECTAMENTE PLANO Y OTRAS SEGÚN EL CASO TRATADO.

LA TEORÍA DE LA RESISTIVIDAD PARTE DE UN SEMIESPACIO HOMOGÉNEO, COMPUESTO POR LAS ATMÓSFERAS CUYA RESISTIVIDAD ES CONSIDERADA PARA EL CASO, INFINITA, Y EL OTRO, PARA UN MEDIO DE RESISTIVIDAD, P , SOBRE EL CUAL SE ESTABLECE UN CAMPO ELÉCTRICO ENTRE DOS PUNTOS AB, GENERANDO UNA CORRIENTE ELÉCTRICA TRAVÉS DE ELLOS.

SEGÚN LA LEY DE KIRCHOFF DE CORRIENTES, LA SUMA DE ESTA EN CONDICIONES ESTACIONARIAS ES:



$$a. \quad I_A + I_B = 0$$

b. Según las ecuaciones de Maxwell

$$\Delta x \bar{E} = - \frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$$

$$\Delta x \bar{H} = J + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$$

Donde:

E: Intensidad de Campo Eléctrico

H: Intensidad de Campo Magnético

B: Densidad de Flujo Magnético

D: Densidad de Flujo Eléctrico

J: Densidad de Corriente

Como se están planteando condiciones estacionarias, entonces las derivadas parciales desaparecen, de tal forma que;

$$\Delta x \bar{E} = 0$$

$$\Delta x \bar{H} = J$$

Se deduce que el campo eléctrico es conservativo y se deriva de un potencial escalar,

$$\bar{E} = - \Delta V$$

Por otro lado se aplica la Ley de Ohm para medios isótropicos, que plantea;

$$\begin{aligned}\bar{J} &= \sigma \bar{E} \\ \bar{E} &= \rho \bar{J}\end{aligned}$$

Y como no hay creación o eliminación de cargas, entonces;

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

Luego;

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \bar{J} &= \nabla \cdot (\sigma \bar{E}) = 0 \\ \nabla \cdot (\sigma \bar{E}) &= \sigma (\nabla \cdot \bar{E}) + \bar{E} \cdot (\nabla \sigma) \\ \nabla \cdot (\sigma \bar{E}) &= -\sigma (\nabla \cdot \nabla V) + \bar{E} \cdot (\nabla \sigma) \\ \nabla \cdot (\sigma \bar{E}) &= -\sigma (\nabla^2 V) + \bar{E} \cdot (\nabla \sigma)\end{aligned}$$

Como el medio se consideró inicialmente homogéneo, su conductividad se asume uniforme, por lo tanto;

$$\nabla \cdot \sigma = 0$$

$$\nabla^2 V = 0$$

Esta es la ecuación de *Laplace* válida para todo el espacio conductor, excepto en los puntos de contacto AB.

En una superficie semiesférica de radio, r , alrededor de un electrodo, se tendrá uniformidad en la densidad de corriente, J , debido a la simetría, en la dirección radial. Considerando el área de una semiesfera, la corriente será;

$$I = 2 \pi r^2 J$$

Entonces;

$$J = \sigma E = \frac{I}{2\pi r^2}$$

Esta contribución corresponde a la densidad de corriente de conducción, luego se esta anulando el efecto de las densidades de corriente de convección y desplazamiento, las cuales dependen de campos no conservativos y acumulaciones de carga, las cuales no hemos considerado en la suposición inicial. De la anterior ecuación podemos despejar el campo eléctrico;

$$|E| = \frac{I}{2\sigma\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2}$$

Lo cual indica que el campo eléctrico de un electrodo puntual es inversamente a proporcional al cuadrado de la distancia radial, r , de aquí que la diferencia de potencial entre los puntos MN estará dada por;

$$V_{MN} = - \int_N^M E \cdot dl$$

Si tomamos a r_M y r_N como las distancias a los puntos M y N, respectivamente se obtiene;

$$V_{MN} = - \frac{\rho I}{2\pi} \int_N^M \frac{\partial r}{r^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right)$$

Si se quiere considerar un potencial absoluto (respecto a una referencia específica) y no una diferencia de potencial, se caracterizaría idealmente, el punto N, como el potencial cero a una distancia infinita de la fuente; de tal forma que:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_M} \right)$$

En el caso de que se tuvieran “n” fuentes, tocaría tener en cuenta el aporte i-ésimo de cada una de ellas, por lo cual:

$$V_M = \frac{\rho}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{r_i}$$

Tomando como base el anterior desarrollo matemático y manteniendo la suposición inicial se puede definir la resistividad aparente. Si se define **a**, como la distancia entre MN y **b**, como la distancia AM, se obtiene la siguiente expresión al crearse un campo eléctrico por medio de AB como se muestra en la Figura 11, midiendo la diferencia de potencial en MN, bajo la misma línea de acción de AB.

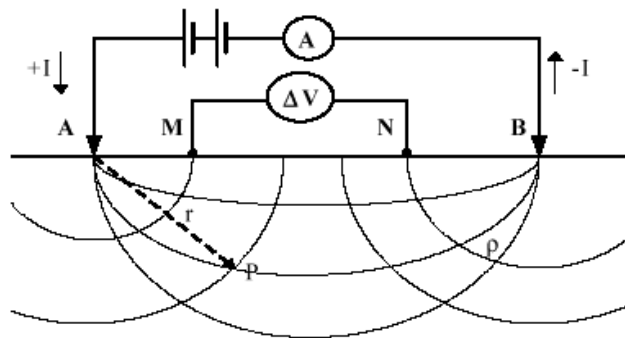


Figura 11. Definición de la resistividad aparente

$$\Delta V = V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{b+a} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{a}{b(b+a)} \right)$$

Despejando encontramos la expresión para la resistividad,

$$\rho = 2\pi \left(\frac{b(b+a)}{a} \right) \left(\frac{\Delta V}{I} \right)$$

La cual se puede ajustar a las características geométricas de cada tipo de configuración electrónica.

En la Figura 12 se puede apreciar una imagen del primer MRS desarrollado a partir de [2].



Figura 12. Imagen del Primer MRS desarrollado

Luego se desarrolló un segundo trabajo de grado [3] por medio del cual se implementó un prototipo mejorado del MRS, se puede apreciar una imagen del mismo en la Figura 13.



Figura 13. Imagen del Prototipo mejorado del MRS

4. MEDIDOR DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA – MIE

El prototipo para Medidor de Impedancia Electroquímica se desarrolló a partir de varios trabajos de grado [4], [5], [6] y [7], a la fecha hay uno en realización [8].

4.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MIE

El principio de funcionamiento del MIE, es similar a las de los prototipos MRS y SPGA, con la diferencia de que las señales que se suministran son señales senoidales de múltiples valores de frecuencia. Consiste en un circuito generador de tensión senoidal de amplitud fija y frecuencia controlable, la señal de tensión se aplica a una celda electroquímica y se adquiere la señal de corriente reconstruyendo la amplitud y fase, para posteriormente realizar el cálculo de la impedancia (magnitud y fase), con un conjunto de datos analizados y tratados para eliminar fuentes de error es posible calcular los parámetros eléctricos que permiten modelar en forma aproximada el comportamiento de la celda.

4.2. CONFIGURACIÓN GENERAL DEL MIE

El método de trabajo que se adoptó para el diseño y construcción del prototipo medidor de impedancia electroquímica se basó en una organización modular teniendo en cuenta el diagrama de bloques mostrado en la Figura 14.

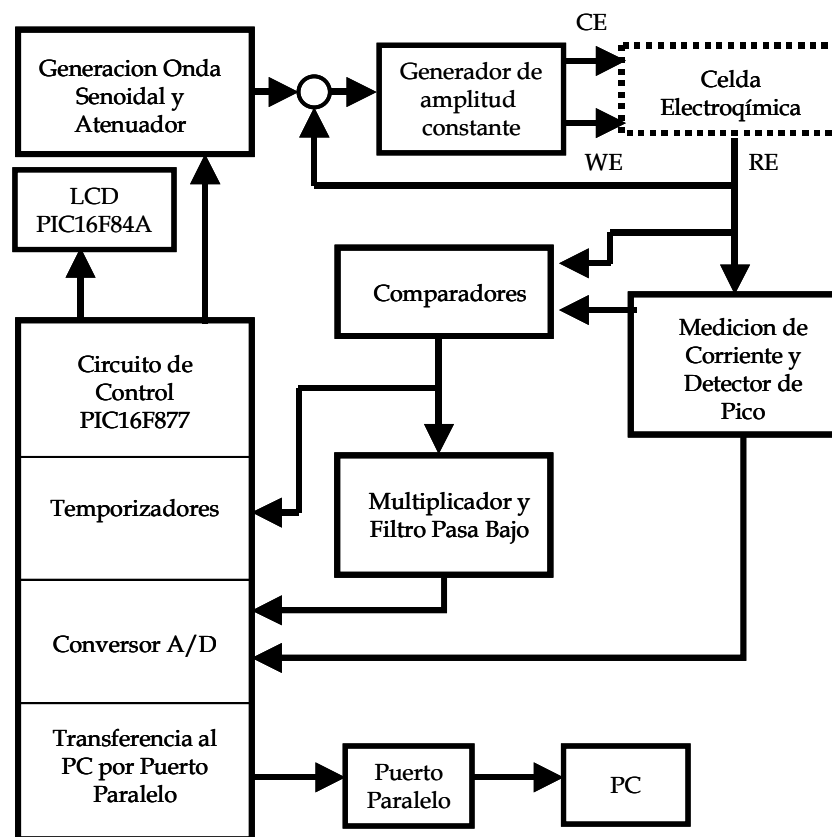


Figura 14. Diagrama de Bloques del Medidor de Impedancia Electroquímica

FUENTE: HOJA DE DATOS EXAR XR-2206

El MIE utiliza dos microcontroladores, el PIC16F84A y el PIC16F877. El primero es el encargado del manejo de la pantalla LCD y teclado para la interfaz de usuario. El segundo tiene como función el control general del MIE, principalmente la conmutación de frecuencias a aplicar, la medición de frecuencia y fase por software mediante temporizadores, la digitalización de las señales de corriente y la fase en la celda con el convertor A/D y la comunicación vía puerto paralelo con el PC para la posterior visualización de los datos obtenidos mediante Labview. La onda senoidal generada se atenúa para entregar a la celda los valores apropiados. El bloque de “generación de amplitud constante” es la etapa de salida hacia la celda electroquímica. La medición de la corriente en la celda se hace por medio de

un amplificador de instrumentación y un detector de pico que entregará el valor máximo de la señal para luego ser digitalizada. Los comparadores convierten las señales senoidales de voltaje y corriente en ondas cuadradas, estas son utilizadas para medir frecuencia y fase. El multiplicador entrega una onda cuadrada de valor medio proporcional a la fase existente, esta onda es posteriormente filtrada y digitalizada.

4.3. FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA DEL MIE

Para poder calcular los parámetros de circuitos equivalentes se hace necesario aplicar correcciones a los datos muestreados tanto de tensión como de corriente, para esto se aplica una técnica denominada regresión senoidal.

4.3.1. Regresión Senoidal

Constituye la forma de obtener la mejor aproximación de una onda senoidal para un conjunto de datos.

Siendo X y Y de la siguiente forma:

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n]$$

$$Y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_i, \dots, y_n]$$

Se plantea la ecuación 1

$$\overline{Y} = B_c \cos(\omega X) + B_s \sin(\omega X) \quad \text{Ecuación 1.}$$

Se plantea un problema de optimización ecuación 2.

$$e = \sum_{i=1}^n [Y_i - B_c \cos(\omega X_i) + B_s \sin(\omega X_i)]^2 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Se deriva e con respecto a Bc, dando la ecuación 3

$$\frac{\partial e}{\partial Bc} = \sum_{i=1}^n 2[Y_i - Bc \cos(WoXi) - Bs \sin(WoXi)] * [-\cos(WoXi)] = 0$$

La ecuación resultante de derivar la ecuación 3.

$$\sum_{i=1}^n \{Y_i \cos(WoXi) - Bc \cos^2(WoXi) - Bs \sin(WoXi)\} \cos(WoXi) = 0 \text{ Ecuación 4}$$

Ahora se deriva e con respecto a Bs.

$$\frac{\partial e}{\partial Bs} = \sum_{i=1}^n 2[Y_i - Bc \cos(WoXi) - Bs \sin(WoXi)] * [-\sin(WoXi)] = 0 \text{ Ecuación 4.1}$$

La ecuación resultante es la ecuación 5.

$$\sum_{i=1}^n [Y_i \sin(WoXi) - Bc \sin(WoXi) \cos(WoXi) - Bs \sin^2(WoXi)] = 0 \text{ Ecuación 5.}$$

Haciendo uso de las propiedades de las sumatorias la ecuación resulta de la forma:

$$Bc \sum_{i=1}^n \cos^2(WoXi) + Bs * \frac{1}{2} * \sum_{i=1}^n \sin(2WoXi) = \sum_{i=1}^n Y_i \cos(WoXi) \text{ Ecuación 6.}$$

Reagrupando términos se llega a una ecuación sencilla. Ecuación 7.

$$Bc * \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sin(2WoXi) + Bs \sum_{i=1}^n \sin^2(WoXi) = \sum_{i=1}^n Y_i \sin(WoXi)$$

Despejando Bc de la ecuación 7 resulta la ecuación 8.

$$Bc = \frac{\left\{ \left(\sum_{i=1}^n Y_i \cos(WoXi) \right) * \left(\sum_{i=1}^n \sin^2(WoXi) \right) - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \sin(WoXi) \right) * \left(\frac{1}{2} * \sum_{i=1}^n (2WoXi) \right) \right\}}{\left\{ \left(\sum_{i=1}^n \cos^2(WoXi) \right) * \left(\sum_{i=1}^n \sin^2(WoXi) \right) - \frac{1}{4} * \left(\sum_{i=1}^n (2WoXi) \right)^2 \right\}}$$

Ecuación 8

De igual forma que Bc, para Bs se aplican las mismas propiedades de sumatorias dando la ecuación final para Bs. La ecuación 9

$$B_s = \frac{\left\{ \left(\sum_{i=1}^n \cos^2(W_o X_i) \right) * \left(\sum_{i=1}^n Y_i \text{Sen}(W_o X_i) \right) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \text{Sen}(2W_o X_i) * \left(\sum_{i=1}^n Y_i \text{Cos}(W_o X_i) \right) \right\}}{\left\{ \left(\sum_{i=1}^n \cos^2(W_o X_i) \right) * \left(\sum_{i=1}^n \text{Sen}^2(W_o X_i) \right) - \frac{1}{4} * \left(\sum_{i=1}^n (2W_o X_i) \right)^2 \right\}}$$

Ecuación 9

Si se considera que las muestras están equiespaciadas y se toman sobre un periodo completo, entonces la regresión senoidal aporta el mismo resultado que la DFT (Transformada Discreta de Fourier).

O bien, La DFT calcula automáticamente el mejor ajuste de una senoidal en el sentido de los mínimos cuadrados, por tanto el resultado es muy preciso y con la FFT es muy rápido.

4.3.2. REGRESIÓN CIRCULAR PARA EL MIE

Con el fin de poder obtener el Diagrama de Nyquist y a partir de éste calcular los parámetros de circuito equivalente de una celda electroquímica, se hace necesario procesar los datos de impedancia con el fin de ajustarlos y obtener la mejor aproximación circular. De esta forma se aplicó el algoritmo denominado regresión circular.

Siendo X y Y de la siguiente forma:

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n]$$

$$Y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_i, \dots, y_n]$$

Se tiene que la ecuación de una circunferencia con centro en C (h, 0) y radio R, es de la forma:

$$Y^2 + (x-h)^2 = R^2 \quad \text{ó} \quad Y^2 = R^2 - (x_i - h)^2$$

Se plantea un problema de optimización.

Minimizando. Ecuación 1 $e = \sum_{i=1}^n (Y^2 - Y_i^2)^2$ \therefore Error en el cuadrado de la variable vertical.

Reemplazando términos se obtiene que: $e = \sum_{i=1}^n [R^2 - (x_i - h)^2 - Y_i^2]^2$ Ecuación 2.

Derivando con e con respecto a R: $\frac{\partial e}{\partial R} = \sum_{i=1}^n 2[R^2 - (x_i - h)^2 - Y_i^2] * 2R = 0$ Ecuación 3

Utilizando las propiedades de las sumatorias da como resultado la expresión:

$$nR^2 - \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 2x_i^2 h + h^2) - \sum_{i=1}^n Y_i^2 = 0 \text{ Ecuación 4.}$$

Ecuación 5 después de derivar: $nR^2 + 2h \sum_{i=1}^n x_i - nh^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2$ Ecuación 5.

Ahora se deriva a e con respecto a h: $\frac{\partial e}{\partial h} = \sum_{i=1}^n 2[R^2 - (x_i - h)^2 - Y_i^2] * 2(x_i - h) = 0$

$$\sum_{i=1}^n [R^2 - x_i^2 + 2hx_i - h^2 - Y_i^2] * (x_i - h) = 0 \text{ Ecuación 6}$$

Multiplicando término a término se tiene:

$$R^2 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i^3 + 2h \sum_{i=1}^n x_i^2 - h^2 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 - nhR^2 + h \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2h^2 \sum_{i=1}^n x_i + nh^3 + h \sum_{i=1}^n Y_i^2 = 0 \text{ Ecuación 7}$$

La ecuación 7 es resultado de las operaciones realizadas anteriormente:

$$R^2 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i^3 + 3h \sum_{i=1}^n x_i^2 - 3h^2 \sum_{i=1}^n x_i + nh^3 - \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 - nhR^2 + h \sum_{i=1}^n Y_i^2 = 0$$

Agrupando términos de la ecuación de arriba se obtiene la ecuación 8

$$R^2 * \left\{ \sum_{i=1}^n x_i - hn \right\} + h * \left\{ 3 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \right\} - h^2 * \left\{ 3 \sum_{i=1}^n x_i \right\} + h^3 n = \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 \quad (8)$$

Reagrupando, se obtiene la ecuación 9.

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) * R^2 - nhR^2 + \left\{ 3 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\} * h - \left\{ 3 \sum_{i=1}^n x_i \right\} * h^2 + nh^3 - \sum_{i=1}^n x_i^3 - \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 = 0$$

Las expresiones resultantes después de derivar con respecto a R y h son las ecuaciones 5 y 8:

$$nR^2 + \left(2 \sum_{i=1}^n x_i \right) * h - nh^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Ecuación 8

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) * R^2 - nhR^2 + \left\{ 3 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\} * h - \left\{ 3 \sum_{i=1}^n x_i \right\} * h^2 + nh^3 - \sum_{i=1}^n x_i^3 - \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 = 0$$

De la ecuación (5) se despeja R^2 dando la ecuación (A):

$$R^2 = h^2 - \left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) * h + \frac{1}{n} * \left\{ \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\} \quad \text{Ecuación (A)}$$

La ecuación (A) en la ecuación (8),

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) * h^2 - \left[\frac{2}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] * h + \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right] * \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right] - nh^3 + \left(2 \sum_{i=1}^n x_i \right) * h^2 - \left\{ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\} * h + \left\{ 3 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\} * h - \left\{ 3 \sum_{i=1}^n x_i \right\} * h^2 + nh^3 - \sum_{i=1}^n x_i^3 - \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 = 0$$

Después de varias manipulaciones matemáticas se obtiene la ecuación (C)

$$\left\{ 2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{2}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right\} * h = - \left\{ \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n x_i \right\} * \left\{ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\} + \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 \quad \text{Ecuación C}$$

C

Finalmente se despeja h de la ecuación (C) dando la expresión para la ecuación (D):

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 - \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right\} * \left\{ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\}}{2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{2}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad \text{Ecuación D.}$$

Como resultado de la solución de la ecuación de la circunferencia con centro en C (h, 0) y radio R, se obtuvieron que las ecuaciones A y D son las soluciones.

Resultado final:

$$R^2 = h^2 - \left(\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) * h + \frac{1}{n} * \left\{ \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\}$$

Ecuación A

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i Y_i^2 - \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right\} * \left\{ \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right\}}{2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{2}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

Ecuación D

Lo cual constituye un resultado interesante pues para aplicar la regresión circular, sólo se requiere la programación de dos ecuaciones ahorrando consumo de líneas de programación lo cual constituía una limitante al trabajar con DSP con baja capacidad de programación. Además simplifica los cálculos y resume en gran parte la ejecución de procesamiento.

En la Figura 14. Se puede apreciar el concepto aplicado a unos resultados analizados mediante la regresión circular.

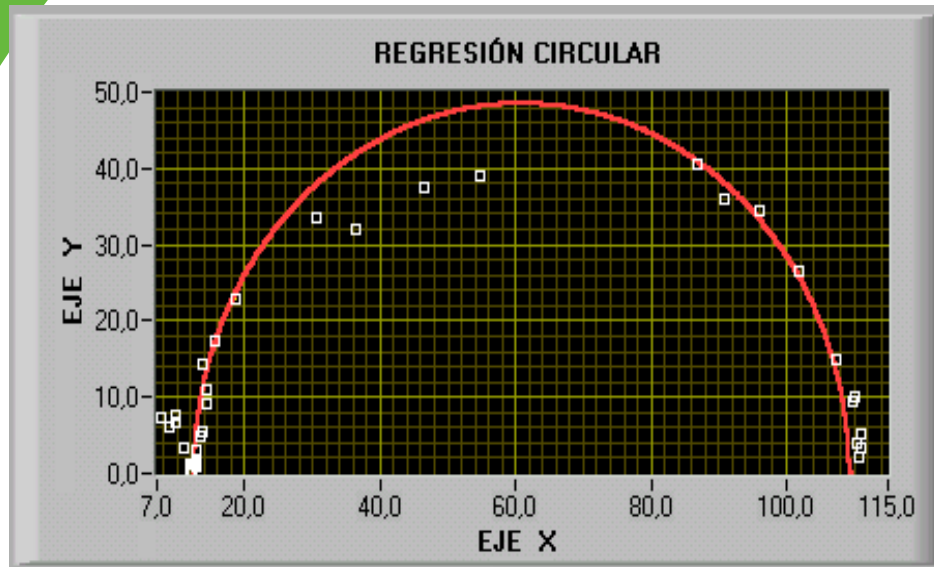


Figura 15. Grafico representativo del algoritmo de regresión circular

5. CONCLUSIONES

- Se implementaron tres prototipos de equipos electrónicos para desarrollar ensayos de corrosión como el Sistema Potenciostato – Galvanostato Autónomo SPGA, Medidor de Resistividad de Suelos MRS y Medidor de Impedancia Electroquímica MIE, con un costo moderado y adaptado a las necesidades y condiciones del Laboratorio de Corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Para esto se utilizaron dispositivos de aplicación específica y de propósito general, de capa superficial, técnicas de realización de tarjetas de circuito impreso de doble capa, estrategias para minimizar la interferencia electromagnética y de presentación comercial.
- Con relación al Sistema Potenciostato Galvanostato SPGA, se desarrolló un equipo que puede ser usado como Potenciostato y Galvanostato, con un rango de operación de $\pm 5V$ y $\pm 100mA$; dos rangos de medición de corriente, con resoluciones de $0.01mA$ y $0.1\mu A$, y resolución en voltaje de $1mV$, visualizables en pantalla; comunicación serial con el computador a 9600 baudios por segundo; capacidad de almacenamiento de 8 pruebas con 8124 puntos de corriente y voltaje, cada una; y una interfase compuesta por un *LCD* de 20x4 caracteres y un teclado de 16 teclas, que permitan la fácil interacción entre el usuario y el equipo. El costo comercial de un equipo con características similares es de aproximadamente US\$3000 (*COR110* de *CAEM*), mientras que el precio estimado del *SPGA* es de US\$850.
- Para el control del *SPGA* se logró implementar una programación modular, la cual permite una fácil expansión del mismo, facilitando el desarrollo de futuros proyectos que empleen este mismo microcontrolador. Dentro de la programación se pueden destacar las subrutinas para: la multiplicación de 16 por 16 bits; la división de 32 entre 16 bits; la conversión entre

complemento a 2, hexadecimal y *ASCII*; el manejo de los conversores digital analógico y analógico digital; la lectura y escritura de memorias con protocolo *I²C*; manejo de pantalla *LCD*; y comunicación con un computador vía puerto serial. Las últimas, son independientes de la configuración del **hardware**.

- Para el Medidor de Resistividad de Suelos MRS, se deben Mejorar las condiciones de diseño del cargador de batería, con el cual se pueda mantener un nivel de corriente de carga mayor, haciéndose necesario el sensado de la corriente y la temperatura de la batería, para controlar su sobrecalentamiento. El propósito sería buscar un equilibrio entre el tiempo de carga y la corriente de carga con el objeto de minimizar la degradación de la batería y Para optimizar el consumo de energía se propone rediseñar el sistema de alimentaciones, implementando reguladores conmutados (LDOs) de mejor eficiencia, que los reguladores lineales, y utilizando un transformador con núcleo de ferrita a una frecuencia de inversión superior a 1kHz.
- Para el Medidor de Impedancia Electroquímica MIE, se ha implementado un prototipo de unidad de procesamiento basado en “*DSP*” para la caracterización de una celda electroquímica. Se visualizan los resultados en una pantalla de cristal líquido. Las opciones implementadas para la caracterización de una celda electroquímica son: Seleccionar Simulación, el cual realiza el diagrama de Nyquist, el diagrama de bode en magnitud y fase, introduciéndole los valores de las resistencias R_s , R_p y el Condensador C_D . Seleccionar Nuevo, el cual realiza el proceso de adquisición de las señales de tensión y corriente de la celda electroquímica, para luego calcular sus valores y graficar la respuesta en frecuencia. Se diseñaron funciones en alto nivel de programación prácticas para facilitar la programación de la pantalla de cristal líquido HG25504NG-01.

- Se logro acoplar el Medidor de Impedancia Electroquímica con el DSP. En donde el DSP es el encargado de trabajar en modo Maestro y el MIE en modo esclavo.
- Dentro de los grandes avances de la tecnología en los últimos 20 años, cabe anotar el gran desempeño y versatilidad que ha demostrado el trabajo sobre microcontroladores y microprocesadores; llegando a integrar en un DSP funciones mas eficaces junto con manejos periféricos y procesadores matemáticos; alcanzando gran velocidad de procesamiento y ejecución, pero cabe resaltar, que la tecnología no puede estar creciendo de una sola rama, el verdadero crecimiento de la tecnología depende de una gran cantidad de factores como avances en tecnología de materiales, en almacenamiento de energía (pilas), y avances en paralelo. En este proyecto se experimento un gran desnivel o tropiezo con la comunicación que se debiera realizar entre la pantalla y el DSP por medio del registro de desplazamiento; donde se tuvo la necesidad de restarle capacidad de procesamiento y operación al DSP, simplemente porque es demasiado rápido para otro periférico; la posibilidad de configurar frecuencias de trabajo o ciclos de reloj para el DSP, es prueba de que se tiene que estar dando la posibilidad de acople entre lo nuevo y lo que se esta trabajando en el momento.
- Las señales provenientes de medidor de impedancia electroquímica, no son señales muy optimas, ya que son señales que vienen como muchas señales no deseadas (ruido) y no se tiene un control eficiente en cuanto a la frecuencia de las señales provenientes del aparato y esto ocasiona errores en la sincronización y esos factores alteran los resultados en una forma significativa

- Equipos económicos comparados con uno comercial de características similares.
- Interfase con el usuario de fácil manipulación y entendimiento.
- Programación modular mediante el uso de una librería de subrutinas.
- Se han aplicado los desarrollos y avances logrados en trabajos de grado anteriores y se cuenta con una mejor base teórica y práctica para el desarrollo de nuevos equipos.
- En el SPGA, como se trabaja con señales en DC es fundamental la selección de los conversores A/D y D/A.
- Para el MRS es fundamental la etapa de potencia y en especial la eficiencia de operación.
- Para el MIE el aspecto más relevante es el procesamiento de los datos y la selección del DSP es fundamental.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACEVEDO, JUAN JOSE. GONZÁLEZ SÚA ,GABRIEL y MORALES, LUIS CALIXTRO. Sistema Potenciostato Galvanostato Autónomo – SPGA.
- [2] ANGULO JULIO, CARLOS ANDRÉS. FIALLO ARIAS, JAIME ANDRÉS y NÚÑEZ GUALDRÓN, OMAR LEONARDO. Medidor de Resistividad de Suelos – MRS. Bucaramanga UIS 2004.
- [3] MANTILLA, MARÍA ALEJANDRA. CASADIEGOS AGUDELO, RICAURTE y QUINTERO, ANDRÉS FELIPE. Prototipo Mejorado para Medición de Resistividad de Suelos – MRS. Bucaramanga UIS – 2007.
- [4] RODRÍGUEZ PACHECO, JORGE HUMBERTO y RUIZ GÓMEZ, SERGIO ANDRÉS. Medidor de Impedancia Electroquímica – MIE. Bucaramanga UIS – 2004.
- [5] AMARÍS, JEAN PIERRE y LÓPEZ, JOSE ALBERTO. ELABORACIÓN DEL SOFTWARE PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA UTILIZANDO DSP FAMILIA 56800 DE MOTOROLA. Bucaramanga UIS – 2004.
- [6] CARVAJAL, CARLOS FERNANDO y ORTÍZ, ALEXANDER. implementación de un sistema de adquisición y procesamiento de datos para una estructura básica de medidor de impedancia electroquímica. Bucaramanga UIS – 2004.

[7] HERRERA CELIS, JOSÉ LUIS y GELVEZ DUEÑAS, ANDERSON. Diseño y construcción de un impedanciómetro portátil. Bucaramanga – UIS. Actualmente en ejecución.