

# **Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico**

**Subdirección Académica**

**Departamento de Ingeniería Electrónica**

## **TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**Desarrollo de un Dispositivo para Medir los Índices de Corrosión en  
Metales**

presentada por  
**Ing. José Hugo Arellano Pérez**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica**

Director de tesis  
**Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez**

Codirector de tesis  
**Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín**

**Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2016.**



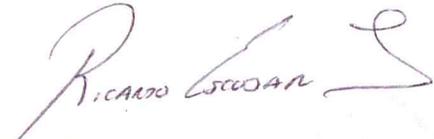
Cuernavaca, Mor., 20 de junio de 2016.

OFICIO No. DIE/129/2016  
**Asunto:** Aceptación de documento de tesis

**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. José Hugo Arellano Pérez** con número de control **M14CE073** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **“Desarrollo de un Dispositivo para Medir los Índices de Corrosión en Metales”** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



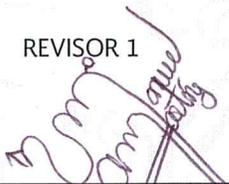
Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 7534115

CODIRECTOR DE TESIS



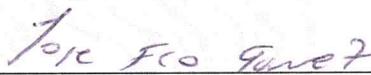
Dr. Jorge Uruchurtu Chavarrin  
Doctor en Ciencias en Ingeniería de la Corrosión  
Oficio SAC/133/2015

REVISOR 1



Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 8031070

REVISOR 2



Dr. José Francisco Gómez Aguilar  
Doctor en Física  
Cédula profesional 9124781

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Estudiante  
Expediente

CMAZ/lrr



Cuernavaca, Mor., 24 de junio de 2016  
OFICIO No. SAC/239/2016

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**ING. JOSÉ HUGO ARELLANO PÉREZ**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado “**Desarrollo de un Dispositivo para Medir los Índices de Corrosión en Metales**”, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO”



**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



**SEP TecNM**  
**CENTRO NACIONAL**  
**DE INVESTIGACIÓN**  
**Y DESARROLLO**  
**TECNOLÓGICO**  
**SUBDIRECCIÓN**  
**ACADÉMICA**

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Expediente

GVGR/mcr

# Dedicatoria

## **A dios**

*Por poner en mi camino a las personas correctas.*

## **A mi madre, Maura Pérez Martínez**

*Por apoyarme en mis decisiones y por los consejos que me ha dado a lo largo de mi vida. Demostrándome que es posible superar las adversidades y a ser ante todo una persona humilde.*

## **A mis hermanos**

*Por crecer de distintas maneras junto conmigo.*

## **A mi amiga Edaena Simental Antúnez y a su madre**

*Por brindarme una muy buena amistad, por su apoyo y consejos en tiempos difíciles.*

## **A mi compañera de maestría Susana Haydee Sainz García**

*Por brindarme su amistad y confianza durante la maestría, por motivarme durante las largas jornadas de trabajo.*



# Agradecimientos

*Gracias al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet) que me permitió ingresar a su programa de maestría y me ofreció desde unas cómodas instalaciones hasta el mejor apoyo por parte de sus catedráticos.*

*Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo económico brindado, con su apoyo me fue posible realizar esta maestría lejos de mi hogar y en una institución de reconocimiento nacional.*

*A mi director de tesis el Dr. Ricardo Fabricio Escobar Jiménez por su apoyo y guía durante el desarrollo de esta investigación y a mi co-director el Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín, por asesorarme y brindarme su atención en el laboratorio. A mis revisores de tesis el Dr. José Francisco Gómez Aguilar y el Dr. Víctor Manuel Alvarado Martínez por sus acertados comentarios y seguimiento a la tesis desarrollada.*

*A mis compañeros de generación César, Ivonne, Jesús, Óscar, Adrián, Daniel, Patricia y Saul. A mi compañero Óscar Jaime Ramos Negrón por sus consejos. A Lorena Ruíz Ramírez por estar al pendiente de nosotros desde que llegamos al propedéutico hasta nuestro examen de grado y a Ana María Pérez Martínez por atendernos en nuestros trámites.*

*A los doctores que me impartieron clase: el Dr. Juan Reyes Reyes, el Dr. Manuel Adam Medina, el Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez, el Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza, el Dr. Luis Gerardo Vela Valdés, el Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez y a la Dra. María Guadalupe López López.*

*Y a los compañeros de otras generaciones: Adriana, Arturo, Carlos, Didhier, Diego, Eider, Emanuel, Joaquín, Luis, Montse, Moisés y Citlali.*



# Resumen

En esta tesis de maestría se presenta el desarrollo de un dispositivo para medir los índices de corrosión en metales. El dispositivo desarrollado funciona específicamente en acero al carbono A36 y en aluminio 6061-T6. Se eligió al acero y al aluminio por ser los metales más utilizados en la industria. El sistema utiliza la técnica de ruido electroquímico por lo cual el sistema se limita al análisis de la corrosión electroquímica de metales en contacto con un electrolito.

El dispositivo consiste en una sonda de medición formada por tres electrodos elaborados del mismo material. El primer par de electrodos mide el ruido en potencial y el segundo mide el ruido en corriente teniendo ambos pares un electrodo en común.

Un circuito que acondiciona las señales de voltaje medidas (ruido en corriente y ruido en potencial). Las señales de voltaje son amplificadas y se suma un voltaje definido (alrededor de 1V) para que estén en el rango de medición del convertidor analógico-digital (Arduino UNO<sup>®</sup>, sus entradas analógicas leen valores entre 0 y +5V). La amplificación se realizó mediante amplificadores de instrumentación AD620 y el amplificador programable AD8253.

El procesamiento de los datos lo realiza una Raspberry Pi<sup>®</sup> 2 modelo B y se muestran los resultados en una pantalla táctil de 7 pulgadas. El sistema operativo que se utiliza es Raspbian Jessie y el programa que realiza los cálculos se desarrolló en Python.

El dispositivo cuenta con un algoritmo que determina la velocidad de corrosión (en mm/año) presentada en el metal y el tipo de corrosión presentado (localizada, generalizada o mixta). A partir de la velocidad de corrosión medida se determina la vida útil (años) de la pieza metálica a partir de un grosor conocido.

Se implementó una red neuronal artificial basada en el Extreme Learning Machine, en la capa de entrada se tienen dos neuronas (desviación estándar de voltaje y desviación estándar de corriente). Se tienen 15 neuronas en la capa oculta y una neurona en la capa de salida que estima la velocidad de corrosión. La función de activación usada fue la tangente hiperbólica.

Se realizaron pruebas con electrodos de acero al carbono A36 sumergidos en soluciones de  $H_2SO_4$  en concentraciones de 8, 10 y 12%. Electrodos de aluminio 6061-T6 se

X

sumergieron en soluciones de *NaCl* al 3%.

# Abstract

In this master thesis the development of a device to measure corrosion rates of metals is presented. The device developed works specifically in A36 carbon steel and 6061-T6 aluminum. The steel and aluminium were selected because they are the most used metals in the industry. The device uses the electrochemical noise technique whereby the device is limited to the analysis of electrochemical corrosion of metals in contact with an electrolyte.

The device consists of a measuring probe formed by three electrodes made of the same material. The first pair of electrodes measures the potential noise and the second pair measures the current noise, both pairs have a common electrode.

A circuit that adjusts the voltage signals that are measured (potential noise and current noise). The voltage signals are amplified and a defined voltage is added (approximately 1V) to reach the measuring range of the analog to digital converter of the Arduino UNO<sup>®</sup> (voltage signals between 0 and +5V). The amplification was realized by the AD620 instrumentation amplifier and the AD8253 programmable amplifier.

The data processing is performed by a Raspberry Pi<sup>®</sup> 2 Model B and the results are displayed on a 7 inches touch screen. The operating system used is Raspbian Jessie and the program that performs calculations was developed in Python.

The device has an algorithm that determines the corrosion rate (in mm/year) presented in the metal, the type of corrosion presented (localized, generalized or mixed). From the corrosion rate measured the useful life (years) of the metal is calculated knowing the thickness of the metal piece.

An artificial neural network based on the Extreme Learning Machine was implemented, the input layer has two neurons (standard deviation of voltage and standard deviation of current). The hidden layer has 15 neurons and a neuron in the output layer that estimates the corrosion rate. The activation function used was the hyperbolic tangent.

Electrodes of A36 carbon steel were immersed in  $H_2SO_4$  solutions at concentrations of 8, 10 and 12 %. Electrodes of 6061-T6 aluminum were immersed in  $NaCl$  solutions at 3 %.



# Índice general

Lista de figuras	XVII
Lista de tablas	XXI
Nomenclatura	XXI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Hipótesis . . . . .	2
1.4. Justificación . . . . .	3
1.4.1. Alcances . . . . .	3
1.5. Metodología . . . . .	4
1.6. Organización del documento . . . . .	5
<b>2. Estado del arte y marco teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Estado del arte . . . . .	7
2.1.1. Medición de los índices de corrosión . . . . .	7
2.1.2. Métodos lineales . . . . .	10
2.1.3. Redes bayesianas . . . . .	10
2.1.4. Modelos de Markov . . . . .	11
2.1.5. Redes neuronales . . . . .	13
2.1.6. Dispositivos para medir la corrosión . . . . .	14
2.1.7. Conclusión . . . . .	16
2.2. Marco teórico . . . . .	17
2.2.1. Metales . . . . .	17
2.2.2. Corrosión . . . . .	17

2.2.3.	Corrosión electroquímica . . . . .	18
2.2.4.	Tipos de corrosión . . . . .	18
2.2.5.	Consecuencias de la corrosión . . . . .	19
2.2.6.	Corrosión electroquímica . . . . .	21
2.2.7.	Ruido electroquímico . . . . .	22
2.2.8.	Medición del ruido electroquímico . . . . .	22
2.2.9.	Análisis de los datos de ruido electroquímico . . . . .	24
2.2.10.	Análisis estadístico del ruido electroquímico . . . . .	25
2.2.11.	Resistencia a la polarización $R_p$ . . . . .	25
2.2.12.	Resistencia de ruido $R_n$ . . . . .	26
2.2.13.	Medición de la velocidad de corrosión por ruido electroquímico . . . . .	27
2.3.	Vida útil del metal . . . . .	28
2.4.	Redes neuronales . . . . .	28
2.5.	Amplificadores operacionales . . . . .	33
<b>3.</b>	<b>Caso de estudio</b>	<b>37</b>
<b>4.</b>	<b>Implementación del dispositivo</b>	<b>39</b>
4.1.	Elaboración de las sondas de medición de ruido electroquímico . . . . .	39
4.2.	Circuitos de amplificación de voltaje y corriente . . . . .	40
4.3.	Red neuronal . . . . .	45
<b>5.</b>	<b>Pruebas y resultados</b>	<b>47</b>
5.1.	Obtención de los registros de voltaje y corriente a partir del ruido electroquímico medido . . . . .	48
5.2.	Pruebas para entrenamiento de red neuronal y comprobación de red neuronal	50
5.2.1.	Entrenamiento y comprobación de la red con datos de aluminio 6061-T6 sumergido en $NaCl$ al 3% . . . . .	52
5.2.2.	Entrenamiento y comprobación de la red con datos de acero al carbono A36 sumergido en $H_2SO_4$ al 8, 10 y 12% . . . . .	53
5.2.3.	Pruebas del dispositivo desarrollado . . . . .	55
5.3.	Componentes y costo del dispositivo . . . . .	67
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>69</b>
6.1.	Conclusiones . . . . .	69
6.2.	Trabajos futuros . . . . .	71
	<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
	<b>Anexos</b>	<b>81</b>

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	XV
<b>A. Interfaz de usuario del dispositivo</b>	<b>83</b>
<b>B. Información de los principales componentes del dispositivo</b>	<b>89</b>
B.1. Raspberry Pi <sup>®</sup> 2 B . . . . .	89
B.2. Arduino UNO <sup>®</sup> . . . . .	90
<b>C. Ejemplo de elaboración de una sonda de medición para utilizarse en un equipo</b>	<b>93</b>
<b>D. Filtrado mediante media móvil</b>	<b>95</b>



# Índice de figuras

2.1. Monitor de corrosión 7657 de Toho Technical Research similar al utilizado en Takasaki y Yamada (2007). . . . .	8
2.2. Generador de ondas de largo alcance similar a los utilizados en Berndt y Philippacopoulos (2005). . . . .	8
2.3. Tipos de corrosión. . . . .	19
2.4. La corrosión y sus efectos. . . . .	21
2.5. Esquemas correspondientes a los arreglos para la medición de ruido electroquímico, bajo el sistema de tres electrodos. . . . .	23
2.6. Diagrama esquemático de una neurona típica o célula nerviosa (Castro y González (1993)). . . . .	29
2.7. Neurona artificial (Olabe (1998)). . . . .	30
2.8. Amplificador operacional básico. . . . .	33
2.9. Equivalente de ca de un circuito de amplificador operacional: (a) práctico; (b) ideal. . . . .	34
2.10. Conexión de amplificador operacional básico. . . . .	34
2.11. Amplificador sumador. . . . .	35
3.1. Descripción del dispositivo. . . . .	37
4.1. Electrodos de aluminio. . . . .	40
4.2. Electrodos de acero al carbono A36. . . . .	40
4.3. Amplificador operacional AD620. . . . .	41
4.4. Amplificador programable AD8253. . . . .	41
4.5. Principales componentes del dispositivo para medir la corrosión. . . . .	43
4.6. Integración de los componentes del dispositivo para medir los índices de corrosión en metales. . . . .	44
4.7. Arquitectura de la red neuronal implementada en el dispositivo. . . . .	45

5.1. DAQ y multímetro utilizado para comparar los registros realizados con el dispositivo. . . . .	47
5.2. Circuito de amplificación de voltaje. . . . .	49
5.3. Circuito de amplificación de corriente. . . . .	50
5.4. Entrenamiento de la red neuronal con datos de aluminio 6061-T6 sumergido en soluciones de NaCl al 3%. . . . .	52
5.5. Pruebas de la red neuronal con datos de aluminio 6061-T6 sumergido en soluciones de NaCl al 3%. . . . .	53
5.6. Entrenamiento de la red neuronal con datos de acero al carbono A36 sumergido en soluciones de $H_2SO_4$ al 8, 10 y 12%. . . . .	54
5.7. Pruebas de la red neuronal con datos de acero al carbono A36 sumergido en las soluciones de $H_2SO_4$ . . . . .	55
5.8. Señales de I y V sin filtrar. . . . .	56
5.9. Señal de I filtrada. . . . .	56
5.10. VC obtenida por el dispositivo y VC obtenida por el equipo. . . . .	57
5.11. Índice de localización obtenido por el equipo y por el dispositivo. . . . .	57
5.12. VC obtenida por el dispositivo y VC estimada por la red neuronal con electrodos de acero al carbono A36 en la muestra de NaCl al 3%. . . . .	58
5.13. Señales de I y V sin filtrar. . . . .	58
5.14. Señal de I filtrada. . . . .	59
5.15. VC obtenida por el dispositivo y VC obtenida por el equipo. . . . .	59
5.16. Índice de localización obtenido por el equipo y por el dispositivo. . . . .	60
5.17. VC obtenida por el dispositivo y VC estimada por la red neuronal con electrodos de acero al carbono A36 en la muestra de $H_2SO_4$ al 8%. . . . .	60
5.18. Señales de I y V sin filtrar. . . . .	61
5.19. Señal de I filtrada. . . . .	61
5.20. VC obtenida por el dispositivo y VC obtenida por el equipo. . . . .	62
5.21. Índice de localización obtenido por el equipo y por el dispositivo. . . . .	62
5.22. VC obtenida por el dispositivo y VC estimada por la red neuronal con electrodos de acero al carbono A36 en la muestra de $H_2SO_4$ al 10%. . . . .	63
5.23. Señales de I y V sin filtrar. . . . .	64
5.24. Señal de I filtrada. . . . .	64
5.25. VC obtenida por el dispositivo y VC obtenida por el equipo. . . . .	65
5.26. Índice de localización obtenido por el equipo y por el dispositivo. . . . .	65
5.27. VC obtenida por el dispositivo y VC estimada por la red neuronal con electrodos de acero al carbono A36 en la muestra de $H_2SO_4$ al 12%. . . . .	66
A.1. Escritorio del sistema Raspbian. . . . .	84
A.2. Menú de herramientas del sistema Raspbian . . . . .	85

A.3. Menú de opciones del programa desarrollado en Python. . . . .	85
A.4. Ingreso de información mediante teclado virtual. . . . .	86
A.5. Muestra en pantalla de los registros de voltaje y corriente. . . . .	86
A.6. Muestra en pantalla de los índices de corrosión medidos y la vida útil estimada. . . . .	87
A.7. Comunicación remota con el dispositivo. . . . .	87
C.1. Tapón de drenado de un depósito de agua caliente. . . . .	94
C.2. Elaboración de una sonda de medición de ruido electroquímico para un equipo. . . . .	94



# Índice de tablas

2.1. Intervalos de valores de $IL$ . . . . .	26
2.2. Valores de $k$ para el cálculo de la velocidad de corrosión. . . . .	28
4.1. Tabla de verdad de niveles lógicos de ganancia en modo enlazado del AD8253. . . . .	42
5.1. Índices de corrosión determinados en la pruebas. . . . .	66
5.2. Cantidad y precio de los componentes del dispositivo. . . . .	67
B.1. Características de la Raspberry Pi <sup>®</sup> 2 B . . . . .	90
B.2. Características del Arduino UNO <sup>®</sup> . . . . .	91



# Nomenclatura

## Notación

$B$	Constante que relaciona el metal-medio ambiente específico.
$EDS$	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> , Espectroscopia de Energía Dispersiva
$i_{corr}$	Densidad de corriente de corrosión
$IMPI$	Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
$IL$	Índice de localización.
$RMSE$	<i>Root Mean Square Error</i> , Raíz del Error Cuadrático Medio.
$Rn$	Resistencia al ruido.
$RNA$	Red Neuronal Artificial.
$Rp$	Resistencia a la polarización.
$SEM$	<i>Scanning Electron Microscope</i> , Microscopía Electrónica de Barrido.
$Weq$	Peso equivalente del metal o aleación.
$VC$	Velocidad de corrosión.

## Subíndices

$I$	Corriente.
$V$	Voltaje.

## Letras griegas

$\sigma$	Desviación estándar.
$\rho$	Densidad.



# Capítulo 1

## Introducción

Los metales son materiales con características especiales que les brindan diversas propiedades. Tales como dureza, maleabilidad, ductilidad, entre otras. Debido a tales propiedades los metales son ampliamente utilizados en la industria. Los metales más comunes son el acero, aluminio y cobre. La corrosión es un tipo de oxidación que se caracteriza por la destrucción de un metal o metales, esto a partir de la interacción con un ambiente determinado formado por agentes agresivos. Estos agentes incluyen la humedad, temperatura, aire, vapores, etc.

La corrosión se hace presente en la mayoría de las piezas metálicas de la maquinaria y equipo industrial, sobre todo en tuberías y contenedores. Las consecuencias de la corrosión son diversas, entre ellas figuran la reducción de espesor de las tuberías o superficies, fugas de líquido o gas, contaminación de las sustancias contenidas (por ejemplo el agua potable en redes de distribución), daños al equipo derivados de las fugas, reducción de la eficiencia, etc. Además de gastos adicionales derivados al reparar o cambiar la superficie corroída, gastos de mantenimiento al renovar la capa anticorrosión o el desarrollo de proyectos sobredimensionados (utilizar un mayor espesor en las piezas y recubrimientos adicionales).

Debido a que existen diferentes formas de corrosión (uniforme, localizada, química, electroquímica, bioquímica), algunas de ellas más destructivas o rápidas, es necesario medirla a través de índices para tomar acciones adecuadas para prevenirla, evitando fallas en equipos e incluso accidentes. En la corrosión electroquímica el efecto de corrosión se debe a las características de la solución que entra en contacto con el metal, por lo general el pH, los sólidos en suspensión, sales disueltas y cloruros.

Los índices de corrosión son obtenidos mediante diversos métodos, se puede hacer una división en tres grupos: los que utilizan medios físicos, por medios electroquímicos y los que hacen uso de equipo especializado. Los medios físicos se han utilizado desde hace varios años, por su parte los métodos con equipo especializado son un tanto recientes debido a la tecnología que utilizan. La mayoría de los métodos se utilizan sobre una muestra del metal

o una sección específica cuando el sistema está fuera de línea, además de sólo indicar el nivel de corrosión presente. Algunos de estos métodos son capaces de realizar la medición en línea sin embargo no realizan una predicción sobre el comportamiento de la corrosión en un lapso de tiempo.

Es por ello que en esta tesis se realizará un dispositivo que además de medir los índices de corrosión en línea sea capaz de predecir el tiempo de vida útil de la pieza metálica.

## 1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad la mayoría de la industria utiliza materiales metálicos en sus instalaciones los cuales sufren el ataque de la corrosión. Sobre todo cuando las condiciones de uso y el entorno donde se utilizan involucra características que dan origen al fenómeno de corrosión. El efecto se hace presente con mayor efecto en el material que está en contacto con líquidos donde características como el pH, dureza, sólidos suspendidos, temperatura u otras promueven la formación de óxidos o sarro. El fenómeno de corrosión causa tal desgaste del metal que se requiere dar mantenimiento y vigilancia constante que genera costos adicionales. Sin embargo de no atender esta situación se pueden presentar mayores costos por fugas, rupturas, bajo rendimiento o accidentes derivados de un mal funcionamiento.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un dispositivo para medir los índices de corrosión en metales que sea capaz de predecir el tiempo de vida útil de la pieza metálica.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un dispositivo para medir en línea los índices de corrosión en materiales metálicos.
- Desarrollar una estrategia de estimación del tiempo de vida útil del equipo a partir de los índices de corrosión medidos.

## 1.3. Hipótesis

Con el desarrollo de un dispositivo para medir los índices de corrosión mediante ruido electroquímico es posible determinar el tiempo de vida útil de la pieza metálica a partir

de la velocidad de corrosión registrada en el metal.

## 1.4. Justificación

Generar tecnología de bajo costo que pueda ser empleada para medir los índices de corrosión, además de indicar el nivel de corrosión, permitirá determinar la vida útil de las piezas metálicas, siendo así posible evitar la pérdida de recursos (el propio metal, fugas de agua, gas, etc.), elevación de costos (mayor consumo de gas o electricidad) e incluso riesgos al personal (fugas de líquidos o gases tóxicos, ruptura de estructuras, etc.).

Esta tesis se enfoca en los materiales metálicos más utilizados en la industria como lo son el acero y el aluminio. Para esta investigación los materiales a disposición fueron acero al carbono A36 y aluminio 6061-T6. Pretendiendo entonces que estos metales (acero y aluminio) se conviertan en un punto de partida para incursionar en equipos (utilizando diferentes materiales para la sonda, agregando sensores para monitorear otras variables, mejorando los algoritmos del dispositivo a partir de un mejor análisis de los datos, etc.) como contenedores industriales, calderas, tuberías, etc.

### 1.4.1. Alcances

En esta tesis se desarrolló un dispositivo que mide los índices de corrosión en dos materiales metálicos (acero al carbono A36 y aluminio 6061-T6), calculando la velocidad de corrosión del material (mediante ecuaciones de análisis de datos de ruido electroquímico y con una red neuronal) y el tipo de corrosión que se presenta (localizada, generalizada o mixta). Además, a partir de los índices de corrosión medidos, determina el tiempo de vida útil de la pieza metálica teniendo conocimiento del grosor de la pieza. El sistema se conforma por una sonda de medición de ruido electroquímico (formada por tres electrodos), el sistema de adquisición de datos, la parte de procesamiento de los datos y la visualización en pantalla de los registros de voltaje y corriente así como la velocidad de corrosión y vida útil de la pieza metálica.

Las señales de ruido electroquímico se generan por el efecto de corrosión que produce un electrolito al estar en contacto con un metal. Por lo tanto para realizar la medición de los índices de corrosión la sonda de medición debe de sumergirse en la solución que está en contacto con la pieza metálica de la cual se requiere obtener los índices de corrosión y la vida útil. Los cara de los electrodos que forman la sonda de medición debe de estar en contacto con el electrolito en cuestión (agua potable, gasolina, sustancias ácidas, cloruros, etc.).

Por lo cual para realizar pruebas en equipos industriales como tuberías o contenedores es necesario realizar adecuaciones para que la sonda de medición entre en contacto con

la solución que se almacena o fluye a través del equipo. Por ejemplo acoples de purga instalados en tuberías de agua o combustibles.

Se realizaron pruebas sumergiendo la sonda de acero al carbono A36 en soluciones de ácido sulfúrico en concentraciones de 8, 10 y 12 %. LA sonda de aluminio 6061-T6 se introdujo en diferentes soluciones de cloruro de sodio al 3 %. Por lo tanto el dispositivo solo opera con los metales y las soluciones en las concentraciones mencionadas anteriormente.

Se eligió como metales al acero y al aluminio por su amplia aplicación en la industria. El ácido sulfúrico y el cloruro de sodio se eligieron por su poder corrosivo en el acero y el aluminio respectivamente. Las pruebas realizadas se realizaron a temperatura ambiente por lo cual se desprecia el valor de la temperatura, la cual si tiene un efecto en el proceso de corrosión cuando el electrolito se encuentra a altas temperaturas.

## 1.5. Metodología

La metodología empleada para el desarrollo del trabajo de tesis fue la siguiente:

- a. Revisión bibliográfica de métodos de análisis de corrosión.
- b. Revisión bibliográfica de los métodos predictivos propuestos (redes neuronales, sistemas lineales, redes bayesianas y modelos de Markov) y elección de uno de ellos para utilizarlo en la predicción de la velocidad de corrosión de metales.
- c. Revisión bibliográfica (artículos y patentes) de dispositivos para medir la corrosión.
- d. Selección de dos materiales metálicos y elaboración de la sonda de medición de cada material.
- e. Desarrollo del dispositivo que mide los índices de corrosión en línea (sonda de medición, circuito de amplificación de las señales de voltaje y corriente, programación en Arduino UNO<sup>®</sup> y Raspberry Pi<sup>®</sup>).
- f. Reproducción del efecto de corrosión en una solución corrosiva utilizando las dos sondas de medición elaboradas y medición de los índices de corrosión presentados.
- g. Desarrollo de la estrategia de estimación del tiempo de vida útil del equipo a partir de los índices de corrosión medidos con el dispositivo.
- h. Prueba del dispositivo utilizando cada sonda en una solución corrosiva determinada.

## 1.6. Organización del documento

El presente documento consta de seis capítulos. El primero de ellos es la introducción, donde se plantea la problemática que trata esta tesis, dando a conocer los antecedentes que dieron lugar al tema en cuestión así como los objetivos, hipótesis, alcances y metodología empleada.

El capítulo dos es el marco teórico y estado del arte, donde se describen los fundamentos necesarios para comprender y desarrollar la tesis. Se describen los trabajos realizados con cierta anterioridad que sirvieron de fundamento para la temática de la tesis así como para determinar el nicho de oportunidad que se encontró.

El capítulo tres describe el caso de estudio que se abordó dando una explicación sobre el tema de investigación.

El capítulo cuatro aborda la implementación del dispositivo, aquí se incluye la elaboración de la sonda de medición, la adquisición de datos y se describe la red neuronal.

El capítulo cinco reporta las pruebas y resultados obtenidos de las pruebas del dispositivo utilizando los metales elegidos en soluciones con un carácter corrosivo. Sobre todo se enfatiza en la velocidad de corrosión obtenida por el análisis del ruido electroquímico y la aproximación realizada por la red neuronal.

A partir de los resultados encontrados en el capítulo cinco se da lugar a las conclusiones reportadas en el capítulo seis así como los trabajos futuros a realizar.

Por último se encuentra la bibliografía utilizada y los anexos.



## Capítulo 2

# Estado del arte y marco teórico

### 2.1. Estado del arte

#### 2.1.1. Medición de los índices de corrosión

La medición de los índices de corrosión permite determinar el deterioro del metal a causa de la corrosión, a partir de estos índices se evalúa el daño y se toman las medidas necesarias. Ya sea reparar la capa protectora de corrosión o agregarla si es que no se contaba con ella e incluso, si el daño es realmente considerable, reemplazar la pieza o área afectada.

Uno de los métodos más comunes para medir los índices de corrosión es el uso de cupones y la técnica de pérdida de masa, en Cuevas *et al.* (2003) y Echeverría *et al.* (2007) se utilizaron estas técnicas para medir el nivel de corrosión. Los cupones son muestras del metal o aleación del que está formado el equipo o herramienta. Estos son pesados previamente y sometidos a las condiciones de operación en las que se trabajará, después de cierto tiempo se observan y se vuelven a pesar para determinar así los índices de corrosión.

En Echeverría *et al.* (2007) se simuló un sistema de distribución de agua potable para observar los efectos de la corrosión en acero al carbono, galvanizado y cobre. En este sistema los factores que promueven la corrosión son el agua misma, los flujos a alta velocidad y la formación de biopelícula en los tubos. En Cuevas *et al.* (2003) se realizó el estudio de la corrosión de la aleación Incoloy-800 causada por sales fundidas a altas temperaturas, se buscó validar el uso de la técnica de resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ) en sales fundidas a altas temperaturas sin embargo no se validaron los resultados siendo la técnica de pérdida de peso más eficaz para las condiciones del estudio realizado.

También es posible utilizar medios electroquímicos como el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y la resistencia a la polarización ( $R_p$ ), dichas mediciones se pueden realizar con

equipo como el monitor de corrosión 7660 de Toho Technical Research (Figura 2.1) utilizado en Takasaki y Yamada (2007), donde además de los métodos mencionados de igual manera se utilizan los cupones.

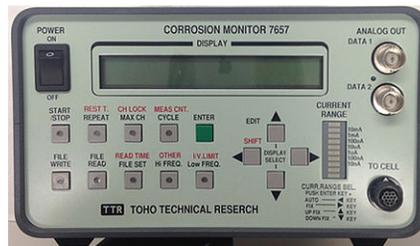


Figura 2.1: Monitor de corrosión 7657 de Toho Technical Research similar al utilizado en Takasaki y Yamada (2007).



(a) Generador de ondas



(b) Transductores



(c) Anillo de transductor



(d) Empleo del equipo

Figura 2.2: Generador de ondas de largo alcance similar a los utilizados en Berndt y Philippacopoulos (2005).

Si se cuenta con mayor presupuesto o la superficie a analizar así lo requiere se pueden utilizar métodos que involucren equipo más especializado como el usado en Berndt y Philippacopoulos (2005) donde mediante ondas de largo alcance se midió la corrosión en las tuberías de instalaciones geotérmicas. Dichas ondas permiten medir 30 metros en ambas direcciones de la tubería, los daños se determinan mediante una gráfica de amplitud

vs. distancia. El equipo de monitoreo se compone de tres componentes principales, el transductor (Figura 2.2 (b)) y el anillo de transductor (Figura 2.2 (c)), el instrumento generador de ondas (Figura 2.2 (a)) y el software para la interpretación de los datos (Figura 2.2 (d)).

En Tomati y Gabriele (2011) además de medir la corrosión en toda la tubería (transporte de gas y petróleo) se empleó la herramienta “Run Chart” para conocer los lugares afectados, agregando una curva exponencial a los resultados se lograron determinar las posibles fechas de falla en la tubería. En Nazeri *et al.* (2012) se miden las variaciones del potencial y la corriente de corrosión en una soldadura de Sn-9Zn libre de plomo al estar en contacto con una solución alcalina. También en Tsao y Chen (2012) se miden las variaciones del potencial y la corriente de corrosión pero en compuestos intermetálicos de Cu-Sn en una solución de NaCl.

Dentro de las técnicas electroquímicas, la medición por ruido electroquímico es una de las más utilizadas, en Sarmiento *et al.* (2009) y en Mabbutt *et al.* (2009) esta técnica fue utilizada. En Sarmiento *et al.* (2009) se contemplaron los efectos del cromato de litio ( $Li_2CrO_4$ ) como inhibidor de la corrosión, Mabbutt *et al.* (2009) se enfocó en medir la corrosión en intercambiadores de calor industriales causada por los residuos de la combustión de carbón y biomasa.

En ocasiones además de medir la corrosión, ésta se acelera mediante soluciones con potencial corrosivo, en Mabbutt *et al.* (2009) se utilizaron varios parámetros de corrosión incluyendo el potencial de circuito abierto, corriente de corrosión galvánica, potencial de corrosión y corriente de corrosión. Como agente corrosivo se utiliza una solución de hidróxido de potasio (KOH).

Si se trata de una planta o complejo muy sofisticado para medir la corrosión de manera meticulosa es indispensable utilizar técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM, por *Scanning Electron Microscope*) y la espectroscopia de energía dispersiva (EDS, del inglés *Energy Dispersive Spectroscopy*) utilizadas en Bordoni y Olmedo (2011), Kuźnicka (2009) y Pegueroles y Gil (2012). En Bordoni y Olmedo (2011) se midió la corrosión en tubos de presión de una central nuclear refrigerada por agua presurizada mediante la SEM y la EDS, también se emplearon los cupones porque a pesar de ser una técnica sencilla y utilizada desde hace tiempo es de las más confiables. En Kuźnicka (2009) se realizó el estudio de la corrosión en tubos de un intercambiador de calor mediante la SEM.

El análisis en los tubos del intercambiador determinó que se produjo por erosión-corrosión, provocada por partículas sólidas suspendidas en el agua y por la composición química del agua rica en cloruros que debilitó la capa que protege a los tubos de la corrosión. En Pegueroles y Gil (2012) se caracterizó la resistencia a la corrosión de muestras de CoCr utilizadas en aplicaciones dentales. Se utilizó la SEM, la EDS y ensayos electroquímicos midiendo el potencial y la corriente galvánica.

En Escobar *et al.* (2009) se midió la corrosión mediante potencial electroquímico y la corriente electroquímica en un transformador de calor de absorción, empleando un sistema de adquisición de datos en línea (desarrollado en los lenguajes bash y GNU Octave de Linux). Como equipo se empleó una tarjeta de adquisición de datos Agilent 34970A realizando la interfaz con la computadora mediante el puerto RS-232. Mediante el modelo de corrosión y estimaciones se determinó el índice de localización de la corrosión.

### 2.1.2. Métodos lineales

En Pitarque *et al.* (1998) se realizó mediante simulación, la comparación del desempeño de los modelos estadísticos (regresión múltiple, análisis discriminante y regresión logística) vs. las redes neuronales (del tipo perceptrón multicapa) en las tareas de predicción y clasificación (binario o no binaria). Para las tareas de predicción, los modelos de regresión múltiple funcionan de manera similar a las redes neuronales. Sin embargo, en las tareas de clasificación las redes neuronales mostraron un mejor rendimiento.

En Reyes *et al.* (2007) se utilizó el modelo de regresión logística en la predicción del rendimiento estudiantil, definiendo el éxito de los alumnos en el primer semestre de estudios de ingeniería. Se utilizó un modelo de regresión logística y el método de análisis discriminante.

En Atencio *et al.* (2008) se realizó la predicción del rendimiento en cortes de carnicería en bovinos venezolanos donde se utilizaron técnicas estadísticas de normalidad, media aritmética y análisis de correlación y regresión lineal múltiple.

En Heredia *et al.* (2012) se usó la regresión logística ordinal para la predicción del rendimiento académico de los alumnos en una materia posterior al semestre actual en base a las calificaciones del semestre en curso.

En Corina *et al.* (2012) se empleó la regresión logística en conjunto con las redes bayesianas para evaluar susceptibilidad a deslizamientos en montañas.

### 2.1.3. Redes bayesianas

Una Red Bayesiana (RB) es un modelo probabilístico de una función de probabilidad conjunta (FPC) definido por un grafo dirigido acíclico (DAG) y un conjunto de funciones de probabilidad condicionada, de forma que la estructura de dependencia/independencia mostrada por el DAG puede ser expresada en términos de la función de probabilidad conjunta mediante el producto de varias distribuciones condicionadas.

Las redes bayesianas modelan un fenómeno mediante un conjunto de variables y las relaciones de dependencia entre ellas. Dado este modelo, se puede hacer inferencia bayesiana; es decir, estimar la probabilidad posterior de las variables no conocidas, en base a

las variables conocidas. Estos modelos pueden tener diversas aplicaciones, para clasificación, predicción, diagnóstico, etc. Además, pueden dar información interesante en cuanto a cómo se relacionan las variables del dominio, las cuales pueden ser interpretadas en ocasiones como relaciones de causa–efecto. Inicialmente, estos modelos eran construidos “a mano” basados en un conocimiento experto, pero en los últimos años se han desarrollado diversas técnicas para aprender a partir de datos, tanto la estructura como los parámetros asociados al modelo. También es posible el combinar conocimiento experto con los datos para aprender del modelo (Sucar (2006)).

En Correa *et al.* (2008) se hizo la comparación de las redes bayesianas vs. las redes neuronales en modelos para la predicción del acabado superficial (rugosidad) en un proceso de fresado a alta velocidad. Para predecir la rugosidad superficial se empleó una red bayesiana aumentada en árbol y una red neuronal del tipo perceptrón multicapa, de los dos modelos las redes bayesianas mostraron superioridad.

En Alamilla *et al.* (2012) se presentó un modelo para estimar la evolución del deterioro por corrosión interna en tuberías de gaseoductos (dos líneas de tuberías, una de petróleo crudo y otra de gasolina). Toda la información disponible para el modelo se incorporó con el teorema de Bayes. Para determinar el daño de corrosión producido en los sitios con más actividad de la tubería se utilizaron las medidas de profundidad de corrosión en instantes de tiempo, planteando una función de propagación y finalmente elaborando el modelo probabilístico.

En Plankensteiner *et al.* (2013) se usaron las redes bayesianas para modelar la vida útil de un semiconductor utilizado en un sistema de esfuerzo cíclico. La red bayesiana diseñada permitió integrar los ajustes de pruebas, diseños geométricos y parámetros físicos del dispositivo. Para modelar y simular la red bayesiana se utilizaron los toolbox de MATLAB<sup>®</sup>.

En Haddad *et al.* (2014) se realizó la predicción de la fractura por fatiga de dispositivos médicos cardiacos (cables). La red se modeló a partir de datos en vivo y en vitro.

En Amaya *et al.* (2014) se emplearon simulaciones numéricas en conjunto con datos para obtener velocidades de corrosión por estimación bayesiana. Se obtuvieron datos de corriente a través de sensores y electrodos colocados en el casco de un barco y en una estructura con forma de torre, en ambas se estudiaron los aspectos electroquímicos generados por la corrosión.

#### 2.1.4. Modelos de Markov

Como los modelos lineales, los modelos de Markov tienen una estructura simple. Esto es debido a su dependencia en el supuesto de Markov para representar secuencias de eventos (de acuerdo con esta suposición, la ocurrencia del próximo evento sólo depende de un número fijo de eventos anteriores). Dado un número de eventos observados, el próximo

evento se predice a partir de la distribución de probabilidad de los acontecimientos que han seguido estos acontecimientos observados en el pasado.

En el ámbito de la predicción probabilística también han sido aplicadas distintas técnicas estocásticas que operan a partir de las series temporales para pronosticar la probabilidad de un cierto evento meteorológico (por ejemplo la ocurrencia de lluvia “Precipitación  $> 0.5$  mm”, de vientos fuertes “Racha  $> 80$  km/h”, etc.). Las cadenas de Markov se aplican a variables discretas, y han sido utilizadas profusamente en este campo, comenzando con Gabriel y Neumann en 1962 que desarrollaron un modelo probabilístico de precipitación para Tel Aviv (Gutiérrez *et al.* (2004)).

Estos modelos generalizan la idea de la persistencia estableciendo probabilidades de transición entre los distintos estados de la variable en sucesivos valores del tiempo. Suponiendo que el estado actual sólo depende de los  $k$  estados anteriores, un modelo de Markov de orden  $k$  permitiría cuantificar probabilísticamente la dinámica de transiciones del sistema.

En Caleyó *et al.* (2009) se realizó el modelado de la corrosión por picadura de la parte externa de tuberías subterráneas. Para realizar el modelado se utilizaron los valores de profundidad de la picadura de la tubería en diferentes tipos de suelo, el mismo modelo también fue aplicado a datos de corrosión por picadura obtenidos de inspecciones a la tubería y de experimentos de inmersión en laboratorios.

En Kobayashi *et al.* (2012) se emplearon los modelos ocultos de Markov en conjunto con la estimación bayesiana para obtener un modelo estadístico de deterioro para el manejo de infraestructura. Los datos requeridos para la comprobación del modelo oculto de Markov propuesto consistieron en los registros de observaciones de nueve años sobre una carretera de Japón.

En Valor *et al.* (2013) se utilizó los modelos de cadena de Markov para el modelado estocástico de la corrosión por picadura. Se crearon modelos para describir la corrosión por picadura (profundidad y velocidad) en tuberías subterráneas y en muestras sujetas a pruebas de corrosión en laboratorio.

En Kobayashi *et al.* (2014) se desarrolló un modelo de Markov para la predicción del agrietamiento en estructuras civiles. Se aplicó un solución numérica usando la estimación bayesiana y el método de modelo de cadena de Markov de Monte Carlo. Para demostrar la aplicación y contribución del modelo se empleó un conjunto de datos del sistema de pavimento japonés.

En Wang *et al.* (2015) se realizó un modelado bayesiano de la corrosión externa en tuberías subterráneas basado en la integración de las técnicas Monte Carlo de cadena de Markov y el agrupado de datos de inspecciones. Para obtener el daño de la corrosión se utilizó la velocidad de pérdida de metal como indicador. El modelo propuesto fue validado con datos de inspecciones directas e indirectas recolectadas de un sistema de tuberías

subterráneas de 110 km.

### 2.1.5. Redes neuronales

En Kenny *et al.* (2009) se midió la corrosión en líneas de tensión ubicadas en la ciudad de San Luis-Maranhão, Brasil. Debido al clima ecuatorial son varias las variables que se consideran como precursoras de la corrosión, por lo cual se eligieron diez parámetros ambientales como entradas para la red neuronal (humedad, lluvia, viento, radiación solar, temperatura, etc.). El modelo de corrosión se elaboró con una red perceptrón multicapa con diez neuronas en la capa de entrada, dos capas intermedias de neuronas sigmoideas; la primera con funciones de modulación tangencial (tansig) y la segunda con funciones de modulación logarítmica (logsig); una neurona de salida con una función lineal (purelin) para amplificar la señal recibida a los valores de corrosión reales y el algoritmo de retropropagación Levenberg-Marquardt para el entrenamiento de la red. Los resultados obtenidos indicaron que la red neuronal demostró ser eficiente al estimar la corrosión.

En Kamrunnahar y Urquidi (2010) se predijo el comportamiento de la corrosión en metales y aleaciones utilizando una red neuronal supervisada en la minería de datos. Los datos recaudados fueron: mediciones de corriente de vidrios metálicos, datos de velocidad de corrosión en carbono y aleaciones de acero y datos de corriente de titanio grado dos. Los primeros dos grupos de datos pertenecieron a corrosión generalizada y el último a corrosión localizada.

En Jančíková *et al.* (2013) se utilizaron las redes neuronales para la predicción del comportamiento de la corrosión en el metal. Para entrenar la red se utilizaron datos de muestras que fueron expuestas en diferentes partes de la república Checa, como entradas para la red neuronal se utilizó: temperatura, humedad relativa, cantidad de precipitaciones, pH de la lluvia, contaminación del aire por dióxido de sulfuro y el tiempo de exposición. La salida de la red fue la pérdida de masa del acero al carbono causada por la corrosión. El software utilizado fue el módulo de redes neuronales de STATISTICA, parte del código fue elaborado en C++. La red elaborada fue del tipo *feed forward* multicapa con topología 6-7-1.

En Abdullah *et al.* (2014) se aplicaron las redes neuronales para predecir la velocidad de corrosión en una instalación de tubería metálica. Como entradas a la red se tuvo: composición del material (C, Mn, Si, P, S, Cr, Mo, Al, Ni y Fe), pH, temperatura y velocidad de flujo del fluido. La red utilizada fue del tipo *feed forward back propagation* con tres capas (entradas, oculta y salida), nueve nodos en la capa oculta, para entrenar la red se utilizó el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

En De Masi *et al.* (2014) se desarrolló un modelo predictivo de red neuronal del perfil de corrosión interna de una tubería. La red diseñada es del tipo *feed forward* con un ajuste para la relación entre entrada y salida. Como entradas de la red se tuvieron las

características geométricas de la tubería, parámetros de flujo multifase y dos modelos determinísticos que relacionan la velocidad de corrosión con la temperatura y el  $CO_2$ . El algoritmo de entrenamiento que dió mejores resultados fue Levenberg-Marquardt de retro propagación. La salida de la red se dividió en tres posibles salidas: velocidad de corrosión, pérdida de metal y área afectada.

En Vera y Ossandón (2014) se realizó la predicción de la corrosión atmosférica de metales y aleaciones (acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio), los cuales fueron expuestos durante tres años en nueve sitios diferentes en los alrededores de Chile. Para cada sitio se diseñó un modelo de red diferente, teniendo como entradas los factores siguientes: tiempo de exposición, concentración atmosférica de  $SO_2$  y de  $Cl^-$ , humedad relativa, temperatura ambiente y cantidad de lluvia, la salida para los modelos fue la velocidad de corrosión.

### 2.1.6. Dispositivos para medir la corrosión

En la búsqueda de dispositivos para medir la corrosión se encontraron algunos dispositivos que sólo consideran a la sonda de medición como dispositivo, otros son sondas con sensores adaptados y por último se encontraron dispositivos muy similares al que se desarrolló en esta tesis. Enseguida se mencionan algunos de estos dispositivos.

En Uruchurtu *et al.* (1997) se patentó una sonda para medir la corrosión en precalentadores regenerativos de aire en centrales termoeléctricas.

En Uruchurtu y Malo (1998) se patentó una sonda para medir la corrosión atmosférica con salidas para conectarse a una computadora u otros dispositivos para el análisis de los datos.

En Enciso y Salinas (2007) se desarrolló un sistema computarizado que supervisa la corrosión en tiempo real por análisis de ruido electroquímico a partir de una celda. Con este sistema se realizaron mediciones de corrosión a partir de una celda electroquímica en una solución salina con muestras de materiales utilizados en los componentes de la central nuclear de Laguna Verde. En un futuro se

El sistema de computadora permite visualizar gráficas (potencial eléctrico, corriente, valores estadísticos, espectro de frecuencias) así como su análisis (media, valor RMS (raíz media cuadrática, de *Root Mean Square*), desviación estándar y varianza), contando además con indicadores visuales que indican el tipo de corrosión (uniforme, mixta y localizada). También cuenta con una sección de cálculo de velocidad de corrosión (mm/año, mp/año, gr  $m^2$ /año) y con la opción de introducir características (masa atómica, número de electrones, densidad) de otros materiales que puedan utilizarse en la celda.

En Menchaca (2011) la universidad autónoma de Tamaulipas patentó un dispositivo para el monitoreo a distancia de los procesos de corrosión electroquímicos. El dispositivo utiliza la técnica de ruido electroquímico para determinar los niveles de corrosión, la sonda

empleada utilizó la configuración de tres electrodos idénticos. El análisis de los datos de ruido electroquímico se realizó mediante el análisis estadístico en el dominio temporal de las señales. Se determinó la desviación estándar de las señales de corriente ( $\sigma_I$ ) y potencial ( $\sigma_V$ ), la resistencia al ruido (Rn) y el índice de localización (IL). El dispositivo cuenta con circuitería para la adquisición y filtrado de los datos, posteriormente los datos de voltaje y corriente son mandados a través de un módem hacia otro módem conectado a una computadora que tiene el software que procesa los datos.

En Nóvoa y Pérez (2014) se patentó un sonda para determinar la corrosión en recubrimientos protectores de metales y recubrimientos asociados.

En Kilian *et al.* (2013) se patentó un dispositivo para determinar el potencial de corrosión electroquímica para componentes de una central nuclear.

En Agudo (2013) se patentó una sonda para monitorear la corrosión donde se acoplan diferentes sensores (humedad, temperatura) la cual comunica de manera inalámbrica los valores registrados para su posterior análisis.

En Aperador y Roa (2014) la universidad militar de Nueva Granada patentó un equipo de monitoreo de corrosión en situ para estructuras de cualquier tipo de concreto armado. En Guillermo *et al.* (2015) ya se expone la utilización de este equipo para monitorear de manera remota la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. La técnica utilizada por dicho equipo es la medición electroquímica de media celda. La información se almacena en una tarjeta micro SD y es enviada posteriormente a una página web alojada en un servidor, donde se procesan los datos y se obtiene el nivel de corrosión presentado. Un módulo de GSM/GPRS M95 (*Global System for Mobile communications/General Packet Radio Service*) fue agregado para poder controlar el dispositivo de manera remota mediante un teléfono celular a través de mensajes de texto.

En England (2016) se patentó una sonda de monitoreo de corrosión formada por cupones de corrosión y sensores de temperatura y humedad que almacena los datos registrados para su posterior análisis.

En Teale y Perkins (2016) y Gao *et al.* (2016) se patentaron sondas de medición de corrosión en pozos profundos, Teale y Perkins (2016) utilizó sensores ópticos y Gao *et al.* (2016) utiliza arreglos de resistencias para recaudar datos sobre el proceso de corrosión.

En Taskar *et al.* (2016) se patentó un dispositivo para detectar la corrosión en procesos donde intervienen gases, este consiste en una serie de cámaras que retienen gas. Las cámaras tienen un cupón que reacciona de manera especial cuando entra en contacto con un gas corrosivo.

En Hedtke (2016) se patentó una forma de medir la corrosión utilizando una prueba de sacrificio acoplada con circuitería que permite medir los cambios que sufre la prueba por parte de la corrosión.

En Do-Hyung *et al.* (2016) se patentó una sonda de corrosión y el método de elaboración

de dicha sonda.

### 2.1.7. Conclusión

De las diferentes formas de medir los índices de corrosión se optó por indagar en las técnicas electroquímicas donde a su vez se realiza una sub-clasificación en técnicas intrusivas y no intrusivas. Por parte de las técnicas intrusivas una de las más famosas es la Resistencia a la Polarización ( $R_p$ ) y por parte de las técnicas no intrusivas la Resistencia al Ruido ( $R_n$ ). Ambas técnicas utilizan al ruido electroquímico como medio para poder determinar las condiciones de corrosión. Como técnica más apta para el desarrollo de la tesis se consideró a la resistencia al ruido como la mejor opción, ya que se caracteriza por no necesitar polarizar la zona sobre la cual se realiza el análisis. A partir de la medición del ruido electroquímico y su procesamiento mediante ecuaciones algebraicas es posible determinar los índices de corrosión.

Tras la lectura de la bibliografía de métodos predictivos se eligió un solo método para emplear en la tesis, siendo las redes neuronales el método elegido. Debido a que la corrosión es un fenómeno no lineal (Jančíková *et al.* (2013)) los métodos lineales no serían efectivos en la predicción del comportamiento de la corrosión siendo las redes neuronales un método apto para resolver problemas no lineales (Abdullah *et al.* (2014)).

Los modelos de Markov son ampliamente utilizados en la predicción de corrosión estructural (Valor *et al.* (2013)) sin embargo requieren de datos históricos (de incluso años) para su implementación. Estos datos deben de ser una cantidad significativa y con un adecuado tratamiento por lo cual para el desarrollo de esta tesis los modelos de Markov no resultan aptos pues no se dispone del tiempo suficiente para recopilar datos además de que se requiere de software adicional para el tratamiento previo de dichos datos.

Las redes bayesianas por su parte tampoco resultaron aptas pues de igual manera que los modelos de Markov requieren un tratamiento adicional de los datos, el cual se suele realizar con software adicional aunado a la implementación de otros métodos como los mismos modelos de Markov antes mencionados (Haddad *et al.* (2014)). Además los requerimientos de memoria y procesamiento de las redes neuronales son menores que los necesarios para trabajar con redes bayesianas, dicha cuestión no resulta un gran problema en sí pues actualmente los ordenadores son muy potentes. Sin embargo para esta tesis se utiliza una computadora de placa reducida (Raspberry Pi<sup>®</sup>) la cual tiene características limitadas (suficientes para el dispositivo) que de solucionarse utilizando una computadora potente influiría en el diseño y costo final del prototipo (Correa *et al.* (2008)).

Del análisis bibliográfico se concluye que a pesar de existir varios métodos para medir los índices de corrosión, técnicas para calcular la velocidad de corrosión y dispositivos medidores de corrosión no existe un dispositivo que además de realizar las tareas antes mencionadas realice la predicción de la vida útil del equipo sobre el que se produce el

efecto de corrosión. Por lo tanto un dispositivo que mida los índices de corrosión en línea de los metales (a partir del ruido electroquímico) y, a partir de estos índices, calcule la vida útil de la pieza metálica será de gran utilidad para la industria.

En México no existe gran cantidad de patentes sobre dispositivos de esta naturaleza, el más similar es el reportado en Menchaca (2011), sin embargo éste y otros dispositivos aún requieren de una computadora para procesar los datos. Por lo tanto, el dispositivo desarrollado en esta tesis innova al tener en una sola pieza un dispositivo capaz de medir los índices de corrosión y a partir de ellos determinar la vida útil del material. La implementación en dos materiales metálicos es punto de partida para implementarse posteriormente (después de agregar más sensores, un modelo con más variables, diferentes métodos de análisis de los datos, etc.) en equipos industriales (tuberías, contenedores, tanques, etc.).

## 2.2. Marco teórico

Esta tesis tuvo como finalidad desarrollar un dispositivo para medir los índices de corrosión en metales, por lo tanto a continuación se desarrollan los temas necesarios para comprender los conceptos incluidos en este trabajo.

### 2.2.1. Metales

Los metales son sustancias inorgánicas compuestas por uno o más elementos metálicos y pueden contener algunos elementos no metálicos. Ejemplos de metales son el cobre, el hierro, el aluminio, níquel y titanio. Los metales tienen una estructura cristalina en la que los átomos están dispuestos de manera ordenada lo cual les confiere la propiedad de ser dúctiles y resistentes tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas. Los metales tienen una gran aplicación en la industria, principalmente en la aeronáutica, biomédica, de los semiconductores, electrónica, energética, de estructuras civiles y del transporte (Smith y Hashemi (2006)).

### 2.2.2. Corrosión

La oxidación es la reacción de los metales con el oxígeno dando lugar a un óxido, a pesar de deteriorar al metal la capa de óxido actúa como recubrimiento e incluso se incrementa el espesor debido a este fenómeno. Cuando la oxidación se produce en un ambiente húmedo o en presencia de agentes agresivos (temperatura, aire, vapores, etc.) se denomina corrosión. La corrosión se caracteriza por la destrucción del metal originando la pérdida del espesor o grietas sobre la superficie. La corrosión se hace presente en la mayoría de las piezas metálicas de la maquinaria y equipo industrial, sobre todo en tuberías y contenedores.

### 2.2.3. Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica es la forma más común de ataque a los metales, ésta se presenta cuando se produce el contacto de un metal con medios líquidos conductores que contienen agentes oxidantes (Vázquez y Damborena (2001)). Estos procesos se caracterizan porque el metal que se corroe se comporta como un polielectrodo (Costa (2005)), es decir, sobre distintos puntos de la superficie metálica se verifican simultáneamente y a la misma velocidad las dos semireacciones en que puede dividirse la reacción redox global. A estas dos reacciones se les asignan nombres de proceso anódico, para la oxidación del metal, y proceso catódico, para la reducción del agente oxidante presente en el medio corrosivo. Como los fenómenos de corrosión implican reacciones redox que se verifican en la interfase metal/electrolito, este tipo de procesos conlleva un movimiento de cargas eléctricas. De esta manera, el estudio de los fenómenos de corrosión puede abordarse mediante distintas técnicas electroquímicas que permitan evaluar los parámetros eléctricos asociados a esos procesos de transporte de cargas.

### 2.2.4. Tipos de corrosión

El daño que se produce por el fenómeno de corrosión puede tomar diferentes formas dependiendo de la naturaleza del metal o la aleación. Por ello, es posible clasificar la corrosión en diferentes tipos. Una clasificación preliminar divide el efecto de corrosión en corrosión generalizada o uniforme y corrosión localizada (Milella (2012)). En la Figura (2.3) se muestra un esquema de clasificación para los diferentes tipos de corrosión, con algunas de sus sub-clasificaciones (Coatl (2009)).

- **Corrosión general o generalizada:** Se denomina corrosión general al proceso que ocurre sin el ataque apreciable en una zona localizada en particular. Este tipo de corrosión se ve favorecido bajo circunstancias en las cuales los productos formados por la reacción del metal con su ambiente no lo protegen, permitiendo que el proceso continúe en todo el metal. Este tipo de corrosión es el que genera más pérdidas de material sin embargo, al ser de tipo superficial, es la más fácil de controlar (aplicando una capa protectora a la superficie como pintura o barnizado) y por lo tanto la que menos accidentes provoca (Cortés y Hortiz (2004)).
- **Corrosión localizada:** A diferencia de la corrosión generalizada, la corrosión localizada ocurre en áreas o superficies perfectamente localizadas o ubicadas donde el efecto de corrosión tiene su mayor concentración. Este tipo de corrosión es la más peligrosa pues da lugar a fugas en tuberías o contenedores en cualquier punto de la superficie (Perry y Green (2004)).

- **Corrosión estructural:** Es aquella que hace referencia al daño que sufren los materiales en su estructura o composición por efecto de las reacciones que el metal tiene con su ambiente. Entre los tipos de corrosión estructural se pueden mencionar la graffítica, la separativa y la biológica.

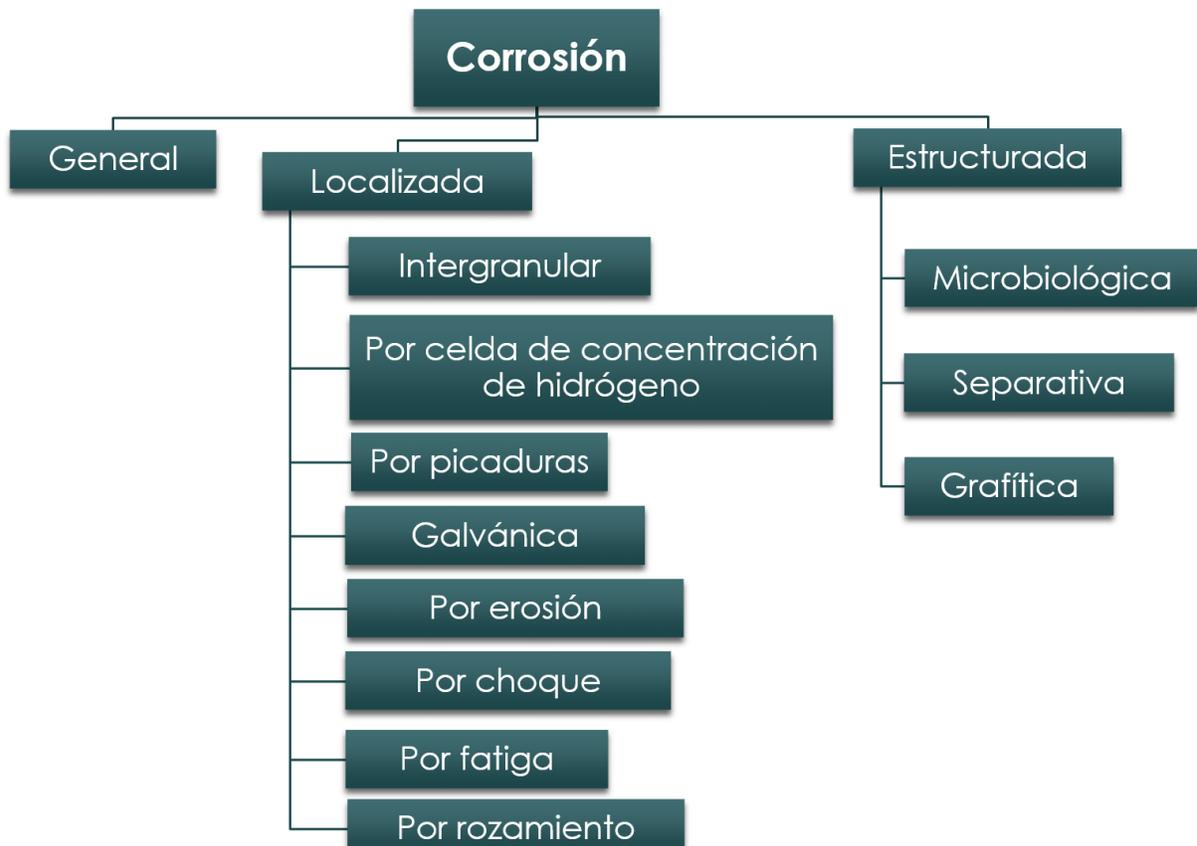


Figura 2.3: Tipos de corrosión.

### 2.2.5. Consecuencias de la corrosión

Las principales consecuencias de la corrosión son las siguientes (Roberge (1999)):

- Paros de planta.
- Desperdicio de recursos valiosos.
- Pérdida o contaminación del producto.

- Reducción en la eficiencia.
  
- Mantenimiento costoso.
  
- Altos costos por proyectos sobredimensionados.
  
- Riesgos a la seguridad.

El costo originado por la corrosión es uno de los aspectos más alarmantes. De 1999 a 2001, Estados Unidos tuvo un total anual de costos directos por corrosión de aproximadamente 276 mil millones de dólares, aproximadamente un 3.1 % del PIB (Producto Interno Bruto) de ese país. De igual manera en Perú, de acuerdo con la empresa Teknoquímica, en el año 2000 las pérdidas por corrosión representaron 8 % del PIB, es decir, aproximadamente 1 200 millones de dólares (Orozco *et al.* (2007)).

En algunas industrias como la electrónica es necesario utilizar recubrimientos especiales e incluso reemplazar algunos de los materiales por metales como el oro o la plata (los cuales tienen una mayor resistencia a la corrosión) incrementando en gran medida los costos de producción y el precio de venta del artículo terminado (López *et al.* (2007)). Los costos por proyectos sobredimensionados son realmente grandes, dependiendo de la instalación. Por ejemplo, en el campo geotérmico Miravalles, ubicado en Costa Rica, el costo por sobre espesor de 1 mm para 30.5 km de tuberías asciende a más de un millón de dólares (Tres *et al.* (2008)).

En cuanto a la seguridad de las personas se suelen presentar eventos aislados sin embargo hay eventos donde personas ha resultado heridas e incluso se han registrado decesos. Tal y como sucedió en Guadalajara, Jalisco, en abril de 1992 (Figura 2.4 a), donde fugas en tuberías de gasolina de Pemex originadas a partir del efecto de corrosión ocasionaron 200 víctimas mortales, más de 1 500 heridos y alrededor de 1 600 construcciones dañadas (Roberge (1999)). En la industria aeronáutica la corrosión es uno de los aspectos más importantes a considerar al revisar las aeronaves, pues los materiales empleados son propensos a la corrosión aunado a las condiciones de operación. Además de gastar miles de millones de dólares en reparaciones y recubrimientos se han presentado accidentes como el registrado el 28 de abril de 1998 (Figura 2.4cb)), cuando un Boeing 737 operado por Aloha Airlines, con 19 años de servicio, perdió una parte importante del fuselaje superior a 24 000 pies de altura, el avión logró aterrizar, sin embargo una de las azafatas perdió la vida (Valdez Salas y Schorr Wiener (2013)).



(a) Guadalajara 22/04/92

(b) Vuelo 243 Honolulu 4/28/88.

Figura 2.4: La corrosión y sus efectos.

### 2.2.6. Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica es la forma más común de ataque a los metales, ésta se presenta cuando se produce el contacto de un metal con medios líquidos conductores que contienen agentes oxidantes (Vázquez y Damborena (2001)). Estos procesos se caracterizan porque el metal que se corroe se comporta como un polielectrodo (Costa (2005)), es decir, sobre distintos puntos de la superficie metálica se verifican simultáneamente y a la misma velocidad las dos semireacciones en que puede dividirse la reacción redox global. A estas dos reacciones se les asignan nombres de proceso anódico, para la oxidación del metal, y proceso catódico, para la reducción del agente oxidante presente en el medio corrosivo.

Como los fenómenos de corrosión implican reacciones redox que se verifican en la interfase metal/electrolito, este tipo de procesos conlleva un movimiento de cargas eléctricas. De esta manera, el estudio de los fenómenos de corrosión puede abordarse mediante distintas técnicas electroquímicas que permitan evaluar los parámetros eléctricos asociados a esos procesos de transporte de cargas.

La mayor parte de los métodos electroquímicos para el estudio de la corrosión están basados en la perturbación controlada de una de las dos variables eléctricas fundamentales, voltaje o corriente, y la medición de la otra variable como consecuencia de la alteración introducida al sistema. El comportamiento de la respuesta en el tiempo depende, por una parte, de las características de la señal de perturbación, y por otra de las características eléctricas del sistema. Haciendo uso de estos métodos es posible estimar la velocidad de corrosión y, además, extraer información adicional sobre las características del sistema difíciles de obtener mediante otras técnicas experimentales (Martínez *et al.* (2012)).

Dentro de estas técnicas las más empleadas son la de polarización lineal (PL), resistencia de polarización ( $R_p$ ), voltametría cíclica (Vc) e impedancia electroquímica (IE)

(Botana y Marcos (2002)).

### 2.2.7. Ruido electroquímico

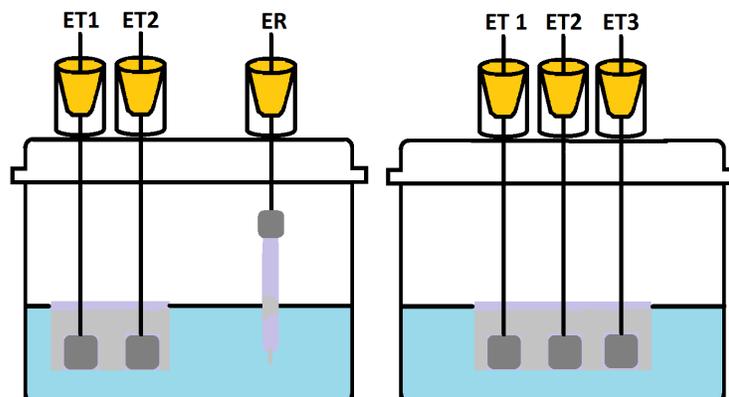
Los primeros trabajos sobre corrosión y la técnica de ruido electroquímico (EN, del inglés *Electrochemical Noise*) se comenzaron a publicar desde la década de los 60's, empleándose como un método de ensayo no destructivo para el estudio in situ del proceso de corrosión de los metales. Sin embargo, las mejoras en el análisis de datos se produjo hasta la década de los 90's, a partir de esta década se ha establecido y ampliado su uso, sobre todo para aplicaciones de baja temperatura, materiales de construcción, barriles de residuos nucleares, monitoreo de procesos industriales, etc. La técnica de Medida del Ruido Electroquímico se basa en el análisis de las fluctuaciones de potencial y corriente producidos cuando un metal se corroe libremente. Este método presenta una ventaja importante sobre los demás métodos electroquímicos ya que no se necesita perturbar el sistema para obtener la información deseada (Cappeln *et al.* (2005)).

La medición o registro del ruido electroquímico es, en apariencia, sencillo lo importante es la obtención de la información relevante que puede ser, en muchos casos, más problemático (Genescá (2002)).

### 2.2.8. Medición del ruido electroquímico

La medición del ruido electroquímico de potencial y de corriente se puede realizar de manera simultánea, como se muestra en la Figura (2.5). Para el primer caso, Figura 2.5(a), el ruido de potencial se mide entre uno de los electrodos de trabajo (ET) y el electrodo de referencia (ER), mientras que el ruido en corriente se mide entre los dos electrodos de trabajo, comportándose los dos electrodos como un sólo electrodo del doble del área de uno de ellos. Para el segundo caso, Figura 2.5(b), el primer par de electrodos mide el ruido de potencial y el segundo par mide el ruido en corriente, teniendo un electrodo en común (Tres *et al.* (2001), Genescá (2002), Botana y Marcos (2002), Espada *et al.* (2003), Edgemon (2004), Garita (2014)).

Los tres electrodos deben de ser fabricados del mismo metal con el que está fabricado el equipo donde se analizará el proceso de corrosión (tuberías, tanques, etc.). Y debe de entrar en contacto con la solución contenida (agua, combustibles, etc.) o que fluye a través de él para que los datos registrados por el dispositivo sean acerca de la corrosión generada por el líquido sobre el metal que forma al equipo. En ensayos de laboratorio se puede tener un electrodo de diferente material pues solo se determina el poder corrosivo del electrolito con el que se trabaje.



(a) Dos electrodos de trabajo y uno de referencia. (b) Tres electrodos de trabajo.

Figura 2.5: Esquemas correspondientes a los arreglos para la medición de ruido electroquímico, bajo el sistema de tres electrodos.

La estructura de las fluctuaciones de potencial se puede explicar en términos de un sistema corrosivo desplazándose del estado pasivo al de corrosión. En el estado pasivo el potencial se mantendrá esencialmente constante; cualquier fluctuación será lenta en periodos largos de tiempo. El ruido en corriente se obtiene midiendo las oscilaciones de la corriente entre dos electrodos idénticos o de un sólo electrodo bajo control potencioestático (Genescá (2002), Botana y Marcos (2002)). Es importante tomar en cuenta, que el ruido en potencial es muy sensible en procesos de rompimiento de película y en etapas de iniciación de la corrosión localizada, mientras que el ruido en corriente es más sensible una vez que el proceso alcanza la propagación del mismo, de aquí la importancia de obtener ambas medidas al mismo tiempo.

El número de lecturas efectuadas en una medición es una propiedad particular de los datos. La forma usual para el registro de datos en las mediciones de ruido electroquímico es almacenarlos en forma de series temporales  $x_n$ ,  $n = 1, \dots, N$ , donde  $x$  representa la señal de voltaje ( $V$ ) o corriente ( $I$ ) y  $N$  es el número total de puntos de la serie. Así, los datos se toman en intervalos de tiempo  $t_m$ , la duración total de un registro es  $T_m = (N)(t_m)$ . Un valor típico y ampliamente utilizado de  $N$  es 1024, mientras que para  $t_m$  se suelen tomar valores entre 0.1 a 1 segundo. Debido al caracter agresivo de las soluciones es necesario utilizar tiempos de muestreo no mayores a un segundo además de que en el análisis del ruido electroquímico se debe de trabajar a frecuencias menores a 1 Hz (Cottis y Loto (1986), Estupiñán-López *et al.* (2011), Almeraya-Calderón *et al.* (2012), Wang *et al.* (2013), Gaona-Tiburcio *et al.* (2014)).

Estas series de tiempo se han desarrollado significativamente gracias a los avances

de la tecnología en cómputo, permitiendo la facilidad de manipularlas para obtener la información del fenómeno de forma cuantitativa y cualitativa (Botana y Marcos (2002)).

### 2.2.9. Análisis de los datos de ruido electroquímico

Los datos de corriente y voltaje obtenidos en ensayos de ruido electroquímico proporcionan un tipo de información difícil de interpretar de forma directa. La adquisición de los datos en los ensayos de ruido electroquímico se realiza habitualmente en periodos de duración bastante largos, ésto da lugar a una gran cantidad de datos lo cual dificulta su análisis. Por ello, con el fin de disponer de una información útil y confiable de los datos, se usan técnicas estadísticas cuya finalidad es conseguir un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas (Botana y Marcos (2002)).

Para conseguir este objetivo es necesario emplear métodos sistemáticos y sencillos; para organizar y preparar los datos, detectar fallos en el diseño y adquisición de los mismos, el tratamiento y evaluación de datos ausentes, identificación de casos atípicos y comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas multivariantes (normalidad, linealidad, etc.). Incluso, algunos investigadores (Botana y Marcos (2002)) recomiendan que de cara a obtener la máxima información posible, sean utilizados distintos métodos para cada sistema que se estudie. La mayor parte de los métodos de análisis de datos que actualmente son utilizados se pueden clasificar en cinco grandes grupos:

- a) **Inspección directa de registros experimentales:** Sin necesidad de procesar matemáticamente los datos es posible obtener información sobre la velocidad de corrosión y el tipo de corrosión que se presenta en el metal. Esto a partir de las gráficas de corriente y voltaje.
- b) **Análisis estadístico en el dominio temporal:** A través de parámetros estadísticos es posible determinar características del proceso de corrosión. A partir de la resistencia al ruido es posible determinar la velocidad de corrosión como se hace con técnica como la resistencia a la polarización. En análisis estadístico en el dominio temporal es el método utilizado en esta investigación.
- c) **Análisis en el dominio de frecuencias:** Este análisis se realiza utilizando la densidad de potencia espectral (PSD, del inglés *Power Spectral Density*). La PSD se obtiene transformando los datos del dominio temporal al dominio de las frecuencias utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT, del inglés *Fast Fourier Transform*) o el Método de la Máxima Entropía (MEM, del inglés *Maximum Entropy Method*). Estos espectros permiten determinar el tipo y la velocidad de corrosión que se presenta.
- d) **Análisis basado en la Teoría del Caos:** En este método se trata de obtener información sobre el proceso de corrosión a través de un estudio del orden y la correlación de

los datos. Con este análisis ha sido posible establecer que la corrosión localizada es un proceso caótico relativamente simple y la corrosión uniforme es un proceso aleatorio.

- e) **Análisis basado en la transformada de Wavelets:** La Transformada de Wavelets es una extensión de la Transformada de Fourier que se adapta mejor al estudio de señales no estacionarias como es el caso del ruido electroquímico. Algunas de las aplicaciones desarrolladas con transformada de Wavelet permiten reconocer patrones en las señales de ruido electroquímico que definen el mecanismo de corrosión y patrones que indican cambios en la cinética de la corrosión.

Antes de aplicar algún método para el análisis de los datos experimentales hay que realizar un proceso de filtrado para eliminar las fluctuaciones de alta o baja frecuencia, las cuales se pueden originar por la presencia de una tendencia de corriente directa o ruido instrumental.

### 2.2.10. Análisis estadístico del ruido electroquímico

El análisis estadístico de las series temporales es un método simple y rápido para la interpretación del ruido electroquímico. La base de las series de tiempo se define por la distribución de los valores usualmente expresados como función de la probabilidad acumulativa, equivalente a la función de la densidad de probabilidad. Los parámetros estadísticos más comunes son: media, varianza, desviación estándar, raíz media cuadrática (*rms*), índice de localización (*IL*), sesgo y curtosis (Botana y Marcos (2002)). El Índice de Localización (*IL*, también conocido como Índice de Picadura) se define como la relación que existe entre la desviación estándar ( $\sigma_I$ ) y el valor de la raíz media cuadrática de la corriente ( $I_{rms}$ , rms del inglés *Root Mean Square*), como se utilizó en (Hernández *et al.* (2009)).

$$IL = \frac{\sigma_I}{I_{rms}}. \quad (2.1)$$

En la Tabla 2.1 se muestran los intervalos de valores de *IL* propuestos en (Botana y Marcos (2002)) para indicar el tipo de corrosión.

### 2.2.11. Resistencia a la polarización $R_p$

Esta técnica está basada en la medida de la relación existente entre el potencial y la densidad de corriente en estado estacionario, excitando el sistema mediante señales de corriente continua. El objetivo de esta técnica es determinar las curvas de Tafel del sistema, ya que sus pendientes están relacionadas con la velocidad de corrosión (Hernández *et al.* (2009)).

Tabla 2.1: Intervalos de valores de  $IL$ .

Tipo de corrosión	Valores de $IL$	
	Max.	Min.
Localizada	1.0	0.1
Mixta	0.1	0.01
Uniforme	0.01	0.001

Desde que en 1957 Stern y Geary (Genescá (2002)) dieron forma al método, la medida de la resistencia de polarización ha sido la técnica que más ha contribuido al avance de la ciencia de la corrosión. Estos autores propusieron la denominada ecuación de Stern-Geary, en la que se establece una correlación entre la resistencia de polarización ( $R_p$ ) y la velocidad de corrosión, ecuación (2.2).

$$R_p = \frac{B}{i_{corr}}, \quad (2.2)$$

donde  $i_{corr}$  es la densidad de corriente de corrosión y  $B$  está relacionada con las pendientes anódica ( $\beta_a$ ) y catódica ( $\beta_c$ ) de Tafel del sistema, a través de la expresión:

$$B = \frac{B_a B_c}{2,303(B_a + B_c)} \quad (2.3)$$

El valor típico de  $B$  para la mayoría de los sistemas es de 0.026 V según la literatura (Hernández *et al.* (2009)). Para las pruebas el valor de  $B_a$  fue de 0.026V y  $B_c$  de -0.0261V.

### 2.2.12. Resistencia de ruido $R_n$

El término de resistencia de ruido ( $R_n$ ), fue definido en la década de los ochenta con idea de complementar la información proporcionada por los registros de ruido de corriente y voltaje separadamente. La resistencia en ruido se define como:

$$R_n = \frac{\sigma_V}{\sigma_I}, \quad (2.4)$$

donde:

$\sigma_V$  = es la desviación estándar del ruido de potencial.

$\sigma_I$  = es la desviación estándar del ruido de corriente.

La idea de relacionar dichas magnitudes surgió de la observación de que existe una buena correlación entre los registros de ruido de potencial y corriente. Por lo tanto, las

variaciones en potencial se pueden considerar como una respuesta del sistema a las variaciones de corriente o viceversa. Así, en el caso más simple, existirá una constante que relacione dichas variables y que puede utilizarse para evaluar la dificultad o facilidad con que se da la transferencia de carga a través de la superficie de los electrodos de trabajo (Botana y Marcos (2002)). Esta magnitud está relacionada con las pendientes de Tafel anódicas y catódicas según la ecuación de Stern-Geary (ecuaciones (2.2) y (2.3)).

La diferencia entre  $R_p$  y  $R_n$  es que para calcular  $R_n$  el sistema se desplaza del equilibrio de forma espontánea (ruido electroquímico), mientras que para calcular  $R_p$  es necesario polarizar la muestra imponiendo una señal externa.

Diversos autores han analizado la relación entre  $R_n$  y  $R_p$ , algunos han demostrado que son equivalentes (Botana y Marcos (2002)), por esto mismo proponen utilizar el valor de  $R_n$  para la determinación de la velocidad de corrosión, ya que presenta la ventaja de que puede calcularse sin necesidad de polarizar la muestra, según la siguiente relación:

$$R_n = \frac{B}{i_{corr}}, \quad (2.5)$$

donde  $B$  es la constante que relaciona el metal-medio ambiente específico en V e  $i_{corr}$  es la densidad de corriente de corrosión en  $A/m^2$ . Actualmente diversos autores reducen el número de datos adquiridos realizando el cálculo de la media cada cierto número de datos adquiridos, ya sea cada 5, 10, 30, 60, etcétera. Con este método se puede abordar el análisis matemático de manera más sencilla y con ello el cálculo de  $R_n$  con menor cantidad de datos.

### 2.2.13. Medición de la velocidad de corrosión por ruido electroquímico

La densidad de corriente de corrosión se puede medir por cualquier técnica electroquímica por lo cual a partir de la resistencia de ruido es posible determinar la densidad de corriente de corrosión mediante la siguiente ecuación:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_n}, \quad (2.6)$$

y con ello evaluar la velocidad de corrosión de la misma forma que se haría mediante la resistencia de polarización obtenida mediante métodos de corriente continua. La determinación de la Velocidad de Corrosión ( $VC$ ) se realiza mediante la siguiente ecuación (ASTM (1999a)):

$$VC = k(i_{corr}(\frac{Weq}{\rho})), \quad (2.7)$$

donde:

$k$ : constante expresada en diferentes sistemas de unidades (tabla 2.2).

$\rho$ : es la densidad del metal o aleación.

$i_{corr}$ : es la densidad de corriente de corrosión.

$W_{eq}$ : es el peso equivalente del metal o aleación utilizado.

Tabla 2.2: Valores de  $k$  para el cálculo de la velocidad de corrosión.

Unidades				Valores de $k$
$CR$	$i_{corr}$	$\rho$	$k$	
mpy	$\mu A/cm^2$	$g/cm^3$	mpy g/ $\mu A$ cm	0.1288
mm/año	$A/m^2$	$kg/m^3$	mm kg/ A m año	327.20
mm/año	$\mu A/cm^2$	$g/cm^3$	mm g/ $\mu A$ cm año	$3.27 \times 10^{-3}$

### 2.3. Vida útil del metal

La vida útil estimada del acero (años) u otros metales se obtiene a través de la ecuación (2.8) (Molina *et al.* (2011)).

$$\text{Vida útil estimada} = \frac{\text{Grosor (falla funcional)}}{\text{Tasa de corrosión}}, \quad (2.8)$$

el grosor es la medida mínima del material (mm) en la cual el sistema no presenta fallas, se considera la existencia de fallas cuando el sistema opera fuera de los parámetros normales o deseados. La tasa de corrosión es la velocidad de corrosión anual (mm/año) que presenta el material (Villada *et al.* (2009)).

### 2.4. Redes neuronales

Las llamadas redes neuronales artificiales están basadas en las redes neuronales biológicas que conforman el cerebro humano. Sin embargo, las redes artificiales no han logrado igualar el poder de procesamiento del cerebro humano a pesar de los arduos intentos de los diseñadores. El sistema nervioso humano está constituido por alrededor de  $10^{11}$  neuronas, formando un complejo sistema de interconexiones del orden de  $10^{15}$  (Olabe (1998)). La neuronas son muy similares a otras células del cuerpo sin embargo cuentan con capacidad para recibir, procesar y transmitir señales electroquímicas a todo el sistema que forma el cerebro. La Figura (2.6) muestra la interacción entre un par de neuronas biológicas.

Las neuronas se comunican a través de sus dendritas. El punto de contacto o de conexión se llama sinapsis, las entradas son dirigidas al núcleo donde se suman para excitar o inhibir la célula. Cuando la excitación acumulada supera un valor umbral las neuronas envían una señal a través del axón a otras neuronas.

Las redes neuronales biológicas son muy superiores a cualquier inteligencia artificial actual, sobre todo en tareas de reconocimiento de patrones, algunas de las capacidades que las hacen superiores son las siguientes (Yegnanarayana (2009)):

- a) Robustez y tolerancia a fallas: El deterioro de algunas neuronas no parece afectar de manera significativa el desempeño de la red.
- b) Flexibilidad: La red automáticamente se ajusta a un nuevo ambiente sin utilizar alguna instrucción preprogramada.
- c) Habilidad para tratar con distintos conjuntos de datos: La red puede tratar con información difusa, probabilística, de ruido e inconsistente.
- d) Cómputo colectivo: La red desempeña muchas operaciones de rutina en paralelo y da tareas de manera distribuida.

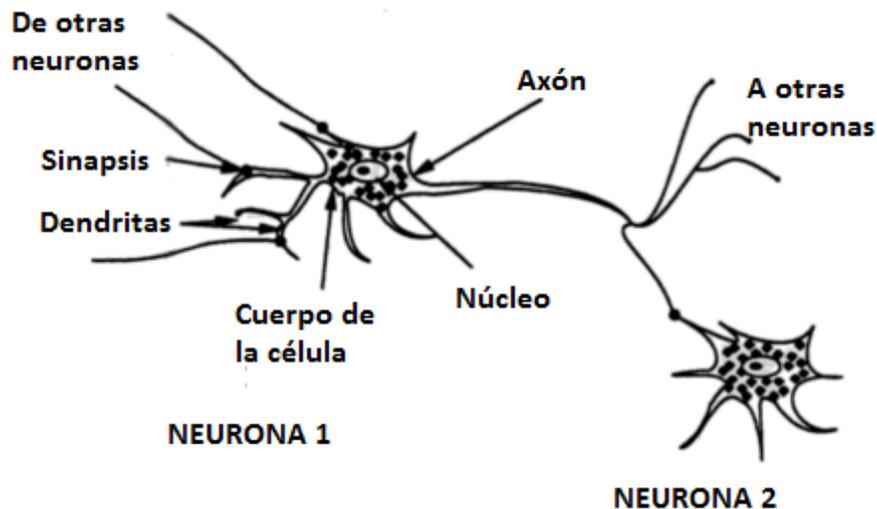


Figura 2.6: Diagrama esquemático de una neurona típica o célula nerviosa (Castro y González (1993)).

Las Redes Neuronales Artificiales (**RNA** o **ANN**, del inglés *Artificial Neural Network*) están diseñadas en base a las redes neuronales biológicas que integran el cerebro humano.

De acuerdo con Castro y González (1993) una red neuronal es un sistema de procesadores paralelos conectados entre sí en forma de grafo dirigido. Esquemáticamente, cada elemento de procesamiento (neuronas) de la red se representa como un nodo. Sus elementos además de ser muy similares también realizan funciones similares tales como aprender, generalizar y abstraer (Olabe (1998)). Estas RNA consisten en un conjunto de rasgos de entrada, generalmente binarios, que son multiplicados por valores asociados a las neuronas llamados pesos sinápticos, generalmente reales entre 0 y 1, posteriormente son insertados a una función matemática que determina la activación de la neurona tal como se muestra en la Figura (2.7) (Brauer (2013)).

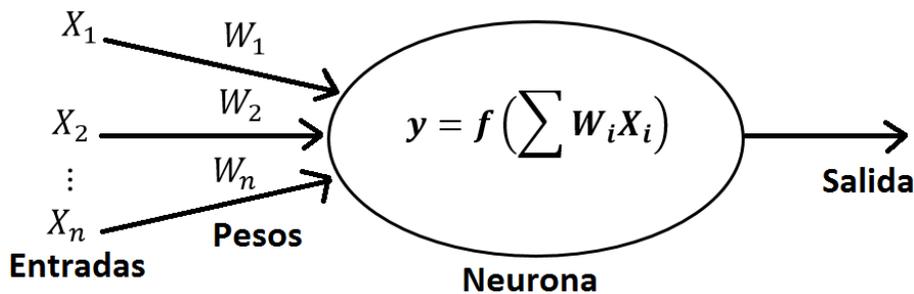


Figura 2.7: Neurona artificial (Olabe (1998)).

Al realizar el ajuste de los pesos sinápticos, mediante algoritmos de aprendizaje, se pueden obtener salidas deseadas ante entradas específicas. Existen diferentes algoritmos para ajustar los pesos y obtener el desempeño deseado de la red. Para que la red mejore su desempeño se realiza un entrenamiento con datos que entrenan a la red. Para validar el entrenamiento de la red se utilizan medidas estándar del error (diferencia entre las salidas deseadas y las estimadas por la red), las más comunes son la suma de los cuadrados de los errores, la raíz cuadrada del error cuadrático medio y el error máximo.

Las redes neuronales artificiales han resultado ser una buena herramienta en aplicaciones donde las entradas presentan ruido o están incompletas. Las áreas con mayor aplicación para las RNA son las siguientes(Olabe (1998), Gutiérrez *et al.* (2004));

- Análisis y procesado de señales.
- Control de procesos.
- Robótica.
- Diagnósticos médicos.
- Reconocimiento de imágenes.

- Filtrado de ruido.
- Procesado del lenguaje.
- Predicción meteorológica y oceánica.

La selección de una red se realiza en función de las características del problema a resolver y de las limitaciones computacionales que se puedan tener. Los modelos de redes más comunes son los siguientes (Olabe (1998)).

### **1) Adaline y Madaline**

Diseñador: Bernard Widrow

Año: 1960

Tipo: Predicción

Características: Técnicas de adaptación para el reconocimiento de patrones.

### **2) Resonance Theory Networks (ART)**

Diseñador: Carpenter, Grossberg

Año: 1960-86

Tipo: Conceptualización

Características: Reconocimiento de patrones y modelo del sistema neuronal. Concepto de Resonancia Adaptativa.

### **3) Back-Propagation**

Diseñador: Rumelhart y Parker

Año: 1985

Tipo: Clasificación

Características: Solución a las limitaciones de su red predecesora el perceptrón.

### **4) Bi-Directional Associative Memory (BAM) Networks**

Diseñador: Bart Kosko

Año: 1987

Tipo: Asociación

Características: Inspirada en la red ART.

### **5) The Boltzmann Machine**

Diseñador: Ackley, Hinton y Sejnowski

Año: 1985

Tipo: Asociación

Características: Similar a la red Hopfield.

**6) Brain-State-in a Box**

Diseñador: James Anderson

Año: 1970-86

Tipo: Asociación

Características: Red asociativa lineal.

**7) Cascade-Correlation-Networks**

Diseñador: Fahhman y Lebiere

Año: 1990

Tipo: Asociación

Características: Adición de nuevas capas ocultas en cascada.

**8) Counter-Propagation**

Diseñador: Hecht-Nielsen

Año: 1987

Tipo: Clasificación

Características: Clasificación adaptativa de patrones.

**9) Delta-Bar-Delta (DBD) Networks**

Diseñador: Jacobb

Año: 1988

Tipo: Clasificación

Características: Métodos heurísticos para acelerar la convergencia.

**10) Digital Neural Network Architecture (DNNA) Networks**

Diseñador: Neural Semiconductor Inc.

Año: 1990

Tipo: Predicción

Características: Implementación hardware de la función Sigmoide.

**11) Directed Random Search (DRS) Networks**

Diseñador: Maytas y Solis

Año: 1965-81

Tipo: Clasificación

Características: Técnica de valores Random en el mecanismo de Ajuste de Pesos.

## 2.5. Amplificadores operacionales

Un amplificador operacional, o amp-op, es un amplificador diferencial de muy alta ganancia con alta impedancia de entrada (por lo general de algunos megaohms) y baja impedancia de salida (de menos de  $100 \Omega$ ) (Boylestad y Nashelsky (2009)). Los usos típicos del amplificador operacional son proporcionar cambios en la amplitud del voltaje (amplitud y polaridad), en osciladores, en circuitos de filtrado y en muchos tipos de circuitos de instrumentación. Un amplificador operacional contiene varias etapas de amplificadores diferenciales para alcanzar una muy alta ganancia de voltaje.

El circuito básico se construye utilizando un amplificador diferencial de dos entradas (positiva y negativa) y por lo menos una salida. La Figura 2.8 muestra un amplificador operacional básico con dos entradas y una salida, que sería el resultado de utilizar una etapa de entrada de un amplificador diferencial. Cada entrada produce ya sea la misma salida o una de polaridad (o fase) opuesta, dependiendo de si la señal se aplica a la entrada positiva (+) o la entrada negativa (-) respectivamente.

La Figura 2.9 a) muestra el circuito equivalente de ca del amplificador operacional. Como se puede observar, la señal de entrada aplicada entre las terminales de entrada experimenta una impedancia de entrada  $R_i$  que suele ser muy alta. Se muestra que el voltaje de salida debe ser la ganancia del amplificador por la señal de entrada tomada a través de una impedancia de salida  $R_o$ , la que por lo general es muy baja. Un circuito de amplificador operacional ideal, como el de la Figura 2.9 b), tendría una impedancia de entrada infinita, una impedancia de salida cero y una ganancia de voltaje infinita.

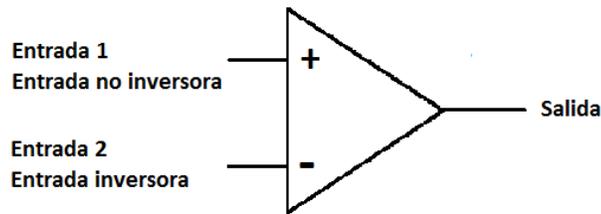


Figura 2.8: Amplificador operacional básico.

### Amplificador operacional básico

La Figura 2.10 muestra la conexión de circuito básico utilizando un amplificador operacional. Dicho circuito funciona como un multiplicador de ganancia constante. Se aplica una señal de entrada  $V_1$  a través de un resistor  $R_1$  a la entrada negativa. La salida se conecta de nuevo a la misma entrada negativa por medio de un resistor  $R_f$ . La entrada positiva se conecta a tierra. Como la señal  $V_1$  se aplica esencialmente a la entrada negativa, la fase de la salida resultante es la opuesta a la de la señal de entrada.

### Ganancia unitaria

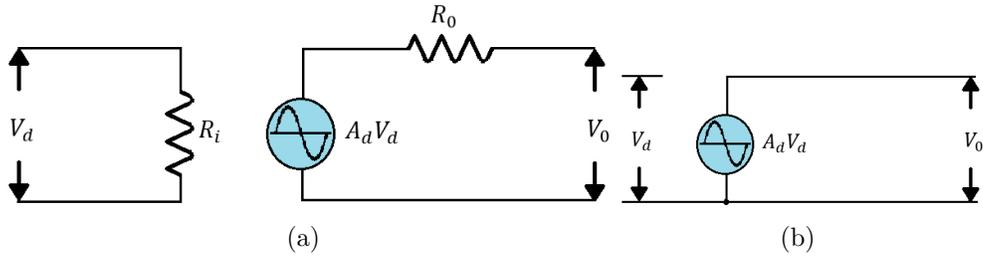


Figura 2.9: Equivalente de ca de un circuito de amplificador operacional: (a) práctico; (b) ideal.

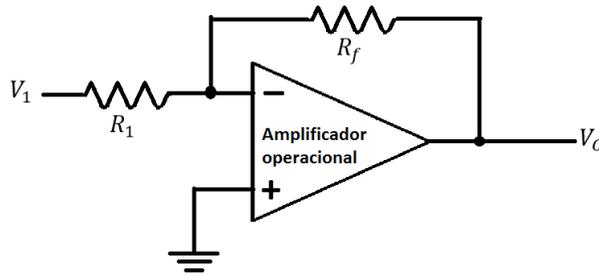


Figura 2.10: Conexión de amplificador operacional básico.

Si  $R_f = R_1$ , la ganancia es:

$$\text{Ganancia de voltaje} = -\frac{R_f}{R_1} = -1,$$

de modo que el circuito proporciona una ganancia unitaria de voltaje con una inversión de fase de  $180^\circ$ . Si  $R_f$  es exactamente igual a  $R_1$ , la ganancia de voltaje es exactamente igual a 1.

### Ganancia de magnitud constante

Si  $R_f$  es algún múltiplo de  $R_1$ , la ganancia total del amplificador es una constante. Por ejemplo, si  $R_f = 10R_1$ , por lo que:

$$\text{Ganancia de voltaje} = -\frac{R_f}{R_1} = -10,$$

por lo tanto el circuito proporciona una ganancia de voltaje de exactamente 10 junto con una inversión de fase de  $180^\circ$  con respecto a la señal de entrada. Si se seleccionan valores precisos para  $R_f$  y  $R_1$ , se puede obtener una amplia variedad de ganancias, con la ganancia tan precisa como los resistores utilizados, la cual se ve levemente afectada por la temperatura y otros factores del circuito.

### Suma de voltajes

Otro de los usos comunes de los amplificadores es como amplificador sumador. La ecuación para obtener el voltaje de salida es la siguiente:

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \frac{R_f}{R_3}V_3\right). \quad (2.9)$$

La Figura 2.11 muestra la conexión, donde la salida se representa como la suma de las tres entradas, cada una multiplicada por una ganancia diferente.

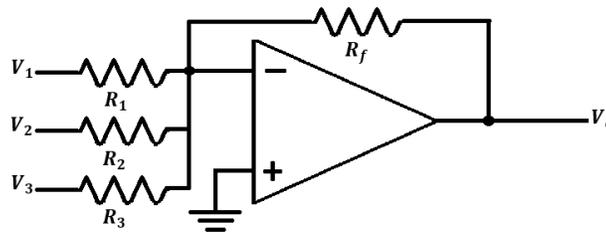


Figura 2.11: Amplificador sumador.



## Capítulo 3

### Caso de estudio

La presente tesis se enfoca en el desarrollo de un dispositivo para medir los índices de corrosión presentados en dos materiales metálicos: acero A36 y aluminio 6061-T6. La mayoría de la industria utiliza materiales metálicos, sobre todo acero y aluminio. Por lo que se consideró importante trabajar con electrodos de estos dos materiales. El dispositivo registra el ruido electroquímico que se genera cuando los metales están en contacto con un electrolito y a partir de éste calcula los índices de corrosión presentados en el metal y la vida útil estimada de la pieza. El diagrama que describe al dispositivo se muestra en la Figura 3.1.

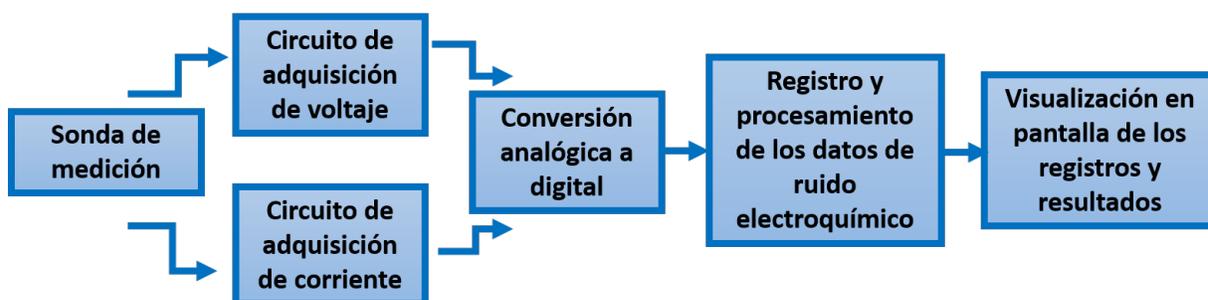


Figura 3.1: Descripción del dispositivo.

La sonda de medición se conforma por tres electrodos del mismo material en la configuración descrita en la Figura 2.5 b). La sonda permite medir los movimientos de cargas eléctricas generados por el efecto de corrosión sobre el metal. El primer par de electrodos mide directamente el voltaje y el segundo par mide la corriente teniendo un electrodo en común. Ambos pares miden voltaje en el orden de los  $mV$ , con una resistencia de muy bajo valor colocada entre el par de electrodos que miden la corriente se obtiene un voltaje

aun más pequeño (del orden de los  $\mu\text{V}$ ). Mediante la ley de Ohm se determina la corriente generada pues ya se conoce el voltaje y la resistencia.

Por lo tanto la finalidad del circuito de amplificación será llevar estos voltajes a un rango que pueda ser leído por un convertidor analógico digital.

Una vez obtenidos los datos leídos por el convertidor analógico-digital se determinan los registros originales mediante operaciones matemáticas que reviertan las amplificaciones realizadas a las señales. Con las señales originales se inicia el análisis para determinar la resistencia al ruido y obtener la densidad de corriente de corrosión. Con el conocimiento de estos valores y del metal en cuestión (densidad y peso equivalente) se obtiene la velocidad de corrosión presentada en el metal.

El dispositivo implementará una red neuronal que estimará la velocidad de corrosión utilizando únicamente la desviación estándar del ruido en potencial ( $\sigma_V$ ) y la desviación estándar del ruido en corriente ( $\sigma_I$ ). Para entrenar la red es necesario recolectar registros de voltaje y corriente y agruparlos en conjuntos (de 10, 20, 30, etc.), determinar la  $\sigma_V$ ,  $\sigma_I$  y la velocidad de corrosión presentada en cada conjunto para entrenar la red neuronal.

Teniendo el conocimiento de la velocidad de corrosión presentada en el material metálico y un grosor mínimo (que de ser consumido por la corrosión expone al equipo a fallas o reducción de su eficiencia) se estima la vida útil en años que tendrá el equipo si la velocidad de corrosión se mantiene a esa velocidad.

El  $IL$  (índice de localización), ofrecerá un mejor panorama del efecto de degradación del metal, pues si se tiene una velocidad de corrosión elevada aunado a una corrosión del tipo localizada indica que la solución tiene un alto poder corrosivo. Reflejando entonces una rápida degradación del metal y la posible aparición de fugas o grietas.

El tener un dispositivo como el que se desarrolló en esta tesis ofrece la ventaja de tener un análisis de la corrosión sin perturbar el equipo y de tener datos sobre el proceso de corrosión en un corto periodo de tiempo. Además de ser un dispositivo con un bajo costo y de fácil manejo para llevarse al área de trabajo.

## Capítulo 4

# Implementación del dispositivo

En este capítulo se describe la implementación del dispositivo para medir los índices de corrosión en metales, se describen algunos componentes así como su función dentro del dispositivo.

### 4.1. Elaboración de las sondas de medición de ruido electroquímico

Primeramente se decidió utilizar el acero al carbono A36 y el aluminio 6061-T6 como metales para probar el dispositivo, por lo tanto los electrodos también son del mismo material. La configuración de electrodos elegida fue la de tres electrodos de trabajo descrita en la Figura 2.5 b) (Genescá (2002), Botana y Marcos (2002)). Para ello se utilizó una sonda electroquímica compuesta por tres electrodos de trabajo en forma de cilindro, todos del mismo material (acero o aluminio), barnizados para evitar el contacto entre ellos al momento de las pruebas. De tal manera que solo se expone la cara inferior de cada electrodo. El área superficial de la cara expuesta de los electrodos de acero es de  $0.3156 \text{ cm}^2$  con una longitud de 4.5 cm, Figura 4.1. En los electrodos de aluminio el área de la cara expuesta es de  $0.7163 \text{ cm}^2$  con una longitud de 3 cm, ver Figura 4.2.

La cara expuesta de los electrodos se pulió con lijas del número 120, 400, 600, 1500 y 2000 para eliminar posibles ranuras y poros donde se pudiese enfocar el efecto de corrosión al hacer las mediciones. Antes de ser barnizados se limpiaron con agua destilada y se desengrasaron con acetona de acuerdo a la norma ASTM G1-90 *Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test specimens*, estándar práctico para la preparación, limpieza y evaluación de especímenes en pruebas de corrosión (ASTM (1999b)). Por último se soldaron cables con caimanos para la conexión a los circuitos de amplificación. Procurando tener uno de los electrodos con dos cables soldados para que

sea el electrodo en común de la sonda.



Figura 4.1: Electrodo de aluminio.

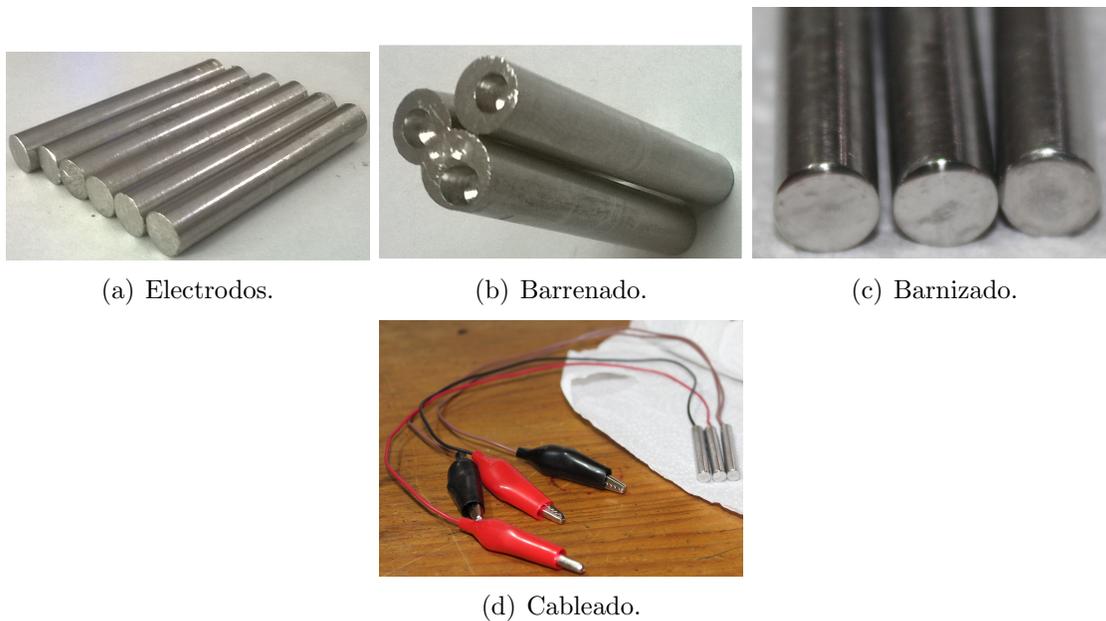


Figura 4.2: Electrodo de acero al carbono A36.

## 4.2. Circuitos de amplificación de voltaje y corriente

Después de tener la sonda de medición de ruido electroquímico se elaboraron los circuitos de amplificación de voltaje y corriente. En el caso del voltaje se utilizó el amplificador

operacional AD620 el cual permite tener una ganancia ( $G$ ) en la amplificación de las señales de voltaje de entrada, esto dependiendo del valor de la resistencia ( $R_G$ ) colocada entre los pines 1 y 8, ver ecuación (4.1).

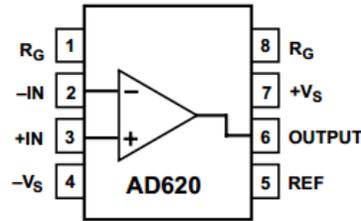
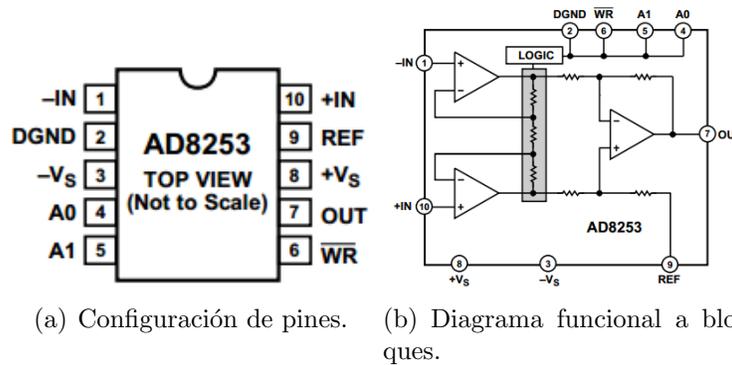


Figura 4.3: Amplificador operacional AD620.

$$G = \frac{49,4k\Omega}{R_G} + 1, \quad (4.1)$$

para la corriente fue necesario el amplificador operacional AD620 y el amplificador programable AD8253 (Figura 4.4). El amplificador programable permitirá adaptar las ampli-ficaciones para que los valores de voltaje no se salgan del rango de lectura del convertidor analógico-digital. Para poder medir la corriente a partir del voltaje se colocó una resis-tencia de muy bajo valor entre los pines 1 y 8 del amplificador AD620. Posteriormente mediante la ley de Ohm se calculó la corriente.



(a) Configuración de pines. (b) Diagrama funcional a bloques.

Figura 4.4: Amplificador programable AD8253.

La amplificación realizada por el AD620 fue nuevamente amplificada por el AD8253, para determinar la ganancia del AD8253 se utiliza la Tabla (4.1). La configuración del AD8253 se programó utilizando las salidas digitales del Arduino UNO®.

Después de amplificar las señales se adecuaron para que estuvieran en un rango entre 0 y 5V, rango en el cual funciona la conversión analógica a digital del Arduino UNO<sup>®</sup>. Para ello se adicionó un valor de voltaje fijo a las señales amplificadas de aproximadamente 1V mediante un divisor de tensión. La adición se realizó con el amplificador TL084 en modo de amplificador sumador inversor, después de adicionar el voltaje se usó nuevamente el TL084 en modo de amplificador inversor de ganancia unitaria para tener voltaje positivo.

Tabla 4.1: Tabla de verdad de niveles lógicos de ganancia en modo enlazado del AD8253.

$\overline{WR}$	A1	A0	Ganancia
Alto a bajo	Bajo	Bajo	Cambio a 1
Alto a bajo	Bajo	Alto	Cambio a 10
Alto a bajo	Alto	Bajo	Cambio a 100
Alto a bajo	Alto	Alto	Cambio a 1000
Bajo a alto	$X^1$	$X^1$	No hay cambio
Bajo a alto	$X^1$	$X^1$	No hay cambio
Alto a alto	$X^1$	$X^1$	No hay cambio

Una vez obtenidas las señales de voltaje se realizó la conversión analógico a digital mediante las entradas analógicas del Arduino UNO<sup>®</sup>, posteriormente los valores medidos se comunicaron de manera serial a la Raspberry Pi<sup>®</sup>. La cantidad de registros se definió en 10 de acuerdo a la bibliografía revisada (Botana y Marcos (2002)).

Conforme los registros llegan a la Raspberry Pi<sup>®</sup> esta los almacena hasta lograr la cantidad de registros que el usuario desea realizar, cuando se logra tal cantidad se calcula la  $\sigma_V$  y la  $\sigma_I$ . Con estos valores se calcula la resistencia al ruido  $Rn$ , ecuación (2.5). Con el valor de  $Rn$  es posible obtener la densidad de corriente de corrosión, ecuación (2.6). Ahora se calcula la velocidad de corrosión de acuerdo a la ecuación (2.7) en mm/año, de acuerdo a la norma ASTM G 102-89 *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*, práctica estándar para el cálculo de velocidades de corrosión e información relacionada a mediciones electroquímicas (ASTM (1999a)).

También se calcula el índice de localización con la ecuación (2.1) para determinar el tipo de corrosión presentado en el metal de acuerdo a los valores de la Tabla 2.1.

La velocidad de corrosión ahora se aproxima utilizando la red neuronal con los bias, pesos y umbrales obtenidos durante el entrenamiento. Por último se calcula la vida útil del material de acuerdo a la ecuación (2.8). Los registros y demás valores se almacenan en archivos con extensión .txt y se muestran al usuario en la pantalla táctil de la Raspberry

Pi<sup>®</sup> (Anexo A).

En la Figura 4.5 se muestran los principales componentes del dispositivo.



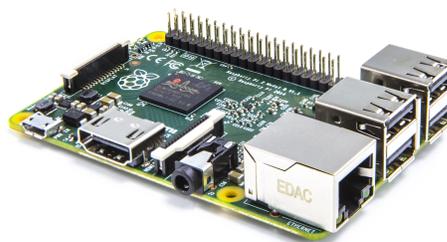
(a) Arduino UNO<sup>®</sup>.



(b) Fuente de poder.



(c) Pantalla táctil de 7".



(d) Raspberry Pi<sup>®</sup> 2 B.

Figura 4.5: Principales componentes del dispositivo para medir la corrosión.

La Figura 4.6 muestra la disposición de los elementos que integran el dispositivo que mide los índices de corrosión presentados en el metal mediante la técnica de ruido electroquímico.

a. Circuito de amplificación y acondicionamiento de voltajes (para obtener el ruido en

potencial y en corriente).

- b. Convertidor analógico digital (Arduino UNO<sup>®</sup>).
- c. Raspberry Pi<sup>®</sup> (quien procesa los datos y ejecuta el algoritmo que calcula los índices de corrosión y la vida útil de la pieza metálica) y pantalla táctil de 7" (para interactuar con el dispositivo y ver los resultados obtenidos).
- d. Fuente de alimentación de 5 y 12V para alimentar el circuito de amplificación así como la Raspberry PiO<sup>®</sup>, pantalla y Arduino UNOO<sup>®</sup>.
- e. Sonda de medición de ruido electroquímico formada por tres electrodos de un mismo material.

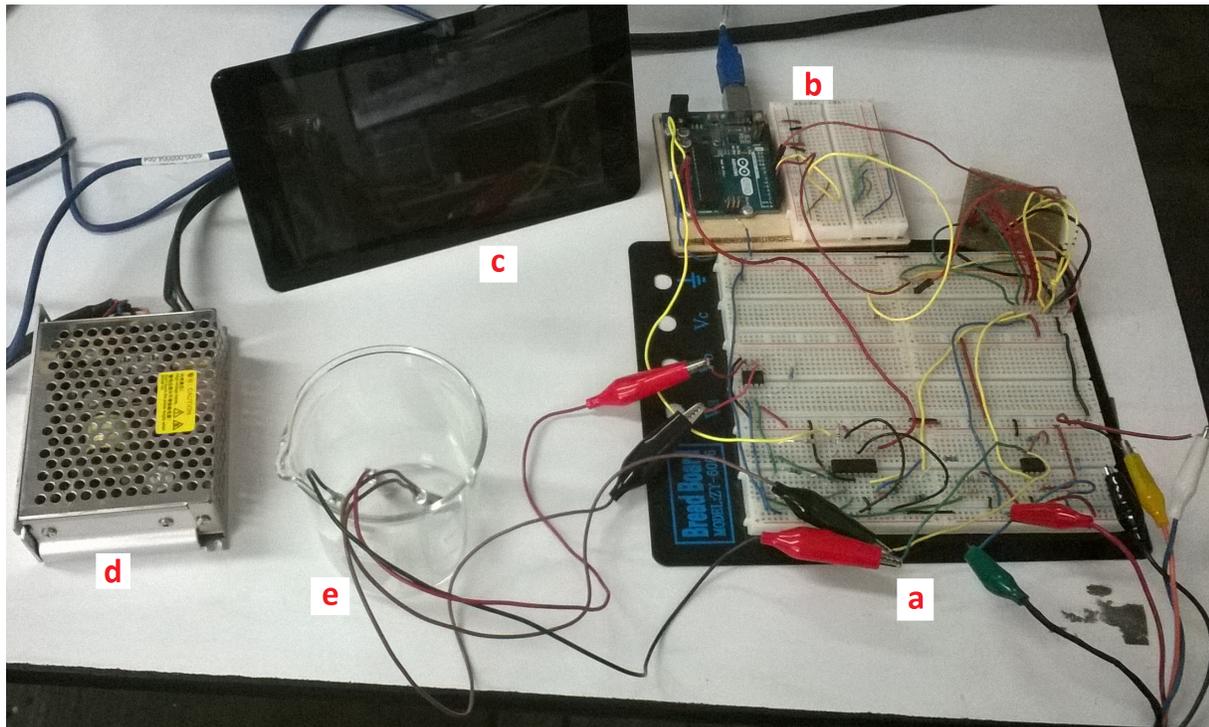


Figura 4.6: Integración de los componentes del dispositivo para medir los índices de corrosión en metales.

### 4.3. Red neuronal

La red neuronal se basa en el Extreme Learning Machine (Huang *et al.* (2006)). En la capa de entrada se tienen dos neuronas de entrada, las cuales son  $\sigma_I$  y  $\sigma_V$ . En la capa oculta se tienen 15 neuronas. En la capa de salida se tiene una neurona que arroja la velocidad de corrosión. Como función de activación se utilizó la tangente hiperbólica. El error utilizado es el RMSE (del inglés *Root Mean Square Error*, raíz del error cuadrático medio). En la Figura 4.7 se muestra la arquitectura de la red neuronal.

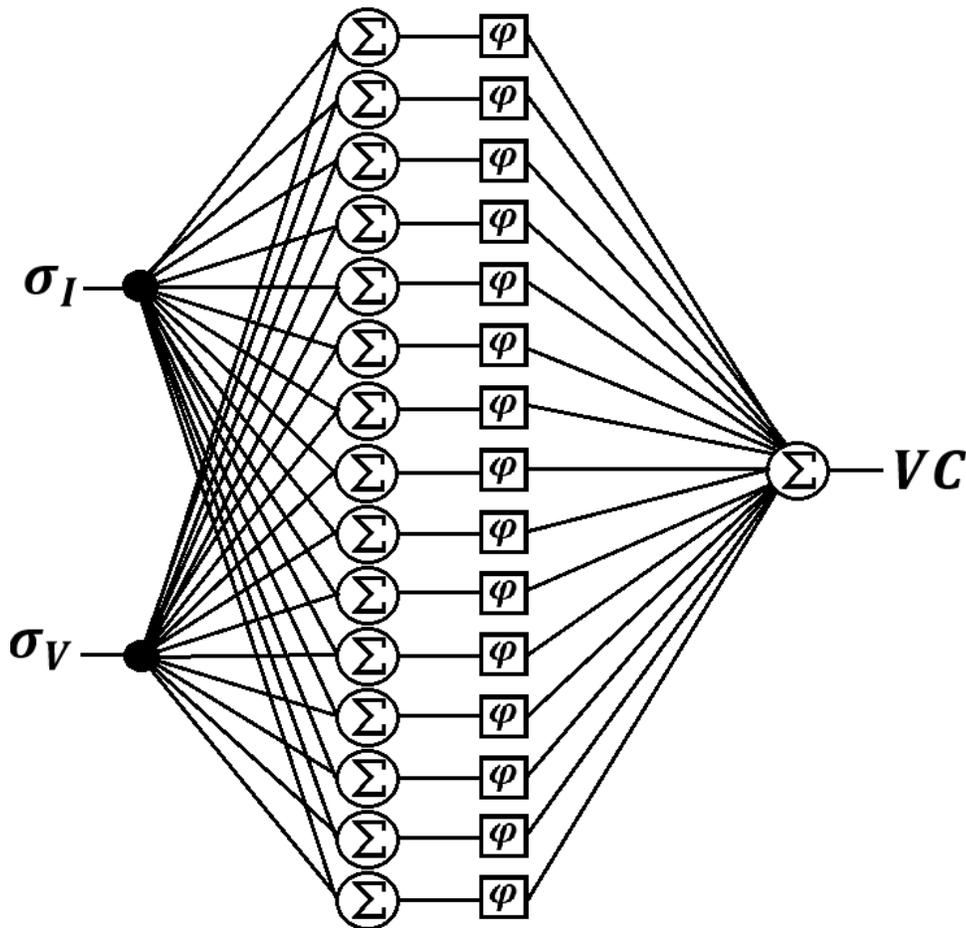


Figura 4.7: Arquitectura de la red neuronal implementada en el dispositivo.



# Capítulo 5

## Pruebas y resultados

Para mostrar el desempeño del dispositivo desarrollado en este trabajo de investigación, éste se comparó contra dos sistemas de adquisición de datos que permiten obtener las mismas señales que serán analizadas para determinar los índices de corrosión. Los sistemas de adquisición de datos fueron una tarjeta de adquisición de datos DAQ (del inglés *Data Acquisition*) modelo 6002 de National Instruments (Figura 5.1 (a)) y un multímetro Keysight® modelo 34461A (Figura 5.1 (b)). Ambos, DAQ y multímetro estuvieron conectados a una computadora vía puerto USB. Una interfaz desarrollada en LabVIEW® 2012 de National Instruments permitió monitorear los registros de voltaje y corriente obtenidos por los electrodos así como almacenarlos en archivos .txt para su comparación con los registros obtenidos con el dispositivo.



Figura 5.1: DAQ y multímetro utilizado para comparar los registros realizados con el dispositivo.

La prueba consistió en conectar una sonda, la cual consiste en tres electrodos, a la DAQ y al multímetro y otra sonda al dispositivo desarrollado, con la finalidad de obtener los

voltajes y corrientes generados. Para posteriormente realizar los análisis correspondientes con cada conjunto de datos obtenido por los tres diferentes equipos (DAQ, multímetro y dispositivo desarrollado en esta tesis).

## 5.1. Obtención de los registros de voltaje y corriente a partir del ruido electroquímico medido

Para probar el dispositivo desarrollado en esta tesis se montó el circuito de adquisición de voltaje según se muestra en la Figura 5.2. La resistencia  $R_G$  tuvo un valor de  $50.26\text{K}\Omega$  para obtener un ganancia de 1.98. El divisor de tensión produce una salida de voltaje de  $0.91\text{V}$ . La salida de este circuito se conectó a la entrada analógica A0 del Arduino UNO<sup>®</sup>.

Para la corriente se colocó una resistencia de  $1.2\Omega$  ( $R_R$  en la Figura 5.3) entre los pines 2 y 3 del AD620, con esta resistencia se pudo calcular el valor de la corriente mediante la ley de Ohm. El valor de la resistencia  $R_G$  fue de  $49.8\Omega$  obteniendo una ganancia de 990.97. La salida del AD620 se colocó como entrada para el AD8253 para una segunda amplificación. Los pines A0, A1 y  $\overline{WR}$  se conectaron a los pines digitales 5, 6 y 7 del Arduino respectivamente. El pin 5 se puso en alto y los pines 6 y 7 en bajo, obteniendo una ganancia de 10 de acuerdo a la Tabla 4.1. La salida de este circuito se conectó a la entrada analógica A1 del Arduino UNO<sup>®</sup>. El Arduino<sup>®</sup> estuvo conectado a Raspberry Pi<sup>®</sup> mediante conexión USB que permitió la comunicación serial para registrar los valores de voltaje medidos. En el código de la Raspberry Pi<sup>®</sup>, escrito en lenguaje Python, se restó el voltaje sumado y se dividió entre las ganancias de los amplificadores para obtener lo más cerca posible la señal original.

En el caso de la corriente el voltaje se dividió entre el valor de la resistencia  $R_R$  para obtener el valor de la corriente. Antes de trabajar de manera física con los amplificadores se realizaron simulaciones en el software NI Multisim y en Pspice de ORCAD. Las amplificaciones se probaron de manera física con una señal generada por un generador de funciones y se observó la amplificación en un osciloscopio.

En las mediciones se genera una impedancia causada por el cableado del circuito y los mismos electrodos sin embargo con el uso de los amplificadores operacionales la impedancia se reduce en su mayoría pues estos tiene una alta impedancia a la entrada y una baja impedancia a la salida. Debido a que aun no se elabora una placa final para el dispositivo no se ha considerado la impedancia generada por las pistas. Se consideró utilizar conexiones cortas entre los componentes del circuito utilizando cableado del mismo calibre.

Un punto importante es la conexión de los electrodos con el cableado, para mejorar este aspecto se barrenaron los electrodos para soldar el cable y lograr la menor resistencia posible en el contacto entre ellos. El cable de los electrodos cuenta con caimanos en los

cuales también se busco obtener la menor resistencia posible, para ello se cuidó el trabajo de soldadura entre el cable de cobre y los caimanes. El factor de impedancia en el circuito de acondicionamiento de señales no se abordó a fondo en esta investigación.

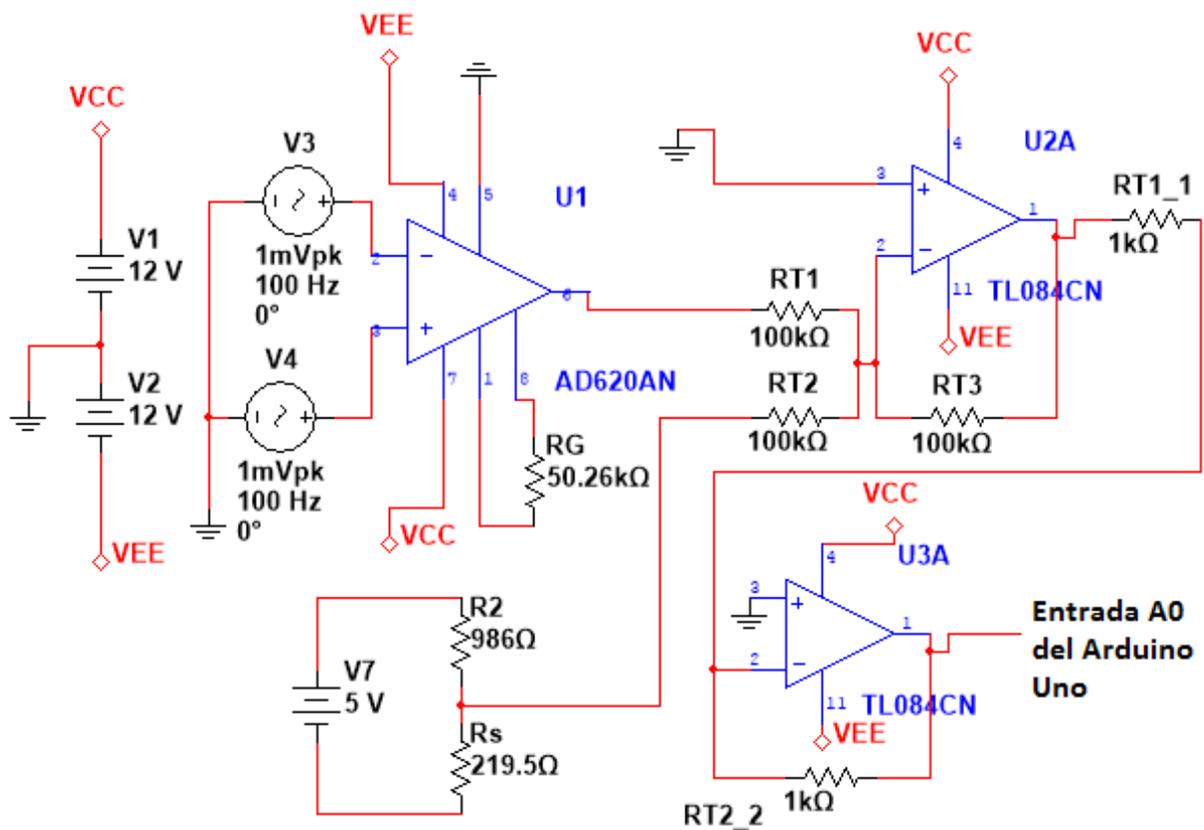


Figura 5.2: Circuito de amplificación de voltaje.

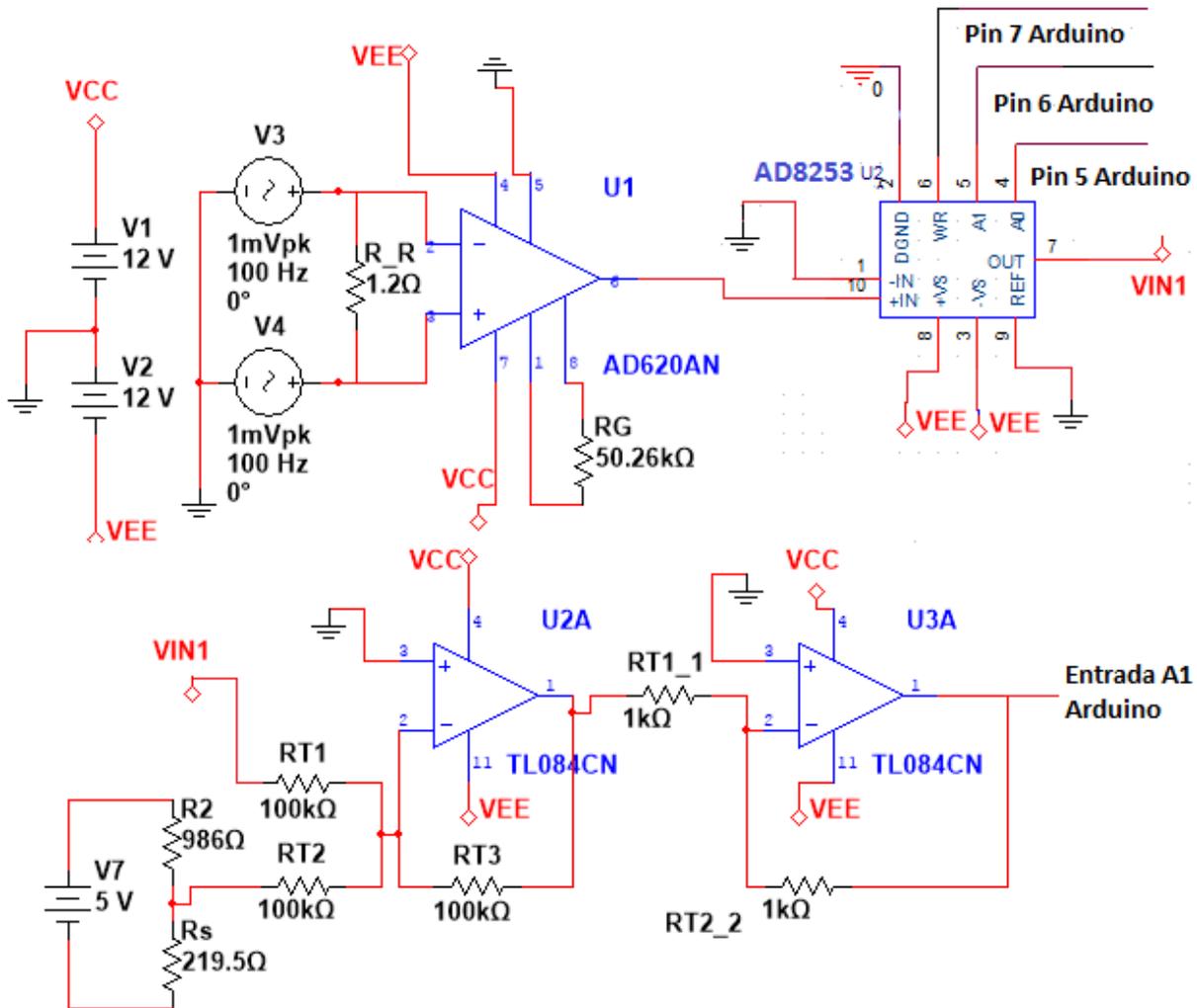


Figura 5.3: Circuito de amplificación de corriente.

## 5.2. Pruebas para entrenamiento de red neuronal y comprobación de red neuronal

Las pruebas consisten en la medición de voltaje y corriente usando dos diferentes muestras de metales sumergidas en distintas soluciones ( $H_2SO_4$  y  $NaCl$ ).

Estas pruebas se desarrollaron como se muestra a continuación:

- Prueba 1) Medición de voltaje y corriente en sondas de aluminio 6061-T6 sumergidas

en una solución de  $NaCl$  al 3 %.

- Prueba 2) Medición de voltaje y corriente en sondas de acero al carbono A36 sumergidas en una solución de  $H_2SO_4$  al 8 %.
- Prueba 3) Medición de voltaje y corriente en sondas de acero al carbono A36 sumergidas en una solución de  $H_2SO_4$  al 10 %.
- Prueba 4) Medición de voltaje y corriente en sondas de acero al carbono A36 sumergidas en una solución de  $H_2SO_4$  al 12 %.

En la prueba uno se realizó la inmersión de la sonda durante alrededor de 44 horas. En las pruebas 2, 3 y 4 el tiempo de inmersión de la sonda fue de alrededor de cuatro horas. El tiempo de muestreo de los datos fue de un segundo y antes de la inmersión de los electrodos, éstos fueron limpiados con agua destilada, se lijó la cara de los electrodos (la cual se expone a la solución) para eliminar poros y ranuras y nuevamente se limpiaron con agua destilada y se dejaron secar un breve momento.

No se ha definido en investigaciones sobre pruebas de corrosión que grado de lija utilizar, se menciona que el lijado de las caras de los electrodos debe de evitar la formación de corrosión en posibles ranuras sobre la superficie, iniciando con lijas gruesas y terminando con lijas finas de grado mayor al 600 (Estupiñán-López *et al.* (2011)). En Garita (2014) se lijan y se limpian las sondas antes de volver a realizar mediciones.

Los registros de voltaje y de corriente tienen ruido originado por las ampliificaciones y la resolución de los convertidores analógico-digital. El convertidor analógico-digital del Arduino UNO<sup>®</sup> tiene una resolución de 10 bits (1 024 combinaciones) en un rango de 0 a +5V y la de la DAQ es de 16 bits (65 536 combinaciones) en un rango de -10 a +10V. Para reducir el ruido se utilizó un filtro de media móvil en los registros de corriente.

Los datos almacenados en el dispositivo se tomaron mediante una memoria USB y cargaron a MATLAB<sup>®</sup> donde se dividieron en grupos de 10 datos y se obtuvo la  $\sigma_I$ ,  $\sigma_V$  y la  $VC$  de cada grupo. Enseguida los valores de  $\sigma_I$ ,  $\sigma_V$  y  $VC$  fueron ordenados aleatoriamente y se procedió a entrenar la red neuronal con cerca del 75 % de los grupos de registros. La red cuenta con 15 neuronas en la capa oculta y la función tangente hiperbólica como función de activación. Se eligió la aproximación que tuvo el menor valor de RMSE de 1000 aproximaciones, posteriormente se probaron los bias, pesos y umbrales encontrados en el 25 % de los grupos de registros restantes.

Una vez entrenada la red neuronal se cargaron los pesos, bias y umbrales encontrados al dispositivo.

### 5.2.1. Entrenamiento y comprobación de la red con datos de aluminio 6061-T6 sumergido en $NaCl$ al 3 %

Para desarrollar el entrenamiento de la red neuronal, en total se obtuvieron 156 340 registros obteniendo así 15 634 grupos. El entrenamiento de la red se realizó con 11 725 grupos de registros como se muestra en la Figura 5.4, el valor RMSE fue de 0.0006.

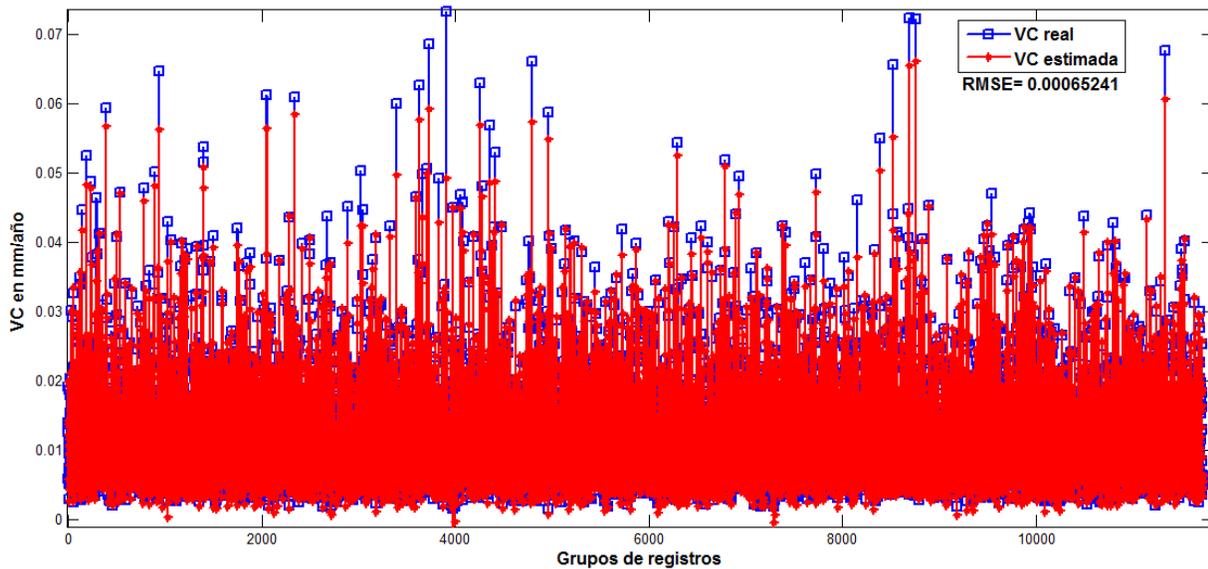


Figura 5.4: Entrenamiento de la red neuronal con datos de aluminio 6061-T6 sumergido en soluciones de  $NaCl$  al 3 %.

Y para la comprobación de la red neuronal se emplearon 3 909 grupos de registros de las pruebas realizadas. En la Figura 5.5 se muestra la comprobación de la red neuronal, el valor RMSE fue de 0.0099.

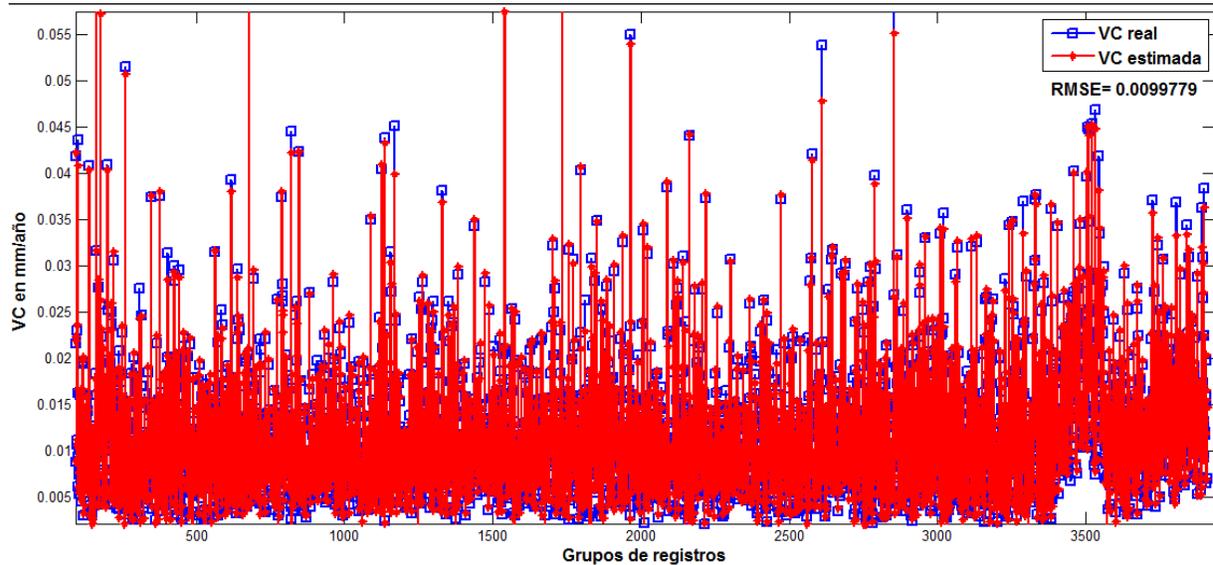


Figura 5.5: Pruebas de la red neuronal con datos de aluminio 6061-T6 sumergido en soluciones de  $NaCl$  al 3%.

### 5.2.2. Entrenamiento y comprobación de la red con datos de acero al carbono A36 sumergido en $H_2SO_4$ al 8, 10 y 12%

En total se obtuvieron 42 000 registros generando 4 200 grupos. El entrenamiento de la red se realizó con 3 150 grupos de registros, dicho entrenamiento se muestra en la Figura 5.6, el valor RMSE fue de 0.0027.

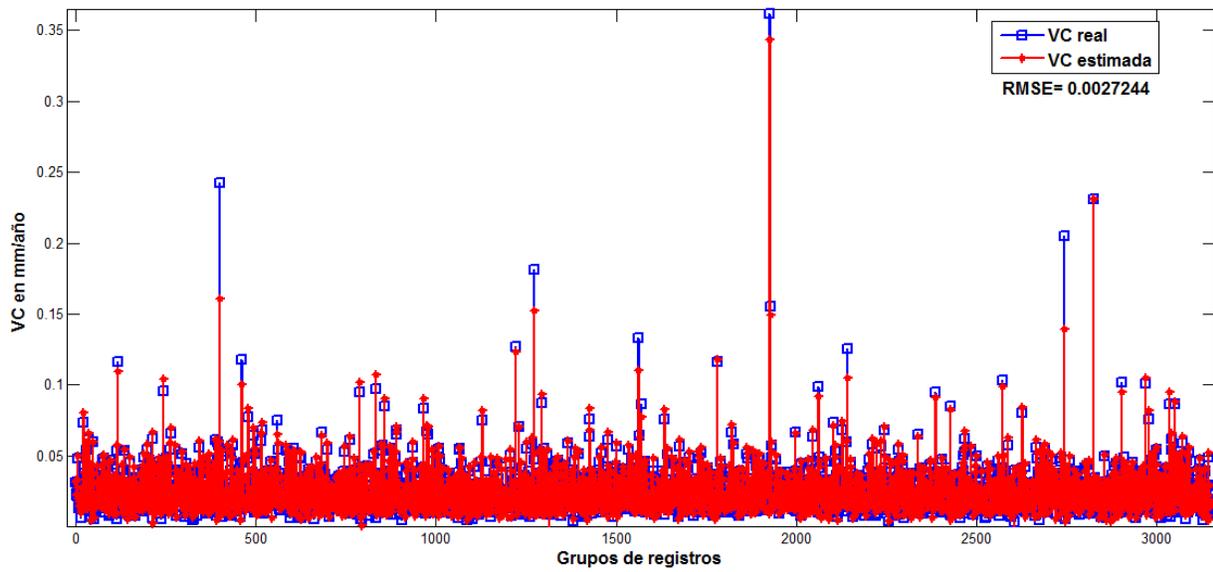


Figura 5.6: Entrenamiento de la red neuronal con datos de acero al carbono A36 sumergido en soluciones de  $H_2SO_4$  al 8, 10 y 12%.

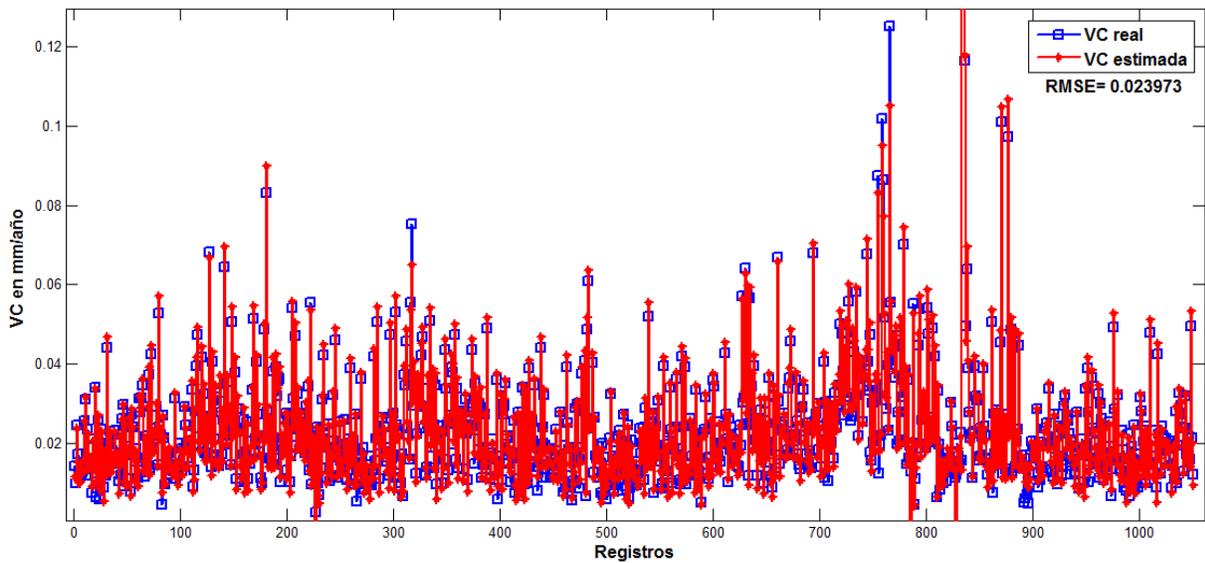


Figura 5.7: Pruebas de la red neuronal con datos de acero al carbono A36 sumergido en las soluciones de  $H_2SO_4$ .

La comprobación de la red neuronal se realizó con 1 050 grupos de registros de las

pruebas realizadas con los electrodos de acero sumergidos en las soluciones de  $H_2SO_4$  a diferentes concentraciones. En la Figura 5.7 se muestra la comprobación de la red neuronal, el valor RMSE fue de 0.0239.

### 5.2.3. Pruebas del dispositivo desarrollado

Después de realizar el entrenamiento de la red neuronal con cada metal en las soluciones respectivas se realizaron pruebas en cada solución en un periodo aproximado de 8 minutos. Una vez obtenidos los registros de voltaje y corriente realizados por el dispositivo y el equipo estos fueron cargados a MATLAB<sup>®</sup> para realizar la comparativa de los índices de corrosión obtenidos. Se calculó la velocidad de corrosión con los datos del dispositivo y con los datos del equipo. Se comparó la velocidad de corrosión obtenida por el dispositivo y la estimada por la red neuronal. También se comparó el índice de localización obtenido por el dispositivo y el obtenido con las mediciones del equipo.

#### Prueba 1) Aluminio 6061-T6 sumergido en una solución de $NaCl$ al 3%

La Figura 5.8 muestra los registros de voltaje y de corriente registrados por el equipo y el dispositivo antes de realizarse el filtrado a la señal de corriente registrada por el dispositivo.

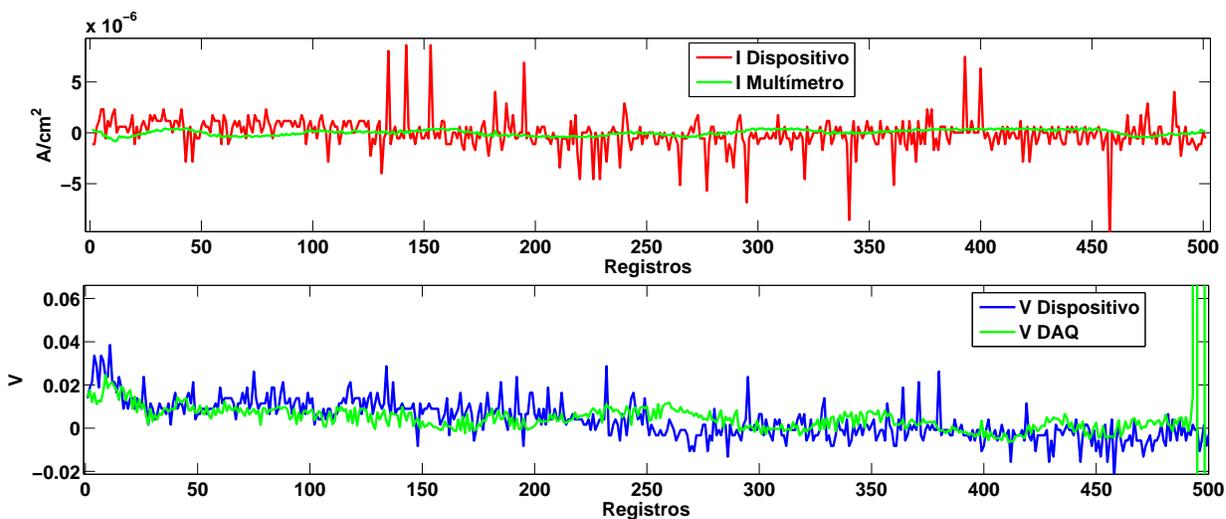


Figura 5.8: Señales de I y V sin filtrar.

En la Figura 5.9 se muestra el filtrado que realiza el dispositivo a la señal de corriente.

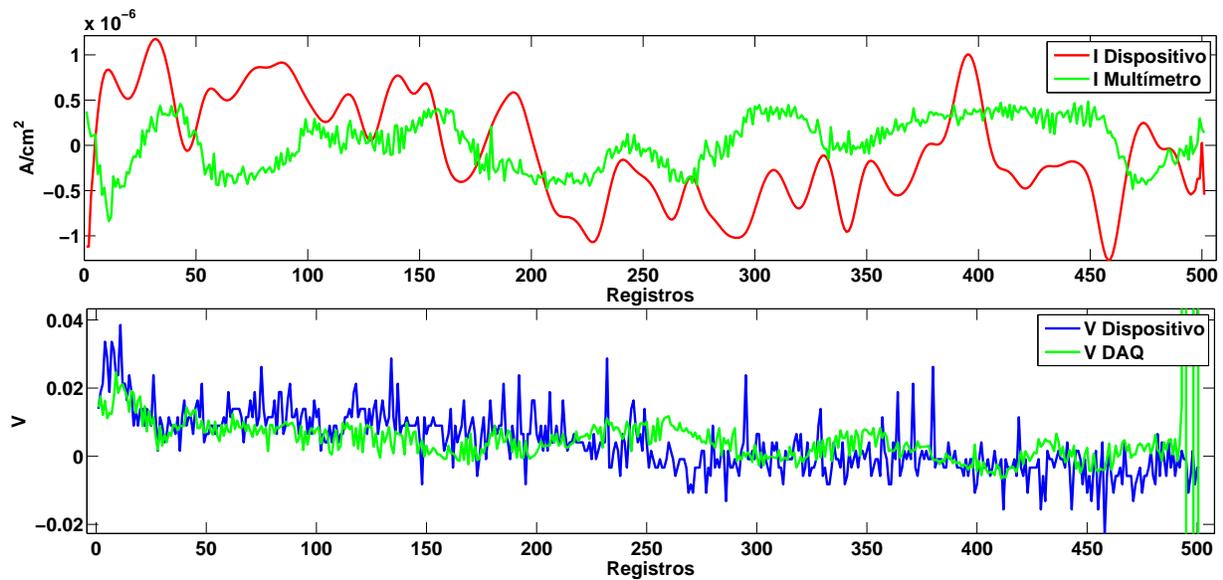


Figura 5.9: Señal de I filtrada.

La Figura 5.10 muestra la velocidad de corrosión calculada con los registros obtenidos con el equipo y la calculada por el dispositivo, el valor RMSE fue de 1.1094.

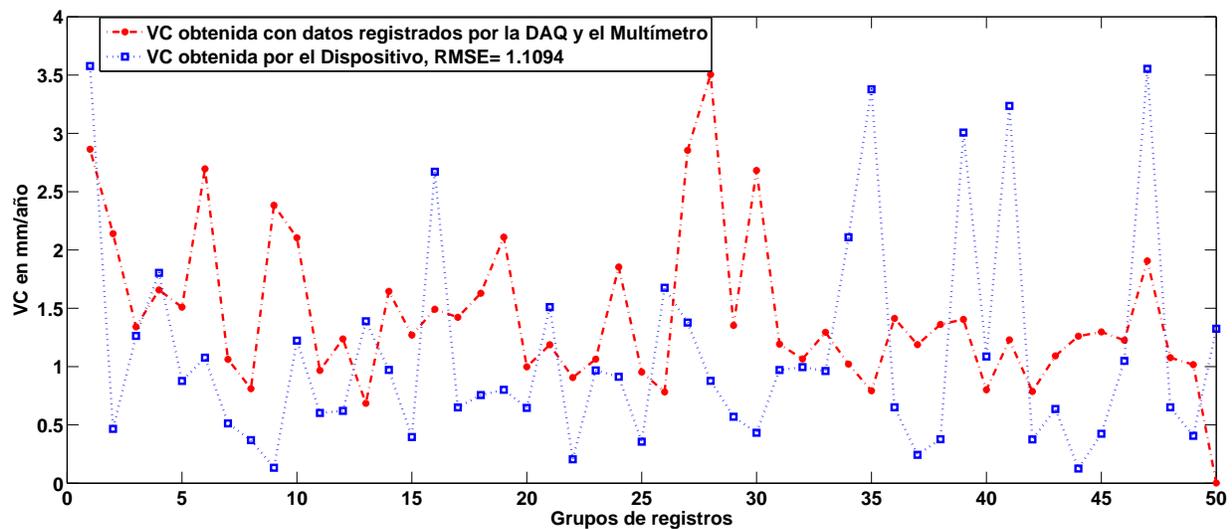


Figura 5.10: VC obtenida por el dispositivo y VC obtenida por el equipo.

La Figura 5.11 muestra el índice de localización calculado con los registros obtenidos con el equipo y el calculado por el dispositivo. El tipo de corrosión presente es localizada.

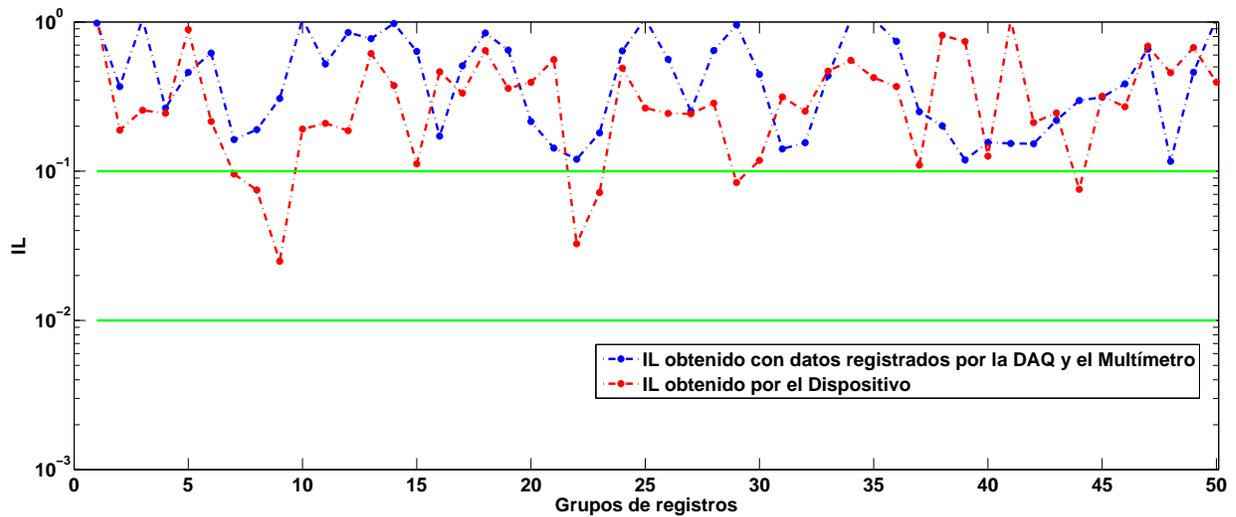


Figura 5.11: Índice de localización obtenido por el equipo y por el dispositivo.

En la Figura 5.12 se muestra la velocidad de corrosión calculada por el dispositivo y la aproximada por la red neuronal. El valor RMSE fue de 0.6381.

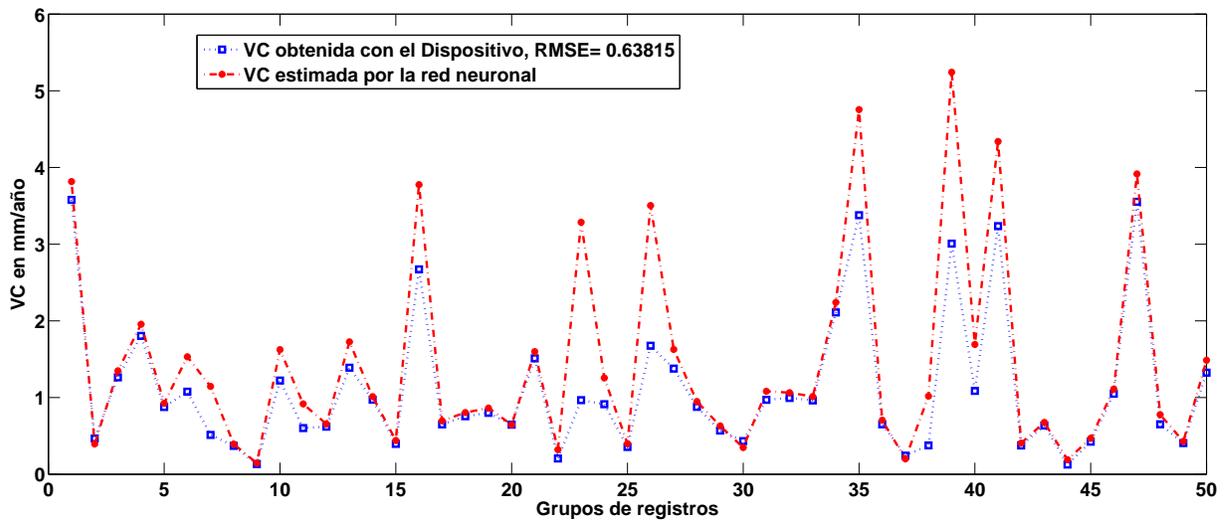


Figura 5.12: VC obtenida por el dispositivo y VC estimada por la red neuronal con electrodos de acero al carbono A36 en la muestra de  $NaCl$  al 3%.

**Prueba 2) Medición de voltaje y corriente en sondas de acero al carbono A36 sumergidas en una solución de  $H_2SO_4$  al 8%**

La Figura 5.13 muestra los registros de voltaje y de corriente registrados por el equipo y el dispositivo antes de realizarse el filtrado a la señal de corriente registrada por el dispositivo.

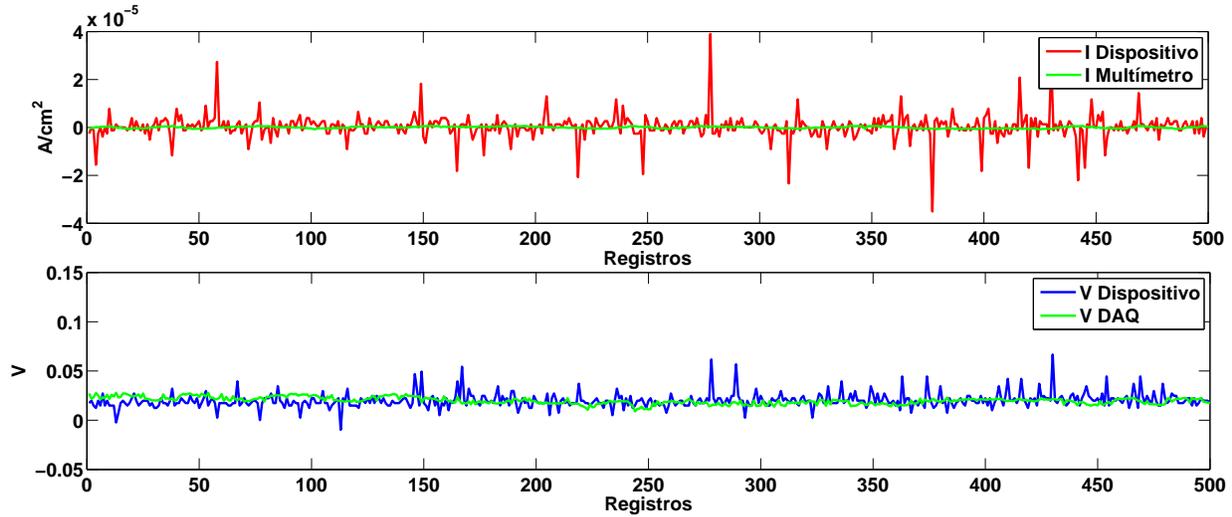


Figura 5.13: Señales de I y V sin filtrar.

En la Figura 5.14 se muestra el filtrado que realiza el dispositivo a la señal de corriente.

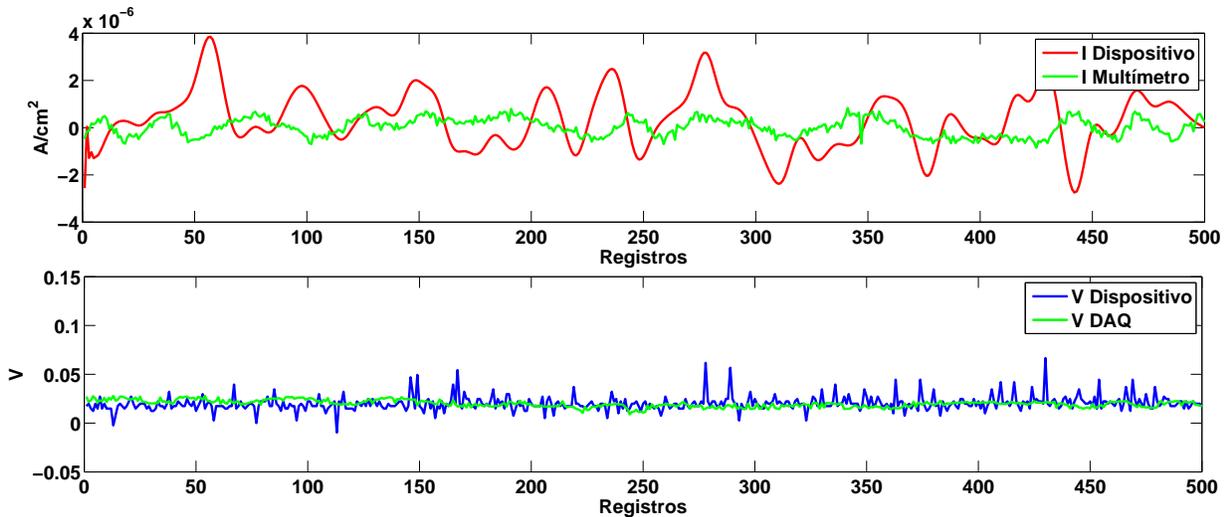


Figura 5.14: Señal de I filtrada.

La Figura 5.15 muestra la velocidad de corrosión calculada con los registros obtenidos con el equipo y la calculada por el dispositivo, el valor RMSE fue de 4.1919.

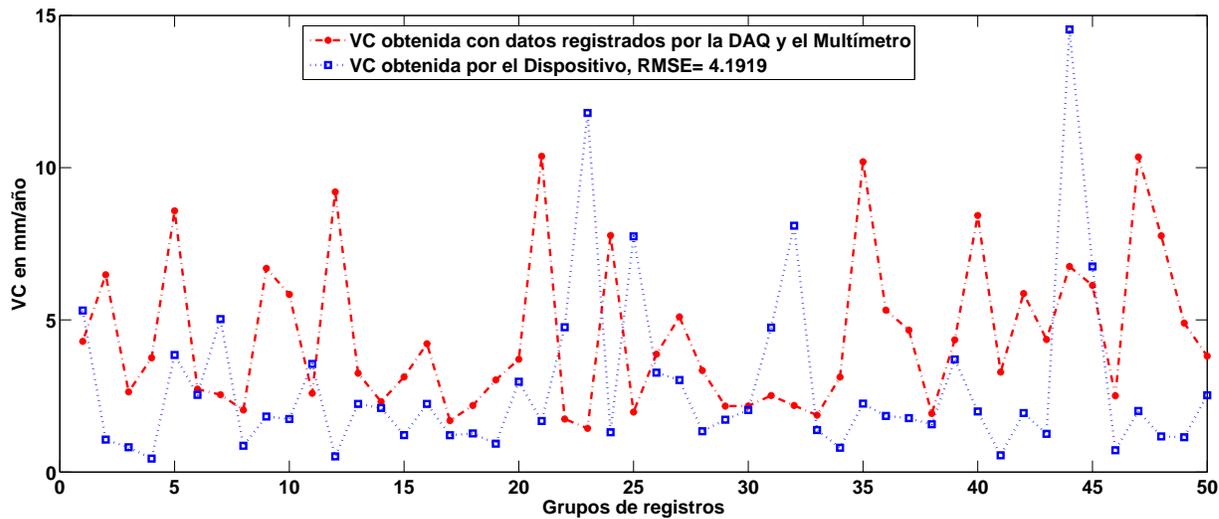


Figura 5.15: VC obtenida por el dispositivo y VC obtenida por el equipo.

La Figura 5.16 muestra el índice de localización calculado con los registros obtenidos con el equipo y el calculado por el dispositivo. El tipo de corrosión presente es localizada.

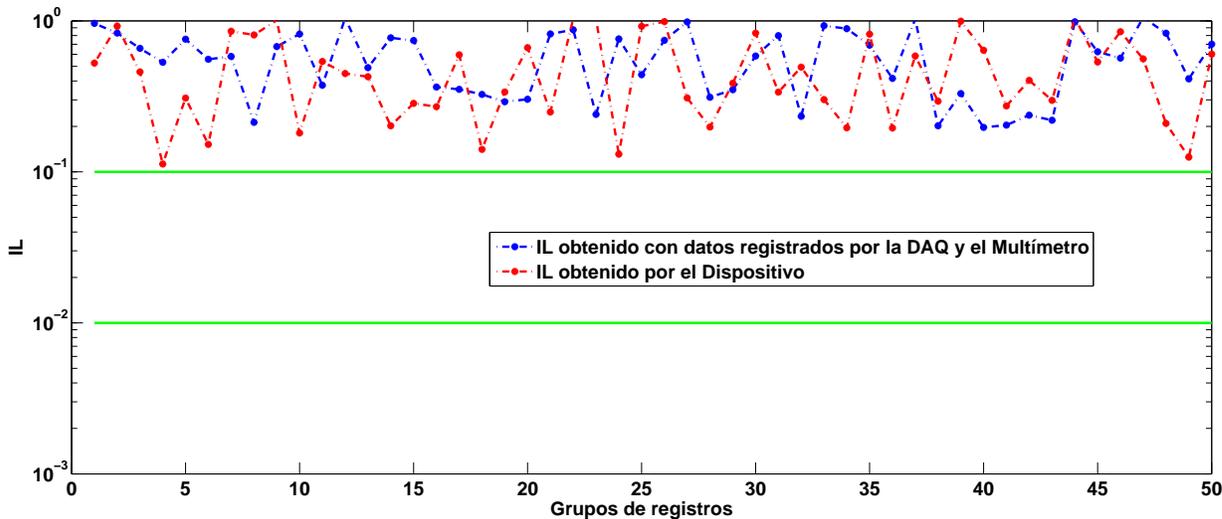


Figura 5.16: Índice de localización obtenido por el equipo y por el dispositivo.

En la Figura 5.17 se muestra la velocidad de corrosión calculada por el dispositivo y la aproximada por la red neuronal, el valor RMSE fue de 1.1349.

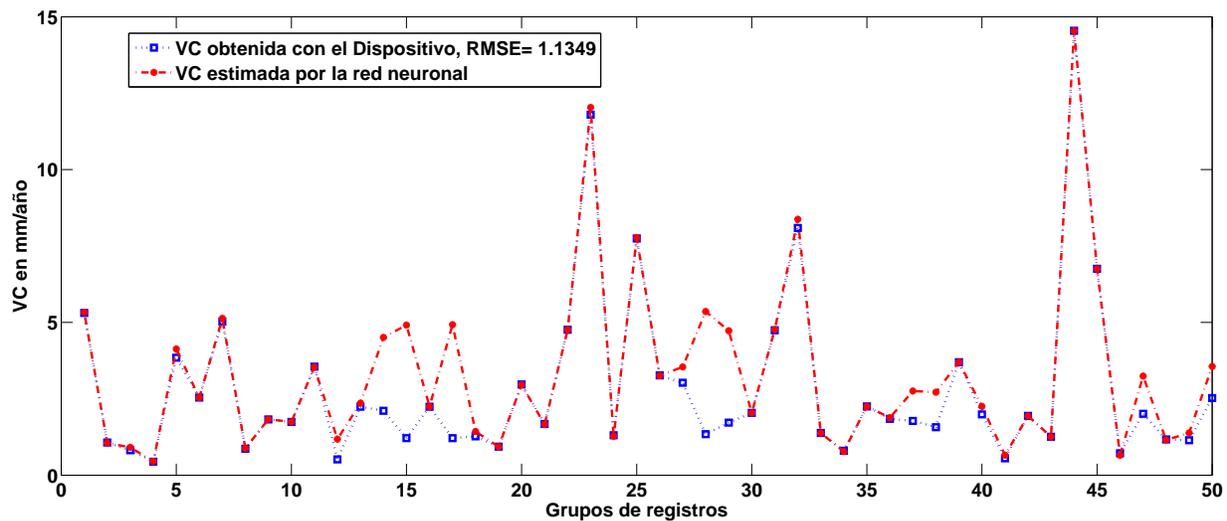


Figura 5.17: VC obtenida por el dispositivo y VC estimada por la red neuronal con electrodos de acero al carbono A36 en la muestra de  $H_2SO_4$  al 8%.

### Prueba 3) Medición de voltaje y corriente en sondas de acero al carbono A36 sumergidas en una solución de $H_2SO_4$ al 10%

La Figura 5.18 muestra los registros de voltaje y de corriente registrados por el equipo y el dispositivo antes de realizarse el filtrado a la señal de corriente registrada por el dispositivo.

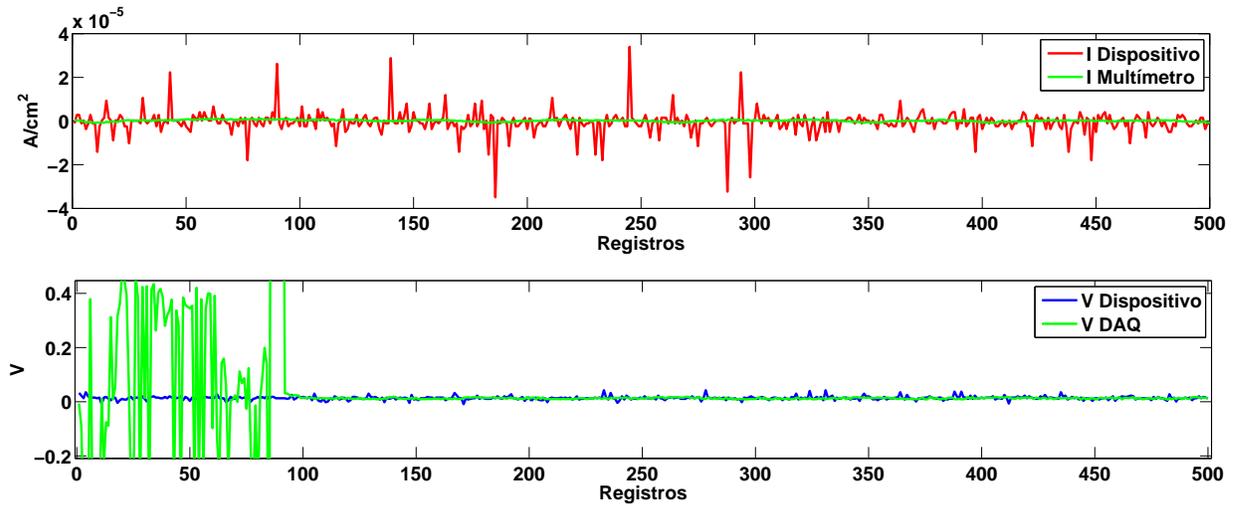


Figura 5.18: Señales de I y V sin filtrar.

En la Figura 5.19 se muestra el filtrado que realiza el dispositivo a la señal de corriente.

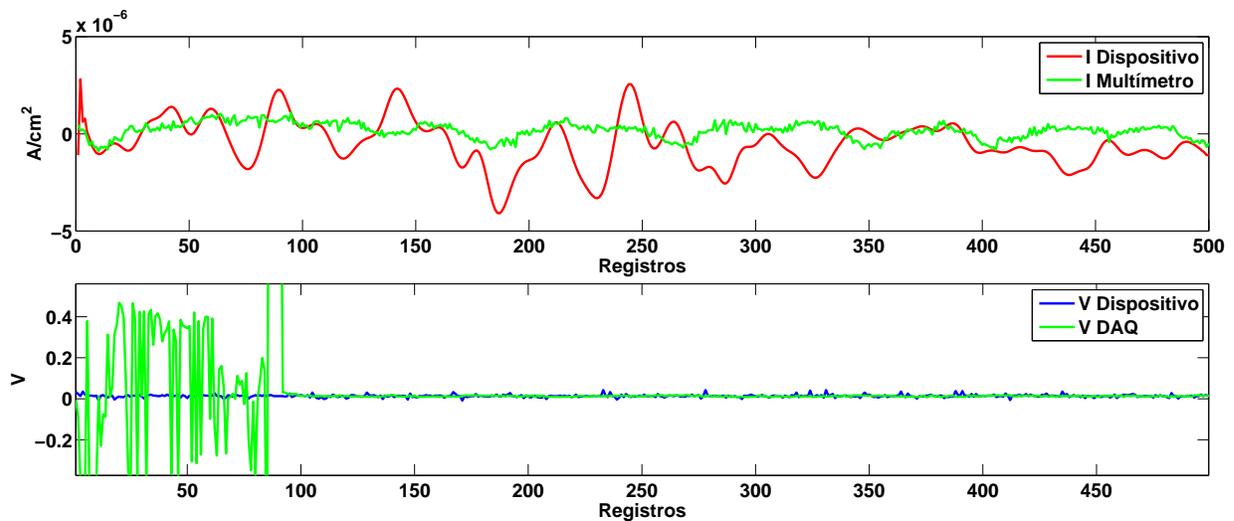


Figura 5.19: Señal de I filtrada.

La Figura 5.20 muestra la velocidad de corrosión calculada con los registros obtenidos con el equipo y la calculada por el dispositivo, el valor RMSE fue de 3.7288.

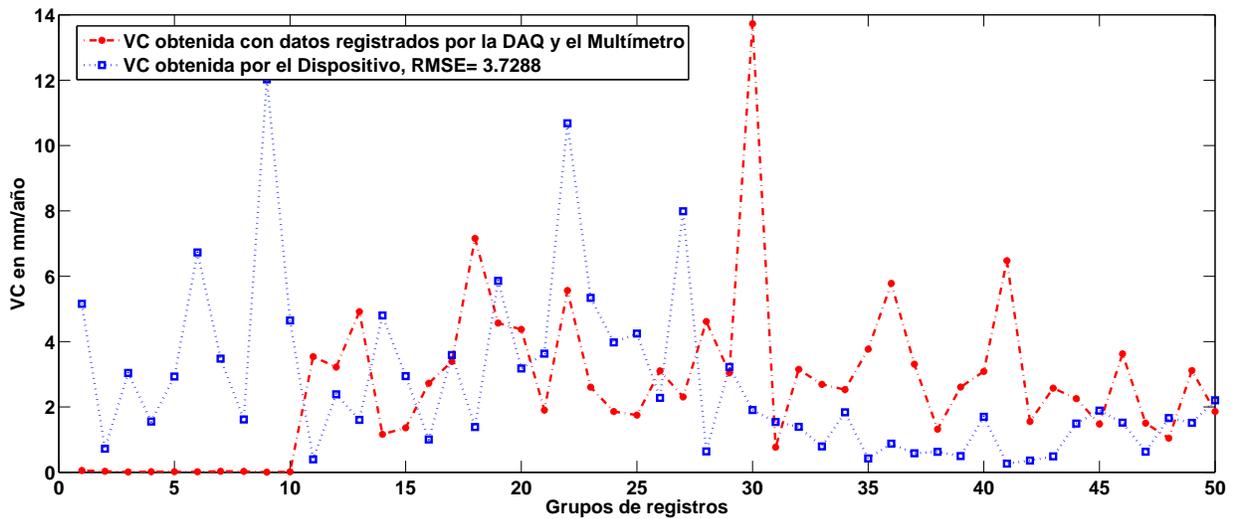


Figura 5.20: VC obtenida por el dispositivo y VC obtenida por el equipo.

La Figura 5.21 muestra el índice de localización calculado con los registros obtenidos con el equipo y el calculado por el dispositivo. El tipo de corrosión presente es localizada.

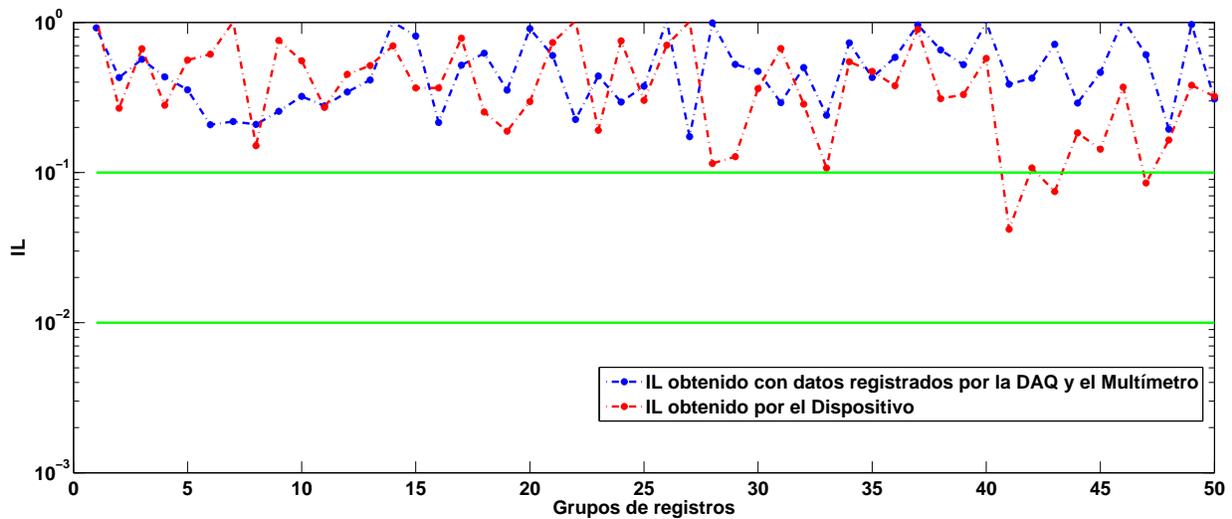


Figura 5.21: Índice de localización obtenido por el equipo y por el dispositivo.

En la Figura 5.22 se muestra la velocidad de corrosión calculada por el dispositivo y la aproximada por la red neuronal, el valor RMSE fue de 3.7288.

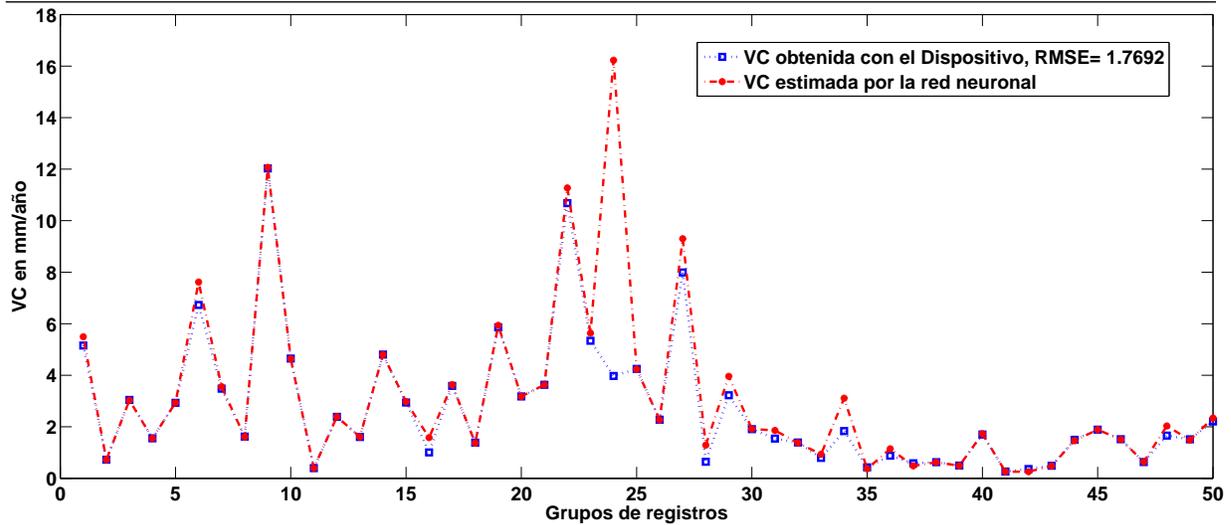


Figura 5.22: VC obtenida por el dispositivo y VC estimada por la red neuronal con electrodos de acero al carbono A36 en la muestra de  $H_2SO_4$  al 10 %.

**Prueba 4) Medición de voltaje y corriente en sondas de acero al carbono A36 sumergidas en una solución de  $H_2SO_4$  al 12 %**

La Figura 5.23 muestra los registros de voltaje y de corriente registrados por el equipo y el dispositivo antes de realizarse el filtrado a la señal de corriente registrada por el dispositivo.

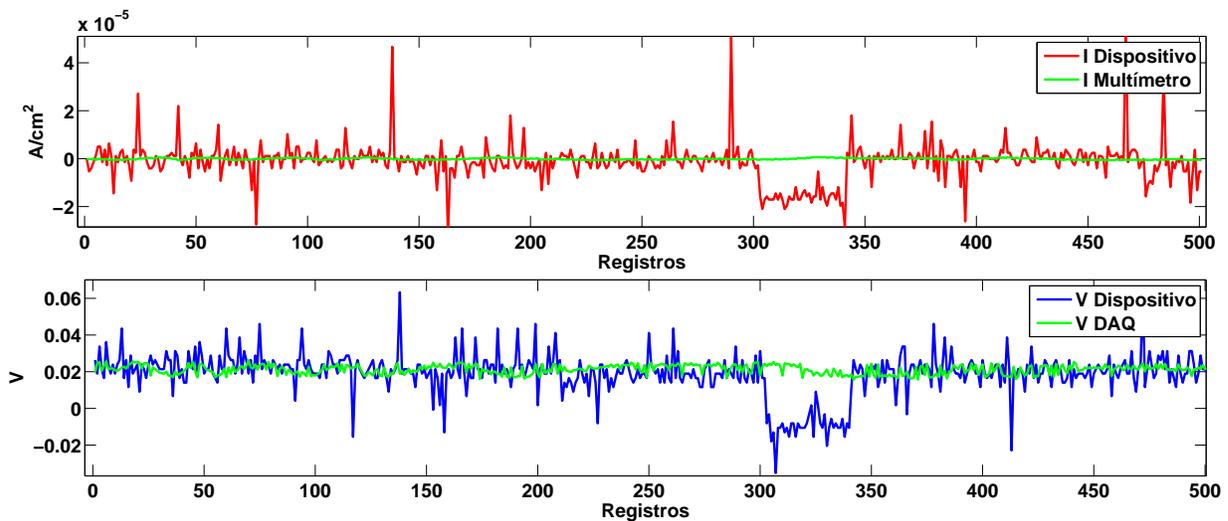


Figura 5.23: Señales de I y V sin filtrar.

En la Figura 5.24 se muestra el filtrado que realiza el dispositivo a la señal de corriente.

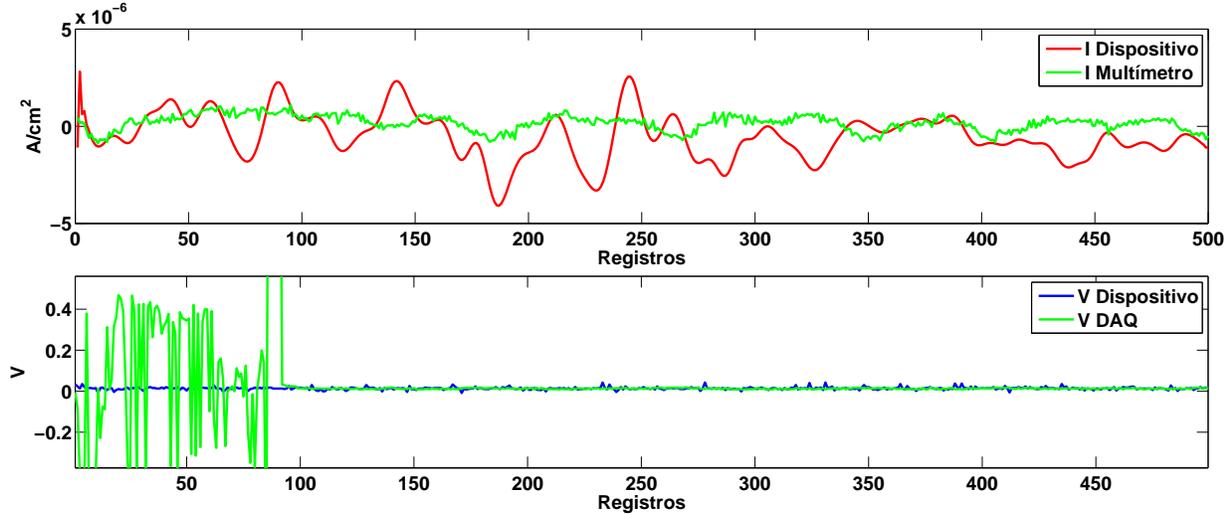


Figura 5.24: Señal de I filtrada.

La Figura 5.25 muestra la velocidad de corrosión calculada con los registros obtenidos con el equipo y la calculada por el dispositivo, el valor RMSE fue de 5.3196.

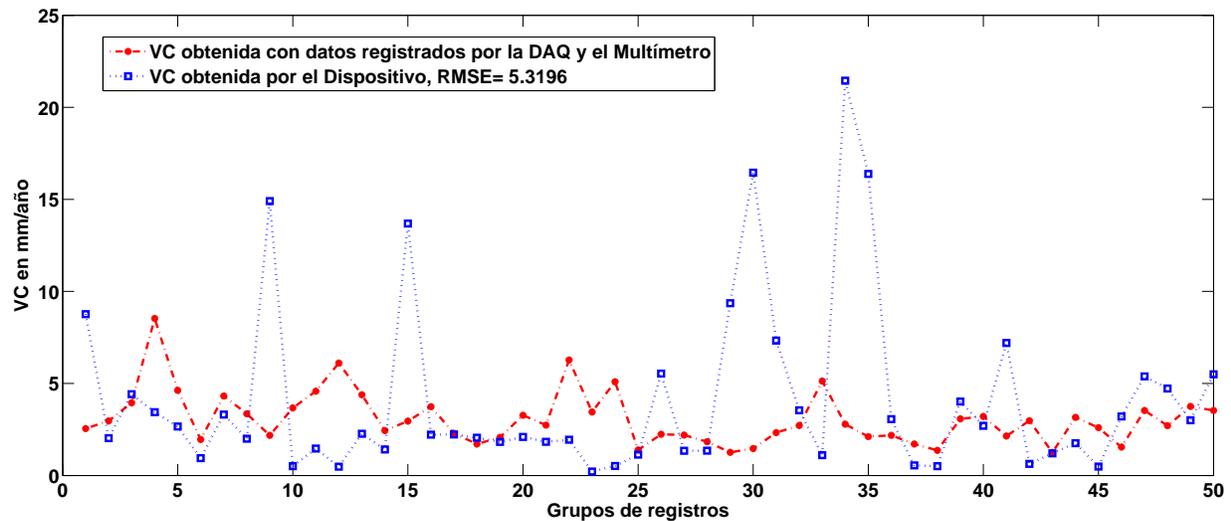


Figura 5.25: VC obtenida por el dispositivo y VC obtenida por el equipo.

La Figura 5.26 muestra el índice de localización calculado con los registros obtenidos con el equipo y el calculado por el dispositivo. El tipo de corrosión presente es localizada.

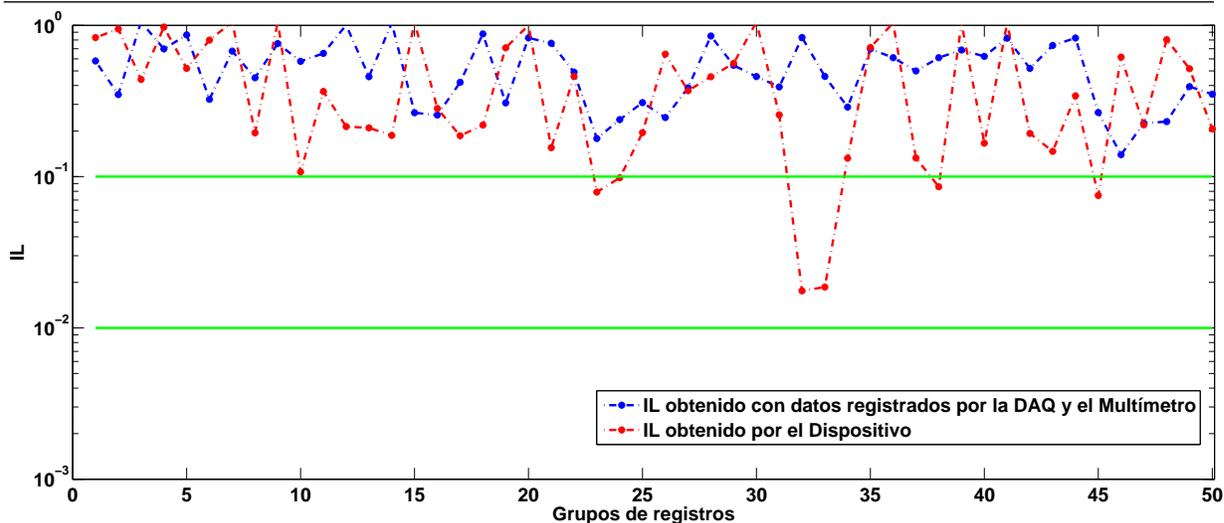


Figura 5.26: Índice de localización obtenido por el equipo y por el dispositivo.

En la Figura 5.27 se muestra la velocidad de corrosión calculada por el dispositivo y la aproximada por la red neuronal, el valor RMSE fue de 5.7792.

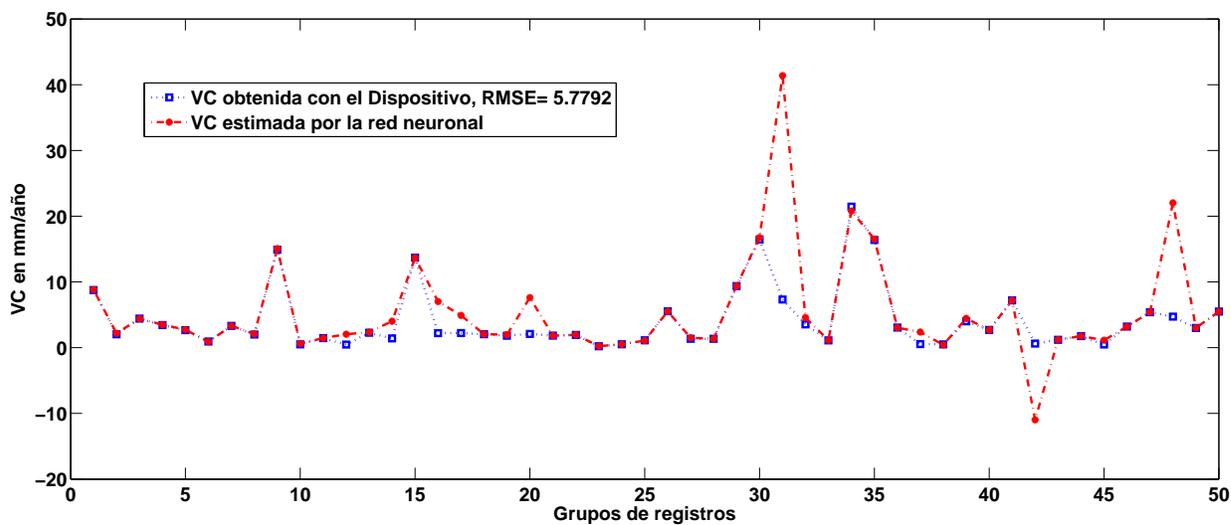


Figura 5.27: VC obtenida por el dispositivo y VC estimada por la red neuronal con electrodos de acero al carbono A36 en la muestra de  $H_2SO_4$  al 12 %.

De acuerdo a los valores de velocidad de corrosión que presentaron el dispositivo y el equipo se concluye que existe una pequeña diferencia en los resultados (Tabla 5.1).

En la prueba dos hubo una variación en los registros realizados por el equipo (DAQ y multímetro) que originó velocidades de corrosión más altas que las registradas por el dispositivo desarrollado. En la Tabla 5.1 la letra E indica equipo y D dispositivo.

Tabla 5.1: Índices de corrosión determinados en la pruebas.

Prueba	VC D	VC E	Corrosión D	Corrosión E	Vida útil D	Vida útil E
1	1.1050	1.4319	Localizada	Localizada	0.9049	0.6983
2	2.8227	4.4219	Localizada	Localizada	0.3542	0.2261
3	2.7053	2.6331	Localizada	Localizada	0.3696	0.3796
4	2.9269	3.0660	Localizada	Localizada	0.3416	0.3260

Con las velocidades de corrosión obtenidas en las pruebas con filtrado de la señal de corriente la vida útil del acero A36 se encuentra alrededor de 0.35 años (4 meses) para un grosor de un milímetro sometido a  $H_2SO_4$  al 10% y de alrededor de 0.7 años (8.4 meses) para un grosor de un milímetro en el caso del aluminio 6061-T6 sometido a  $NaCl$  al 3%.

La mejor aproximación entre dispositivo y equipo se realizó con el acero sumergido en ácido sulfúrico al 10%. La vida útil obtenida con los registros del equipo fue de 0.3797 años y 0.3696 años con los registros del dispositivo, Figura 5.20. En los trabajos futuros se enfocará en mejorar la precisión del circuito de amplificación, sobre todo en la corriente pues es la que recibe dos amplificaciones, además de ser calculada a partir del voltaje medido y una resistencia muy pequeña.

En índice de localización presentado en ambos metales se caracteriza por la corrosión localizada. La red neuronal sigue siendo una buena opción para aproximar la velocidad de corrosión a partir de la desviación estándar de voltaje y la desviación estándar de corriente. Sin embargo cuando se tienen valores fuera del rango de entrenamiento la aproximación de la red comienza a ser muy diferente a los valores obtenidos por el análisis del ruido electroquímico, por lo cual es necesario que la red se entrene con registros de soluciones muy corrosivas y de soluciones de baja agresividad.

### 5.3. Componentes y costo del dispositivo

La cantidad y costo de los componentes que integran el dispositivo para medir los índices de corrosión se describen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Cantidad y precio de los componentes del dispositivo.

Componente	Cantidad	Precio	Subtotal
Amplificador AD620AN	2	\$ 96.552	\$ 193.104
Amplificador TL084CN	1	\$ 7.759	\$ 7.759
Fuente de 20W 5V/2A,12V/0.5A,-12V/.35A	1	\$ 478.448	\$ 478.448
Amplificador AD8253	1	\$ 239.855	\$ 239.855
Raspberry Pi <sup>®</sup> 2	1	\$ 838.320	\$ 838.320
Pantalla para Raspberry Pi 7" <sup>®</sup>	1	\$ 1429.180	\$ 1429.180
Arduino UNO <sup>®</sup>	1	\$ 342.241	\$ 342.241
Resistencia de 100k $\Omega$	10	\$ 0.862	\$ 8.620
Resistencia de 1k $\Omega$	1	\$ 0.862	\$ 0.862
Resistencia de 220 $\Omega$	1	\$ 0.862	\$ 0.862
Resistencia de 1 $\Omega$	1	\$ 0.862	\$ 0.862
Resistencia de 49,9 $\Omega$	1	\$ 0.862	\$ 0.862
<b>Total</b>			\$ 3540.975

También se presenta un costo al construir los electrodos, sin embargo éste depende del tipo de metal a utilizar (acero, aluminio, cobre, etc.).



# Capítulo 6

## Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

Se desarrolló un dispositivo para medir los índices de corrosión en metales (acero al carbono A36 y aluminio 6061-T6) mediante el registro y análisis de los datos de ruido electroquímico generados cuando el metal entra en contacto con un electrolito. El dispositivo se integra por los siguientes elementos:

- Una sonda de medición formada por tres electrodos idénticos elaborados del mismo metal (se elaboraron dos sondas, una de acero al carbono A36 y una de aluminio 6061-T6), el primer par de electrodos mide el ruido en potencial y el segundo el ruido en corriente teniendo ambos pares un electrodo en común.
- Un circuito de acondicionamiento de las señales de voltaje medidas donde se incluyen amplificadores operacionales (AD620) y un amplificador programable (AD8253), las señales son amplificadas hasta alcanzar el rango de lectura del convertidor analógico-digital (Arduino UNO<sup>®</sup>).
- La parte del procesamiento de los datos y visualización de los resultados encontrados llevada a cabo por una Raspberry Pi<sup>®</sup> 2 modelo B y una pantalla táctil de 7 pulgadas.

El dispositivo realiza un análisis estadístico de los datos de ruido electroquímico y, teniendo en cuenta características del metal (densidad y peso equivalente), obtiene la velocidad (en mm/año) y tipo de corrosión (localizada, generalizada o mixta) que se presenta sobre el metal. Además se determina la vida útil del metal (en años) a partir de la velocidad de corrosión medida y el grosor de la pieza metálica (fijado por el usuario, ver Anexo A).

Se implementó una red neuronal basada en el Extreme Learning Machine la cual tiene dos entradas (desviación estándar de voltaje y desviación estándar de corriente), en la capa oculta cuenta con 15 neuronas y a la salida una neurona que estima la velocidad de corrosión. Se utilizó la tangente hiperbólica como función de activación.

La velocidad de corrosión obtenida por la red neuronal fue muy similar a la obtenida mediante el análisis estadístico. Demostrándose así que la red neuronal permite obtener la velocidad de corrosión presentada en el metal mediante la desviación estándar de voltaje y la desviación estándar de corriente sin tomar en cuenta las características del metal. Sin embargo se debe de realizar un buen entrenamiento, de lo contrario las aproximaciones que realice la red serán muy distintas a las encontradas con el análisis estadístico. Para que la red lograra una buena aproximación fue necesario ordenar los datos de entrenamiento de manera aleatoria.

Los amplificadores operacionales y el amplificador programable permitieron acondicionar las señales de voltaje medidas por los electrodos de tal manera que logran estar en el rango de lectura del convertidor analógico-digital. Sin embargo el circuito no se preparó para que el amplificador programable varíe su ganancia de acuerdo a las señales que recibe. Ya que si la amplificación es muy baja (valores menores a 0V) o muy alta (valores mayores a +5V) no se tendrán lecturas.

Se realizó la comparación de los índices de corrosión obtenidos por el dispositivo y los calculados a partir de datos obtenidos mediante una tarjeta de adquisición de datos y de un multímetro, los índices obtenidos son muy similares. Se concluye que las diferencias presentadas se deben al ruido y en parte a la resolución de los convertidores analógico-digital. A pesar de que se filtró la señal de corriente ésta aun mantuvo ruido, por lo tanto se ven afectados los índices de corrosión obtenidos por el dispositivo, los cuales tienden a ser un poco más elevados.

El dispositivo fue probado con soluciones de  $H_2SO_4$  en concentraciones de 8, 10 y 12% usando la sonda de acero al carbono A36 y con  $NaCl$  al 3% usando la sonda de aluminio 6061-T6. A partir de la velocidad de corrosión obtenida la vida útil del acero A36 se determinó en alrededor de 0.35 años (4 meses) para un grosor de un milímetro sometido a  $H_2SO_4$  al 10% y de alrededor de 0.7 años (8.4 meses) para un grosor de un milímetro en el caso del aluminio 6061-T6 sometido a  $NaCl$  al 3%. El tipo de corrosión presentado en ambos metales fue corrosión localizada.

El dispositivo elaborado resulta económico comparado con potencióstatos o corrosímetros, los cuales además de tener un costo elevado requieren de una computadora o resulta difícil su manejo o traslado al área de pruebas. Además de brindar la información en el momento el dispositivo también guarda los registros realizados por si se requiere de ellos para un análisis más a fondo o recopilarlos como historial.

## 6.2. Trabajos futuros

- Reducir el costo final del dispositivo empleando componentes de menor costo.
- Adecuar el circuito de amplificación para que responda ante valores de voltaje fuera del rango de lectura del convertidor analógico-digital (utilizando el amplificador programable AD8253).
- Elaborar varias sondas de medición de ruido electroquímico de un mismo material (Acero A36 y aluminio 6061-T6) y realizar mediciones de los índices de corrosión en periodos de tiempo largos (una o dos semanas) para ver el comportamiento del fenómeno de corrosión.
- Emplear soluciones con alta agresividad (por ejemplo ácidos a altas concentraciones) y soluciones de baja agresividad (por ejemplo agua destilada) para poder tener una amplia gama de registros si se sigue empleando la red neuronal (entrenar la red neuronal con los datos obtenidos).
- Realizar la patente del dispositivo ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI).



# Bibliografía

- Abdullah, Z., Pratama, D. Y., Sawitri, D., y Risanti, D. D. (2014). The application of neural network for predicting corrosion rate in metal pipe installation. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 2014(1).
- Agudo, d. R. D. (2013). Dispositivo para monitorizar la corrosión.
- Alamilla, J., Campos, D., y Sosa, E. (2012). Estimation of corrosion damages by bayesian stochastic models. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(5):411–423.
- Almeraya-Calderón, F., Estupiñán, F., Zambrano, P., Martínez-Villafañe, A., Borunda, A., Colás, R., y Gaona-Tiburcio, C. (2012). Análisis de los transitorios de ruido electroquímico para aceros inoxidables 316 y duplex 2205 en nacl y fecl. *Revista de metalurgia*, 48(2):147–156.
- Amaya, K., Yoneya, N., y Onishi, Y. (2014). Obtaining corrosion rates by bayesian estimation: Numerical simulation coupled with data. *The Electrochemical Society Interface*, 23(4):53–57.
- Aperador, C. W. y Roa, R. G. (2014). Equipo de monitoreo de corrosión in situ para estructuras de cualquier tipo de concreto armado.
- ASTM (1999a). Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements: G 102-89. *American Society for Testing and Materials*.
- ASTM (1999b). Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens: G 1-90. *American Society for Testing and Materials*.
- Atencio, V. O., Huerta, L. N., y Jerez, T. N. (2008). Predicción del rendimiento en cortes de carnicería de bovinos venezolanos. *Revista Científica*, 18(6):704–714.
- Berndt, M. y Philippacopoulos, A. (2005). Control de la corrosión. *Geotermia*, 18(1):48–50.

- Bordoni, R. y Olmedo, A. (2011). Oxide thickness measurements and characterization of two zr-2.5 nb pressure tubes of embalse nuclear power plant. *Acta Microscopica*, 20(1).
- Botana, J. y Marcos, M. (2002). Ruido electroquímico, métodos de análisis. *Universidad de Cadiz, Septem Ediciones, España*.
- Boylestad, R. L. y Nashelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*. PRENTICE HALL, INC.
- Brauer, L. P. M. (2013). Control de un robot humanoide mediante redes neuronales pulsantes para la manipulación de objetos. *Instituto Politécnico Nacional*.
- Caleyo, F., Velázquez, J., Valor, A., y Hallen, J. (2009). Markov chain modelling of pitting corrosion in underground pipelines. *Corrosion Science*, 51(9):2197–2207.
- Cappeln, F., Bjerrum, N., y Petrushina, I. (2005). Electrochemical noise measurements of steel corrosion in the molten nacl-k2so4 system. *Journal of The Electrochemical Society*, 152(7):B228–B235.
- Castro, J. A. F. y González, D. M. S. (1993). *Redes neuronales: algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación*. Addison-Wesley.
- Coatl, P. M. (2009). Estudio de velocidad de corrosión de acero al carbono en soluciones acuosas de alcanolaminas y sales térmicamente estables. [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lqi/coatl\\_p\\_m](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lqi/coatl_p_m). [Accesado 12-05-2015].
- Corina, P. M., Viloría, I., y Viloría, J. (2012). Aplicación de regresión logística y redes bayesianas para evaluar susceptibilidad a deslizamientos en montañas. *Suelos Ecuatoriales*, 42(1):23–27.
- Correa, M., Bielza, C., Pamies, T. J., y Alique, L. J. R. (2008). Redes bayesianas vs redes neuronales en modelos para la predicción del acabado superficial. *Digital CSIC*.
- Cortés, M. M. T. y Hortiz, H. P. (2004). Corrosión. *Hipótesis: Apuntes científicos unian-dinos*, (4).
- Costa, J. M. (2005). *Diccionario de química física*. Ediciones Díaz de Santos.
- Cottis, R. y Loto, C. (1986). Electrochemical noise generation during stress corrosion cracking. volumen 8, pp. 201–214. Trans Tech Publ.
- Cuevas, A. C., Porcayo, C. J., Izquierdo, M. G., y González, R. G. (2003). Corrosion del incoloy-800h por sales fundidas a alta temperatura. *Revista mexicana de ingeniería Química*, 2:135–142.

- De Masi, G., Vichi, R., Gentile, M., Bruschi, R., y Gabetta, G. (2014). A neural network predictive model of pipeline internal corrosion profile. *IEEE SIMS*.
- Do-Hyung, K., Joon-Young, S., y Kyong-Ok, K. (2016). Sensor for monitoring and method of manufacturing the same.
- Echeverría, F., Rios, J. F., Ramírez, E., y Calderón, J. A. (2007). Sistema piloto para estudiar la corrosión de metales empleados en la distribución de agua potable. *Scientia et Technica*, 4(36):925–929.
- Edgemon, G. L. (2004). Design and performance of electrochemical noise corrosion monitoring systems at the hanford site. Technical report, CH2M (US).
- Enciso, J. A. R. y Salinas, A. R. (2007). Sistema que supervisa la corrosión en tiempo real por análisis del ruido electroquímico. *Scientia et Technica*, 1(36).
- England, W. G. (2016). Corrosion monitoring apparatus and methods.
- Escobar, R., Uruchurtu, J., Juárez, D., Siqueiros, J., y Hernández, J. (2009). On-line indirect measures estimation for the performance of an absorption heat transformer integrated to a water purification process. *Measurement*, 42(3):464–473.
- Espada, L., Sanjurjo, M., Urréjola, S., Bouzada, F., Rey, G., y Sánchez, A. (2003). Ventajas del análisis wavelet sobre el análisis de fourier para la interpretación del ruido electroquímico. *Revista de metalurgia*, 39(Extra):72–79.
- Estupiñán-López, F., Almeraya-Calderón, F., Margulis, B. R., MA, B. Z., Martínez-Villafañe, A., y Gaona-Tiburcio, C. (2011). Transient analysis of electrochemical noise for 316 and duplex 2205 stainless steels under pitting corrosion. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 6:1785–1796.
- Gao, L., Pelletier, M. T., Atkinson, R. S., y Perkins, D. L. (2016). Method and device for downhole corrosion and erosion monitoring.
- Gaona-Tiburcio, C., Aguilar, L. M., Zambrano, R. P., Estupiñán, L. F., Cabral, M. J., Nieves-Mendoza, D., Castillo-González, E., y F., A.-C. (2014). Electrochemical noise analysis of nickel based superalloys in acid solutions. *Int. J. Electrochem. Sci*, 9:523–533.
- Garita, A. L. (2014). Evaluación de monitores electroquímicos para estudios de corrosión atmosférica del acero al carbono. *TECNOLOGÍA en marcha*, 27(2):3–13.
- Genescá, J. (2002). Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión. *Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México*.

- Guillermo, R.-R., William, A.-C., y Emilio, D.-T. (2015). Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4):565–572.
- Gutiérrez, J., Cano, R., Cofiño, A. S., y Sordo, C. M. (2004). Redes probabilísticas y neuronales aplicadas a las ciencias atmosféricas. *INM, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid*.
- Haddad, T., Himes, A., y Campbell, M. (2014). Fracture prediction of cardiac lead medical devices using bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 123:145–157.
- Hedtke, R. C. (2016). Corrosion rate measurement using sacrificial probe.
- Heredia, R. J. J., Rodríguez, H. A. G., y Vilalta, A. J. A. (2012). Empleo de la regresión logística ordinal para la predicción del rendimiento académico. *Revista investigación operacional*, 33(3):252–267.
- Hernández, J., Romero, R., Juárez, D., Escobar, R., y Siqueiros, J. (2009). A neural network approach and thermodynamic model of waste energy recovery in a heat transformer in a water purification process. *Desalination*, 243(1):273–285.
- Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y., y Siew, C.-K. (2006). Extreme learning machine: theory and applications. *Neurocomputing*, 70(1):489–501.
- Jančíková, Z., Zimný, O., y Košťál, P. (2013). Prediction of metal corrosion by neural networks. *Metallurgija*, 52(3):379–381.
- Kamrunnahar, M. y Urquidi, M. M. (2010). Prediction of corrosion behavior using neural network as a data mining tool. *Corrosion Science*, 52(3):669–677.
- Kenny, E. D., Paredes, R. S., de Lacerda, L. A., Sica, Y. C., de Souza, G. P., y Lázaris, J. (2009). Artificial neural network corrosion modeling for metals in an equatorial climate. *Corrosion Science*, 51(10):2266–2278.
- Kilian, R., Lockamon, B. G., Pop Mihai, G. M., y Sell, H.-J. (2013). Sistema electrónico para el monitoreo a distancia de los procesos de corrosión electroquímico.
- Kobayashi, K., Kaito, K., y Lethanh, N. (2012). A statistical deterioration forecasting method using hidden markov model for infrastructure management. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(4):544–561.

- Kobayashi, K., Kaito, K., y Lethanh, N. (2014). A competing markov model for cracking prediction on civil structures. *Transportation research part B: methodological*, 68:345–362.
- Kuźnicka, B. (2009). Erosion–corrosion of heat exchanger tubes. *Engineering Failure Analysis*, 16(7):2382–2387.
- López, B. G., Acosta, G. M. M., Montoya, G. H., Castillo, M. J. C., de la Rocha, L. A. P., y Soto, R. S. A. (2007). Evaluación de gastos generados por corrosión en la industria electrónica de mexicali. *Revista conexión*, 20(2).
- Mabbutt, S., Simms, N., y Oakey, J. (2009). High temperature corrosion monitoring by electrochemical noise techniques. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 44(3):186–195.
- Martínez, I., Castillo, A., y Andrade, C. (2012). Evaluación de la corrosión en estructuras de contención nuclear mediante el uso de técnicas electroquímicas no destructivas. *Informes de la Construcción*, 64(528):519–528.
- Menchaca, L. J. (2011). Sistema electrónico para el monitoreo a distancia de los procesos de corrosión electroquímico.
- Milella, P. P. (2012). *Fatigue and corrosion in metals*. Springer Science & Business Media.
- Molina, J. D., Villada, F., y Mesa, N. (2011). La corrosión atmosférica en sistemas de transporte de energía eléctrica: modelo de vida útil y su remuneración en colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2011(59):257–266.
- Nazeri, M. F. M., Affendy, M. G., y Mohamad, A. A. (2012). Corrosion study of sn–9zn lead-free solder in alkaline solution. *Int. J. Electrochem. Sci*, 7(5):4182–4191.
- Nóvoa, R. X. R. y Pérez, P. M. d. C. (2014). Sensor para la determinación de la corrosión en recubrimientos protectores de metales y procedimiento asociado.
- Olabe, X. B. (1998). Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones. *Publicaciones de la Escuela de Ingenieros*.
- Orozco, R., Martínez, E., Galván, R., Ramírez, J., y Fernández, I. (2007). Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico. *La Ciencia y el Hombre, Universidad Veracruzana*, (7).

- Pegueroles, N. M. y Gil, M. F. J. (2012). Caracterización de la resistencia a la corrosión de muestras en base cocr para aplicaciones dentales (ref. 10 10 16.1, lote 9287). *Gaceta dental*.
- Perry, R. H. y Green, D. W. (2004). *Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition*. McGraw-Hill: New York.
- Pitarque, A., Ruiz, J. C., y Roy, J. (1998). Redes neurales vs modelos estadísticos: Simulaciones sobre tareas de predicción y clasificación. *Psicológica: Revista de metodología y psicología experimental*, 19(3):387–398.
- Plankensteiner, K., Bluder, O., y Pilz, J. (2013). Application of bayesian networks to predict smart power semiconductor lifetime. En *Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2013 9th Conference on*, pp. 281–284. IEEE.
- Reyes, R. J., Escobar, F. C., Duarte, V. J., y Ramirez, P. P. (2007). Una aplicación del modelo de regresión logística en la predicción del rendimiento estudiantil. *Estudios pedagógicos (Valdivia)*, 33(2):101–120.
- Roberge, P. (1999). Handbook of corrosion engineering.
- Sarmiento, E., González-Rodríguez, J., Uruchurtu, J., Sarmiento, O., y Menchaca, M. (2009). Fractal analysis of the corrosion inhibition of carbon steel in a bromide solution by lithium chromate. *Int. J. Electrochem. Sci*, 4(1):144–155.
- Smith, S. W. (1999). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing Second Edition*. California Technical Publishing.
- Smith, W. F. y Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Mc Graw Hill.
- Sucar, L. E. (2006). Redes bayesianas. <http://ccc.inaoep.mx/~esucar/Clases-mgp/caprb.pdf>. [Accesado 06-Dic-2015].
- Takasaki, S. y Yamada, Y. (2007). Effects of temperature and aggressive anions on corrosion of carbon steel in potable water. *Corrosion Science*, 49(1):240–247.
- Taskar, M., Shareef, I., y Zemlock, A. (2016). Corrosion sensor retainer assembly apparatus and method for detecting corrosion.
- Teale, D. W. y Perkins, D. L. (2016). Device and method for corrosion detection and formation evaluation using integrated computational elements.

- Tomati, F. J. y Gabriele, A. S. (2011). Corrosión en tuberías de transporte de gas y petróleo. Technical report, HTL network.
- Tres, G., Arriaga, R., Uruchurtu, J., y Malo, M. J. (2001). Monitoreo por ruido electroquímico de la corrosión del acero en una atmósfera contaminada. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 17(4):171–178.
- Tres, G., Saborío, E., Ajún, L., Arias, A., Rodríguez, A., Bravo, O., y Malo, J. (2008). Online monitoring of corrosion in a liquid-steam line pipe of the miravalles geothermal field. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 26(1):101.
- Tsao, L. y Chen, C. (2012). Corrosion characterization of cu–sn intermetallics in 3.5 wt. % nacl solution. *Corrosion Science*, 63:393–398.
- Uruchurtu, C. J., García, O. E., y Malo Tamayo, J. M. (1997). Procedimiento mejorado para el monitoreo en tiempo real de la corrosión en precalentadores regenerativos de aire en centrales termoeléctricas y la sonda empleada en el mismo.
- Uruchurtu, C. J. y Malo, T. J. M. (1998). Procedimiento y sonda de resina activada para el monitoreo y evaluación en tiempo real de la corrosión atmosférica.
- Valdez Salas, B. y Schorr Wiener, M. (2013). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. *OmniaScience Monographs*.
- Valor, A., Caleyó, F., Alfonso, L., Velázquez, J., y Hallen, J. (2013). Markov chain models for the stochastic modeling of pitting corrosion. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
- Vázquez, A. y Damborena, J. (2001). Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos. *Consejo Superior de la Investigación Científica–CENIM (Eds.). Textos Universitarios*, 2001(31).
- Vera, R. y Ossandón, S. (2014). On the prediction of atmospheric corrosion of metals and alloys in chile using artificial neural networks. *Int. J. Electrochem. Sci*, 9:7131–7151.
- Villada, F., Molina, J. D., y Velilla, E. (2009). Modelo de vida útil para estructuras acero-zinc utilizadas en la transmisión de energía eléctrica en colombia. *Información tecnológica*, 20(6):57–66.
- Wang, Hui and Yajima, Ayako and Castaneda, Homero and others (2015). Bayesian modeling of external corrosion in underground pipelines based on the integration of markov chain monte carlo techniques and clustered inspection data. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(4):300–316.

Wang, X., Wang, J., Fu, C., y Gao, Y. (2013). Determination of corrosion type by wavelet-based fractal dimension from electrochemical noise. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 8(5):7211–7222.

Yegnanarayana, B. (2009). *Artificial neural networks*. PHI Learning Pvt. Ltd.

# ANEXOS



## Anexo A

# Interfaz de usuario del dispositivo

La comunicación con el dispositivo se realiza de manera directa a través de la pantalla táctil de 7 pulgadas de la Raspberry Pi<sup>®</sup>. A la Raspberry Pi<sup>®</sup> se le cargó el sistema operativo Raspbian Jessie en su versión del día 27 de mayo de 2016, descargada del sitio oficial de Raspberry Pi<sup>®</sup> (<https://www.raspberrypi.org/downloads/>). Este sistema operativo permite visualizar un escritorio donde se pueden encontrar diferentes herramientas (Figuras A.1 y A.2).

Para procesar los registros de voltaje y corriente y obtener los índices de corrosión se elaboró un programa escrito en lenguaje Python. La versión de Python instalada es la 2.7.9. El programa se ejecuta desde la terminal de Raspbian.

Al iniciar el sistema se inicia un menú donde se pide al usuario especificar el metal con el que se va a trabajar (para esta tesis el sistema solo cuenta con las opciones acero al carbono A36 y aluminio 6061-T6) y después el grosor mínimo del material (necesario para el cálculo de la vida útil). Enseguida se solicita la cantidad de grupos de registros a realizar y la cantidad de cada grupo de registros. Por último se solicita un nombre para los archivos en formato .txt que almacenan los registros de voltaje y corriente así como los índices de corrosión encontrados y la vida útil calculada (Figura A.3).

Los datos se almacenan en la memoria SD de la Raspberry Pi<sup>®</sup> con la finalidad de que el usuario los pueda almacenar posteriormente si lo desea en un dispositivo USB y hacer un análisis propio (en las pruebas del dispositivo se tomaron los datos almacenados para realizar el entrenamiento de la red neuronal).

La captura de la información se realiza a través del teclado virtual instalado en la Raspberry Pi<sup>®</sup> (Figura A.4). Los registros de voltaje y corriente son mostrados en pantalla. Para las pruebas el programa muestra el voltaje que miden las entradas analógicas del Arduino UNO<sup>®</sup> y el voltaje que midió con los electrodos antes de ser adecuado al rango de 0 a +5V (Figura A.5). Cada vez que se ingresa la cantidad de registros por grupo especificados por el usuario se muestra en pantalla la velocidad de corrosión obtenida con

la ecuación (2.7) y la obtenida con la estimación de la red neuronal (Figura A.6). También se muestra la vida útil obtenida con las dos velocidades de corrosión.

Se muestran además el índice de localización (IL) y que tipo de corrosión es de acuerdo a éste, la media del voltaje, media de la corriente, desviación estándar de voltaje ( $\sigma_V$ ), desviación estándar de la corriente ( $\sigma_I$ ), la resistencia al ruido ( $Rn$ ) y la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ).

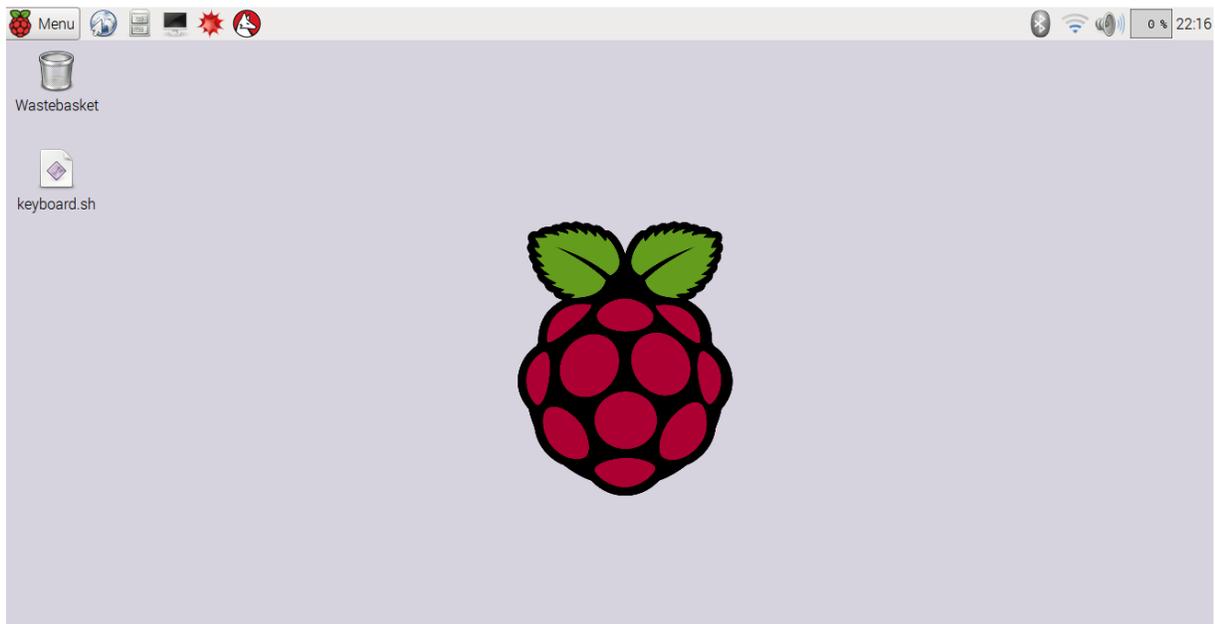


Figura A.1: Escritorio del sistema Raspbian.

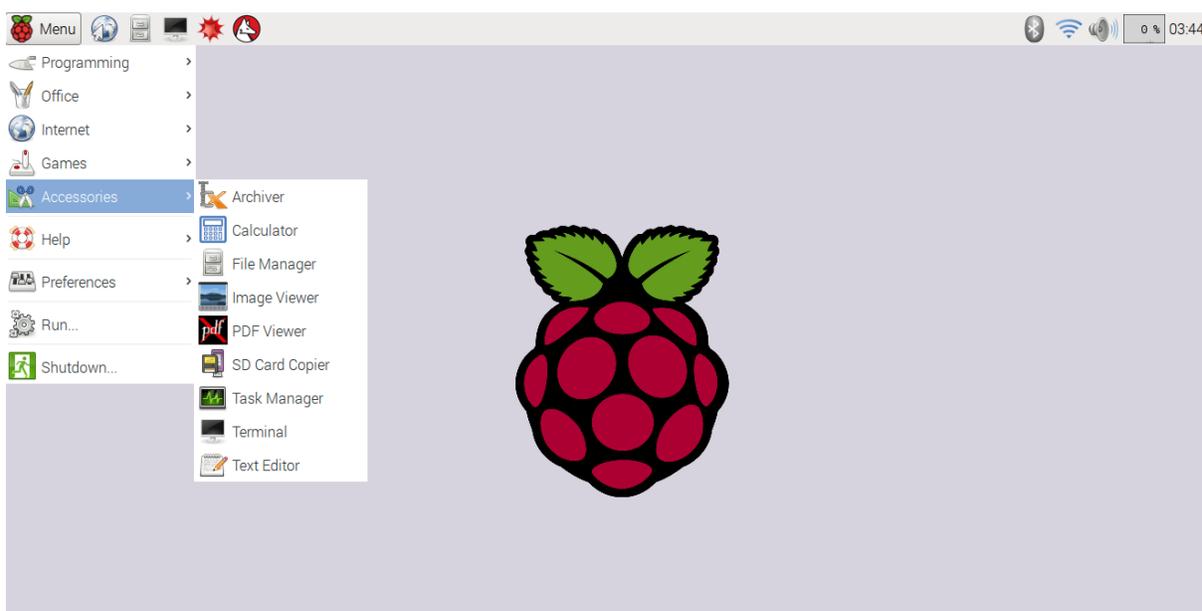


Figura A.2: Menú de herramientas del sistema Raspbian

```
pi@raspberrypi: ~/dispvc
File Edit Tabs Help
pi@raspberrypi:~/dispvc $ python programa_corrosion.py
Dispositivo para medir los indices de corrosion en metales
Indique el metal de prueba:
a- Acero al carbono A36
b- Aluminio 6061-T6
a
Ha elegido: Acero al carbono A36
Indique el grosor minimo del metal en mm
1
Grosor minimo del metal: 1 mm
Indique la cantidad de grupos de registros:
1000
Indique la cantidad de registros por grupo:
10
Indique un nombre para los archivos que guardan los registros y calculos
:
prueba_acero_h2so4_10p_030516
Iniciar: Y/y, Volver al menu N/n
pi@raspberrypi:~/dispvc $ y
```

Figura A.3: Menú de opciones del programa desarrollado en Python.

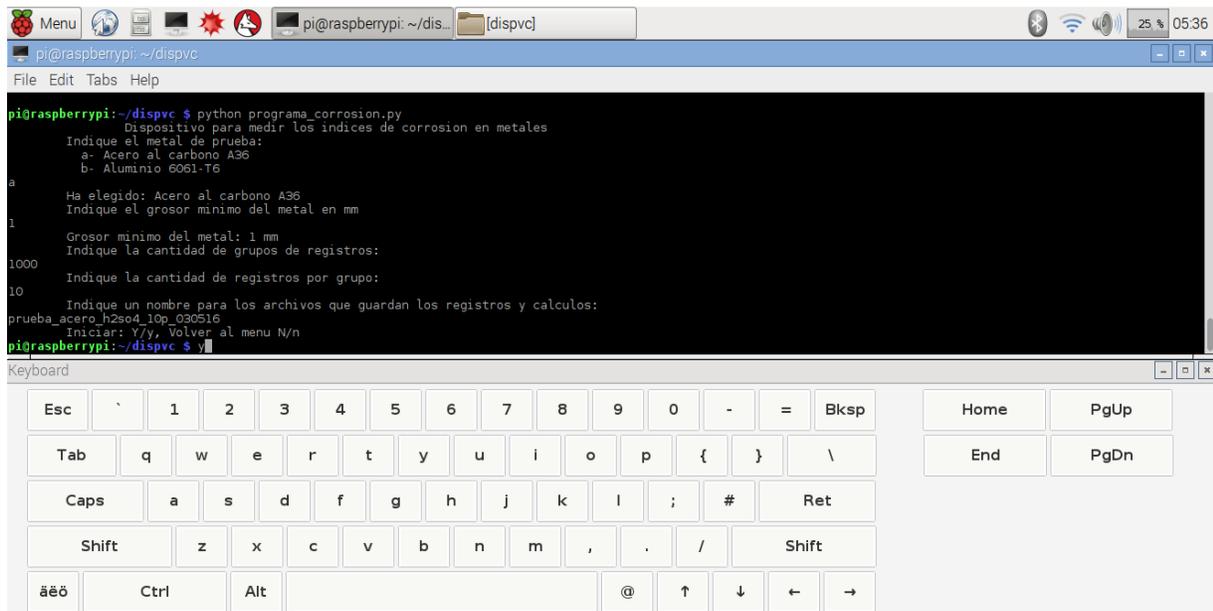


Figura A.4: Ingreso de información mediante teclado virtual.

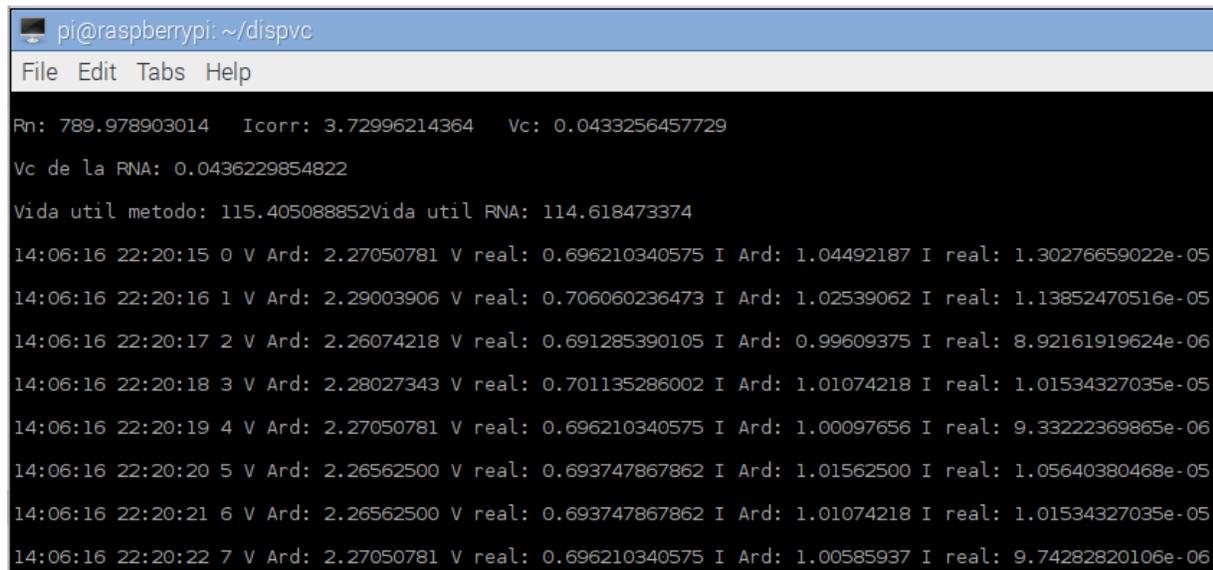


Figura A.5: Muestra en pantalla de los registros de voltaje y corriente.

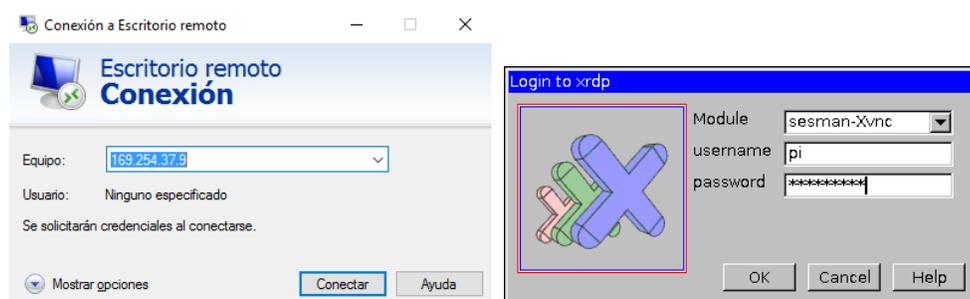
```

pi@raspberrypi: ~/dispcv
File Edit Tabs Help
14:06:16 22:20:12 7 V Ard: 2.27050781 V real: 0.696210340575 I Ard: 1.01074218 I real: 1.01534327035e-05
14:06:16 22:20:13 8 V Ard: 2.27050781 V real: 0.696210340575 I Ard: 1.00097656 I real: 9.33222369865e-06
14:06:16 22:20:14 9 V Ard: 2.29003906 V real: 0.706060236473 I Ard: 0.98144531 I real: 7.68980484809e-06
Media V: 0.656583896462 Media I: 5.92608967415e-06
Sigma V: 0.0046722163058 Sigma I: 5.91435579859e-06
IL: 0.454424613688 Corrosion LOCALIZADA
Rn: 789.978903014 Icorr: 3.72996214364 Vc: 0.0433256457729
Vc de la RNA: 0.0436229854822
Vida util metodo: 115.405088852Vida util RNA: 114.618473374
14:06:16 22:20:15 0 V Ard: 2.27050781 V real: 0.696210340575 I Ard: 1.04492187 I real: 1.30276659022e-05
14:06:16 22:20:16 1 V Ard: 2.29003906 V real: 0.706060236473 I Ard: 1.02539062 I real: 1.13852470516e-05

```

Figura A.6: Muestra en pantalla de los índices de corrosión medidos y la vida útil estimada.

La comunicación con el dispositivo también puede realizarse de manera remota usando la aplicación Conexión a Escritorio remoto desde el sistema operativo Windows (Figura A.7 (a)) a través del software xrdp instalado en la Raspberry Pi<sup>®</sup> (Figura A.7 (b)), para esta comunicación se requiere que la Raspberry Pi<sup>®</sup> esté conectada a una red local (vía ethernet o Wi-Fi). En la aplicación conexión a escritorio remoto se ingresa la dirección IP asignada a la Raspberry Pi<sup>®</sup> y aparecerá la ventana de logueo del sistema xrdp donde se indica el usuario y contraseña asignados.



(a) Conexión a Escritorio remoto (Windows)

(b) sistema xrdp (Raspbian).

Figura A.7: Comunicación remota con el dispositivo.



## Anexo B

# Información de los principales componentes del dispositivo

### B.1. Raspberry Pi<sup>®</sup> 2 B

Raspberry Pi<sup>®</sup> es un ordenador de placa reducida o (placa única) (SBC) de bajo coste desarrollado en Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, con el objetivo de estimular la enseñanza de ciencias de la computación en las escuelas.

Aunque no se indica expresamente si es hardware libre o con derechos de marca, en su sección de preguntas y respuestas frecuentes (FAQs) explican que disponen de contratos de distribución y venta con dos empresas, pero al mismo tiempo cualquiera puede convertirse en revendedor o redistribuidor de las tarjetas RaspBerry Pi<sup>®</sup> por lo que se entiende que es un producto con propiedad registrada pero de uso libre. De esa forma mantienen el control de la plataforma pero permitiendo su uso libre tanto a nivel educativo como particular.

Tampoco deja claro si es posible utilizarlo a nivel empresarial u obtener beneficios con su uso, asunto que se debe consultar con la fundación. En cambio el software sí es open source, siendo su sistema operativo oficial una versión adaptada de Debian, denominada RaspBian, aunque permite otros sistemas operativos, incluido una versión de Windows 10.

El diseño no incluye un disco duro ni unidad de estado sólido, ya que usa una tarjeta SD para el almacenamiento permanente; tampoco incluye fuente de alimentación ni carcasa.

La fundación da soporte para las descargas de las distribuciones para arquitectura ARM, Raspbian (derivada de Debian), RISC OS 5, Arch Linux ARM (derivado de Arch Linux) y Pidora (derivado de Fedora); y promueve principalmente el aprendizaje del lenguaje de programación Python. Otros lenguajes también soportados son Tiny BASIC, C, Perl y Ruby.

Las características de la Raspberry Pi<sup>®</sup> 2 Modelo B se describen en la Tabla B.1.

Tabla B.1: Características de la Raspberry Pi<sup>®</sup> 2 B

SoC	Broadcom BCM2836 (CPU, GPU y SDRAM)
CPU	ARM1176JZF-S a 900 MHz
GPU	Broadcom VideoCore IV
Memoria	RAM 1GB (compartidos con la GPU)
Conexiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 4 x USB 2.0</li> <li>▪ 1 x Salida audio mini jack 3.5 mm</li> <li>▪ 1 x Salida audio/vídeo HDMI</li> <li>▪ 1 x Micro USB</li> <li>▪ 1 x RJ45 10/100 Ethernet RJ45</li> </ul>
Conectividad	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ LAN Red local.</li> <li>▪ WiFi (mediante adaptador USB WiFi compatible, no incluido)</li> <li>▪ Slot MicroSD para tarjetas.</li> </ul>
Alimentación	5V/600 mA (3.5 W) via microUSB.
Dimensiones	85.6 mm x 53.98 mm.
Compatible con Sistemas Operativos Embebidos	Raspbian, Ubuntu MATE, Pidora, y la nueva compatibilidad con WINDOS 10, entre otros Sistemas Embebidos.

## B.2. Arduino UNO<sup>®</sup>

Arduino es una plataforma de creación de prototipos de código abierto basado en hardware y software fácil de usar. Las placas Arduino son capaces de leer las entradas - la luz en un sensor, un dedo sobre un botón o un mensaje de Twitter - y convertirlas en una salida - la activación de un motor, encender un LED, publicar algo en línea. Se puede decir que su placa envía un conjunto de instrucciones al microcontrolador que se encuentra en la placa. Para ello se utiliza el lenguaje de programación de Arduino (basado

en el cableado), y el software de Arduino (IDE), basadas en el procesamiento.

Tabla B.2: Características del Arduino UNO<sup>®</sup>

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de alimentación (recomendado)	7-12V
Máximo voltaje de alimentación (no recomendado)	20V
Pines digitales I/O	14 (6 con salida PWM)
Pines de entrada analógica	6
Corriente DC para Pin I/O	40mA
Corriente DC para Pin 3.3V	50mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328) de los cuales 0.5 KB son usado por el bootloader
SRAM	2KB (ATmega328)
EEPROM	1KB (ATmega328)
Velocidad de reloj	16 MHz



## Anexo C

# Ejemplo de elaboración de una sonda de medición para utilizarse en un equipo

Enseguida se describe el ejemplo de elaboración de una sonda de medición para utilizarse en un equipo que permita que la sonda esté en contacto con la solución mediante un acople. Por ejemplo en una salida de purga o conexión no utilizada.

Los electrodos se deben de elaborar del mismo material del cual está formado el equipo para ver el daño que produce la corrosión causada por la solución en el metal. Teniendo un lugar para realizar el contacto de la solución con la sonda (Figura C.1) se busca un acople que permita esta operación.

El caso que se presenta es para conectarse en un orificio de purga que por lo general tiene un tapón con cuerda. Se busca una pieza que permita reemplazar dicho tapón. Comúnmente se puede utilizar un acople con cuerda (Figura C.2 (a)), los electrodos se colocarán dentro del acople utilizando una base guía (Figuras C.2 (b), C.2 (c) y C.2 (e)) y se rellenará el espacio vacío con resina epóxica. Los electrodos deben de ajustarse para no tener contacto entre ellos y tener contacto con la solución y tener cableado para conectarse al circuito de amplificación (Figura C.2 (h)). Si las condiciones de operación del equipo hacen que el fluido se encuentre a condiciones de presión y temperatura extremas puede no ser una buena opción. Por ejemplo para una tubería con un fluido a no más de 100 grados centígrados la resina epóxica resistirá.

La superficie de los electrodos que estará en contacto con la solución se debe preparar de acuerdo a la norma ASTM G1 (ASTM (1999b)), la cual menciona lijado (Figuras C.2 (f) y (g)), desengrasado y limpieza.



Figura C.1: Tapón de drenado de un depósito de agua caliente.



Figura C.2: Elaboración de una sonda de medición de ruido electroquímico para un equipo.

## Anexo D

# Filtrado mediante media móvil

La media móvil es el filtro más común en DSP (del inglés *Digital Signal Processing*, Procesamiento de Señales Digitales). A pesar de ser un filtro sencillo y de fácil implementación es un filtro óptimo para tareas comunes (Smith (1999)):

- Reducir ruido aleatorio, mientras se mantiene la forma de la señal.
- Es el principal filtro para señales codificadas en el dominio del tiempo.

Como su nombre lo indica, el filtro de media móvil opera promediando un número de los puntos de la señal de entrada para producir cada punto de la señal de salida. En forma de ecuación, esto se escribe:

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i+j], \quad (\text{D.1})$$

donde  $x[]$  es la señal de entrada,  $y[]$  es la señal de salida y  $M$  es el número de puntos en la media.  $i$  es la posición donde se comienzan a tomar los datos y  $j$  las posiciones desde 0 hasta  $M - 1$ . Por ejemplo en un filtro de media móvil de 5 puntos el elemento 80 en la señal de salida está dado por:

$$y[80] = \frac{x[80] + x[81] + x[82] + x[83] + x[84]}{5}$$