

**IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS  
ELECTROQUÍMICAS PARA EL MONITOREO DE  
CORROSIÓN EN PATAS DE TORRES DE TRANSMISIÓN**

**JOSÉ JIMMY DÍAZ FAJARDO**

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

**2004**

**IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL  
MONITOREO DE CORROSIÓN EN PATAS DE TORRES DE  
TRANSMISIÓN**

**JOSÉ JIMMY DÍAZ FAJARDO**

**Monografía para optar el título de**

**Ingeniero Electricista**

**Director**

**Ph. D. Oscar Gualdrón.**

**Codirector**

**Físico Luis Ferney Vesga**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2004**

A mis compañeros y amigos que creyeron  
que podría alcanzar esta meta.

A aquellos seres queridos y amados que me  
rodean y siempre confiaron en mí.

A mis padres y familiares por el apoyo  
incondicional que me brindaron.

A mi esposa, por su angelical paciencia.

A mi hijo, la inspiración y razón  
más grande para vivir.

## AGRADECIMIENTOS

Oscar Gualdrón González, Doctor en Física, Director de Investigaciones de la UIS y Director de la Investigación, por sus valiosas orientaciones acerca del conocimiento y la vida.

Luis Ferney Vesga, Físico, Codirector de la investigación, por su valiosa colaboración y espíritu motivador.

Jorge Hernando Panqueva, Doctor en Física, Director de la Corporación para la Investigación de la Corrosión, por su colaboración y comprensión en la ejecución de esta investigación.

A todos los compañeros de la CIC, por su colaboración, apoyo y ánimo constante .

A los profesores de la Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica por sus enseñanzas.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE ANEXOS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1 INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENERALIDADES.....</b>	<b>3</b>
2.1. OBJETIVOS.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	3
2.3. ALCANCE .....	3
<b>3. FUNDAMENTACIÓN TEORICA.....</b>	<b>4</b>
3.1. QUÉ ES LA CORROSIÓN?.....	4
3.2. QUÉ ES LA ELECTROQUÍMICA?.....	5
3.3. MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS PARA ESTIMAR EL ESTADO DE CORROSIÓN.....	8
3.3.1. Resistencia a la polarización. ....	10
3.3.2. Pendientes Taffel. ....	12
3.3.3. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica .....	13
3.4. ANALOGÍA ELÉCTRICA.....	18
3.5. CORROSIVIDAD EN SUELOS.....	21
3.5.1. Porosidad del terreno. ....	22
3.5.2. Humedad del terreno. ....	22
3.5.3. Resistividad del terreno. ....	22

3.5.4.	Efecto del pH. ....	23
3.5.3.	Potencial redox. ....	23
3.5.4.	Salinidad. ....	24
3.5.5.	Corrientes vagabundas. ....	25
<b>3.6.</b>	<b>CONFIGURACIÓN TÍPICA DE LAS CELDAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS CORROSIVOS. ....</b>	<b>25</b>
3.6.1.	Configuración simple de tres electrodos usando un electrodo de referencia. ....	26
3.6.2.	Configuración simple de dos electrodos usando un electrodo de referencia. ....	27
<b>3.7.</b>	<b>TÉCNICAS PARA CORRELACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y TOMA DE DECISIONES. ....</b>	<b>28</b>
<b>4.</b>	<b>DESARROLLO METODOLOGICO ..... 32</b>	<b>32</b>
4.1.	FASE 1. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA. ....	32
4.2.	FASE 2. DISEÑO EXPERIMENTAL ..... 37	37
4.2.1.	Electrolitos de simulación. ....	38
4.2.2.	Configuración de la celda electroquímica para evaluación. ....	39
4.2.3.	Construcción de probetas. ....	40
<b>4.3.</b>	<b>FASE 3: CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS METALES EN LOS DIFERENTES MEDIOS ACUOSOS.- PRUEBAS PRELIMINARES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL ..... 41</b>	<b>41</b>
4.2.4.	Pruebas electroquímicas. ....	44
4.2.5.	Inspección visual. ....	45
4.2.6.	Análisis químico de los componentes de las soluciones simuladas. ....	47
4.4.	FASE 4. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEFINITIVAS. ....	47
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN ..... 51</b>	<b>51</b>
<b>5.1.</b>	<b>CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS METALES EN LOS DIFERENTES MEDIOS ACUOSOS. .... 52</b>	<b>52</b>
5.1.1.	Análisis de las pruebas LPR. ....	52

5.1.2.	Análisis de las pruebas Taffel. ....	57
5.1.3.	Análisis de las pruebas de EIS. ....	63
<b>5.2.</b>	<b>ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA. ....</b>	<b>68</b>
5.2.1.	Análisis de la función de transferencia por medio del estudio de sus derivadas. ....	69
5.2.2.	Análisis de polos y ceros.. ....	71
5.2.3.	Análisis del lugar geométrico de las raíces. ....	71
5.2.4.	Diagrama de Bode. ....	74
5.2.5.	Diagrama de Nichols. ....	76
5.2.6.	Diagrama de Nyquist. ....	76
5.2.7.	Respuesta al impulso. ....	77
5.2.8.	Respuesta al escalón.. ....	78
<b>5.3.</b>	<b>POTENCIAL DE CORROSIÓN .....</b>	<b>78</b>
<b>5.4.</b>	<b>ANALISIS DE LAS VARIABLES FISICOQUIMICAS .....</b>	<b>80</b>
<b>5.5.</b>	<b>INSPECCION VISUAL.....</b>	<b>82</b>
<b>5.6.</b>	<b>CARACTERIZACION DEL COMPORAMIENTO DE UN METAL A TRAVÉS DEL TIEMPO. ....</b>	<b>85</b>
<b>6.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA FUZZY .....</b>	<b>88</b>
6.1.	DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES FUZZY .....	89
6.2.	DEFINICIÓN DEL UNIVERSO DEL DISCURSO. ....	92
6.3.	REGLAS DEL SISTEMA FUZZY. ....	93
6.4.	VISUALIZACIÓN DEL SISTEMA FUZZY.....	94
<b>ANEXO 1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACION LINEAL ACERO GALVANIZADO .....</b>		<b>99</b>
<b>ANEXO 2 RESULTADOS PRUEBAS DE IMPEDANCIAS PARAMETROS CARACTERISTICOS.....</b>		<b>103</b>

<b>ANEXO 3. RESULTADOS PRUEBAS TAFEL VELOCIDADES DE CORROSION</b> .....	<b>111</b>
<b>ANEXO 4. PRUEBAS DE LPR, EIS Y TAFEL EVALUACIÓN DE UNA PROBETA A TRAVÉS DEL TIEMPO EN UNA MISMA SOLUCIÓN.....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO 5.....</b>	<b>118</b>
<b>CALCULO DE LAS VELOCIDADES DE CORROSION.....</b>	<b>118</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>121</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Corrosividad del suelo en función de la resistividad. ....	22
Tabla 2. Corrosividad del suelo en función del pH. ....	23
Tabla 3. Corrosividad del suelo en función del potencial red - ox .....	24
Tabla 4 .Corrosividad del suelo en función de algunas sales. ....	24
Tabla 5 .Corrosividad del suelo en función de las corrientes vagabundas. ....	25
Tabla 6. Matriz de valores físico químicos para las soluciones de prueba, pH1, Cl1, (SO4)1, (C03)1 son los parámetros base de las pruebas electroquímicas .....	39
Tabla 7. Diseño experimental para estructuras de acero al carbono. (SOLUCIONES) .....	42
Tabla 8. Diseño experimental para estructuras de acero galvanizado (SOLUCIONES) .....	43
Tabla 9 .Matriz de daño para el acero galvanizado .....	46
Tabla 10. Matriz de daño para el acero al carbono. ....	47
Tabla 11. Matriz experimental para las pruebas con el acero al carbono. ....	49
Tabla 12. Matriz experimental para las pruebas con acero galvanizado. ....	50
Tabla 13. Resultados de la curvas LPR para el acero galvanizado .....	54
Tabla 14. Velocidad de corrosión por monitoreo para los diferentes sistemas. ....	58
Tabla 15. Velocidad de corrosión para cada sistema en el tiempo. ....	60
Tabla 16. Parámetros electroquímicos de EIS. ....	67
Tabla 17. Valores de los monitoreos fisicoquímicos de las diferentes variables, a los diferentes monitoreos. ....	81
Tabla 18. Variables Fuzzy a implementar. ....	90
Tabla 19. Universo del discurso de las variables Fuzzy. ....	92
Tabla 20. Reglas generadas para el sistema Fuzzy fisicoquímico .....	95
Tabla 21. Reglas generadas para el sistema Fuzzy electroquímico. ....	96
Tabla 22. Valores de Rp .....	100
Tabla 23. Monitoreo cero .....	104
Tabla 24. Primer Monitoreo .....	105
Tabla 25. Segundo Monitoreo .....	106
Tabla 26. Tercer Monitoreo .....	107
Tabla 27. Cuarto Monitoreo .....	108
Tabla 28. Quinto Monitoreo .....	109
Tabla 29. Sexto Monitoreo .....	110
Tabla 30. Monitoreo cero .....	112
Tabla 31. Primer Monitoreo .....	112
Tabla 32. Tercer Monitoreo .....	113
Tabla 33. Quinto Monitoreo .....	113
Tabla 34. Sexto Monitoreo .....	114

Tabla 35. Pruebas de LPR .....	116
Tabla 36. Pruebas de Impedancia. ....	116
Tabla 37. Velocidades de corrosión. ....	117

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Celda electroquímica .....	5
Figura 2. Modelo de la doble Capa Eléctrica .....	7
Figura 3. Interfase y circuito eléctrico correspondiente .....	9
Figura 4. Curvas de resistencia a la polarización .....	12
Figura 5. Pendientes Taffel. ....	13
Figura 6. Oscilaciones de la onda seno $E(t)$ y $I(t)$ en el diagrama de tiempo(izquierda), y el diagrama de vectores complejo (derecho) con la amplitud $E_0$ , $I_0$ y su fase correspondiente. ....	16
Figura 7. Presentación de una función compleja $F(w)$ en forma de un diagrama de bode como valor absoluto y fase (izquierda) y representación en parámetros de la parte real e imaginaria de $w$ , Diagrama de Nyquist (derecha). ....	16
Figura 8. La función dependiente del tiempo $f(t)$ puede ser sintetizada por una superposición de ondas senosoidales. En el ejemplo, una función periódica, una función de onda cuadrada, es aproximada por sumas de múltiplos de enteros de una oscilación básica ("síntesis armónica). Sobre el lado derecho está representada la transformada de Fourier $F(w)$ , por ejemplo el espectro de $f(t)$ ,.....	17
Figura 9. Representación esquemática de la Función de Transferencia. ....	19
Figura 10. Configuración simple de tres electrodos usando un electrodo de referencia. ....	27
Figura 11. Configuración simple de dos electrodos usando un electrodo de referencia. ....	28
Figura 12. Sistema Fuzzy general.....	31
Figura 13. Sistema de dos electrodos. ....	40
Figura 14. Configuraciones para un sistema de tres electrodos.....	40
Figura 15. Estructura de igual estado de corrosión en tres diferentes medios, se observa diferencias en las curvas de fase.....	66
Figura 16. Diferencias en la curva de impedancia en tres estructuras de igual estado de corrosión en tres diferentes medios. ....	66
Figura 17. Diagrama de función de transferencia de un sistema .....	68
Figura 18. Representación del sistema SG01 a través de los monitoreos y de las derivadas de sus datos de impedancias. ....	70
Figura 19. Representación del diagrama de polos y ceros del sistema SG01 en cada monitoreo .....	72
Figura 20. Grafica del lugar geométrico de las raíces para el sistema SG01. ....	73
Figura 21. Esquema para un sistema de control aplicado a un sistema electroquímico. ....	74
Figura 22. Diagramas de Bode (arriba), Nichols (medio) y Nyquist (abajo). ....	75
Figura 23. Diagrama de la respuesta al escalón (arriba), respuesta al impulso (medio y abajo) construida por dos métodos diferentes. ....	77

Figura 24. Grafica de Potencial de corrosión para los sistemas monitoreados. ....	79
Figura 25. Velocidades de corrosión en los diferentes monitoreos, en los monitoreos iniciales se observan un incremento de la velocidad de corrosión que estuvo por debajo del máximo,.....	85
Figura 26. EL cambio a través del tiempo de la LPR es muy representativo de los sistemas de acero galvanizado, vemos en el monitoreo 7 que la LPR es muy grande y esta ligada a la alta velocidad de corrosión del sistema. ....	86
Figura 27. El potencial de corrosión muestra el fenómeno de pasivación (monitoreo 6, 9) y activación o rompimiento de la capa de oxido en los demás monitoreos.....	86

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO 1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA POLARIZACION LINEAL ACERO GALVANIZADO .....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO 2 RESULTADOS PRUEBAS DE IMPEDANCIAS PARAMETROS CARACTERISTICOS.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO 3. RESULTADOS PRUEBAS TAFEL VELOCIDADES DE CORROSION .....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO 4. PRUEBAS DE LPR, EIS Y TAFEL EVALUACIÓN DE UNA PROBETA A TRAVÉS DEL TIEMPO EN UNA MISMA SOLUCIÓN.....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO 5. CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN .....</b>	<b>118</b>

**TITULO “IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL  
MONITOREO DE CORROSIÓN EN PATAS DE TORRES DE TRANSMISIÓN  
ELECTRICA”.\***

**JOSÉ JIMMY DÍAZ FAJARDO\*\***

Palabras Claves: Resistencia a la polarización Lineal, Pendientes Taffel, Espectroscopia de Impedancias Electroquímica, Análisis de la respuesta en frecuencia, Lógica Fuzzy, Fundaciones de Torres.

**Resumen:**

La confiabilidad de los sistemas eléctricos en el mundo se ha constituido como parte fundamental en el análisis de sus componentes y de los ambientes en los que se encuentran. Uno de estos ambientes es el suelo, que constituye un medio de corrosión para las patas de las torres de transmisión. El objetivo del proyecto es combinar varias técnicas electroquímicas para determinar indirectamente, en condiciones de laboratorio, el estado de corrosión de las estructuras enterradas (patas) de las torres de transmisión de energía. Por medio de este proyecto se realiza la identificación de los parámetros de tipo eléctrico y electroquímico de mayor importancia para el monitoreo del estado de corrosión de las patas de las torres de transmisión. El análisis incluye la caracterización de un medio corrosivo patrón, en el que se realizan las pruebas de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR), Pendientes Taffel y Espectroscopia de Impedancias Electroquímica (EIS). En el análisis de la información de las pruebas de EIS, se hace un estudio de la respuesta en frecuencia de la celda electroquímica en evaluación y por medio de un análisis no convencional para la interpretación de pruebas electroquímicas, tales como la respuesta al impulso, la respuesta al escalón, entre otras, se extraen patrones de correlación entre el estado de corrosión y las pruebas electroquímicas. Para la iteración de los resultados y el manejo de la información obtenida, se emplea la técnica de Lógica Difusa. Las variables implementadas en el sistema fuzzy y que se recomiendan para el monitoreo de corrosión son: Velocidad de corrosión, Valor máximo de impedancia real del diagrama de Nyquist, Amplitud pico de la respuesta al impulso y al escalón, el potencial de corrosión, pH, Sulfatos, Cloruros, Carbonatos.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Carrera de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director Oscar Gualdrón.

**TITLE “ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES IMPLEMENTATION FOR  
ELECTRICAL TOWERS FOUNDATIONS CORROSION MONITORING”\***

**JOSÉ JIMMY DÍAZ FAJARDO\*\***

**Key words: Linear Polarization Resistance, Tafel Slopes, Electrochemical Impedance Spectroscopy, Frequency Response Analysis, Fuzzy Logic, Towers Foundations.**

**Summary:**

Around the world electrical systems reliability has been regarded as a fundamental in components and surrounding environmental conditions analysis, being soil one of the most important because it represents the main source for corrosion process in transmission towers foundations. This project has been conceived for the evaluation of several electrochemical techniques in order to define, by non direct way and under controlled laboratory conditions, the corrosion present in buried structures of towers that supports energy transmission lines. With this project, as a result, the identification of the most relevant electrical and electrochemical parameters for corrosion monitoring for towers foundations has been settled down. The analysis consider the characterization of reference corrosive media where laboratory tests for Linear Polarization Resistance (LPR), Tafel Slopes (TS) and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) were done. For EIS information study, the response in frequency analysis was carried out on test electrochemical cell and by means of non conventional analysis (i.e. impulse response, stepped response, etc.) for the interpretation of electrochemical tests, was possible to obtain correlation parameters between corrosion state and electrochemical tests. For the iteration of the results and information management fuzzy logic technique was used. The implemented variables in the fuzzy logic system and recommended for corrosion monitoring are: Corrosion Rate, Maximum Real Impedance in Nyquist Diagram, Impulse and Stepped Response Peak Amplitude, Corrosion Potential, pH, Sulfates, Carbonates and Chlorine compounds.

---

\* Degree project.

\*\* Faculty of Physical Mechanics Engineering. Electric , Electronic & Telecommunications Engineering. Project Head Oscar Gualdrón, PhD.

## 1 INTRODUCCION

Uno de los principales objetivos del sector eléctrico ha sido incrementar progresivamente los niveles de confiabilidad en todos sus sistemas eléctricos. En el caso específico de las líneas de transmisión, una falla de sus componentes ocasiona costos superiores a los cien millones de pesos, considerando únicamente el rubro por mantenimiento y sin tener en cuenta las implicaciones económicas contractuales que se derivan debido a la suspensión del servicio.

Las fallas que presentan en su mayoría las torres de transmisión están relacionadas directa o indirectamente con el hecho de que ellas se encuentran en interacción con atmósferas y/o suelos corrosivos. El problema de corrosión es de gran importancia para las empresas de transmisión de energía eléctrica, especialmente en las fundaciones de las torres donde se genera alto nivel de riesgo, ya que se ve afectada la integridad de la estructura enterrada y por consiguiente de la torre; en virtud de su inobservancia y la difícil apreciación del problema.

En la actualidad el tratamiento preventivo que se le da a este problema consiste en programas de inspección basados en apiques (excavación alrededor de la fundación) y el diagnóstico está basado en la inspección visual de la estructura. La metodología del apique es costosa, a razón de un millón de pesos por procedimiento y ofrece poco rendimiento.

Los tres factores señalados a saber, el alto riesgo para la integridad de la estructura, el alto costo en la metodología actual y el bajo rendimiento de la misma justifican desarrollar e implementar una técnica de monitoreo predictiva, que sin necesidad de realizar apiques permita determinar el nivel de corrosión de las estructuras enterradas.

## **2. GENERALIDADES**

### **2.1. OBJETIVOS**

Combinar varias técnicas electroquímicas para determinar indirectamente, en condiciones de laboratorio, el estado de corrosión de las estructuras enterradas (patas) de las torres de transmisión de energía.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Realizar en laboratorio pruebas de tipo electroquímico que indiquen el estado de corrosión de una estructura inmersa en un medio agresivo.
- Evaluar la confiabilidad de las medidas electroquímicas realizadas con las técnicas seleccionadas.
  - Caracterizar la respuesta en frecuencia de los sistemas electroquímicos evaluados.

### **2.3. ALCANCE**

Por medio de este proyecto se realiza la identificación de los parámetros de tipo eléctrico y electroquímico de mayor importancia para el monitoreo del estado de corrosión de las patas de las torres de transmisión.

### 3. FUNDAMENTACIÓN TEORICA

#### 3.1. QUÉ ES LA CORROSIÓN?

Cuando se define corrosión los protagonistas son los metales y el ambiente en que ellos se encuentran. La corrosión, en el sentido más amplio, es un fenómeno natural, por medio del cual los sistemas químicos expresan su tendencia hacia un estado de equilibrio estable. Generalmente se define como la destrucción o deterioro de un material a causa de su reacción química con el medio ambiente.

En la corrosión hay reacciones de elementos metálicos con no metálicos, originando los productos de corrosión.



La corrosión es considerada un fenómeno interfásico, donde la interfase puede ser:

- Sólido - Gas
- Sólido - líquido
- Sólido – líquido - Gas

La naturaleza de la electroquímica provee un principio para determinar un promedio de la corrosión instantánea.

### 3.2. QUÉ ES LA ELECTROQUÍMICA?

Generalmente la electroquímica se presenta como la rama de la química asociada con los fenómenos eléctricos, y está relacionada con el flujo de electricidad en soluciones iónicas así como con la producción o uso de energía eléctrica asociada con las reacciones químicas. Para lograr un mayor entendimiento del proceso corrosivo, es de gran utilidad usar el concepto de celda electroquímica.

Una celda electroquímica sencilla, está compuesta de dos placas metálicas, X y Y inmersas en una solución iónica llamada electrolito. Una corriente eléctrica generada espontáneamente por la celda o impresa por un generador externo, fluyen a lo largo de la trayectoria X-W-Y-SX en un alambre externo y en la solución (Figura 1).

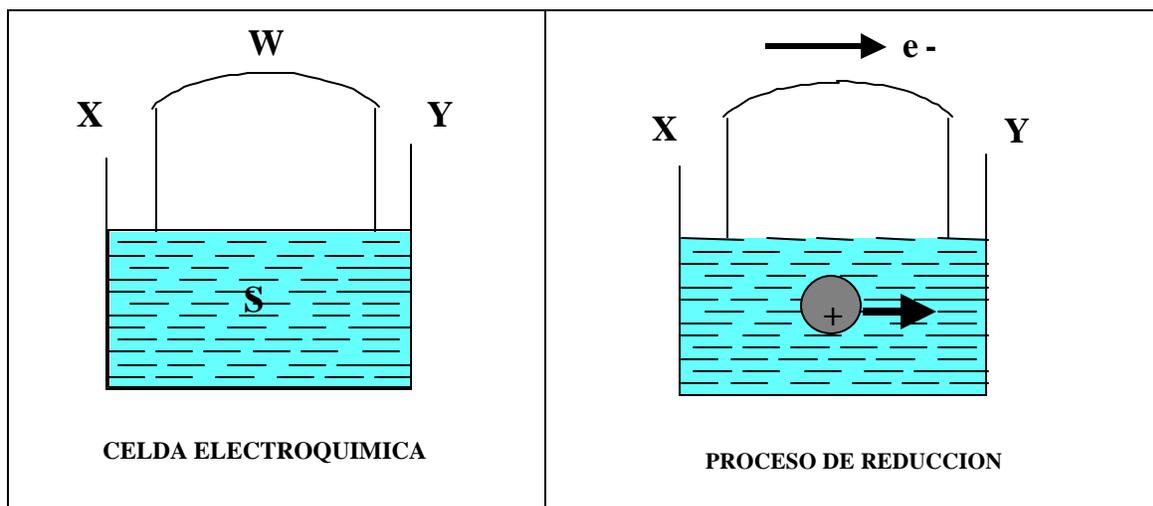
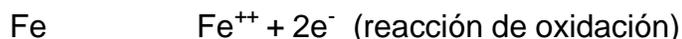


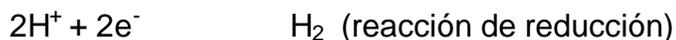
Figura 1 Celda electroquímica

La corriente es transportada por los electrones en un conductor metálico desde X hasta Y, y por iones en la solución de Y a X. En las interfaces metal solución, hay un cambio en la naturaleza de las partículas que transportan la electricidad; se dice entonces, que toma lugar una reacción electroquímica generada entre electrones y iones. Las reacciones químicas que se suceden son denominadas reacciones de reducción cuando un catión se mueve dentro de la solución hasta llegar al metal recibiendo electrones; o reacción de oxidación cuando la especie química pierde electrones.

Este proceso puede ser ilustrado mediante el fenómeno observado cuando se introduce una placa de acero o hierro en una solución de agua-ácido. El hierro en contacto con el ácido se oxida



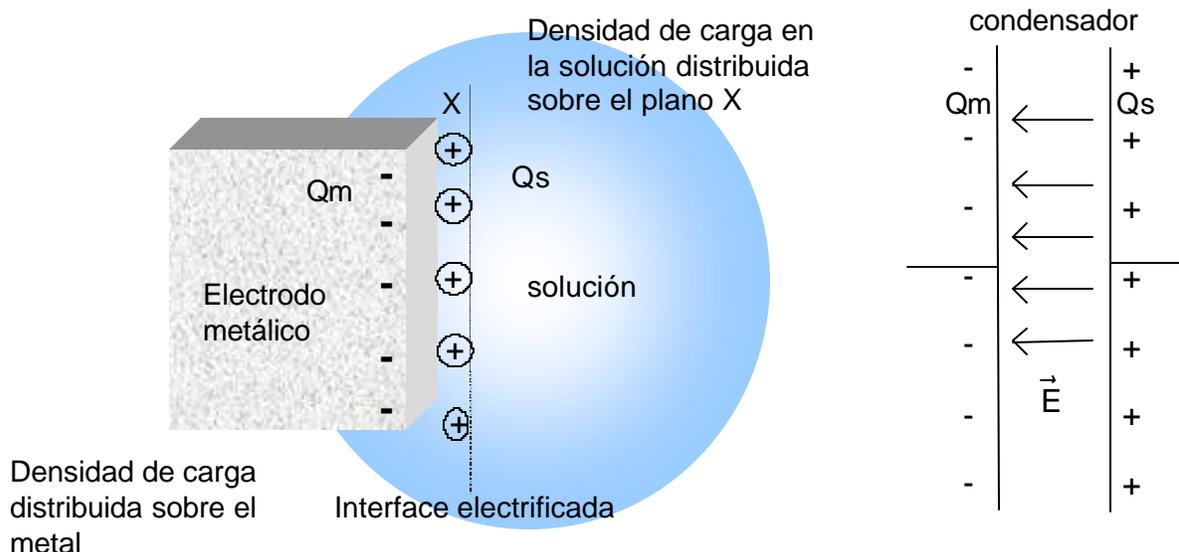
Cada átomo del metal pierde dos electrones. Debido a la presencia de iones  $\text{H}^{+}$  en la solución acuosa, se genera la reacción de reducción.



Aceptando los electrones ofrecidos por el metal de hierro.

Esta reacción ocurre en la interfase metal solución. Una partícula cargada positivamente o catión ( $\text{Fe}^{++}$ ), es arrancada del metal y va hacia la solución, mientras que los dos electrones liberados permanecen en el metal, el resultado es una separación de carga eléctrica. El catión deja el metal, mientras los electrones permanecen en él. Los cationes forman una capa cargada positivamente sobre el lado de la solución, mientras que los electrones en el metal forman una capa cargada negativamente, creándose una doble capa eléctrica. Los iones cargados

positivamente son retenidos por la carga negativa en el metal y son repelidos por la capa positiva de cationes en la solución. (Figura 2)



**Figura 2. Modelo de la doble Capa Eléctrica**

La ocurrencia simultánea de estas reacciones en la interfase metal – solución previene una acumulación excesiva de cargas separadas y permite la destrucción del metal (corrosión).

Estas reacciones son llamadas reacciones de electrodo. Un electrodo puede ser definido como la interfase entre un metal y una solución a través de la cual resulta una transferencia de carga a partir de una reacción electroquímica.

En conclusión, el proceso de corrosión es el fenómeno químico asociado con la separación de cargas, y así mismo esta separación de carga lleva a un proceso eléctrico de transferencia de carga, el cual puede ocurrir homogéneamente en la solución o heterogéneamente en la superficie del electrodo. Para asegurar la

electroneutralidad o equilibrio de cargas (cationes y aniones), dos o más transferencias de carga toman lugar, en direcciones opuestas.

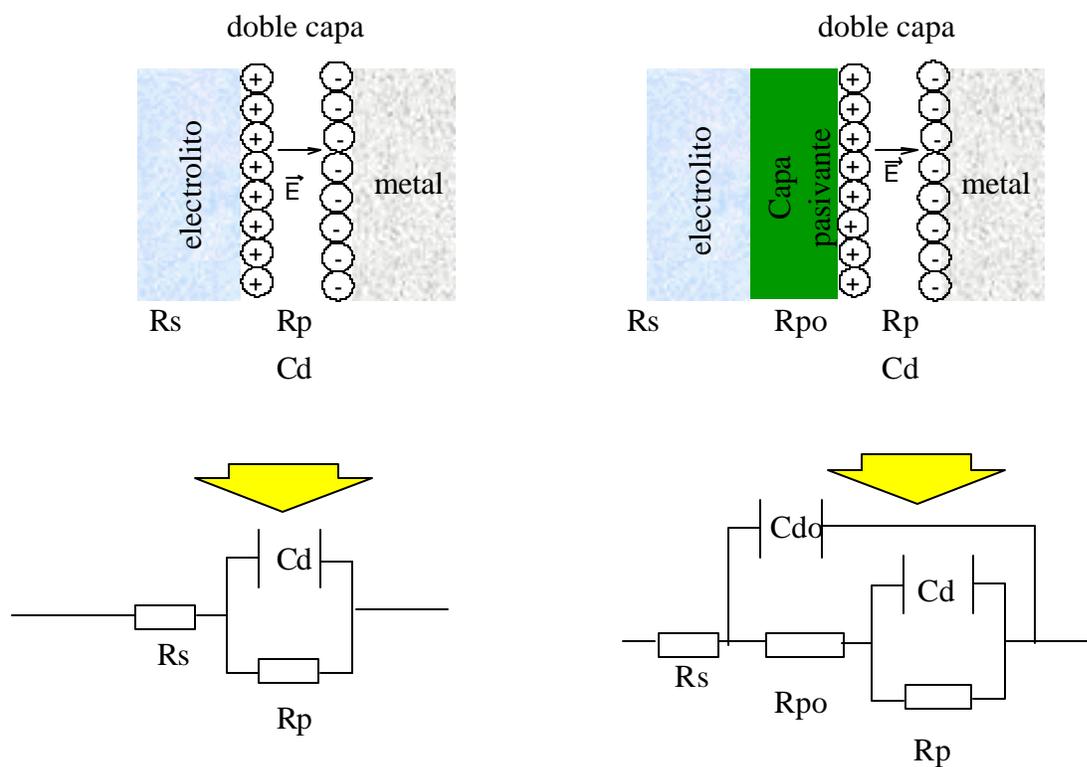
### **3.3. MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS PARA ESTIMAR EL ESTADO DE CORROSIÓN**

El potencial de un electrodo es función del flujo de corriente que circula a través de él. Para interpretar cualitativa y cuantitativamente el funcionamiento de la pila de corrosión es imprescindible conocer antes la clase de relaciones que se plantean entre densidad de corriente y potencial del ánodo y cátodo.

Cualquier material metálico sumergido en un medio corrosivo tiene un potencial característico en ausencia de influencias externas, que se conoce por potencial de reposo, en circuito abierto o de corrosión ( $E_{corr}$ ). Externamente se puede actuar sobre el sistema imponiéndole un potencial y registrando la intensidad o viceversa. Al valor de  $E-E_{corr}$  medida de la modificación impuesta desde afuera, es lo que se conoce como polarización y la relación que se establece entre el potencial y la intensidad como curva de polarización.

Existe una serie electroquímica que caracteriza a todos los metales, la cual se mide con respecto a un electrodo estándar que corresponde al electrodo de hidrógeno con un potencial cero. Dentro de los parámetros que influyen sobre la cinética de la corrosión se encuentran los relacionados con las características de la solución, como por ejemplo la conductividad y la presencia de un recubrimiento sobre el metal. A manera de ejemplo, los crudos son soluciones de muy baja conductividad con los cuales es difícil polarizar un electrodo metálico, por esto se le agregan cloruros o se mezcla el crudo con agua para formar emulsiones y así poder polarizar el electrodo. Dependiendo de los parámetros se pueden crear

diferentes modelos del sistema a estudiar. En el modelo simple se tiene un medio ácido de relativamente alta conductividad, un metal, una interfase y un arreglo de cargas en el espacio; este modelo se puede esquematizar como un circuito equivalente, en donde se tiene la resistencia a la solución, la resistencia a la polarización y una doble capa (Figura 3).



**Figura 3. Interfase y circuito eléctrico correspondiente**

Los procesos electroquímicos que suceden durante el proceso de corrosión pueden producirse con diferentes velocidades, así, cuando ocurre un proceso lento, la impedancia que este elemento ofrece al transporte de iones es bastante alta pero cuando ocurre un proceso rápido, la situación se asemeja a un corto circuito, de manera que los iones no pasan a través de la resistencia eléctrica que el arreglo de cargas ofrece en la interfase.

Los métodos electroquímicos comunes para medir la intensidad de corrosión de un electrodo metálico se basan en señales de corriente alterna y en señales de corriente directa. En los métodos de corriente directa, cuando se polariza un electrodo ocurren desordenes en la interfase, se presenta un intercambio iónico, se oxida el metal y ocurren procesos de reducción. A pesar de que se polarizan más o menos a 20 mV, ocurren de todas maneras procesos electroquímicos en la interfase. Igualmente cuando se polariza el electrodo con una fuente de corriente alterna y con un potencial muy bajo, 10 o 15 mV, ocurre una oscilación de la doble capa y también ocurren reacciones electroquímicas en la interfase.

Cuando se quiere polarizar un electrodo, se debe tener una señal de excitación eléctrica que al inducirla permita medir la corriente y el potencial. El potencial se mide con respecto al electrodo de referencia mientras que la corriente es aquella que circula entre el contraelectrodo y el electrodo de trabajo. Esto proporciona una serie de parámetros de los cuales es conveniente realizar un monitoreo para hacer los cálculos respectivos.

La corrosión sucede pues, gracias a la formación y movimiento de partículas con carga eléctrica y a los procesos parciales anódicos y catódicos les corresponde una intensidad proporcional a la velocidad del fenómeno. Esta afortunada situación hace que sea posible estimar la velocidad de corrosión midiendo magnitudes eléctricas.

**3.3.1. Resistencia a la polarización.** El procedimiento se basa en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno de  $E_{corr}$ . y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión.

En la práctica se aplica una pequeña polarización o  $\Delta E$  de  $\pm 20$  mV generalmente y se mide el  $\Delta i$  correspondiente, dando nombre al método el hecho que las dimensiones del cociente  $\Delta E/\Delta i$  sean las de una resistencia.

La ventaja esencial de este método reside en que las polarizaciones aplicadas son tan pequeñas que prácticamente no se afecta el electrodo en el proceso de medida y una misma probeta permite innumerables medidas y seguir la evaluación del proceso de corrosión con el tiempo.

En general cuando se polariza un sistema electroquímico con un potencióstato se tienen dos curvas características: la de reducción y la de oxidación. La suma de estas curvas produce una curva neta en la que se tiene una porción lineal y dos porciones logarítmicas.

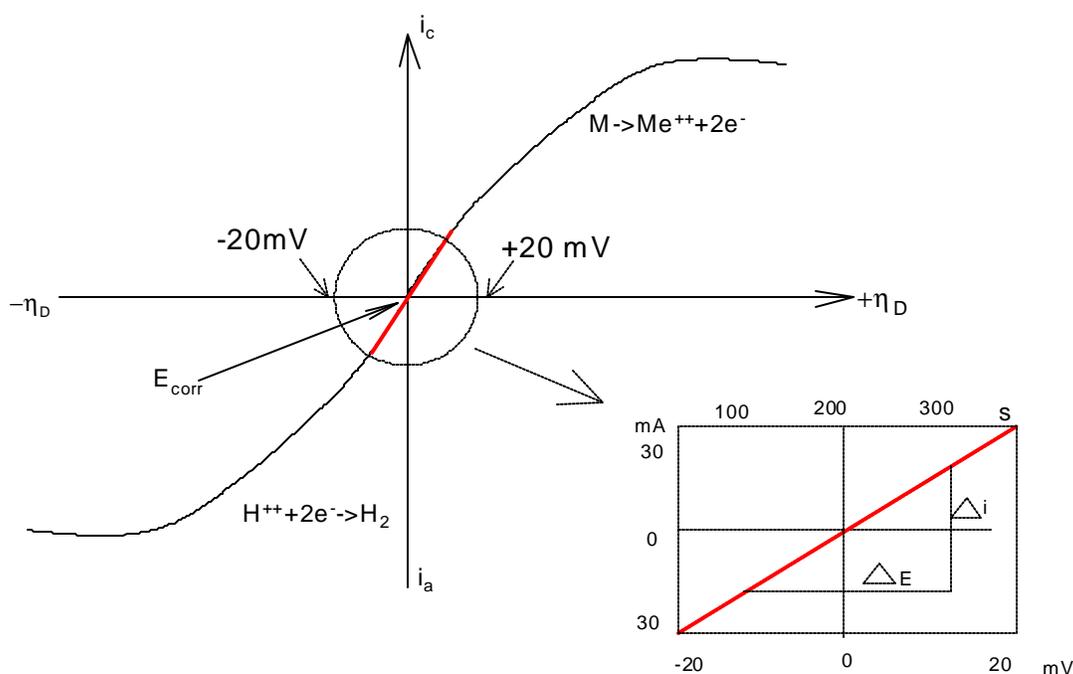
En la técnica de resistencia a la polarización, se escoge la porción lineal cuando se saca el electrodo del equilibrio; en esta región se puede determinar la resistencia como la pendiente de esa porción lineal. Dicha resistencia corresponde a la que está ofreciendo la interfase para que las cargas eléctricas se muevan a través de ella. Una vez se ha determinado la intensidad de corrosión del metal y la resistencia, a través de esta curva, se puede calcular la velocidad de corrosión, mediante la siguiente expresión:

$$V_{corr.} = 0.13 (I_{corr} \times E_w) / d$$

$$E_w/d = W_m / n.$$

**Ecuación 1. Ecuación para el cálculo de la velocidad de corrosión**

Donde  $V_{corr}$  es la velocidad de corrosión expresada en mpy,  $E_w$  corresponde al peso equivalente y  $d$  es la densidad,  $W_m$  es el peso del material y  $n$  es el número de electrones definidos. (Figura 4).

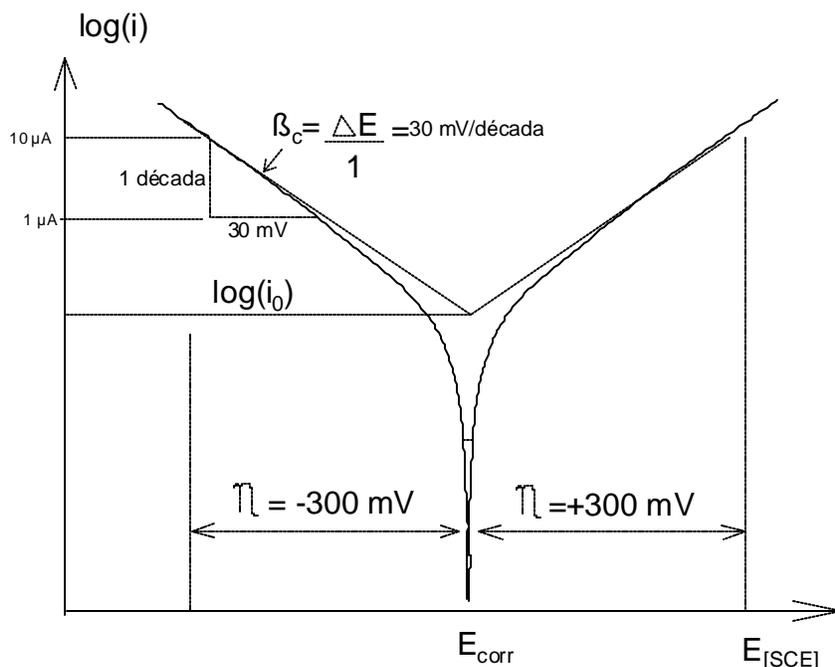


**Figura 4. Curvas de resistencia a la polarización**

**3.3.2. Pendientes Taffel.** Otra técnica necesaria para establecer la velocidad de corrosión, es el método de las pendientes anódica ( $\beta_a$ ) y catódica ( $\beta_c$ ) de las curvas Taffel, en el cual se ubican las curvas de polarización en un diagrama semilogarítmico (Figura 5). Cuando se tiene una película pasiva, hacer resistencia a la polarización es difícil, por eso se deben aplicar potenciales de sobre polarización ( $\eta$ ) mayores con el objetivo de obtener una respuesta de la celda electroquímica. La técnica de Taffel es destructiva desde el punto de vista de la interfase ya que la desordena, lo cual provoca el movimiento de iones que cambian el estado de equilibrio de la misma. Cuando se polariza con potenciales muy altos, para determinar el grado de pasividad del metal, no hay ninguna ecuación que describa estos procesos, de manera que se realiza un análisis empírico del proceso de corrosión.

En la figura 5 se puede observar una curva Taffel, sobre ella vemos la pendiente que se traza en la parte catódica (izquierda) y la pendiente anódica (derecha), las

pendientes se deben cortar sobre el potencial de corrosión. El punto donde se encuentran las pendientes es el logaritmo de la corriente de corrosión. La polarización de la prueba se hace aplicando al sistema  $\pm 300$  mV.



**Figura 5. Pendientes Tafel.**

### 3.3.3. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

**3.3.3.1. Impedancia.** Las propiedades fisicoquímicas de los objetos podrían estar representadas en las propiedades de las impedancias eléctricas. En cualquier circuito eléctrico se pueden observar dos polos donde el flujo de corriente depende de diferentes factores.

La resistencia óhmica y la resistencia diferencial son los elementos más importantes en las EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy). Por ejemplo, la reacción de la resistencia del electrolito (valor inverso de la conductividad), la

resistencia de la capa de óxido y la resistencia de los electrodos de grafito se clasifican dentro de las resistencias óhmicas. Los procesos activos se pueden clasificar como resistencias diferenciales, por ejemplo el flujo de corriente por medio de capas barrera de semiconductores o las reacciones de transferencia de electrones.

**3.3.3.2. Capacitancias.** Es la forma más elemental de memoria electrónica; dos superficies metálicas opuestas forman un dipolo. Cuando una corriente  $I$  es enviada a través de sus conexiones aparece un potencial  $E$ , no similar a la resistencia óhmica, que será constante pero dependiente del tiempo.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{I}{C} \quad E(t) = E_0 + \frac{1}{C} * \int_{t_0}^t I dt \quad \text{Ecuación 2. Ecuación del dipolo}$$

$$C_{diff}(E) = \frac{1}{\frac{dE}{dt}} \quad \text{Ecuación 3. Característica capacitiva}$$

El comportamiento capacitivo de la impedancia es tan elemental como el comportamiento resistivo. La superficie del metal y el electrolito forman el capacitor. La doble capa electroquímica (doble capa capacitiva ( $C_D$ ) de la barrera de potencial justo antes de la superficie del electrodo), o recubrimientos de óxido, lacas y otros recubrimientos trabajan como dieléctrico; estas son en general dependientes del potencial. La estructura del campo eléctrico afecta la alteración del potencial del capacitor por desplazamiento de carga (los portadores de esta carga son electrones). En las reacciones electroquímicas el transporte de las grandes cantidades de carga puede ser realizado por el transporte de masa.

**3.3.3.3. Inductancias.** En este caso el medio almacenado es un campo magnético que rodea un conductor portador de corriente; cuando un circuito es cerrado con un conductor ideal, el rizado de corriente afecta el campo magnético, lo cual genera un voltaje inductivo opuesto al de alimentación.

$$\frac{dI}{dt} * L = E \quad I(t) = I_0 + \frac{1}{L} * \int_{t_0}^t E * dt \quad \text{Ecuación 4. Corriente inductiva}$$

El comportamiento inductivo puede observarse, cuando el flujo de corriente influye reversiblemente la porción de superficie activa del material, por ejemplo en sistemas donde inician los procesos corrosivos.

**3.3.3.4. Noción compleja de impedancia.** En el caso complejo, el voltaje entre los dos polos es directamente proporcional a la corriente entre los dos polos y en este caso la constante de corriente es independiente del tiempo. Frecuentemente la E (I) es independiente del tiempo, pero no lineal. En este caso es común indicar una resistencia diferencial.

$$R_{diff}(E) = \frac{dE}{dI} \quad \text{Ecuación 5. Resistencia diferencial}$$

A continuación encontramos las ecuaciones de voltaje y corriente para un dipolo

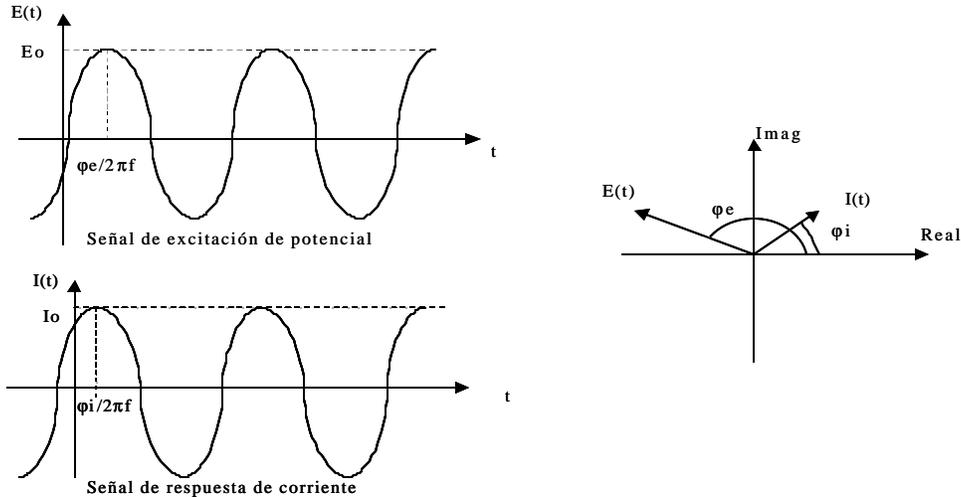
$$E(t) = E_0 * \cos(\omega t + \phi_u) \quad I(t) = I_0 * \cos(\omega t + \phi_i)$$

**Ecuación 6. Voltaje y corriente del dipolo**

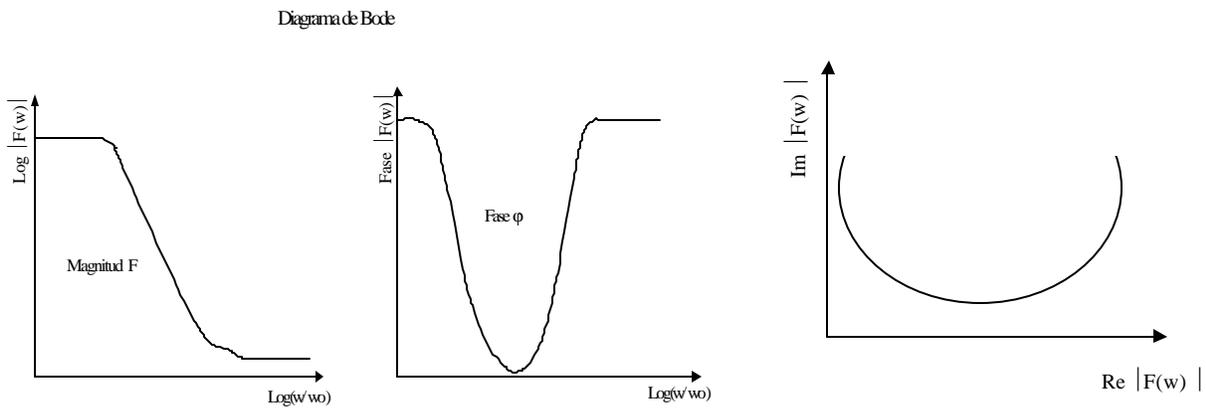
$E_0$  e  $I_0$  son las amplitudes,  $\phi_u$  y  $\phi_i$  son las fases de E (t) y I (t).

La impedancia se puede escribir como:

$$Z(f) = \frac{E_o}{I_o} * e^{ij} \quad j = j_e * j_i \quad \text{Ecuación 7. Impedancia compleja}$$

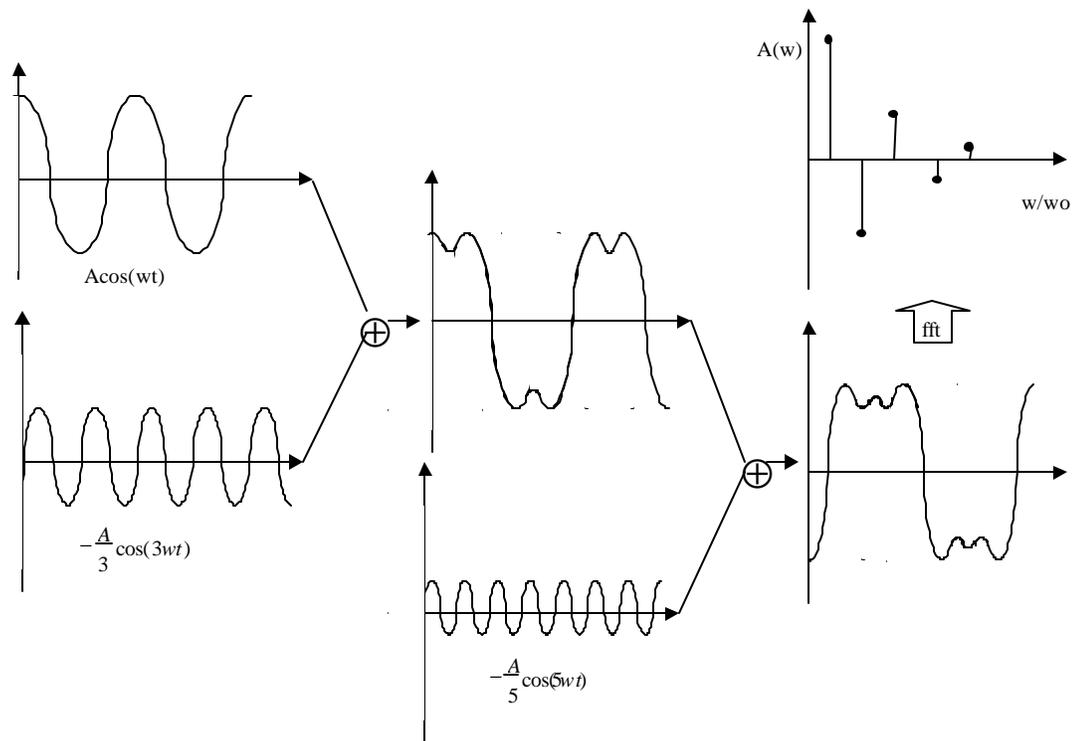


**Figura 6. Oscilaciones de la onda seno E(t) y I(t) en el diagrama de tiempo(izquierda), y el diagrama de vectores complejo (derecho) con la amplitud Eo, Io y su fase correspondiente.**



**Figura 7. Presentación de una función compleja F(w) en forma de un diagrama de bode como valor absoluto y fase (izquierda) y representación en parámetros de la parte real e imaginaria de w, Diagrama de Nyquist (derecha).**

j es la parte imaginaria. La impedancia Z es un análogo de la resistencia de ohm pero de valor complejo.



**Figura 8.** La función dependiente del tiempo  $f(t)$  puede ser sintetizada por una superposición de ondas senosoidales. En el ejemplo, una función periódica, una función de onda cuadrada, es aproximada por sumas de múltiplos de enteros de una oscilación básica ("síntesis armónica). Sobre el lado derecho está representada la transformada de Fourier  $F(\omega)$ , por ejemplo el espectro de  $f(t)$ ,

Un procedimiento usual en la ingeniería eléctrica es construir por medio de elementos eléctricos funciones de transferencia; con la EIS se realiza el procedimiento contrario. La impedancia total está compuesta de una serie de impedancias simples como la resistencia del electrolito  $Z_{el}$ , la impedancia de la doble capa electroquímica  $Z_{ds}$  y la impedancia de la masa metálica. La impedancia del electrolito puede ser considerada para las frecuencias de interés de la EIS como una resistencia óhmica.

$$R_{el} = \frac{l}{a * s}$$

$l$  = ancho de la capa electrolítica entre la doble capa y el plano equipotencial

$a$  = sección transversal del electrolito

$s$  = conductividad específica del electrolito

### **Ecuación 8. Resistencia electroquímica**

Esta "resistencia electrolítica" es una parte inevitable en todas las medidas de impedancia de los sistemas que contienen electrolito. En la capacitancia, aparece por un lado la superficie del metal y por otro lado el plano equipotencial. La conductividad casi nula de la doble capa, causada por la transición de los diferentes mecanismos de conductividad (electrónica y conducción iónica), toma características de dieléctrico.

$$C_D = \frac{a * \epsilon * \epsilon_0}{d}$$

$a$  = sección transversal del plano equipotencial de la doble capa

$\epsilon, \epsilon_0$  = constante dieléctrica del dieléctrico y del vacío

$d$  = ancho de la doble capa

### **Ecuación 9. Capacitancia Electroquímica.**

## **3.4. ANALOGÍA ELÉCTRICA**

Las reacciones de los electrodos son heterogéneas y toman lugar en la región interfacial entre el electrodo y la solución denominada doble capa eléctrica. Dicha capa es caracterizada por dos capas de carga opuesta, como un capacitor, sin embargo, la corriente eléctrica puede pasar a través de la interfase metal – solución, aunque exista una resistencia. El electrodo puede ser representado eléctricamente por una capacitancia en paralelo o una resistencia Faradaica. (Figura 2)

El capacitor muestra la forma más elemental de memoria electrónica; si la diferencia de las cargas entre sus placas no es nula, se puede desarrollar un campo eléctrico homogéneo entre ellas. El potencial absoluto del dipolo es proporcional a la intensidad del campo entre sus placas.

Un sistema de tipo electroquímico presenta un comportamiento similar a un sistema eléctrico. Al excitar este sistema con una señal externa se obtiene una respuesta típica del comportamiento de dicho sistema; al variar su excitación, este proporciona una respuesta diferente. Para cada señal de entrada existe una señal de salida propia del sistema.

La función que relaciona la salida y la entrada se conoce como función de transferencia, la cual es característica de cada sistema y describe el comportamiento del mismo a través del tiempo. En la literatura revisada no se encontró reportado el uso de la función de transferencia como herramienta de análisis para sistemas electroquímicos, de tal forma que desde la perspectiva del autor el uso propuesto en este trabajo experimental es original. A partir de esta función de transferencia se puede realizar un análisis del sistema desde diferentes puntos de vista.



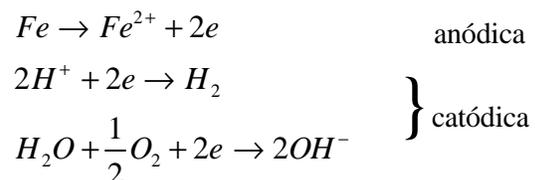
**Figura 9. Representación esquemática de la Función de Transferencia.**

Como se mencionó con anterioridad, la espectroscopia de impedancia electroquímica utiliza la respuesta obtenida de un sistema electroquímico, ante un barrido de voltaje a diferentes frecuencias. Se propone utilizar mecanismos propios del análisis de sistemas para la interpretación de dicha información. Entre las posibles alternativas se encuentran los diagramas de Bode, diagramas de Nyquist, el análisis de Nichols, los diagramas de polos y ceros, y naturalmente, la respuesta al impulso así como la respuesta al escalón. La gráfica de frecuencia contra fase y frecuencia contra la magnitud de la impedancia, conocido en el análisis de sistemas como el diagrama de Bode puede ser muy útil en electroquímica para la interpretación del comportamiento del sistema frente a la formación de capas de corrosión. Otra forma de análisis de la respuesta en frecuencia corresponde al diagrama de Nyquist donde se visualiza la impedancia real contra la impedancia imaginaria. El análisis de Nichols interpreta la fase contra la ganancia en lazo abierto de la función de transferencia, análisis poco usado en la interpretación electroquímica. La respuesta obtenida de una señal escalón y una señal de impulso aplicada a la función de transferencia determina el comportamiento del sistema y es única para cada uno de ellos. El comportamiento de los polos y los ceros de la función de transferencia del sistema, a través del tiempo, puede estar asociada con cambios en la estructura superficial del elemento metálico bajo estudio, tales como capas de óxido y productos de corrosión.

Los análisis propuestos anteriormente no han sido tenidos en cuenta desde el punto de vista electroquímico y son sugeridos para su aplicación en este trabajo experimental.

### 3.5. CORROSIVIDAD EN SUELOS.

Un metal enterrado, al igual que uno sumergido, podrá sufrir ataque corrosivo con mayor o menor intensidad dependiendo de la naturaleza del metal y de la agresividad del medio. La corrosión en suelos es de naturaleza electroquímica, donde hay una reacción anódica, de paso de metal a forma iónica, con cesión de electrones, y otra catódica de descarga de hidrógeno, con captación de electrones:



Siendo la reacción catódica habitual en suelos neutros o alcalinos.

Al contrario de lo que ocurre con metales inmersos en un líquido, o en un gas, en que se puede suponer un medio homogéneo, los suelos son un medio muy complejo, en el que no solamente se tiene una variación en el tamaño de partícula, sino que existen cambios en los materiales que forman dichas partículas, la compactación y por ende la difusión de oxígeno a través de él.

Así mismo los suelos están constituidos por sustancias total o parcialmente solubles en agua, como ocurre con los cloruros, los bicarbonatos alcalinotérreos, y el sulfato cálcico; son estas sales solubles y la humedad quienes le confieren a un suelo su poder corrosivo. A continuación se enunciarán los factores que desde el punto de vista corrosivo tienen mayor incidencia sobre los metales enterrados.

Los factores de mayor incidencia en la corrosividad del suelo son:

**3.5.1. Porosidad del terreno.** Volumen relativo de los espacios vacíos con relación al volumen aparente total de una masa dada de tierra; la corrosión es máxima cuando la relación entre humedad y porosidad es del orden de 0.5.

**3.5.2. Humedad del terreno.** En un suelo seco la humedad es despreciable, debido a que su resistividad es extraordinariamente elevada y por ello las pilas de corrosión que se formen son nulas; en suelo saturado de agua, por dificultarse el acceso de oxígeno hasta la estructura no se favorece la reacción catódica, con lo que el ataque corrosivo será escaso. En el caso de nivel intermedio de humedad se suele tener valores de corrosión más elevados.

**3.5.3. Resistividad del terreno.** Quizás sea la propiedad más significativa en la evaluación de la corrosividad del terreno. La resistividad está asociada con la transferencia de carga entre un metal y el terreno, una menor resistividad proporciona mayor transferencia de carga, o sea mayores velocidades de corrosión. En la siguiente tabla se pueden ver los valores típicos encontrados en la literatura y su característica corrosiva.

**Tabla 1. Corrosividad del suelo en función de la resistividad.**

Resistividad	Característica corrosiva del suelo
< 900 $\Omega \cdot \text{cm}$	muy corrosivos
900-2300 $\Omega \cdot \text{cm}$	bastante corrosivos
2300-5000 $\Omega \cdot \text{cm}$	moderadamente corrosivos
5000-10000 $\Omega \cdot \text{cm}$	ligeramente corrosivos
> 1000 $\Omega \cdot \text{cm}$	muy ligeramente corrosivos

**3.5.4. Efecto del pH.** Un suelo está formado, fundamentalmente, por el resultado de la disgregación de rocas y así según fuesen las rocas originales así será también el terreno resultante. El grado de división es lo que da lugar a arenas, limos y arcillas. Sin embargo, estos suelos iniciales pueden contener, además, otros muchos productos, como materia orgánica, abonos químicos, contaminación industrial o doméstica, entre otros.

**Tabla 2. Corrosividad del suelo en función del pH.**

PH	Medio	Comportamiento
<4	Ácido muy fuerte	Muy agresivo
4.0-4.5	Muy ácido	
4.5-5.0	Ácido	
5.0-6.0	Moderadamente ácido	
6.0-6.5	Poco ácido	Agresivo
6.5-7.5	Neutro	No agresivo
7.5-8.5	Poco alcalino	
>8.5	Muy alcalino	Condicionado

**3.5.3. Potencial redox.** Este valor sirve para predecir el riesgo de corrosión anaerobia que puede sufrir una estructura enterrada. Los valores de potencial red-ox, en función del posible riesgo de corrosión anaerobia del suelo son los que se indican a continuación:

**Tabla 3. Corrosividad del suelo en función del potencial red - ox**

Potencial redox	Agresividad del suelo
<100 mV	Muy agresivo
100-200 mV	Moderadamente agresivo
200-400 mV	Débilmente agresivo
>400 mV	No agresivo

**3.5.4. Salinidad.** Los suelos están constituidos principalmente por: sílice, silicatos simples o complejos de diversos metales como por ejemplo, el Calcio, el Manganeseo, óxidos de Aluminio, carbonatos de Hierro, que son insolubles.

Sin embargo hay otro tipo de sales, en menor proporción, que se disuelven en agua y contribuyen extraordinariamente a la conductividad del suelo, tal es el caso de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ , y de los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{--}$ , además de los bicarbonatos que se forman a partir de los carbonatos cuando estos se hallan en presencia de anhídrido carbónico.

La concentración de las diferentes sales encontradas hace variar la corrosividad. En la práctica se encuentra una clara relación entre la concentración de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{--}$  y la corrosión resultante. En la tabla se puede observar la pérdida de espesores de la estructuras al estar expuesta a los aniones y cationes mencionados.

**Tabla 4 .Corrosividad del suelo en función de algunas sales.**

Anión principal	Agresividad media
$\text{HCO}_3^- > 1/2 \text{ NE}$	0.2 mm en 10 años
$\text{SO}_4^{--} > 1/2 \text{ NE}$	0.75 mm en 10 años
$\text{Cl}^- > 1/2 \text{ NE}$	0.2 mm en 10 años
Catión principal	Agresividad media
$\text{Na}^+ > 1/2 \text{ NE}$	0.84 mm en 10 años
$\text{Ca}^{++} > 1/2 \text{ NE}$	0.55 mm en 10 años

**3.5.5. Corrientes vagabundas.** Son aquellas corrientes eléctricas que circulan a través de un electrolito, en este caso el suelo, fuera de los circuitos previstos. Este fenómeno corrosivo, conocido también como electrólisis, puede ser extraordinariamente intenso con la corriente continua, sobre todo en los puntos de retorno a las líneas de alimentación.

Las medidas de las corrientes vagabundas se hacen en la práctica con 2 electrodos de referencia. Se usa como electrodo de referencia el Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado. De acuerdo con el gradiente de potencial se clasifican las corrientes vagabundas como:

**Tabla 5 .Corrosividad del suelo en función de las corrientes vagabundas.**

Gradiente de potencial	Características
Menos de 0.5 mV/m	Corr vagabundas. Débiles
0.5-5 mV/m	Corr. Vagabundas. Medianamente intensas
Mas de 5 mV/m	Corr. Vagabundas. Intensas

### **3.6. CONFIGURACIÓN TÍPICA DE LAS CELDAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS CORROSIVOS.**

Las celdas utilizadas para la evaluación electroquímica en general tienen tres electrodos. Un electrodo de referencia, un contraelectrodo y el electrodo de trabajo que constituye el elemento a evaluar. Estas configuraciones varían de

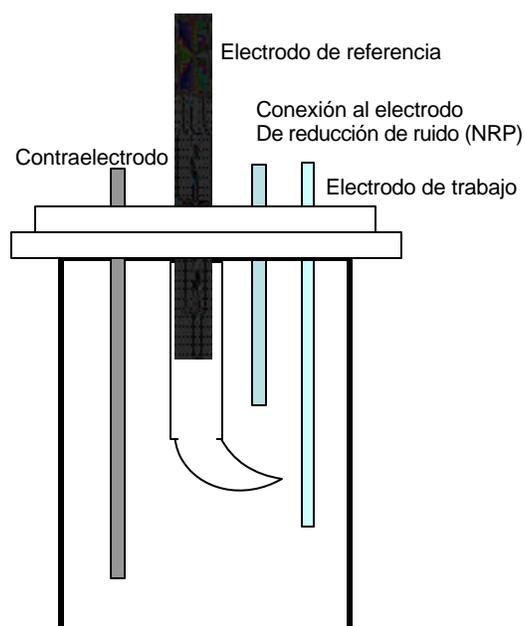
acuerdo a las necesidades de corriente a registrar y del tipo de electrolito a evaluar. Para el caso de este trabajo experimental se requiere registrar corrientes muy pequeñas en algunos casos donde los electrolitos son poco conductores y por tal motivo se debe escoger muy bien el tipo de celda a utilizar.

A continuación se describen las configuraciones de uso común para la evaluación electroquímica y sus características.

**3.6.1. Configuración simple de tres electrodos usando un electrodo de referencia.** Este tipo de celda puede ser adecuado particularmente cuando los experimentos se realizan durante un período corto de tiempo de manera que cualquier deriva en el potencial del electrodo de referencia es pequeña. Esta configuración puede ser beneficiosa también cuando la interferencia con la alimentación es un problema. La celda tiene un electrodo de referencia, un contra electrodo de material inerte (que no tenga reacción con el electrolito) y el electrodo de trabajo, que es el material a evaluar.

Para esta configuración de celda se pueden usar dos tipos de electrodos de referencia; un electrodo metálico o un electrodo de Referencia comercial, normalmente un electrodo de Calomel Saturado o un electrodo de Ag/AgCl. En algunos casos se puede desear usar una sonda de reducción de ruido, para disminuir el ruido sobre la señal de polarización de la alimentación sobre el electrodo de trabajo.

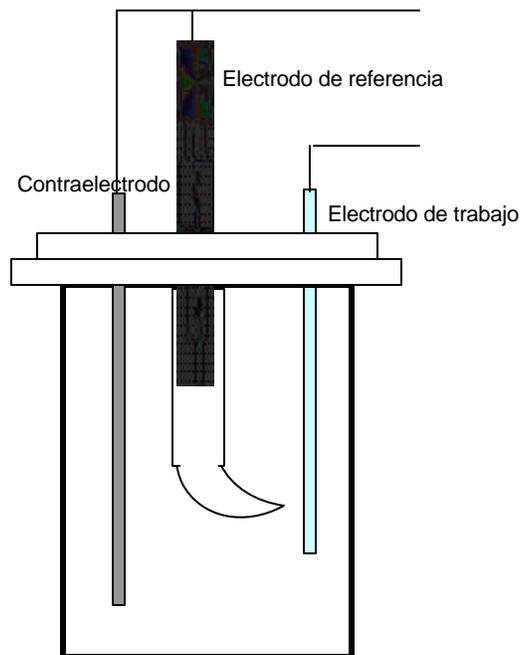
Se pueden realizar experimentos electroquímicos o bien sobre un electrodo individual (WE1) o sobre un par galvánico de electrodos (WE1, WE2). En este último caso, los dos electrodos se comportan como si fuesen un electrodo simple.



**Figura 10. Configuración simple de tres electrodos usando un electrodo de referencia.**

**3.6.2. Configuración simple de dos electrodos usando un electrodo de referencia.** Esta configuración es usada normalmente para experimentos con dos electrodos tipo LPR. En esta configuración solo se usa la sonda central de dos electrodos.

El Electrodo Auxiliar y el Electrodo de Referencia están puenteados entre ellos, mientras que WE1 se conecta al otro terminal del equipo. En esta situación, la corriente de polarización tiene que pasar a través de dos capas de transferencia de carga. Se sugiere que si los dos electrodos son del mismo material, entonces se debe usar sólo la mitad del área real del electrodo para compensar este efecto. Si el común Auxiliar / Electrodo de Referencia es o bien mucho más grande o mucho más activo que el electrodo de prueba, entonces puede ser que la corrección del área no sea necesaria.



**Figura 11. Configuración simple de dos electrodos usando un electrodo de referencia.**

### **3.7. TÉCNICAS PARA CORRELACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y TOMA DE DECISIONES.**

Las técnicas de análisis matemático son una herramienta fundamental en la correlación de la información. En el caso donde los datos son bastante diversos y no se tiene una relación clara entre ellos y además se tiene un sistema de varias entradas y una salida se requiere usar técnicas de correlación más poderosa, que proporcionen un modelo de interacción entre las diversas variables; al transcribir problemas reales y situaciones cercanas, a lenguaje matemático se requiere utilizar las técnicas matemáticas apropiadas en cada caso para resolverlos y dar una interpretación ajustada al contexto de las soluciones obtenidas. Dentro de las

técnicas más usadas para la interpretación de datos experimentales se encuentran.

Las de tipo algebraico:

-  Funciones en forma de tablas y gráficas.
-  Identificación de la expresión analítica y de la gráfica de algunas familias de funciones (polinómica, exponencial y logarítmica, periódicas y racionales) a partir del estudio de sus peculiaridades.
-  Interpretación de las propiedades globales de las funciones mediante el análisis del dominio, recorrido, crecimiento y decrecimiento, valores extremos y tendencia de funciones y gráficas.
-  Tratamiento intuitivo, analítico y gráfico de ramas infinitas, continuidad y derivabilidad.

Y algunas técnicas de tipo probabilística

-  Distribuciones estadísticas bidimensionales. Estudio del grado de relación entre dos variables. Correlación y regresión lineal.
-  Probabilidades compuestas, condicionadas, totales y a posteriori.
-  Distribuciones de probabilidad para variables discretas y continuas que permiten asignar probabilidades a sucesos. Manejo de tablas.

Actualmente a nivel experimental se está aplicando un tipo de técnica que maneja en su contexto, varias entradas y salidas, y proporciona una correlación de la información en un lenguaje cualitativo, basándose en la experiencia y la observabilidad de los resultados. Estas técnicas han sido desarrolladas aprovechando la flexibilidad que permiten los lenguajes de programación y la facilidad que presenta su implementación. Dentro de estas técnicas denominadas de *computación blanda* (soft computing) cabe resaltar las redes neuronales, los sistemas expertos, los algoritmos genéticos y la lógica Fuzzy entre otras.

La lógica Fuzzy ha sido utilizada desde hace muchos años en aplicaciones que van desde cámaras digitales hasta lavadoras de ropa. Las inferencias realizadas con la lógica bivalente tradicional en la cual una premisa solo puede ser de manera excluyente verdadera o falsa son superadas por las obtenidas con lógicas polivalentes que utilizan los sistemas de inferencia Fuzzy. Este aspecto hace de la lógica Fuzzy una herramienta poderosa pues permite realizar inferencias con reglas similares a las utilizadas por los seres humanos en la vida cotidiana.

Con las variables más relevantes para describir el comportamiento de un sistema electroquímico, se construye un modelo basado en lógica difusa (Fuzzy). Este sistema Fuzzy contiene una representación interna que emula el comportamiento de los sistemas electroquímicos consistente en un conjunto de reglas obtenidas a partir del análisis cuantitativo y cualitativo de las pruebas de corrosión realizadas en el laboratorio. Estas reglas proporcionan una correlación entre los diferentes variables de entrada y salida.

En resumen los métodos de inferencia Fuzzy son métodos que interpretan valores de un vector de entrada, basado en un conjunto de reglas, asignando valores a un vector de salida.

Para definir las diferentes partes del sistema Fuzzy a implementar se sigue el modelo de la figura 13, donde se muestra como interactúan las diferentes variables.

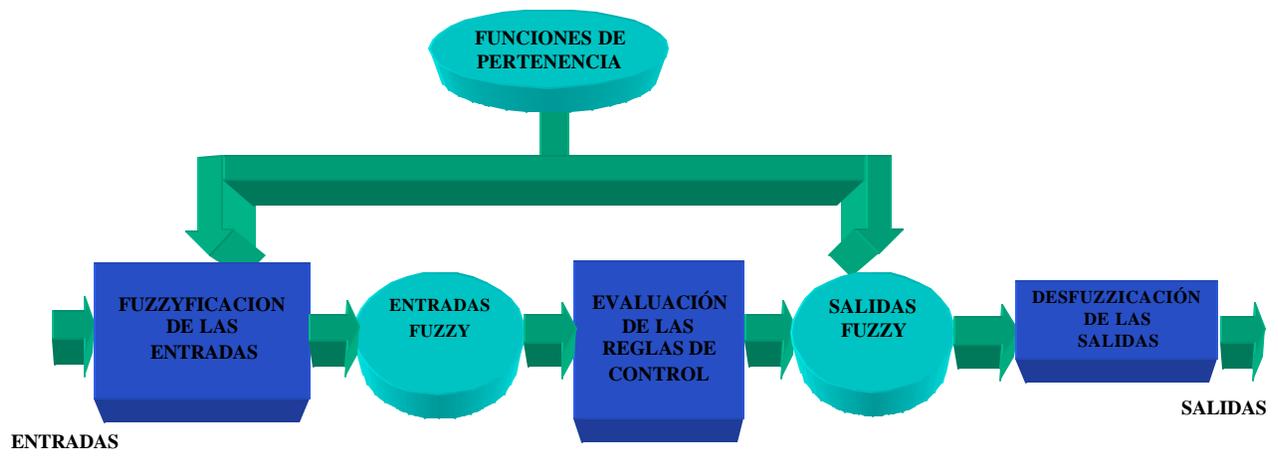


Figura 12. Sistema Fuzzy general

## **4. DESARROLLO METODOLOGICO**

La metodología usada para el cumplimiento de los objetivos consta de varias fases que van desde la revisión bibliográfica para encontrar mecanismos o metodologías ya existentes para el monitoreo de corrosión, hasta el desarrollo de un modelo de análisis de parámetros electroquímicos y el estudio de una posible metodología de evaluación de integridad de estructuras, a nivel de laboratorio.

### **4.1. FASE 1. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.**

Las técnicas propuestas en este proyecto son muy aplicadas para hallar estados de corrosión a nivel de laboratorio y sobre elementos cuyas condiciones de evaluación son controladas. En general son aplicadas sobre estructuras corroídas con el fin de encontrar información de los procesos y mecanismos de corrosión.

El monitoreo del estado de corrosión en estructuras enterradas es un proceso o metodología que no tiene bibliográficamente una clara referencia; a nivel de literatura se encuentra información acerca del proceso de inspección mediante técnicas externas indirectas, para tuberías metálicas enterradas; que busca detectar posibles zonas de pérdidas de metal y daños en el recubrimiento, tanto en redes lineales enterradas a lo largo del terreno como en redes complejas de parques de almacenamiento, factorías, o subsuelo urbano. Se han inspeccionado

tuberías bajo diversas circunstancias, con sistemas activos de Protección Catódica por corriente impresa en funcionamiento, con Protección Catódica sólo mediante ánodos de sacrificio, o incluso sin tener sistemas de Protección Catódica instalados<sup>1</sup>.

Los resultados de estas inspecciones han motivado la atención a la industria implicada, y sobre todo a sus responsables de mantenimiento, sobre cuáles son los mejores métodos de inspección, cuáles métodos resultan más eficaces y económicos, qué información puede llegar a obtenerse de ellos, y cómo deben prepararse estrategias para la reparación de zonas dónde la corrosión es factible o se está realmente produciendo.

Pero debido a que estas metodologías están diseñadas para predecir el estado de una tubería enterrada, este tipo de inspección no tiene aplicabilidad sobre la inspección que se podría realizar en las estructuras de las torres, ya que el efecto de la inducción electromagnética afectaría las medidas de potencial hechas sobre las estructuras eléctricas. Las estructuras de las torres están construidas en acero al carbono galvanizado. El galvanizado es un proceso metalúrgico usado para la protección de las estructuras, mediante deposición en caliente o frío, de zinc sobre el metal base, en este caso el acero al carbono; se realiza la protección de la estructura constituyendo un par galvánico sobre ella; este par galvánico ofrece protección catódica del metal base. El zinc depositado reacciona sobre con el medio protegiendo al acero al carbono de la corrosión. Los productos de corrosión del zinc forman una capa de óxido de zinc, esta capa es pasivante del proceso de corrosión del zinc mismo y del metal base.

Una vez la pasivación se haya roto (despasivación) debido al efecto de los componentes del electrolito (suelo), se inicia de nuevo el proceso de corrosión del zinc depositado, formando de nuevo la capa de pasivante. Este proceso continua

---

<sup>1</sup> PROCAINSA, S.A. ¿Qué técnicas de inspección detectan posibles zonas de pérdida de metal en redes complejas de pipelines o conductos enterrados?. Passeig, 35 - TERRASSA (Barcelona)

hasta que la capa de zinc se consume y empieza a dejar descubierta la capa del metal base, produciendo la corrosión del acero y por consiguiente el daño estructural.

P. Mayer <sup>2</sup> encontró que la degradación de las fundaciones construidas en concreto o de tipo rejilla, puede ser mejor observada por excavación. Este método es más riguroso para determinar la extensión y el tipo de ataque corrosivo, incluyendo una posible corrosión inducida por medios microbiológicos. Para evitar las excavaciones a todas las patas de las torres, se pueden realizar pruebas previas para indicar la presencia de corrientes erráticas y / o corrosión galvánica. Las corrientes erráticas y / o corrosión galvánica pueden ser identificadas mediante la medida del potencial de corrosión de las patas, por medio de un electrodo de referencia de Cu / CuSO<sub>4</sub>. Las fundaciones de acero galvanizado nuevo, cuando están enterradas muestran potenciales de -0.85 V a -1.1 V. Después de que el galvanizado se ha perdido, la superficie de la estructura expuesta tiene potenciales entre -0.5 y -0.7 V. El acero altamente corroído puede tener un potencial entre -0.3 y -0.5 V.

Adicionalmente A. Vorauer<sup>3</sup> determina el complemento del monitoreo de potenciales de corrosión con las medidas por medio de técnicas de polarización electroquímica como lo son las pruebas LPR y Tafel, para determinar las velocidades de corrosión galvánica.

En la revista Anti-corrosión<sup>4</sup>, se introduce la detección de corrosión en estructuras eléctricas por medio de un equipo de la Rohbarck Cosasco System, el Metcon; con este equipo se pueden medir las densidades de corriente de corrosión y el potencial de corrosión y con ello establecer un posible daño para una posterior evaluación por medio de apiques (excavaciones).

---

<sup>2</sup> P. Mayer. Corrosion testing and control in electric power transmission. Ontario Hydro Technologies.

<sup>3</sup> A. Vorauer, Grillage Corrosion Surveys Using the Tower Leg Integrity Monitoring 1989 Results. Ontario Hydro Research Division report N. 90-102 K, 1990, Toronto.

<sup>4</sup> Revista Anti-corrosión. Methods and materials, Volumen 34 Número 3 marzo 1987.

Hughes <sup>5</sup> en su artículo utiliza la resistencia a la polarización, como técnica para obtener velocidades de corrosión del material de las fundaciones de las torres y por ende pérdida de metal. Así mismo propone la técnica como predictiva y de utilidad para un análisis previo a la realización de un apique para conocer el riesgo por corrosión de la estructura.

En su estudio Ashok Kumar <sup>6</sup> utiliza técnicas de corriente alterna como la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, para monitorear corrosión en tuberías enterradas. Esta técnica proporciona información sobre los mecanismos de los procesos corrosivos y la posible formación o no de capas de oxido sobre el metal.

La referencia bibliográfica de mayor ilustración para este estudio es la escrita por J. Uruchurtu <sup>7</sup>. En este estudio utiliza la resistencia a la polarización y las curvas Taffel para la evaluación del estado de corrosión de las patas de las torres de transmisión eléctrica. También usa para su evaluación la técnica de ruido electroquímico y de ella obtiene información de las densidades de corriente de corrosión de las estructuras, con el fin de obtener información de la pasivación o de la dinámica del sistema. Pero esta técnica es difícil de realizar en presencia de fuentes de inducción de corriente alterna como lo son las torres de transmisión de energía.

Es importante conocer la influencia de los medios y su agresividad en las estructuras metálicas enterradas con el fin de esclarecer si existe corrosión en el momento de la evaluación. Conociendo la composición físicoquímica del suelo se puede conocer la tendencia del material a presentar corrosión. De los diagramas de pH se podría observar el estado en que se encuentra el metal, conociendo el

---

<sup>5</sup> David Hughes, Monitoring Steel Tower Foundation Corrosion. Transmission & Distribution World. August 1996. EA Technology

<sup>6</sup> Ashok Kumar, AC Impedance spectra of pipes buried in soil. Corrosion 92 symposium. Techniques for corrosion measurement. NACE

<sup>7</sup> J. Uruchurtu. Corrosion Monitoring of Electric Transmission Line Tower Legs by Electrochemical Methods. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Temixco, Morelos. México. 1995.

pH del sistema y su potencial de corrosión. Con la medida de los cloruros se puede mirar la conductividad del electrolito (suelo) y con ello saber si el suelo es corrosivo o no por su contenido de sales.

La revisión bibliográfica introduce el uso de ciertas técnicas electroquímicas para la evaluación en campo de la corrosión; estas técnicas mostradas son en general medidas de corriente continua (LPR, Taffel, Ruido Electroquímico, entre otras) de dichas pruebas los autores toman datos que por si solos no son representativos del estado de corrosión de una estructura. Si hablamos de medidas de potencial de corrosión o reposo, estas dan un indicativo del estado de oxidación, en este caso del acero galvanizado, pero hay que tener en cuenta que este estado de oxidación puede estar pasivado o en proceso de corrosión.

Las pendientes de resistencia a la polarización (LPR), muestran la cinética de la reacción, la tendencia del material a corroerse o no; estas técnicas unidas a las curvas Taffel establecen la velocidad de corrosión del sistema o el material evaluado. El ruido electroquímico es una técnica que proporciona las densidades de corrosión de los materiales, y que al combinarse con técnicas electroquímicas como la LPR, permite determinar mecanismos y velocidades de corrosión.

Las pruebas de corriente alterna como técnicas poco exploradas, proporcionan como ya se mencionó, información sobre el estado de la superficie y sus mecanismos de corrosión.

Como se observa, cada una de estas técnicas proporciona información sobre el proceso de corrosión en la estructura a evaluar, pero ésta información analizada de forma individual no muestra el estado de corrosión o el nivel de daño de una estructura. Se hace necesario combinar las diferentes técnicas electroquímicas para tener una completa información y de manera experimental determinar la correlación entre cada una de las variables y la información obtenida.

En general se puede concluir que bibliográficamente el problema ha sido abordado de maneras diferentes pero nunca se ha considerado la complementación de los diferentes parámetros obtenidos en las pruebas electroquímicas. La metodología

que se pretende desarrollar contempla las ventajas y desventajas encontradas en cada estudio, con lo cual se busca desarrollar un estudio previo que contemple las técnicas electroquímicas como LPR, EIS, Taffel, entre otras y su implementación con miras al monitoreo de corrosión en línea de las patas de las torres de transmisión.

Juan J. Royuela<sup>8</sup>, presenta en su trabajo, los diferentes factores que de algún modo proporcionan un ataque corrosivo a un metal inmerso o enterrado. Estos factores se enumeran en las tablas 1, 2, 3, 4 y 5 del marco teórico, donde se encuentran las variables fisicoquímicas que contribuyen en mayor medida al deterioro. La matriz de simulación se determina a partir de los datos teóricos reportados por este autor.

## **4.2. FASE 2. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Con base en los datos teóricos y la información obtenida en la revisión bibliográfica se construye el diseño experimental. Este diseño contempla la preparación de los electrolitos de simulación, al igual que los electrodos de trabajo y la configuración de la celda electroquímica. Se debe hacer claridad sobre la necesidad de construir una matriz de datos de una manera siempre organizada, debido a que el sistema Fuzzy propuesto requiere de un muestreo uniformemente distribuido sobre el universo del discurso de cada variable, y no con valores aleatorios como algunas técnicas de diseño experimental recomiendan. El objetivo final o el alcance del proyecto es formular un modelo del comportamiento corrosivo de los sistemas electroquímicos estudiados, que permita estimar el nivel de corrosión que puede presentar una estructura enterrada. Como inicialmente se plantea, se requiere utilizar técnicas de tipo predictivo que con base en los datos

---

<sup>8</sup> Capítulo VI. Corrosión en estructuras enterradas.

obtenidas experimentalmente, permitan extrapolar información monitoreada en campo que no se encuentre dentro de los parámetros de simulación.

Inicialmente se plantea construir un sistema basado en Lógica Difusa (Fuzzy), que cumple con las características propuestas; sin embargo es necesario ajustar el sistema frente a nuevos datos experimentales obtenidos. Para este tipo de ajuste se usan sistemas Neuro Fuzzy, con las ventajas del fácil lenguaje de la Lógica Fuzzy y el ajuste de los parámetros del sistema que se puede obtener con el entrenamiento de datos a partir de la experiencia.

**4.2.1. Electrolitos de simulación.** Los resultados de la revisión bibliográfica determinan la metodología a seguir para la simulación de los electrolitos. En esta fase se realiza un prediseño que parte del montaje de una matriz de pruebas basada en los parámetros más influyentes de la corrosión en suelos. Esta matriz esta conformada por los parámetros pH, Sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ), Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y Carbonatos ( $\text{CO}_3^-$ ).

A cada parámetro se le otorga un valor aleatorio que cumpla con la condición, concentración baja, media y alta, lo que proporciona un barrido inicial de las características corrosivas de cada medio simulado.

Los parámetros varían uno a uno en cada solución como se indica en la tabla 6, este prediseño se propuso en el anteproyecto tabla 7 Matriz de valores físico químicos para las soluciones de prueba.

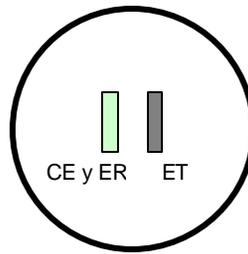
En la tabla 6 se observa la matriz desarrollada para la primera fase experimental. El objetivo de esta fase es obtener datos de tipo experimental que contribuyan al desarrollo de la metodología. Como resultado de este diseño obtenemos 9 tipos de soluciones con las cuales se realizan las pruebas electroquímicas.

**Tabla 6. Matriz de valores físico químicos para las soluciones de prueba, pH1, Cl1, (SO4)1, (C03)1 son los parámetros base de las pruebas electroquímicas**

SOLUCIÓN	pH	HCO <sub>3</sub> (gr/l) <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> (gr/l) <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup> (mgr/l)
1	4	0	0.4	15e3
2	4	0	0.4	5
3	4	0	0.4	1e3
4	4	0	0.057	15
5	4	0	25	15e3
6	7.1	0	0.4	15e3
7	7.2	34	0.4	15e3
8	8.9	77	0.4	15e3
9	8.9	41	0.4	15e3

**4.2.2. Configuración de la celda electroquímica para evaluación.** Parte del diseño experimental para realizar una prueba electroquímica consiste en establecer la configuración de la celda a utilizar. Este diseño depende del tipo de pruebas a realizar, del material a evaluar y de la característica del electrolito de evaluación. Para determinar este diseño se hace necesario montar una serie de ensayos de tipo electroquímico con las diferentes configuraciones posibles.

Para evaluar la configuración se implementó un sistema de dos electrodos y un sistema de tres electrodos, se debe resaltar que la posición de dichos electrodos dentro del sistema proporciona respuestas variadas. El sistema de dos electrodos como ya se había mencionado, conecta los electrodos de referencia y el contra electrodo, puenteando las salidas del potencióstato. Para tal fin se utiliza en este terminal una lámina de acero inoxidable, como segundo electrodo, el electrodo de trabajo (acero galvanizado). Para este tipo de conexión se colocan los dos electrodos en frente, como se observa en la Figura 15.



**Figura 13. Sistema de dos electrodos.**

En el sistema de tres electrodos se utiliza un electrodo de referencia de Ag/AgCl, un contra electrodo de acero inoxidable y un electrodo de trabajo (acero a evaluar). La posición de los electrodos en la celda varía en diferentes posiciones como se observa en la Figura 16, con cada uno de estos montajes se realizaron diferentes evaluaciones para observar su variabilidad.



**Figura 14. Configuraciones para un sistema de tres electrodos.**

**4.2.3. Construcción de probetas.** Para el desarrollo de las pruebas electroquímicas de esta etapa, se preparan las 22 probetas para su evaluación; para tal preparación se debe tener en cuenta que el corte y el esfuerzo sobre un metal produce un desorden en su estructura, que inestabiliza estas zonas y las hacen más susceptibles a la corrosión. Por tal motivo es necesario pintar con un anticorrosivo los bordes de las estructuras para posteriormente depositarlas en inmersión en las soluciones de prueba.

Estas probetas son como ya se había mencionado, de acero al carbono en varios grados de corrosión, con el fin de simular diferentes estados. Igualmente de acero galvanizado con las mismas características. Para conseguir probetas de acero al carbono y acero galvanizado de estado de corrosión avanzado, se aceleró el

proceso por medio de cámaras de simulación de ambientes agresivos; estas cámaras simulan ambientes de tipo salino y ácido dependiendo del nivel de daño que se busca y la severidad en el mismo. En la tabla 7 y 8, se puede apreciar la matriz experimental para los ensayos electroquímicos.

#### **4.3. FASE 3: CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS METALES EN LOS DIFERENTES MEDIOS ACUOSOS.- PRUEBAS PRELIMINARES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL**

En el desarrollo de esta actividad se determina la aplicabilidad de las técnicas electroquímicas para monitorear corrosión en estructuras enterradas; con la matriz experimental diseñada en la fase inmediatamente anterior, se realiza el montaje con las probetas en las celdas electroquímicas (electrolitos) y se conecta todo el sistema al equipo IM6 para su posterior evaluación, en la foto 1 se puede ver el montaje realizado.

**Tabla 7. Diseño experimental para estructuras de acero al carbono. (SOLUCIONES)**

SOLUCION	COMPONENTES QUIMICOS				MATERIAL	TIPO DE ESTRUCTURA	ESTADO DE CORROSION
	PH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (gr/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (gr/l)	Cl <sup>-</sup> (gr/l)			
SC01	4	0.4	0	15	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC02	4	0.4	0	5e-03	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC03	4	0.4	0	1	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC04	4	0.057	0	15	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC05	4	25	0	15	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC06	7.1	0.4	0	15	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC07	7.2	0.4	34	15	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC08	8.9	0.4	77	15	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC09	8.9	0.4	41	15	A. CARBONO	ANGULO	NUEVO
SC11	4	0.4	0	15	A. CARBONO	ANGULO	<sup>9</sup> CORROIDO 1
SC21	4	0.4	0	15	A. CARBONO	ANGULO	<sup>10</sup> CORROIDO 2

<sup>9</sup> ESTRUCTURA CORROIDA EN UNA SALMUERA AL 3 % DE NaCl POR 5 DIAS ESTADO CORROSION MODERADA.

<sup>10</sup> ESTRUCTURA CORROIDA EN LA CAMARA ACIDA DURANTE 5 DIAS ESTADO CORROSION SEVERA.

**Tabla 8. Diseño experimental para estructuras de acero galvanizado (SOLUCIONES)**

SOLUCION	COMPONENTES QUIMICOS				MATERIAL	TIPO DE ESTRUCTURA	ESTADO DE CORROSION
	pH	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (gr/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (gr/l)	Cl <sup>-</sup> (gr/l)			
SG01	4	0.4	0	15	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG02	4	0.4	0	5e-03	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG03	4	0.4	0	1	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG04	4	0.057	0	15	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG05	4	25	0	15	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG06	7.1	0.4	0	15	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG07	7.2	0.4	34	15	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG08	8.9	0.4	77	15	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG09	8.9	0.4	41	15	A. GALVANIZADO	PLANA	NUEVO
SG11	4	0.4	0	15	A. GALVANIZADO	ANGULO	<sup>11</sup> CORROIDO 1
SG21	4	0.4	0	15	A. GALVANIZADO	ANGULO	<sup>12</sup> CORROIDO 2

<sup>11</sup> ESTRUCTURA CORROIDA. ANGULO EXTRAIDO DE UNA TORRE DESPUES DE 4 AÑOS DE SERVICIO.

<sup>12</sup> ESTRUCTURA CORROIDA. ANGULO EXTRAIDO DE UNA TORRE DESPUES DE 17 AÑOS DE SERVICIO..



**Foto 1. Recipiente usado para la celda electroquímica.**

**4.2.4. Pruebas electroquímicas.** Con cada uno de los sistemas montados se realizan las pruebas propuestas en el documento del anteproyecto, LPR, EIS y Taffel. Dichas pruebas se deben realizar en el siguiente orden, prueba de resistencia a la polarización lineal (LPR), espectroscopia de impedancias (EIS), curvas Taffel.

Las pruebas de LPR se realizan primero, ya que, como se dijo con anterioridad, este tipo de pruebas no alteran (desordenan) la interfase electroquímica y no produce corrosión, similar a lo que ocurre con las EIS; pero caso contrario a lo que ocurre con las curvas Taffel que producen, debido al potencial aplicado sobre el metal, un efecto corrosivo en la zona anódica. Se conecta el sistema con dos electrodos, como electrodo de trabajo, el material bajo estudio y como contra electrodo, acero inoxidable tipo laminar de un área aproximada de 15 cm<sup>2</sup>.

Para realizar las pruebas de LPR se conecta a celda electroquímica como se indico en el diseño de la misma. Las pruebas de LPR se realizan en un intervalo de  $-20$  mV a  $20$  mV y a una velocidad de barrido de  $0.2$  mV/s. Los resultados de estas pruebas se pueden observar en el anexo 1.

Las pruebas de EIS se realizan en un intervalo en frecuencia de  $200$  KHz a  $5$  mHz, con una amplitud de  $20$  mV y  $7$  pasos por década. Los resultados se muestran en el anexo 1.

Las curvas Taffel se realizan entre  $-200$  mV y  $200$  mV con respecto al potencial de corrosión y una velocidad de barrido de  $0.5$  mV/s. Los resultados se muestran en el anexo 1.

Cada monitoreo se realizó en intervalos de aproximadamente  $22$  días, con el objeto de obtener información a lapsos definidos y establecer una tendencia de corrosión del metal inmerso en el electrolito.

**4.2.5. Inspección visual.** Para lograr una correlación entre las pruebas electroquímicas se hace una inspección visual de las probetas para determinar su estado de corrosión. Con esta evaluación visual se determina el estado en que se encuentra cada estructura y se hace una correlación entre el estado y los resultados de las pruebas electroquímicas.

Para definir mejor el efecto del electrolito sobre el metal, se hace necesario crear una “matriz de daños” con la cual se pueda valorar cualitativamente la inspección visual de las probetas. En la tabla 9 se encuentra este nivel de clasificación.

**Tabla 9 .Matriz de daño para el acero galvanizado**

Nivel	Descripción
0	Estado superficial bueno
1	Aparición de productos de corrosión de zinc sobre un 20% de la superficie.
2	Óxidos de zinc de baja densidad sobre el metal en un 40% de la superficie.
3	Capa de zinc pasivante (óxidos de alta densidad) sobre algunas zonas del galvanizado.
4	Corrosión sobre un 70 % del galvanizado.
5	Evidencia de pérdida de la capa de zinc del metal. Pérdida de peso en un 5%.
6	Aparición de productos de corrosión localizada del metal base (óxidos de hierro).
7	Óxidos de hierro de baja densidad en un 50 % de la superficie.
8	Óxidos de hierro de densidad alta en un 50 % de la superficie.
9	Pérdida de galvanizado en un 50 % de la superficie.
10	Pérdida de material en un 15% de la estructura.

Esta tabla construida para el acero galvanizado, se elaboro con base en la inspección visual hecha a las probetas de cada sistema, dicha escala de corrosividad se determina dependiendo del estado en que se encuentra el material y de los productos de corrosión que se hallan sobre la estructura.

Igualmente para realizar la inspección visual del acero al carbono se desarrolló una tabla de “matriz de daños”, en la tabla 5 se puede observar esta matriz. Esta tabla resulta de menor complejidad debido a los procesos de corrosión más sencillos del acero al carbono, diferentes a los complejos procesos del zinc (acero galvanizado).

**Tabla 10. Matriz de daño para el acero al carbono.**

Nivel	Descripción
0	Estado superficial bueno
1	Aparición de productos de corrosión de hierro sobre un 20% de la superficie.
2	Óxidos de hierro de baja densidad sobre el metal en un 40% de la superficie.
3	Óxidos de hierro de alta densidad sobre un 20% de la estructura (corrosión localizada).
4	Óxidos de hierro de alta densidad sobre un 40% de la estructura (corrosión generalizada).
5	Óxidos de hierro sobre un 80% de la estructura. Pérdida de material de la estructura.

#### **4.2.6. Análisis químico de los componentes de las soluciones simuladas.**

Las soluciones simuladas son analizadas químicamente para obtener la relación entre los datos electroquímicos, su respuesta y las variables fisicoquímicas que producen el deterioro corrosivo del sistema bajo estudio. Para ello se analizaron los parámetros de la matriz de diseño y se registró su variación en los monitoreos electroquímicos tres y seis. Además se evaluó la conductividad del sistema debido a los sólidos en suspensión encontrados, posiblemente de tipo metálico.

#### **4.4. FASE 4. PRUEBAS EXPERIMENTALES DEFINITIVAS.**

Con base en el análisis de la información de los datos experimentales de la fase anterior, se realizan las pruebas experimentales definitivas. La variación de estas pruebas con respecto a las primeras consiste en el aumento de los monitoreos de

los parámetros fisicoquímicos y la medida de la conductividad en las soluciones. A continuación se pueden observar las características de dichas pruebas.

### *ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIAS*

Barrido en frecuencia: 200 Khz. a 5 mHz

Amplitud de la señal: 20 mV

### *RESISTENCIA A LA POLARIZACION*

Rango de potencial: -20 mV a 20 mV

Barrido 0.2 mV/seg.,

### *CURVAS TAFEL*

Rango de potencial: -250 mV a 250 mV

Barrido 0.5 mV/seg.

Sistema electroquímico de 2 electrodos

Contra electrodos: acero inoxidable

Electrodo de trabajo: Acero galvanizado y acero al carbono en forma laminar de un área aproximada de 40 cm<sup>2</sup>.

Electrodo de referencia Se determina su no utilización.

Total de monitoreos 6 monitoreos.

Intervalo de monitoreos 22 días

Evaluación fisicoquímica Realizada después de cada monitoreo, en total 6 monitoreos de variables fisicoquímicas.

Equipo a utilizar: ZHANER ELECTRIC IM6, análisis de resultados por medio del software THALES.

**Tabla 11. Matriz experimental para las pruebas con el acero al carbono.**

Sistema	Material (estado superficial)	Solución	pH <sup>13</sup>	Conductividad <sup>14</sup> (µs)	Alcalinidad <sup>15</sup> (ppm)	Cloruros <sup>16</sup> (ppm)	Sulfatos <sup>17</sup> (ppm)
SC01	Acero al carbono nuevo	Sln 1	4.00	3921	0	1.23E+04	850
SC02	Acero al carbono nuevo	Sln 2	4.00	982.5	0	9.57E-01	860
SC03	Acero al carbono nuevo	Sln 3	4.00	3921	0	8.63E+02	850
SC04	Acero al carbono nuevo	Sln 4	4.00	39110	0	1.18E+04	209
SC05	Acero al carbono nuevo	Sln 5	4.00	65590	0	1.23E+04	67950
SC06	Acero al carbono nuevo	Sln 6	7.00	38820	34	1.17E+04	910
SC07	Acero al carbono nuevo	Sln 7	7.00	50230	77	1.47E+04	860
SC08	Acero al carbono nuevo	Sln 8	9.00	73860	41	1.15E+04	865
SC09	Acero al carbono nuevo	Sln 9	9.00	111600	0	3.85E+04	9220
SC11	Acero al carbono corroído (estado 1)	Sln 1	4.00	3921	0	1.23E+04	850
SC21	Acero al carbono corroído (estado 2)	Sln 1	4.00	3921	0	1.23E+04	850

Las matrices experimentales de las tablas 11 y 12 contemplan los parámetros fisicoquímicos a simular en los electrolitos de evaluación. En esta matriz se incluye la conductividad como medida electroquímica para el análisis de los electrolitos (metales – soluciones).

<sup>13</sup> Para ajustar el pH se prepara una solución a un pH alto y se acidifica haciendo agregaciones con ácido acético hasta llegar al pH deseado.

<sup>14</sup> La conductividad se mide una vez esta preparada la solución.

<sup>15</sup> Se prepara una solución con Carbonato de Sodio a concentraciones bajas y se empieza a hacer agregados hasta llegar a la concentración deseada.

<sup>16</sup> Por cálculo estequiométrico se prepara la solución, la concentración se logra con Cloruro de Sodio.

<sup>17</sup> Por cálculo estequiométrico se prepara la solución, la concentración se logra con Sulfato de Sodio.

Así mismo se hacen variaciones en los metales a evaluar, en los sistemas SC11 y SC21, se tienen estados de corrosión más avanzados. El sistema SC11 se somete a exposición en cámara salina por espacio de 1 semana, formando productos de corrosión densos sobre el metal, el sistema SC21 se expone en la misma cámara por 2 semanas, formando una capa más densa de productos de corrosión que el sistema anteriormente nombrado.

El sistema SG11 es una sección de ángulo extraído de una torre que tenía 7 años de exposición como tal, muestra productos de corrosión avanzados, óxidos de zinc sobre su superficie. El sistema SG21 es una sección (tipo laminar) de un ángulo de una torre con un tiempo de exposición aproximado de 12 años, esta muestra presenta óxidos de zinc sobre su superficie y evidencia además picadura con presencia de óxidos del metal base.

**Tabla 12. Matriz experimental para las pruebas con acero galvanizado.**

Sistema	Material (estado superficial)	Solución	pH	Conductividad (µs)	Alcalinidad (ppm)	Cloruros (ppm)	Sulfatos (ppm)
SG01	Acero galvanizado	Sln 1	4.00	3921	0	1.23E+04	850
SG02	Acero galvanizado	Sln 2	4.00	982.5	0	9.57E-01	860
SG03	Acero galvanizado	Sln 3	4.00	3921	0	8.63E+02	850
SG04	Acero galvanizado	Sln 4	4.00	39110	0	1.18E+04	209
SG05	Acero galvanizado	Sln 5	4.00	65590	0	1.23E+04	67950
SG06	Acero galvanizado	Sln 6	7.00	38820	34	1.17E+04	910
SG07	Acero galvanizado	Sln 7	7.00	50230	77	1.47E+04	860
SG08	Acero galvanizado	Sln 8	9.00	73860	41	1.15E+04	865
SG09	Acero galvanizado	Sln 9	9.00	111600	0	3.85E+04	9220
SG11	Acero galvanizado corroído (estado 1)	Sln 1	4.00	3921	0	1.23E+04	850
SG21	Acero galvanizado corroído (estado 2)	Sln 1	4.00	3921	0	1.23E+04	850

## 5. ANALISIS DE LA INFORMACIÓN

Durante el desarrollo experimental se hizo una observación muy detallada de los procesos electroquímicos implícitos en la exposición de estructuras metálicas desnudas a electrolitos con mayor o menor grado de corrosividad. El objetivo de la búsqueda experimental era determinar patrones o reglas que establecieran el comportamiento del proceso dentro del universo del discurso de las variables propuestas en la simulación de medios corrosivos.

Estas reglas encontradas a lo largo del análisis de las pruebas electroquímicas, representan el conocimiento empírico desarrollado durante la observación experimental de las pruebas, parte fundamental de la metodología de la investigación. Vale la pena resaltar el desarrollo de algunos postulados de tipo electroquímico propuestos a lo largo del análisis de las diferentes pruebas, estos postulados son construidos con base en el conocimiento que se tiene del proceso electroquímico y de algunos postulados ya establecidos por otros investigadores.

Posteriormente, a partir de las conclusiones obtenidas del análisis de las pruebas electroquímicas se extraen algunas reglas en los términos propios de un sistema de inferencia Fuzzy. En la siguiente sección se presenta el análisis de resultados resaltando en negrilla las reglas obtenidas.

## 5.1. CARACTERIZACION DEL COMPORTAMIENTO DE LOS METALES EN LOS DIFERENTES MEDIOS ACUOSOS.

En el proceso de caracterización de los diferentes metales se llevaron a cabo una serie de pruebas electroquímicas de las cuales se obtuvieron los diferentes parámetros para la correlación con el estado de corrosión en que se encuentra la estructura.

En el proceso de corrosión, antes de realizarse el tercer monitoreo, se realizó una limpieza muy leve de las diferentes probetas inmersas con el fin de acelerar un poco el proceso de corrosión; antes de iniciarse el cuarto monitoreo se realizó un cambio de las soluciones en las cuales se encontraban inmersas las estructuras, esto se hizo debido a que en el análisis químico semicuantitativo, se observó la variación en los parámetros iniciales debido a las reacciones implícitas de las estructuras con los contaminantes de las soluciones.

**5.1.1. Análisis de las pruebas LPR.** Al observar los datos obtenidos de las curvas de LPR se encuentra un ***incremento en la resistencia a la polarización a medida que el nivel de corrosión de la estructura va en aumento***. Esto se debe a la disminución en la velocidad de corrosión de los sistemas debido a las diferentes capas de óxido que se depositaron sobre la estructura. Se observó un cambio considerable en la LPR en el tercer monitoreo justo donde se efectuó la limpieza de las probetas, produciendo un nuevo aumento de la velocidad de corrosión producto de la pérdida de las capas de óxido existentes hasta ese momento. En el monitoreo cuatro donde se realizó el cambio de las soluciones simuladas a las originales, (debido a que en el análisis químico se observó la

variación de los componentes presentes en los sistemas) se presentó un ligero cambio en las velocidades de corrosión existentes, a medida que se incrementaba el tiempo de exposición, las LPR de los diferentes sistemas aumentaron, por consiguiente, las velocidades de corrosión disminuyeron. En la tabla 13 se presentan los resultados de  $R_p$  a través del tiempo de monitoreo. En el ANEXO 1 se encuentran los resultados de las curvas LPR para acero galvanizado.

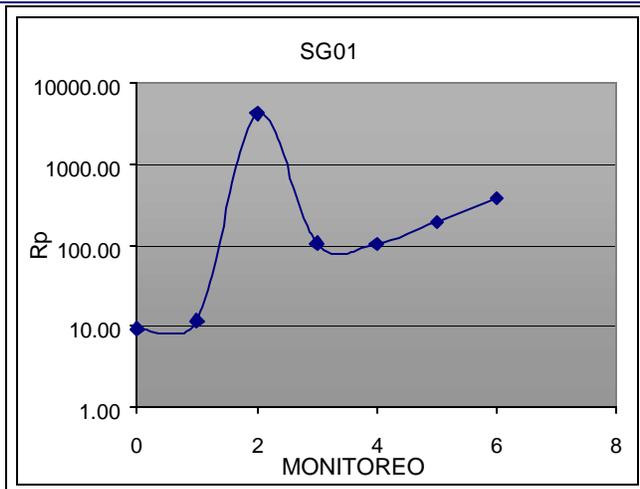
Es difícil hablar de pasivación en el proceso de corrosión de las probetas expuestas debido a que no se hizo un análisis superficial. Por este motivo se cree que ***el aumento de la  $R_p$  es debido a que se tiene una menor área activa para la reacción, por lo cual se tiene un menor flujo de corriente y por ende una mayor resistencia a la polarización.*** De esta forma se puede concluir que ***los aumentos en la velocidad de corrosión (disminución de la  $R_p$ ), se podrían deber al proceso de desprendimiento de las capas de óxidos existentes, lo cual conlleva a que se tenga nuevamente más área de metal activo.*** Lo anterior se corrobora con los cambios observados en la coloración de la solución donde se encontraba inmersa la probeta, que demuestra que ***parte del óxido formado se solubiliza en la solución y otra parte se va al fondo como precipitado.*** (Foto 2).

El comportamiento del sistema SG11, posiblemente implique ***la formación de una capa de óxido de Zinc muy bien compactada, la cual efectivamente se da a condiciones ambientales donde no hay solubilización de los óxidos,*** en la matriz experimental se propuso este sistema ya expuesto a condiciones ambientales.. Por esta razón hay una ***estabilidad en el valor de la  $R_p$  debido a los óxidos compactados depositados sobre la estructura*** durante los primeros monitoreos.

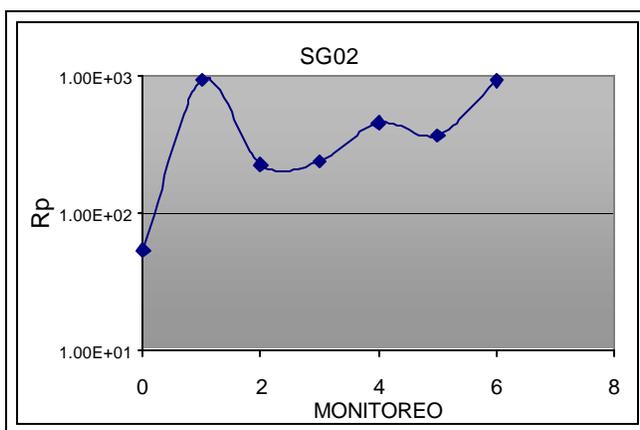
Tabla 13. Resultados de la curvas LPR para el acero galvanizado

TABLA 13. RESULTADOS CURVAS LPR (ACERO

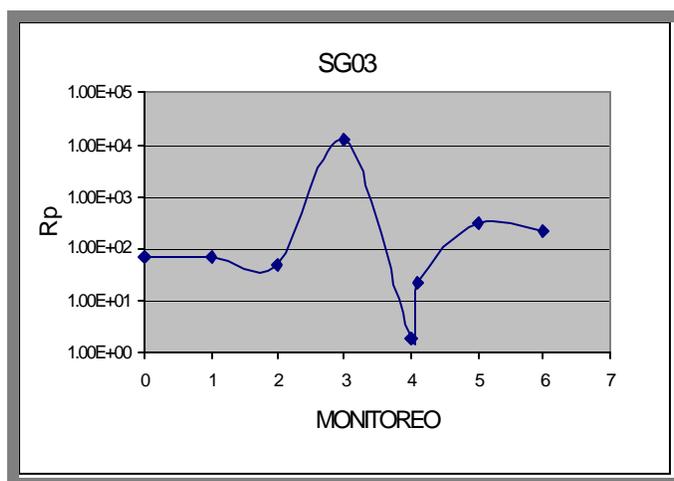
GALVANIZADO)



Para este sistema se observa un aumento brusco de la  $R_p$  para el segundo monitoreo; posterior a la limpieza de los óxidos (monitoreo 3), se presenta una disminución de la  $R_p$  (aumento de la velocidad de corrosión).

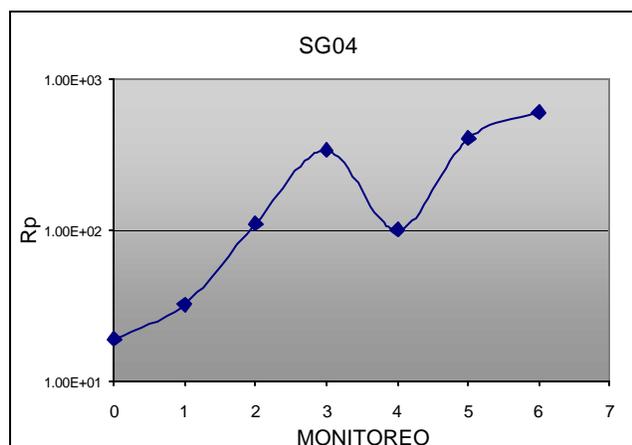


Para el primer monitoreo la ***R<sub>p</sub> aumenta bruscamente producto de la formación de una capa posiblemente de óxidos, sales y otros compuestos.*** Así mismo esta capa de óxido deja de proteger durante el proceso a partir del 2do monitoreo y en posteriores monitoreos aumenta de nuevo.

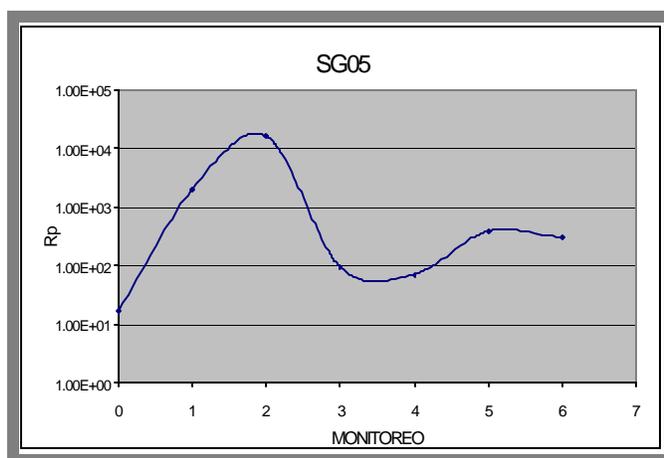


Presenta las mismas características del sistema anterior. En el primer monitoreo presenta un valor de  $R_p$  muy similar al del segundo superior y para el segundo monitoreo esta variable disminuye drásticamente es decir se produjo un aumento de la velocidad de corrosión.

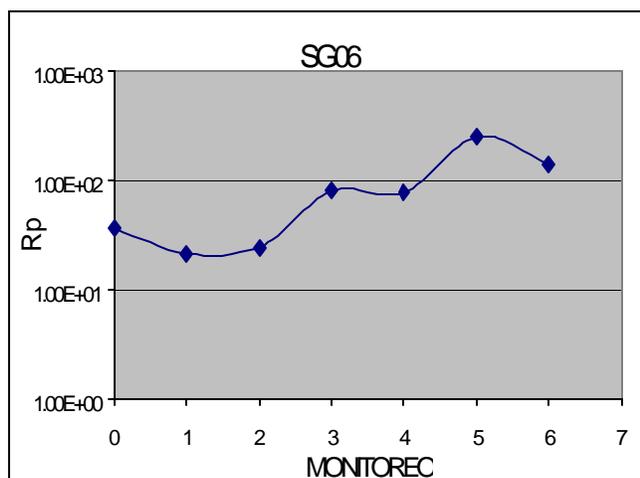
TABLA 13. RESULTADOS CURVAS LPR (ACERO GALVANIZADO)



Presenta un comportamiento en aumento, variando esta característica en el cuarto monitoreo donde se realizó el cambio de solución. **Se nota la presencia de la capa de óxido en el elemento por el aumento en el valor de Rp, y como tal el efecto protector de dichos óxidos sobre la estructura.**

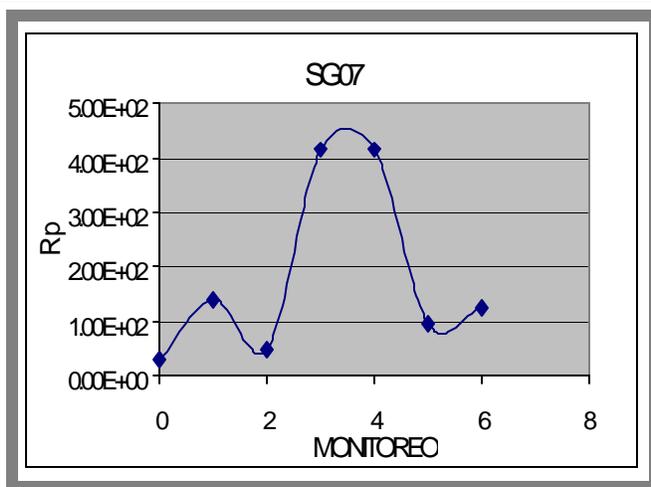


El aumento en el monitoreo 2 obedece a la formación de una capa de óxidos alrededor de la estructura, esta capa representa una disminución de la velocidad de corrosión. En los demás monitoreos se presentó una tendencia más o menos estable.

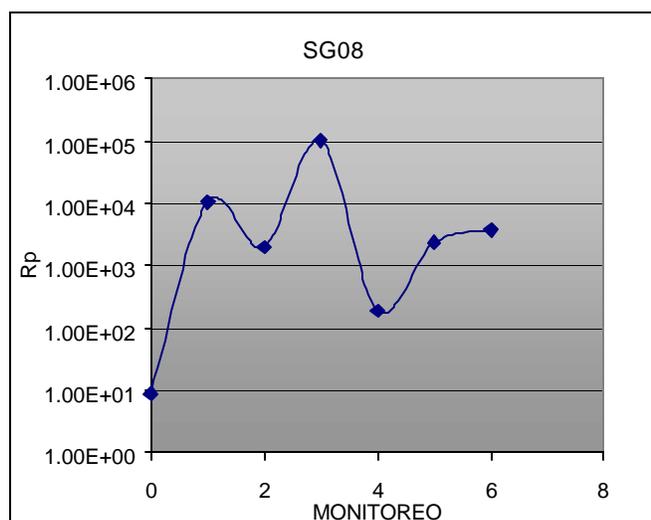


Este sistema presenta una tendencia mucho más estable. Presenta una mayor Rp en el monitoreo 5, pero disminuye de nuevo en el monitoreo 6, esta **disminución de la Rp se ve asociado con el rompimiento de una capa de óxido protector existente** y con ello el aumento de la velocidad de corrosión.

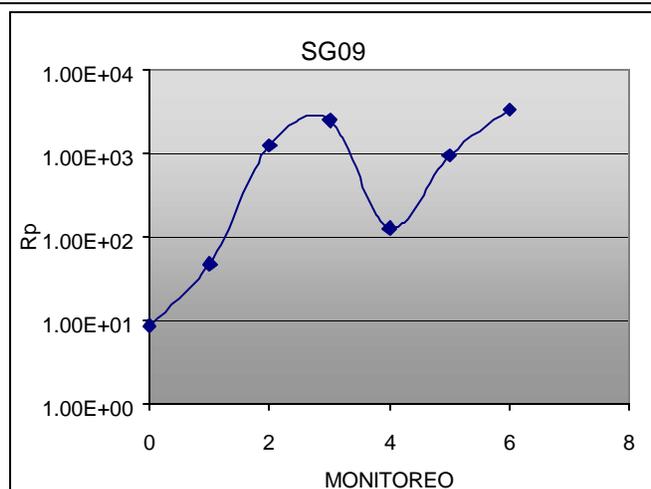
TABLA 13. RESULTADOS CURVAS LPR (ACERO GALVANIZADO)



Se observa un comportamiento más o menos lineal, excepto en el cuarto monitoreo donde se produce un cambio muy brusco en el valor de  $R_p$ . Este valor posiblemente obedece al cambio en la solución y con el una disminución de la velocidad de corrosión.

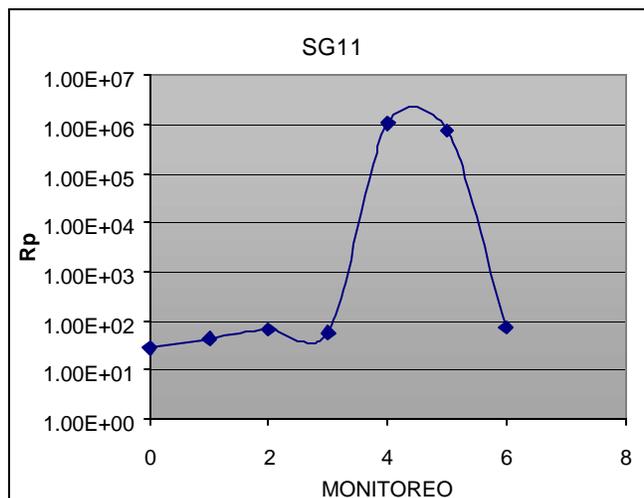


El comportamiento en el sistema estuvo estable hasta el tercer monitoreo donde se produce un incremento considerable en el valor de  $R_p$ , debido a la limpieza de las capas de oxido presentes, pero en este punto debió haber disminuido debido al incremento de la velocidad de corrosión.



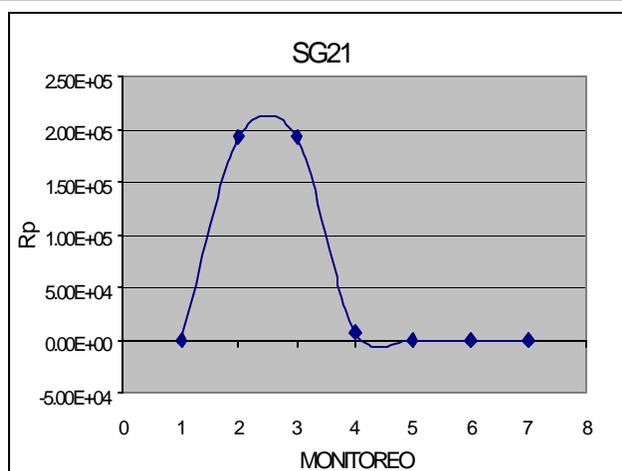
Se presenta un comportamiento muy variable en este sistema aparecen velocidades de corrosión muy bajas en el tercer y en el séptimo monitoreo y un comportamiento muy similar en el monitoreo 0 y 4.

TABLA 13. RESULTADOS CURVAS LPR  
(ACERO GALVANIZADO)



Formación de una capa muy compacta de óxidos protectores presente en las primeras pruebas; aumento de la  $R_p$  en el 4 monitoreo donde se cambiaron las soluciones, lo que implica una velocidad de corrosión baja.

En el monitoreo 5 y 6 esta capa desaparece y deja de proteger contra el proceso de corrosión de la estructura.



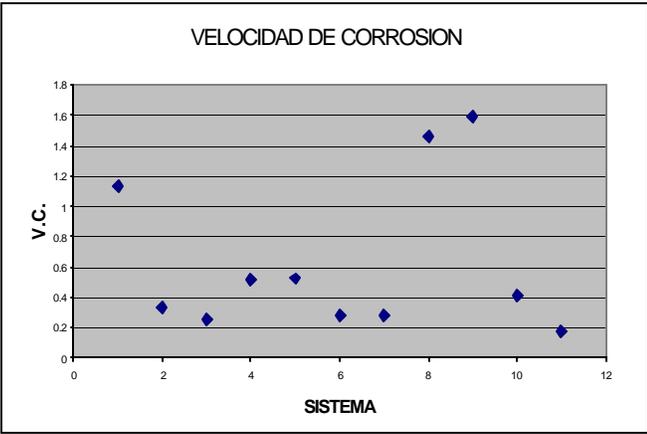
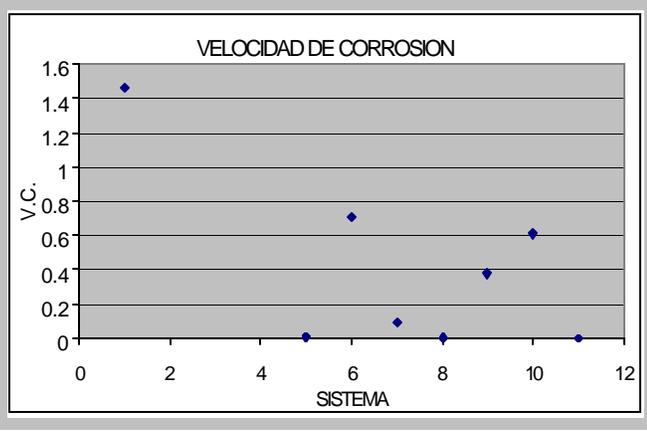
En el primer monitoreo aparece una capa de posibles óxidos los cuales se evidencian con una alta  $R_p$ , en posteriores monitoreos el comportamiento es muy similar presentando velocidades de corrosión altas.

**5.1.2. Análisis de las pruebas Taffel.** En el análisis TAFEL, se puede ver el comportamiento de los diferentes sistemas a través del tiempo, con las curvas de las pendientes anódicas y catódicas se obtienen la  $i_{\text{corr}}$ , esta se encuentra en función de la densidad de corriente por área ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Con este valor y con el  $W_e$

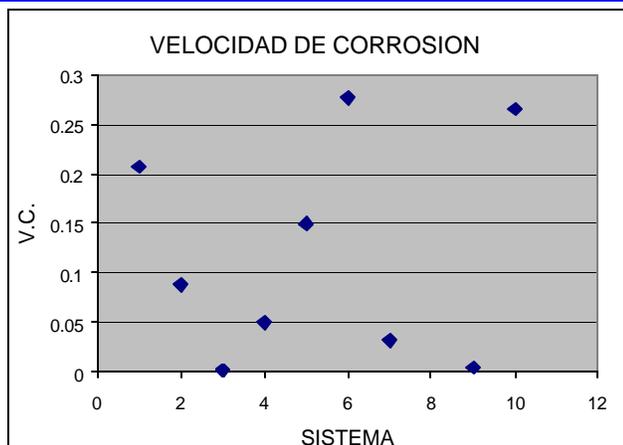
(equivalente electroquímico) y la densidad del material de prueba se calcula la velocidad de corrosión; estos cálculos aparecen en el ANEXO 3.

En la tabla 14 se observa el cálculo de esta velocidad de corrosión de cada sistema en los diferentes monitoreos y en la tabla 15 se observa como es el comportamiento de cada sistema en el tiempo.

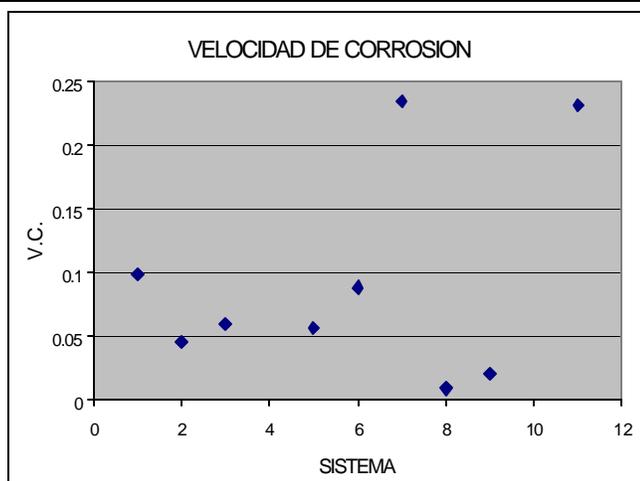
**Tabla 14. Velocidad de corrosión por monitoreo para los diferentes sistemas.**

TABLA 14. VELOCIDAD DE CORROSION POR SISTEMA EN CADA MONITOREO	 <p style="text-align: center;">VELOCIDAD DE CORROSION</p>	<p><b>MONITOREO 0.</b> En este primer monitoreo se observa que la <b>velocidad de corrosión es mayor en los sistemas que presentan un pH más ácido</b> debido a que el zinc se corroe más fácilmente en estos medios, además los óxidos protectores no se depositan en la superficie. En los sistemas con menor contenido de Cloruros se ve que la velocidad de corrosión es mucho menor, además en este pH los productos de Zinc, forman una capa que no se adhiere a la superficie.</p>
	 <p style="text-align: center;">VELOCIDAD DE CORROSION</p>	<p><b>MONITOREO 1</b> Se observa que los sistemas en este monitoreo que presentaban una alta velocidad de corrosión, disminuyeron notablemente, en el sistema 1 se ve que su velocidad de corrosión aumento. <b>El sistema 6 posee un medio neutro, donde el Zinc puede llegar a reaccionar menos que en los medios ácidos</b>, notándose una disminución en la velocidad de corrosión.</p>

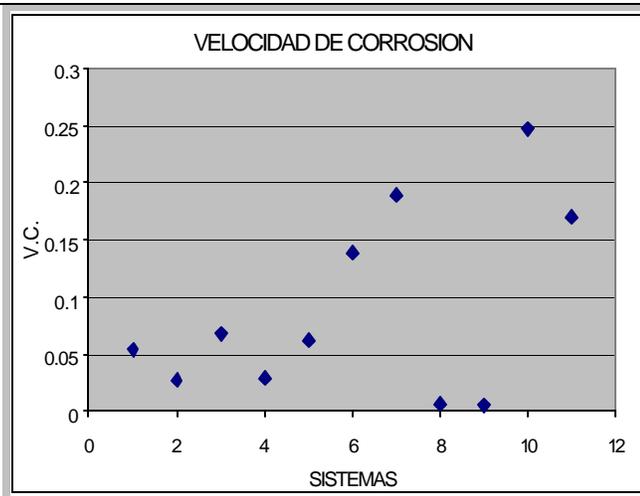
**TABLA 14. VELOCIDAD DE CORROSION POR SISTEMA EN CADA MONITOREO (ACERO GALVANIZADO)**



**MONITOREO 3** Entre los sistemas 1, 2 y 3, se observa una **mayor vc** el sistema 1 debido a que tiene la **mayor cantidad de Cloruros**. Entre los sistemas 4 y 5 la **mayor vc** es del sistema 5, lo cual tiene correspondencia porque el sistema 5 **presenta la mayor cantidad de sulfatos**. Entre los sistemas 6 y 7, el 6 presenta la mayor cantidad de carbonatos, lo cual demuestra que son inhibidores del proceso de corrosión.



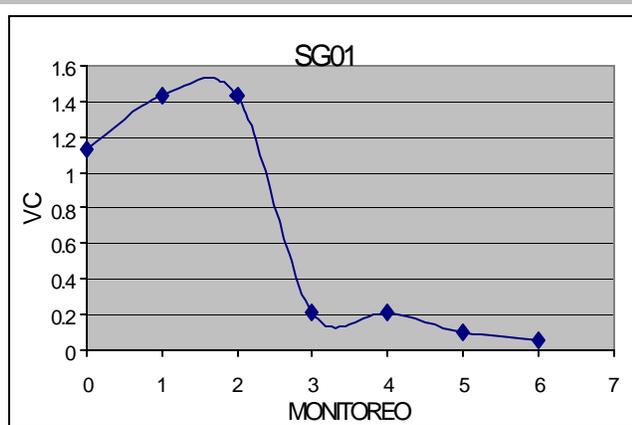
**MONITOREO 5.** Se observa pasivación en los sistemas 8, donde ha tenido un comportamiento con velocidades de corrosión muy bajas. El sistema 7 presentó el más alto valor de velocidad de corrosión en este monitoreo, por la posible ruptura de la capa de óxidos de Zinc, consecuencia del cambio de las soluciones en el monitoreo 4. En el sistema 11 se observa que la velocidad es alta; este sistema presenta la ruptura de la capa de zinc. Con la inspección visual se corrobora que presenta la aparición de óxidos de hierro sobre su superficie.



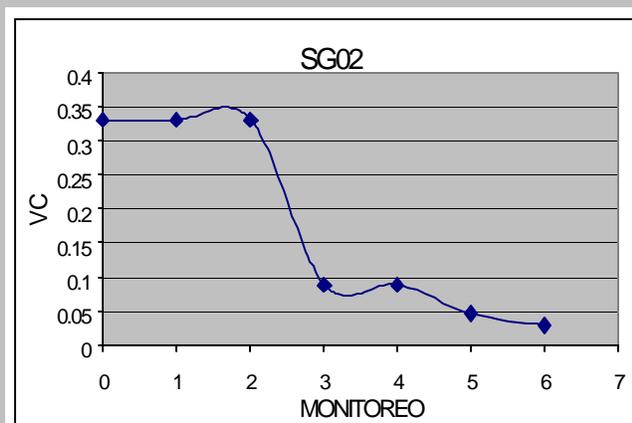
**MONITOREO 6.** Para este monitoreo, los sistemas 10 y 11 están en el proceso de corrosión. Los sistemas 8 y 9 **presentan una pasivación total debido a la presencia de carbonatos** en ellos. Los sistemas 2 y 4, presentan velocidades de corrosión muy leves casi cero, pero se observa aun el efecto de los óxidos sobre la superficie del metal.

Tabla 15. Velocidad de corrosión para cada sistema en el tiempo.

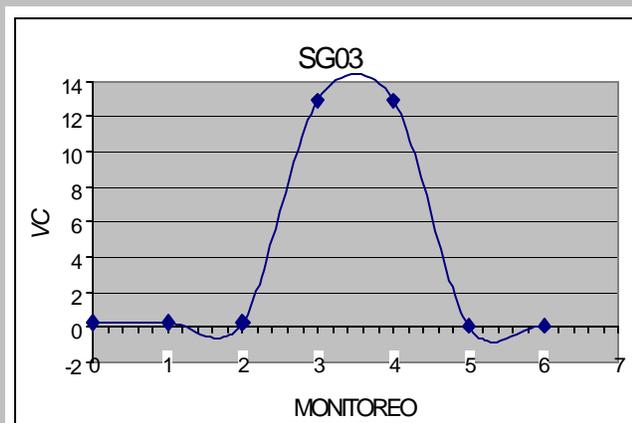
TABLA 15. VELOCIDAD DE CORROSION POR MONITOREO EN CADA SISTEMA  
(ACERO GALVANIZADO)



En el sistema SG01 se observa que la velocidad de corrosión inicial es mayor que en los demás monitoreos hechos, en ese instante la probeta se encontraba nueva y no existían productos de corrosión de Zinc sobre la estructura. Se observa la protección de los productos de corrosión en el tiempo.

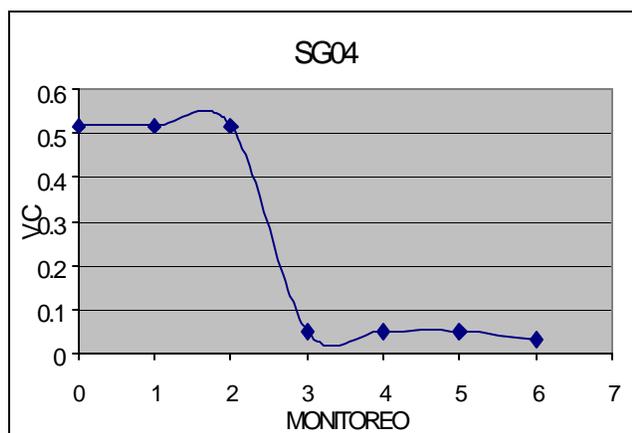


El comportamiento en el tiempo se ve igualmente influenciado como en el anterior sistema, donde el monitoreo de mayor velocidad de corrosión es el cero.

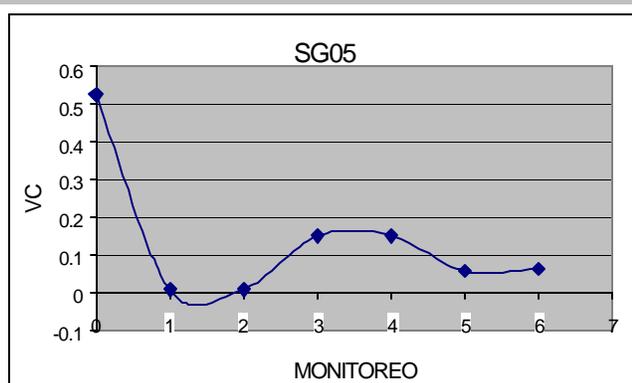


En este sistema observamos un comportamiento muy similar su **menor cantidad de Cloruros produce una menor velocidad de corrosión**, pero se ve que a partir del 5 monitoreo su velocidad de corrosión dejó de disminuir y va en aumento, producto del posible rompimiento de las capas de óxidos.

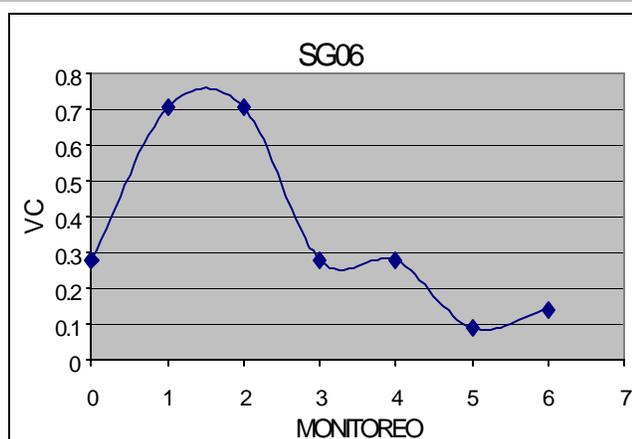
**TABLA 15. VELOCIDAD DE CORROSION POR MONITOREO EN CADA SISTEMA (ACERO GALVANIZADO)**



Para los monitoreos realizados vemos que en el monitoreo inicial, al igual que en los otros sistemas se produce la mayor velocidad de corrosión, pero este sistema presenta un aumento en la velocidad en el monitoreo 3 lo que nos indica que los Cloruros existentes en el actuaron sobre la capa de óxido protector más rápidamente.

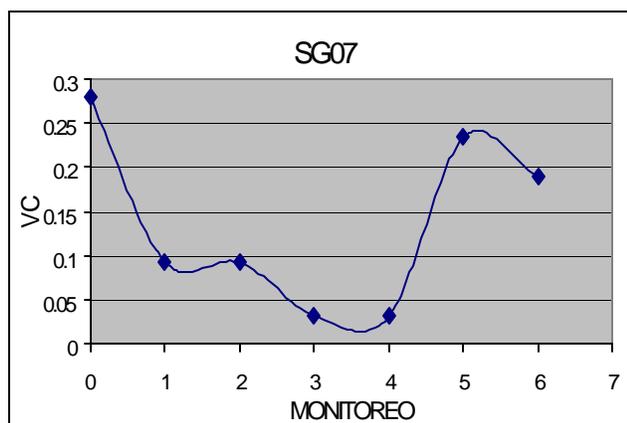


En el monitoreo la velocidad de corrosión estuvo prácticamente en cero, pero esta **velocidad de corrosión aumentó más rápidamente y en mayor proporción debido a la concentración mayor de Sulfatos** presentes; se produce una pasivación al final.

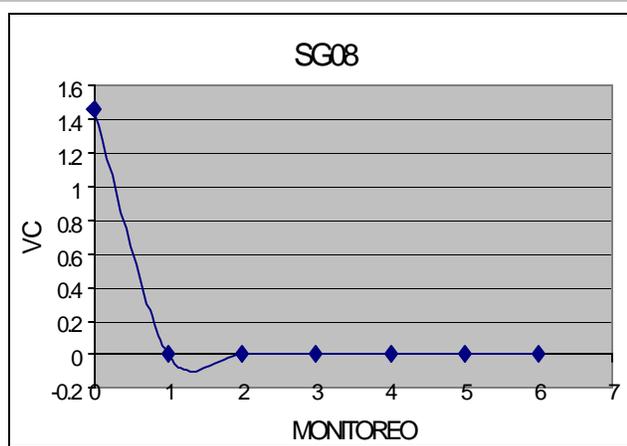


Inicialmente el medio neutro que posee este sistema registra un valor alto de velocidad de corrosión, pero se incrementa notablemente en el primer monitoreo y corroborando la inspección visual se decreta en los siguientes monitoreos, ya que no se observa la formación de capas de óxido sobre el material.

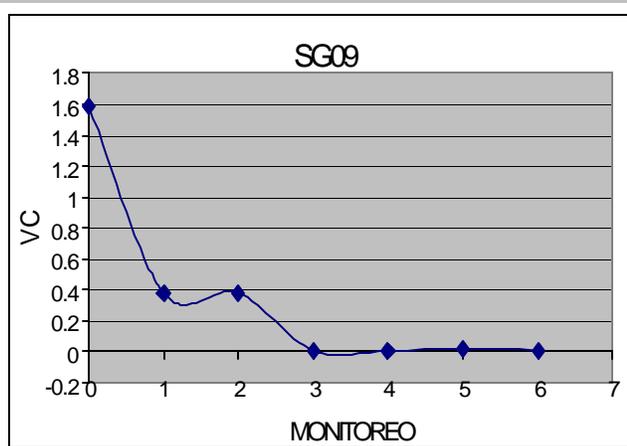
**TABLA 15. VELOCIDAD DE CORROSION POR MONITOREO EN CADA SISTEMA (ACERO GALVANIZADO)**



En el monitoreo 5 presenta un alto valor de velocidad de corrosión esto indica que los Cloruros presentes rompieron la doble capa y están haciendo efecto sobre la superficie del metal.

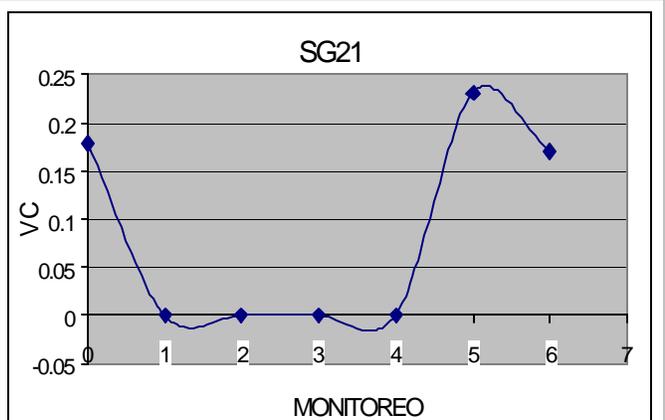
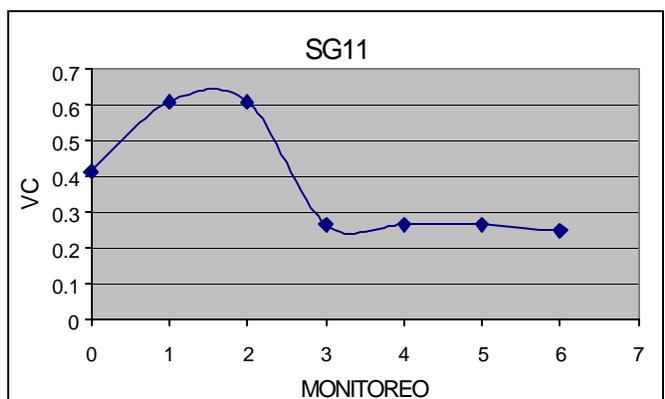


El comportamiento de este sistema es muy singular ya que se encuentra en un medio muy básico, pero se observa una total pasivación del proceso de corrosión, en los monitoreos posteriores al inicial. De hecho las características fisicoquímicas del sistema 7 y 8 son muy similares.



Es el mismo comportamiento del sistema anterior no se observa sobre la superficie del metal alguna capa de óxido proveniente del metal.

**TABLA 15. VELOCIDAD DE CORROSION POR MONITOREO EN CADA SISTEMA. (ACERO GALVANIZADO)**



Este sistema es un acero galvanizado con 4 años de exposición. **La velocidad inicial de corrosión no fue la mas alta debido a que ya existía una capa de óxidos de Zinc sobre la superficie**, se nota el **incremento de la vc. en el primer monitoreo, debido al efecto de los Cloruros** en el sistema. Además este sistema presenta el mismo comportamiento del sistema 1, ya que están expuesto al mismo electrolito; lo que demuestra que lo óxidos formados ambientalmente sobre esta probeta son buenos protectores. Ya que proporcionan el mismo efecto protector.

El proceso inicial sobre el elemento fue bastante apreciable, pero inmediatamente hubo una pasivación de la superficie. En el 5to monitoreo aparece una velocidad de corrosión alta y se observa en la inspección visual debido a la formación de productos de óxido de hierros sobre su superficie.

**5.1.3. Análisis de las pruebas de EIS.** En las pruebas de EIS, se puede observar al igual que en las pruebas de LPR la relación existente entre el estado

de corrosión y los parámetros de las pruebas electroquímicas. De las pruebas de EIS se puede obtener el circuito equivalente que simula los espectros de impedancia de los sistemas, en algunos casos estos sistemas no fueron de fácil obtención.

En los diferentes circuitos se vio la correspondencia de las diferentes capas superficiales producto del proceso corrosivo con la inclusión en ellos de nuevos elementos eléctricos. Esto sugiere que las ***impedancias en laboratorio proporcionan criterios de predicción de estados de corrosión de estructuras.***

A lo largo de los monitoreos se encontraron diversos parámetros que resultaron de interés para estimar el estado de corrosión de una estructura enterrada y se observó el cambio de éste a través del tiempo, razón por la cual se tuvieron en cuenta a la hora de la implementación. En el ANEXO 2 se encuentran los parámetros obtenidos de la caracterización de los sistemas a través de las pruebas de EIS.



**Foto 2. Cambio en la coloración de las soluciones debido a la solubilización de los productos de corrosión.**

Dentro del análisis de las curvas de impedancia se observó que en **los sistemas donde presentaban mayor cantidad de Cloruros, su impedancia a altas frecuencias era menor, pero a bajas frecuencias se presentaba un fenómeno contrario**; esto ratifica los datos de LPR donde se observa mayor velocidad de corrosión para estos sistemas

Dentro del análisis visual podemos observar que los sistemas donde el **pH es ácido (entre 4 y 6), los productos de Zinc no se adhieren fuertemente a la superficie de las probetas, presentándose una solubilización de estos óxidos de Zinc, una capa de color blanco sobre la superficie del metal y sólidos suspendidos en la solución.** Estos **óxidos de Zinc podría estar variando o influenciado las medidas electroquímicas en especial las de EIS**, debido a su sensibilidad para detectar capas de óxidos sobre los metales. Así mismo se puede ver en la inspección visual que en los sistemas donde se presentaba un **pH básico (entre 6-8), no hay solubilización del óxido de Zinc y no se presenta la misma capa de color blanco que se observa en los sistemas más ácidos**; además en **los sistemas donde hay presencia de Carbonatos el pH tiende a ser básico** y se puede observar que **el efecto que tienen los Carbonatos es de pasivar del proceso de corrosión**, lo que nos dice que no hay productos de Zinc reaccionando en estos sistemas.

La influencia de los Sulfatos en el proceso de corrosión es muy similar a la de los Cloruros, razón por la cual se presentan notables daños en la probeta (mirar sistemas SG04 donde aparece una cantidad de Cloruros menor a la de otros sistemas). En esta probeta se puede observar la aparición de productos localizados de corrosión de Hierro, esto representa que **los sistemas que presentan cantidades altas de sulfatos producen estados de picado sobre las capas de Zinc depositadas sobre el acero.**

El comportamiento a través del tiempo de algunos parámetros que en el análisis resultaron ser significativos para la correlación de las variables electroquímicas

con la condición superficial de los sistemas es bastante complejo a la hora de analizar. En ellas se debe tener en cuenta que ***durante el proceso de corrosión de los sistemas estos elementos están reaccionando continuamente creando capas de oxido protector que se pasiva y después se rompen***. Tal fenómeno se puede apreciar en la tabla 14 con la inclusión de algunos parámetros de las curvas de EIS.

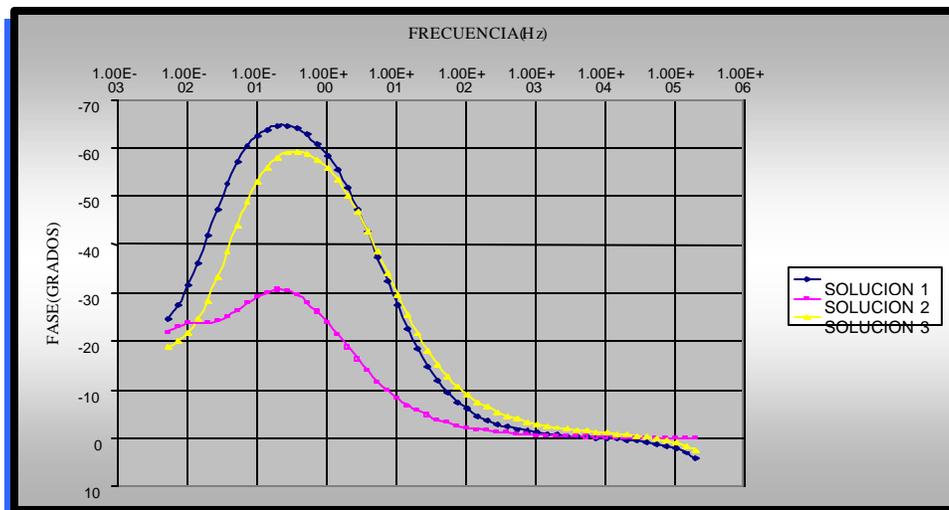


Figura 15. Estructura de igual estado de corrosión en tres diferentes medios, se observa diferencias en las curvas de fase.

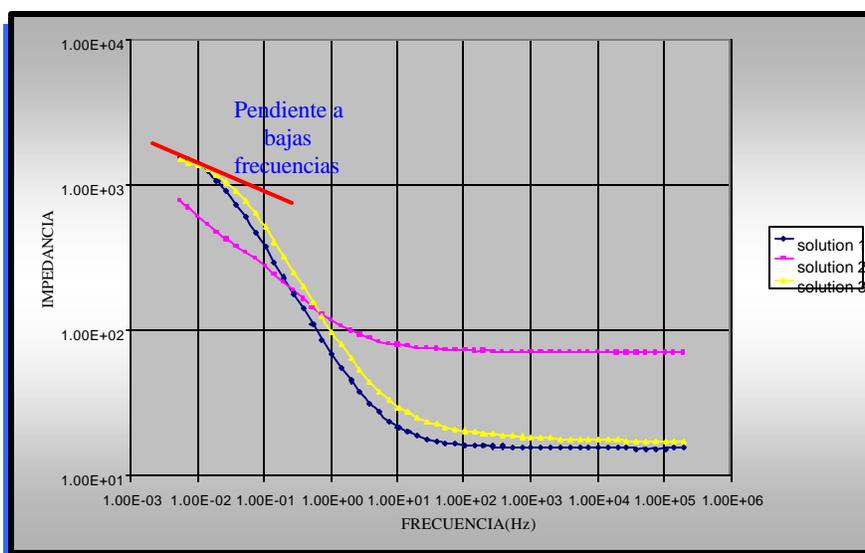
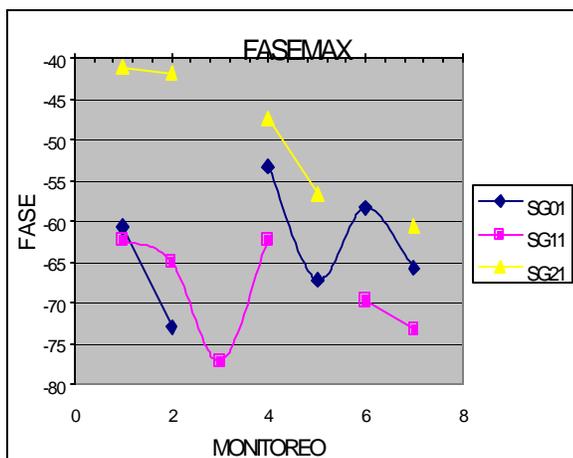


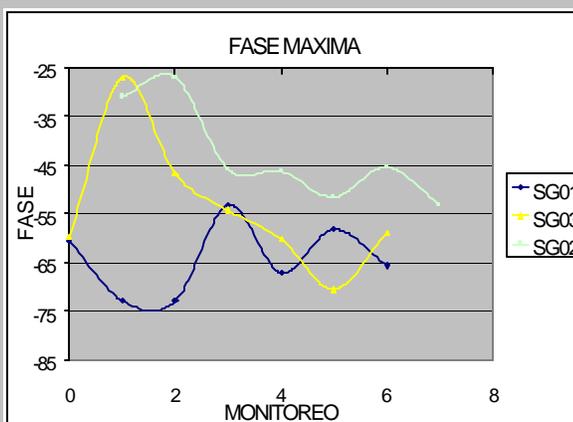
Figura 16. Diferencias en la curva de impedancia en tres estructuras de igual estado de corrosión en tres diferentes medios.

Tabla 16. Parámetros electroquímicos de EIS.

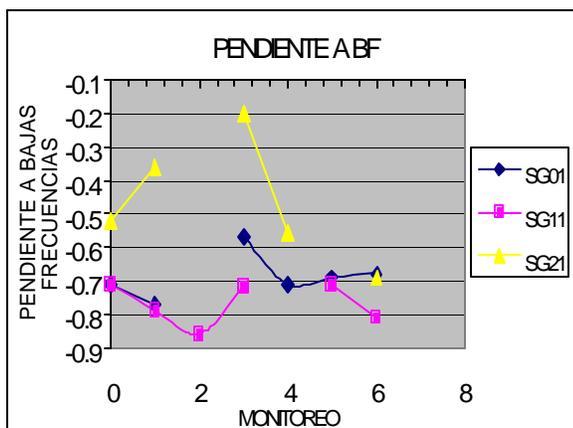
## TABLA 16. PARAMETROS ELECTROQUIMICOS DE EIS



En esta gráfica se puede observar el cambio que sufre la fase a través de los monitoreos en tres sistemas donde la variación radica en la preparación superficial de la probeta. Observamos que en los eventos 0 y 4 donde las soluciones tienen sus valores iniciales, la fase máxima es mayor para la probeta con un nivel de corrosión intermedia, es mínima para la probeta con un nivel de corrosión máximo y es intermedia para el electrodo con un nivel de corrosión mínimo.

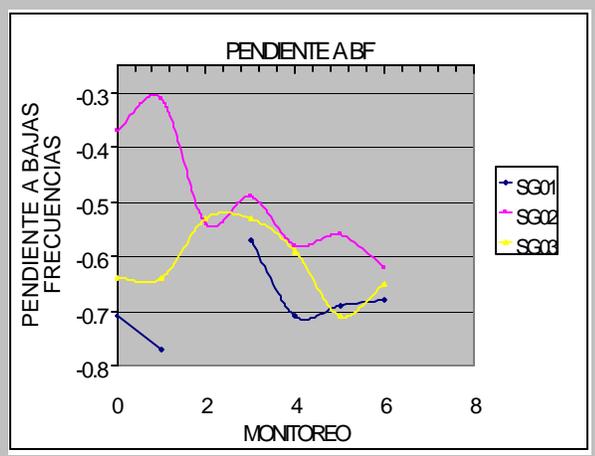


En esta gráfica se puede observar el cambio que sufre la fase a través de los monitoreos, debido al efecto que tienen los contaminantes sobre tres estructuras iguales. Cada respuesta corresponde a la exposición de tres probetas con el mismo grado de preparación superficial, entre electrolitos con diferentes características.



En esta figura se pueden ver tres sistemas cuya variación corresponde a la preparación superficial. En los monitoreos podemos observar la variación de este parámetro; la relación que existe entre la  $R_p$  y este parámetro es directamente proporcional y se puede asociar a las velocidades de corrosión. En el sistema donde se presenta mayor variación es en el sistema con el estado superficial más corroído, debido a los productos de óxido de zinc depositados en la superficie del electrodo

**TABLA 16. PARAMETROS ELECTROQUIMICOS DE EIS**



En estos sistemas la variación radica en los componentes químicos de las soluciones, para el sistema que contiene mayor cantidad de Cloruros se presentan las mayores pendientes a bf, no siendo esto norma en todo el proceso de corrosión del sistema, ya que aparecen puntos en el monitoreo 5 donde el sistema con cantidad de Cloruros intermedios presenta una mayor pendiente.

## 5.2. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA.

Para encontrar una relación entre los datos de impedancia y el estado de corrosión de las estructuras evaluadas, se recurrió al análisis de la respuesta en frecuencia. Debido a que las respuestas obtenidas a través de las pruebas electroquímicas son producidas por la variación de una señal en el dominio de la frecuencia se puede a partir de aquí obtener la función de transferencia que describe el comportamiento del sistema.



**Figura 17. Diagrama de función de transferencia de un sistema**

Para el análisis se tomó la magnitud de la función de transferencia; la entrada esta representada por el barrido en frecuencia de una señal de excitación de 20 mV.

$$X = |X| \angle b$$

$$Y = |Y| \angle q$$

**Ecuación 10. Función de transferencia**

$$H = \frac{|Y|}{|X|} \angle q - b$$

Antes de realizar cualquier análisis se debe hacer una normalización de la frecuencia con el fin de obtener una distribución geométrica de esta variable, este procedimiento es propio del análisis en el dominio de la frecuencia. La función de transferencia se halla con base en la impedancia compleja de los sistemas monitoreados y su entrada, ambos valores se encuentran en el dominio de la frecuencia.

**5.2.1. Análisis de la función de transferencia por medio del estudio de sus derivadas.** Analizando los diferentes sistemas mediante sus derivadas encontramos diferencias entre ellos. Para observar mejor estos resultados se toma como ejemplo el sistema SG01, en él se encuentra que inicialmente la interpolación y el ajuste hecho a este sistema se logra a través de un sistema de tercer orden, de tal manera que se puede hacer un análisis de la tercera derivada de los resultados de impedancia.

En la figura 18 se puede encontrar la gráfica para cada derivada del sistema SG01 para los 5 monitoreos realiza sobre este sistema, este análisis se realiza con un algoritmo desarrollado en MATLAB para tal fin.

Si observamos los datos constantes de la ecuación representativa del sistema y de cada derivada en cada monitoreo podemos observar su tendencia, los valores aumentan y después disminuyen en todos los casos observados, lo cual no

proporciona una buena tendencia para el análisis y correlación con el estado de corrosión.

$$Y1 = 5.2526*x^3 - 0.2301*x^2 + 0.0287*x + 0.0131$$

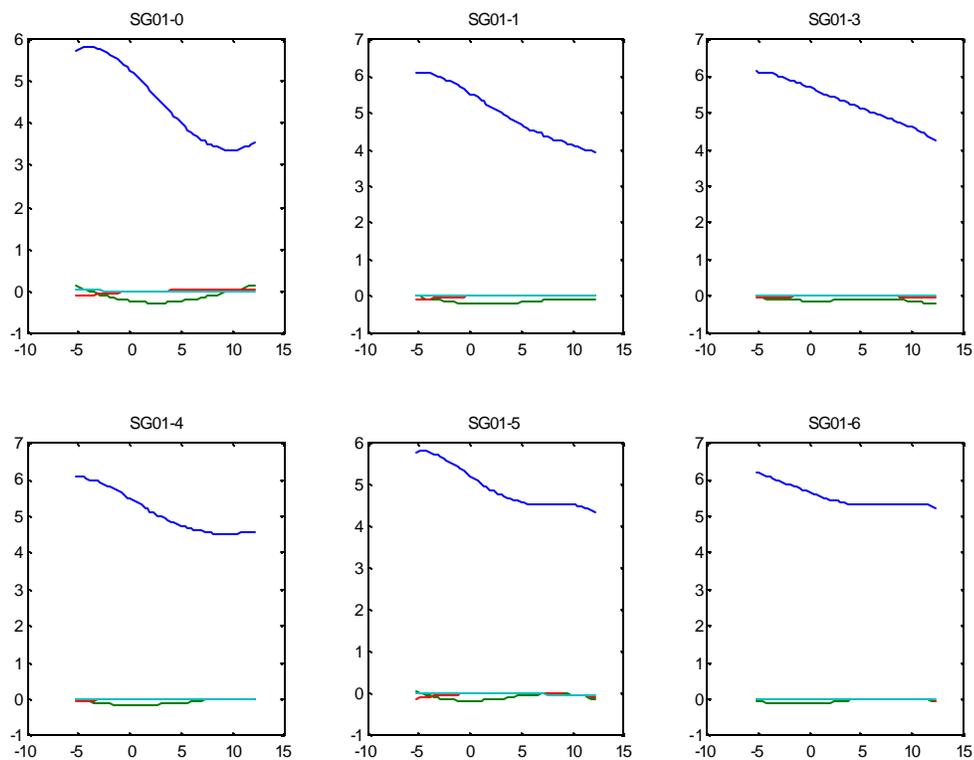
$$Y2 = 5.5323 *x^3 - 0.1747*x^2 + 0.0085*x + 0.0079$$

$$Y3 = 5.6822*x^3 - 0.1214*x^2 + 0.0025*x + 0.0050$$

$$Y4 = 5.4707*x^3 - 0.1701*x^2 + 0.0027*x + 0.0093$$

$$Y5 = 5.2066*x^3 - 0.1756*x^2 + 0.0043*x + 0.0134$$

$$Y6 = 5.6371*x^3 - 0.1085*x^2 + 0.0107*x + 0.0054$$



**Figura 18. Representación del sistema SG01 a través de los monitoreos y de las derivadas de sus datos de impedancias.**

Al analizar los otros sistemas de la matriz, se observa el mismo comportamiento; como conclusión del anterior análisis se encuentra que la aplicación del criterio de la derivada para encontrar una tendencia de los sistemas no es tan aplicable al análisis de sistemas.

**5.2.2. Análisis de polos y ceros.** Otro método de análisis de la función de transferencia de los sistemas es el diagrama de polos y ceros de la respuesta compleja. Con este diagrama se pueden encontrar la estabilidad del sistema y el comportamiento de sus polos en el tiempo. De la función de transferencia, se pueden extraer los polos del denominador y los ceros del numerador; estos valores son propios de cada sistema y representan en su totalidad el comportamiento del sustrato metálico en el medio determinado.

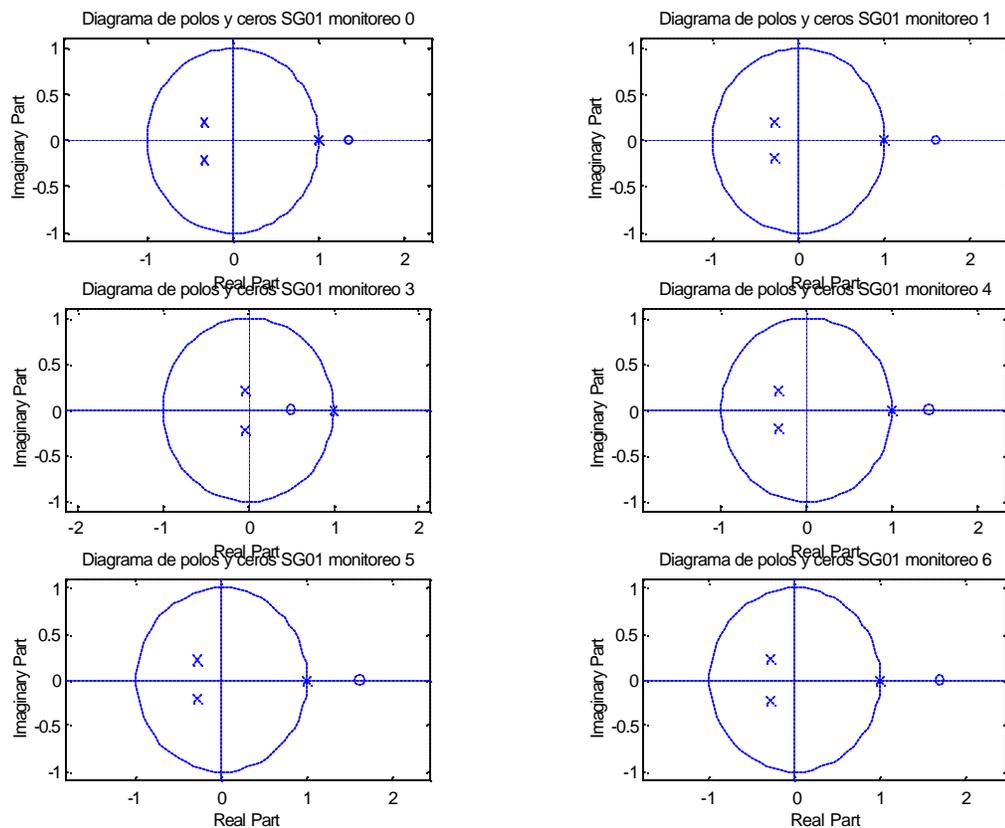
En la figura 19 se puede encontrar la representación del diagrama de polos y ceros para el sistema SG01. Observamos que la tendencia de los polos y los ceros no está definida y aparentemente no proporciona una idea clara del comportamiento. Se recomienda estudiar la estabilidad de sistemas electroquímicos con este método para posteriores trabajos de investigación. Los polos imaginarios (marcados como x en la gráfica) se encuentran en el eje negativo, y se aproxima y aleja del eje real y del eje complejo. El comportamiento de los ceros (marcado como 0 en la gráfica) es más estable y presenta una mejor tendencia. El comportamiento en los demás sistemas es similar.

**5.2.3. Análisis del lugar geométrico de las raíces.** La característica básica de la respuesta transitoria de un sistema en lazo cerrado se relaciona estrechamente con la ubicación de los polos en lazo cerrado. ***Se parte del supuesto de que el sistema electroquímico tiene retroalimentación debido al efecto de la reacción continua que existe en la celda de corrosión en el momento de hacer la evaluación.*** Si el sistema tiene una ganancia de lazo variable, la ubicación de los polos en lazo cerrado depende de la ganancia de lazo elegida.

Esta ganancia es típica de cada sistema y define el comportamiento de la función de transferencia con retroalimentación. En la figura 20 se puede encontrar la

gráfica del lugar geométrico de las raíces junto a la tendencia de los polos y ceros al variar su ganancia.

Observamos en la gráfica que en los diferentes monitoreos los polos del sistema SG01 tienen la misma tendencia de alejarse del eje real hacia valores realmente grandes, excepto en el monitoreo 3, que se mueven a lo largo del eje real. Los polos se mueven siempre sobre el eje real, en unos monitoreos más que otros. En el monitoreo 3 el comportamiento de los polos y ceros no tiene la misma tendencia que tienen, que se pueden observar en los demás monitoreos.



**Figura 19. Representación del diagrama de polos y ceros del sistema SG01 en cada monitoreo**

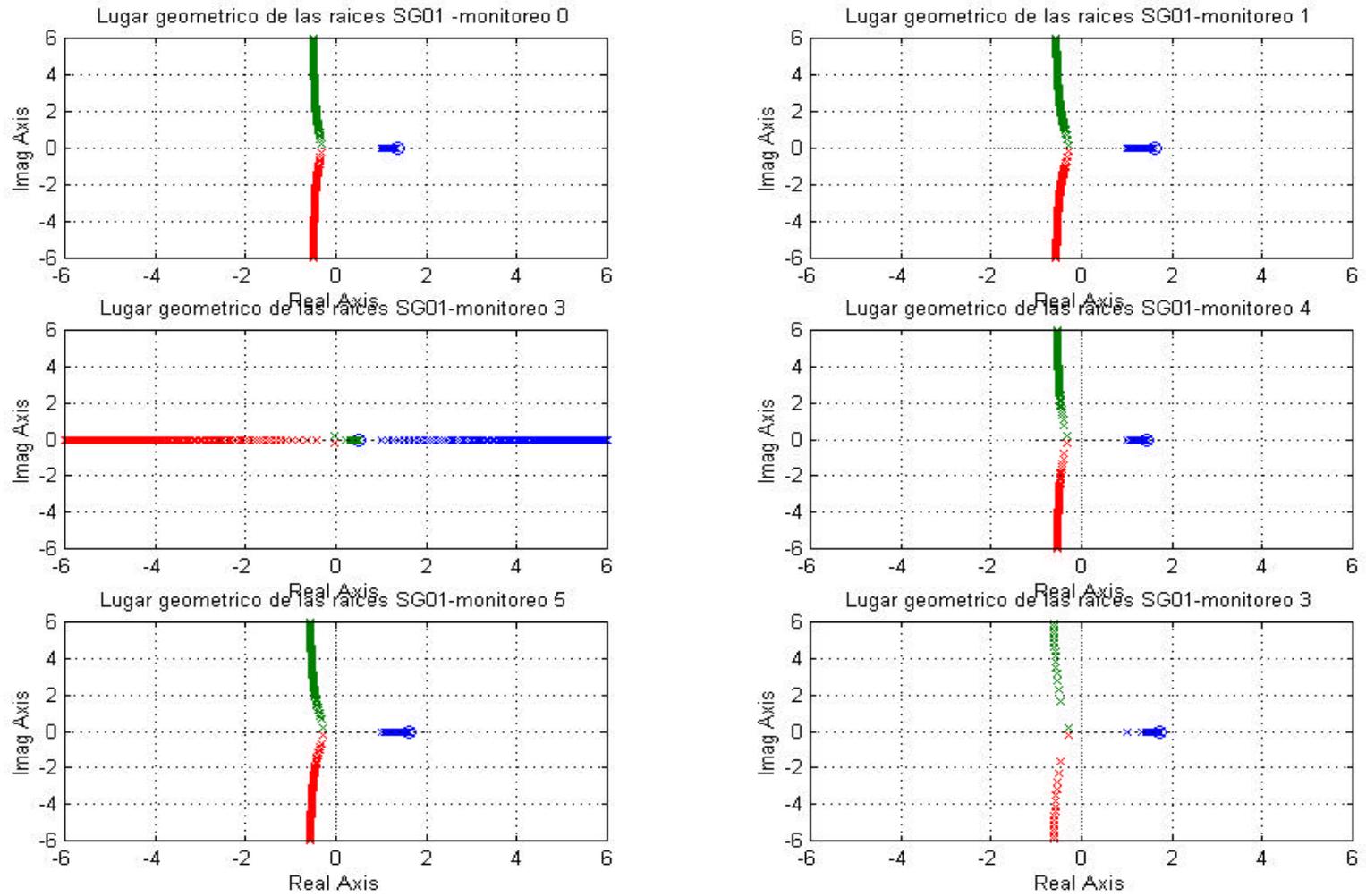
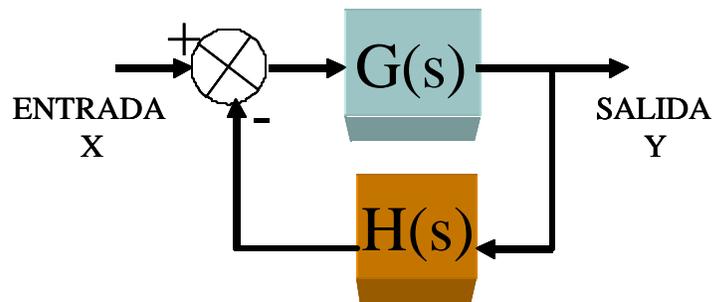


Figura 20. Grafica del lugar geométrico de las raíces para el sistema SG01.

Si vemos el diagrama de lazo cerrado de la figura 21, el sistema electroquímico tendría una retroalimentación negativa y una ganancia ligada a esta retroalimentación y la ecuación característica se escribe como:

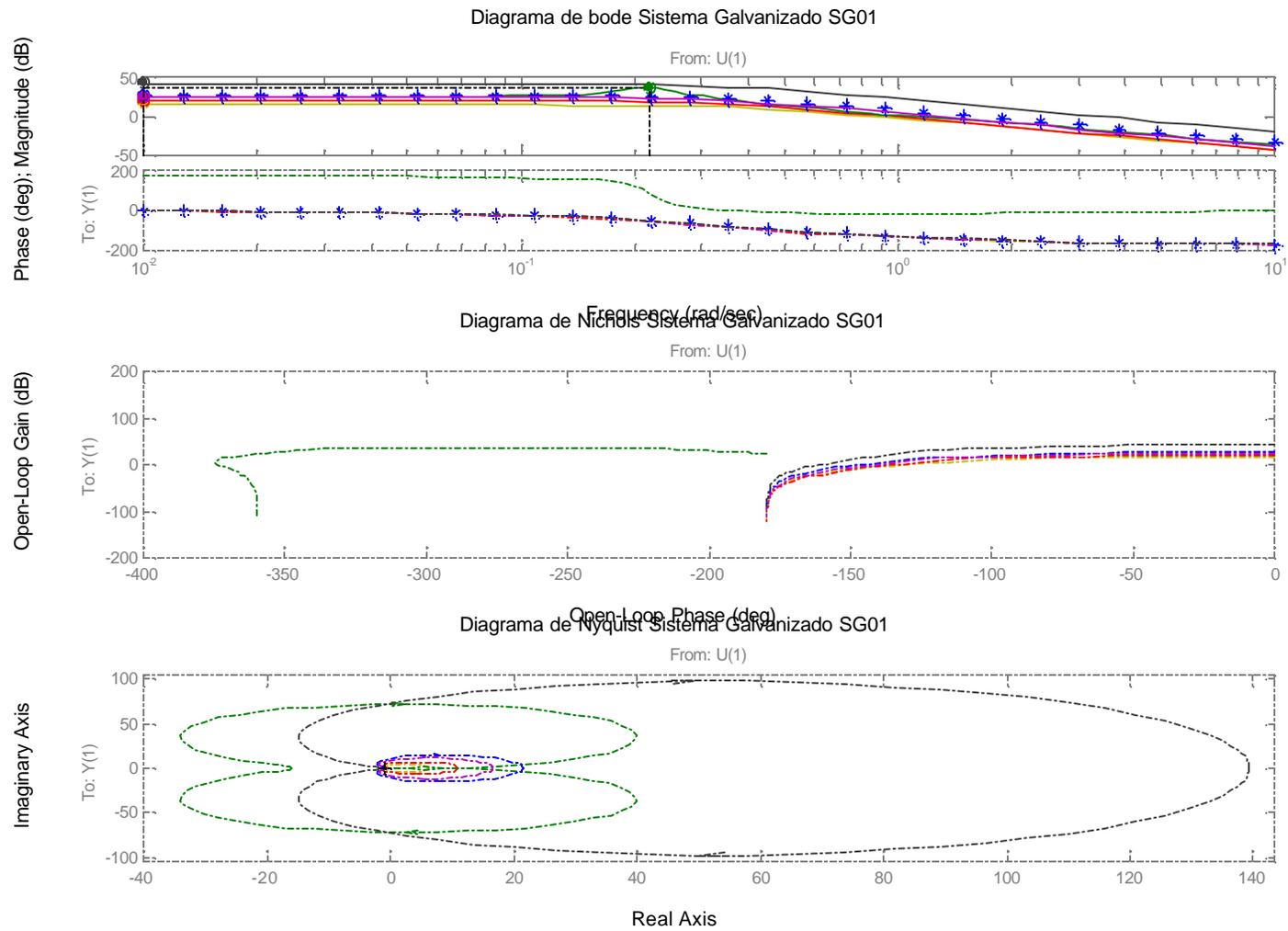
$$1 + K^*(s+z_1)(s+z_2)\dots(a+z_m)/(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n) = 0$$



**Figura 21. Esquema para un sistema de control aplicado a un sistema electroquímico.**

**5.2.4. Diagrama de Bode.** El diagrama de Bode es una herramienta muy usada en electroquímica para la visualización de la información obtenida de las curvas de Espectroscopia.

Con estas curvas se puede visualizar cualitativamente el comportamiento del sistema a través del tiempo, al observar curvas de seguimiento de EIS. La idea fundamental es el análisis de la respuesta en frecuencia es encontrar variables que sean de fácil interpretación y tengan una tendencia clara a través del tiempo de evaluación.



**Figura 22. Diagramas de Bode (arriba), Nichols (medio) y Nyquist (abajo).**

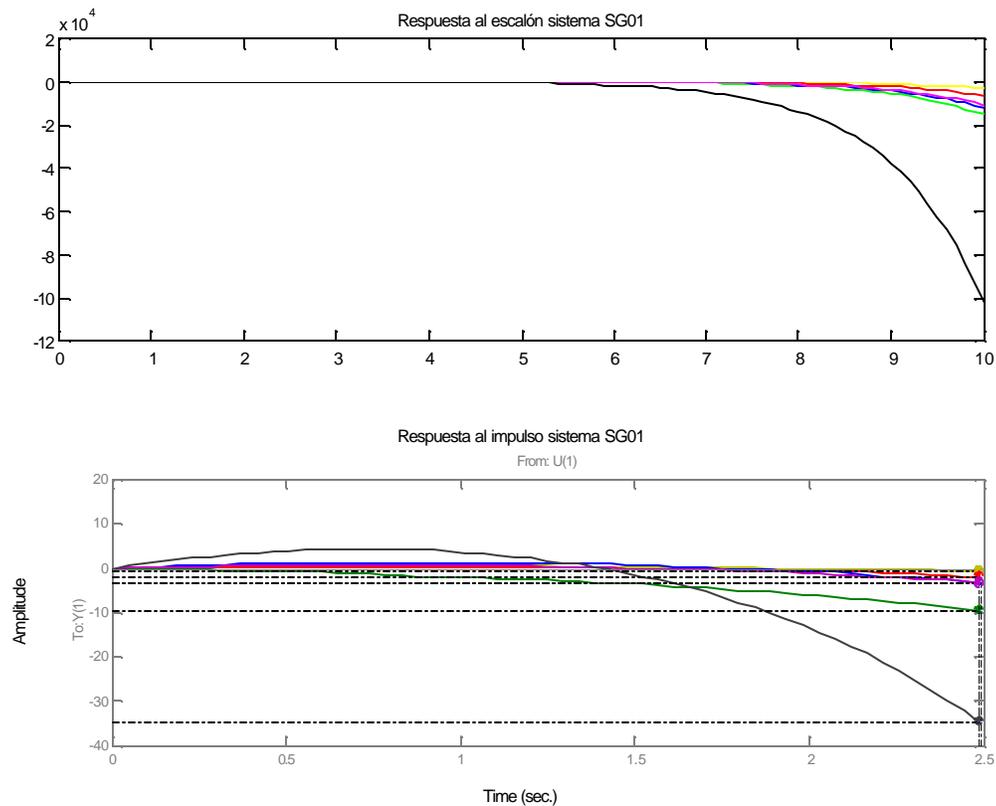
En la parte superior de la figura 22 se encuentra el diagrama de Bode del sistema SG01 en sus diferentes monitoreos, para las tres gráficas de la figura 22 se tiene la siguiente convención: amarillo monitoreo 0; rojo, monitoreo 1, verde monitoreo 3, azul monitoreo 4, magenta monitoreo 5, negro monitoreo 6. Si analizamos el pico de respuesta en el diagrama no se encuentra a simple vista una tendencia clara a través del tiempo del comportamiento del sistema SG01. Este mismo comportamiento se observó en los demás sistemas.

**5.2.5. Diagrama de Nichols.** En el diagrama de Nichols de la figura 22 se puede apreciar la característica en lazo abierto de la fase contra la ganancia.

Al observar el diagrama no encontramos una relación clara entre estado de corrosión y el valor de la ganancia en lazo abierto. El mismo comportamiento se observó en los diferentes sistemas.

**5.2.6. Diagrama de Nyquist.** En el diagrama de Nyquist de la figura 22 se puede apreciar la impedancia real contra la compleja.

En esta gráfica se puede observar una tendencia más clara del sistema SG01 a través del tiempo, el comportamiento es muy similar para los 6 monitoreos registrados, excepto para el monitoreo 3 que presenta un comportamiento diferente a los demás y de difícil interpretación. Se recomienda ampliar este estudio, en un trabajo de investigación posterior para ampliar estos resultados. Si observamos la gráfica encontramos que el **valor máximo de impedancia en el eje real representa una clara tendencia en aumento a medida que el estado de corrosión es más avanzado**. Este comportamiento se observó en los diferentes sistemas.



**Figura 23. Diagrama de la respuesta al escalón (arriba), respuesta al impulso (medio y abajo) construida por dos métodos diferentes.**

**5.2.7. Respuesta al impulso.** Esta señal es usada como señal de prueba para caracterizar y comparar el comportamiento de varios sistemas sobre la misma base. Al aplicar esta señal a un sistema electroquímico se obtiene una respuesta que proporciona información sobre la respuesta transitoria del sistema.

Es muy común encontrar este tipo de análisis para comprender la estabilidad de un sistema y la respuesta en estado estable de dicho sistema. En la figura 23 encontramos la respuesta al impulso del sistema SG01, al analizar esta salida encontramos que existe una tendencia entre su amplitud y el estado de corrosión de la estructura, excepto de nuevo para los datos correspondientes al monitoreo 2.

***Este pico de respuesta determina que a medida que el nivel de corrosión presenta mayores valores, la amplitud disminuye y se hace más negativa o menor.*** Este caso se presentó para los demás sistemas evaluados.

**5.2.8. Respuesta al escalón.** La respuesta al escalón al igual que la respuesta al impulso se usa para determinar el comportamiento de varios sistemas frente a una señal de prueba.

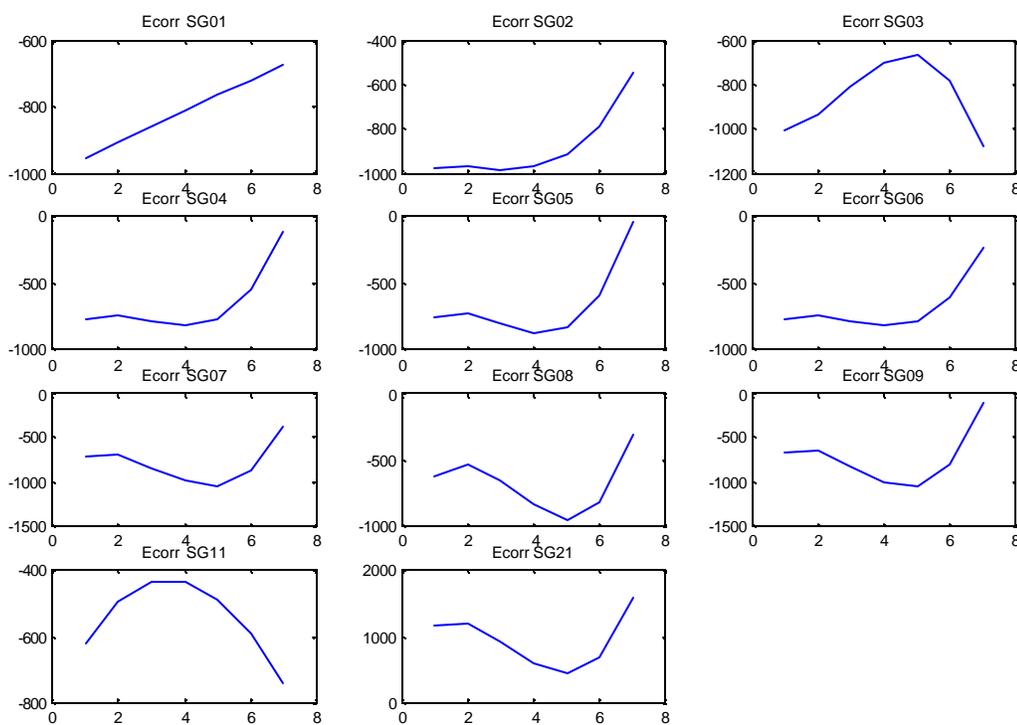
Esta señal recomienda ser aplicada en sistemas que estén sujetos a perturbaciones repentinas. Aunque no es el caso de los sistemas electroquímicos cuyos procesos no son repentinos, pero la caracterización de la respuesta al escalón podría estar ligada a los cambios cinéticos y termodinámicos que ocurren en el sustrato metálico. Si observamos la figura 23 encontramos que existe una clara relación entre estado de corrosión y el pico de respuesta de la señal. ***En este caso la señal se va haciendo más negativa a medida que el estado de corrosión se hace más severo.***

### **5.3. POTENCIAL DE CORROSIÓN**

**El potencial de corrosión es una medida indirecta del estado de corrosión en que puede encontrarse la estructura;** esta medida es propia del material evaluado pero no es representativo de la totalidad de la estructura si la corrosión no es uniforme. Es decir si una estructura tiene un cierto potencial de corrosión quiere decir que la estructura presenta en su totalidad o en algunas zonas ciertos grados o estados de corrosión.

Por ejemplo para el caso del acero galvanizado en estudio, el potencial de corrosión de un estructura estará por el orden de  $-1.1$  V. A medida que el zinc reacciona con el electrolito, este potencial tiende a hacerse más positivo. Una vez el zinc sea consumido la estructura presentará potenciales de corrosión muy cercanos al metal base, que en este caso es acero, que se encuentra por los  $-500$  mV.

**El potencial de corrosión presenta una buen estimativo del estado de corrosión de la estructura enterrada**, el problema es que este potencial registrado no representa una medida absoluta, y pertenece a pilas de corrosión específicas del sustrato metálico.



**Figura 24. Grafica de Potencial de corrosión para los sistemas monitoreados.**

En la figura 24 vemos la tendencia de algunos sistemas a corroerse debido al efecto de los contaminantes de las soluciones simuladas, el potencial de corrosión

en el tiempo tiende a volverse más positivo, debido a la aparición de diferentes productos de corrosión propios del proceso evolutivo de deterioro de la estructura. En cambio con la velocidad de corrosión no ocurre la tendencia definida del potencial. Esta velocidad depende igualmente de los productos de corrosión pero vemos que a medida que se deteriora la estructura aparecen óxidos de tipo protector sobre los sistemas y hacen que la velocidad de corrosión varíe en el tiempo.

#### **5.4. ANALISIS DE LAS VARIABLES FISICOQUIMICAS**

Inicialmente se determinó la importancia de los parámetros fisicoquímicos para estimar el estado de daño de la estructura o la corrosividad del medio donde se encuentra el metal enterrado. En el diseño experimental se hizo el esquema de la matriz que combinaba estos parámetros y los valores que podrían adoptar para que dicha matriz representará o abarcará un amplio rango de valores de dichas variables. En la tabla 17 se encuentran los resultados de la evaluación de las soluciones a lo largo del tiempo de evaluación. En la evaluación preliminar se hicieron monitoreos de contaminantes fisicoquímicos en los monitoreos 3 y 6.

Debido a la variación de estos contaminantes y la pérdida de ellos debido a la evaporación y la reacción con el metal, se hace necesario evaluarlos en cada monitoreo y reemplazar la solución cada vez que se vaya a realizar un nuevo monitoreo. El objetivo de este cambio metodológico es la necesidad de mantener constantes las variables de entrada para garantizar uniformidad en la matriz diseñada para construir la lógica Fuzzy del sistema.

**Tabla 17. Valores de los monitoreos fisicoquímicos de las diferentes variables, a los diferentes monitoreos.**

SISTEMA	pH			SULFATOS			ALCALINIDAD			CLORUROS		
	INICIAL	MONITOREO 3	MONITOREO 6	INICIAL	MONITOREO 3	MONITOREO 6	INICIAL	MONITOREO 3	MONITOREO 6	INICIAL	MONITOREO 3	MONITOREO 6
SG01	4	6.25	8.22	0.4	0.43	0.39	0	0.58	0.7	15	14.53	16.2
SG02	4	6.42	8.36	0.4	0.43	0.35	0	0.58	0.58	5.00E-03	0	0
SG03	4	7.72	3.92	0.4	0.09	0.35	0	0.7	ND	1	0.92	1.04
SG04	4	8.25	3.56	0.057	0.35	0.053	0	0.7	ND	15	14.56	15.78
SG05	4	7.9	3.72	25	21.66	25.67	0	0.7	ND	15	14.11	15.17
SG06	7.1	9.68	3.64	0.4	0.44	0.39	0	6.22	ND	15	12.16	15.04
SG07	7.2	9.66	9.38	0.4	0.47	0.4	34	15.02	10.09	15	14.02	17.06
SG08	8.9	9.73	9.96	0.4	0.44	0.37	77	45.06	45.29	15	14.95	16.17
SG09	8.9	9.65	9.98	0.4	0.44	3.86	41	28.86	31.68	15	14.88	16.23
SG11	4	8.24	8.75	0.4	0.43	0.39	0	0.58	0.52	15	13.67	16.39
SG21	4	7.98	3.2	0.4	0.45	0.46	0	0.58	ND	15	14.85	16.1

Si observamos las diferentes variables y sus valores en los diferentes monitoreos, notamos que **no existe una relación clara y directa entre las variables fisicoquímicas y el estado de corrosión de la estructura. Pero si existe una reacción entre las variables y la corrosividad del sistema.**

La variable alcalinidad ( $\text{HCO}_3$ ) tiene un comportamiento en el tiempo, de tipo parabólico y es diferente para cada sistema, los sistemas 7, 8 y 9 tienen valores diferentes a cero, que corresponde al valor de los otros sistemas.

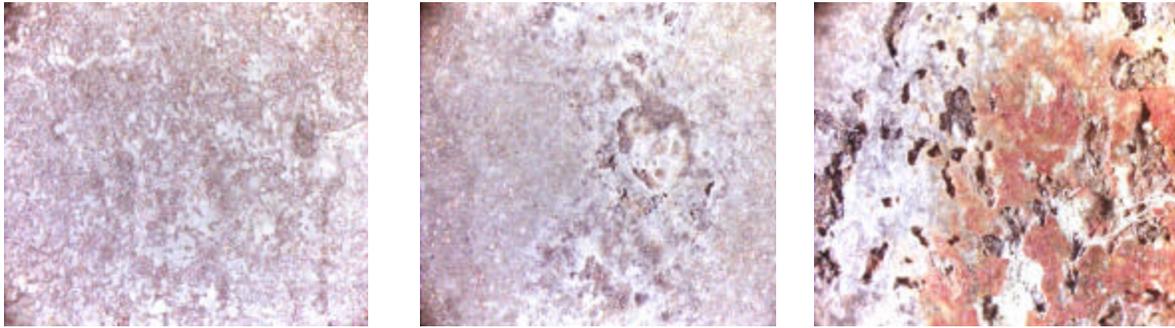
Las variables sulfato, cloruros y pH de bs sistemas no tienen correlación entre ellas y entre los estados de corrosión, pero si con la corrosividad del medio. Los sistemas que tienen un mismo valor para cada variable no conservan un mismo comportamiento. Por ejemplo la variable pH tiene el mismo valor inicial para los sistemas SG01, SG02, SG03, SG04, SG05 pero si observamos su comportamiento en el tiempo no obtenemos un comportamiento similar. Esto se debe a que las otras variables tienen valores distintos para cada uno de estos sistemas. De aquí se puede concluir que las variables de la matriz de ensayos, producen diferentes efectos sobre cada una de los metales expuestos y entre ellas mismas.

## **5.5. INSPECCION VISUAL**

En cada monitoreo se realizó un análisis visual de las estructuras para determinar cual era el estado en el momento de realizar las pruebas. Este punto es fundamental porque lo que se pretende es encontrar una correlación entre las

pruebas electroquímicas hechas y el estado de corrosión de las estructuras inmersas en las soluciones simuladas.<sup>18</sup>

A continuación se muestran algunos registros de una estructura en proceso de corrosión.



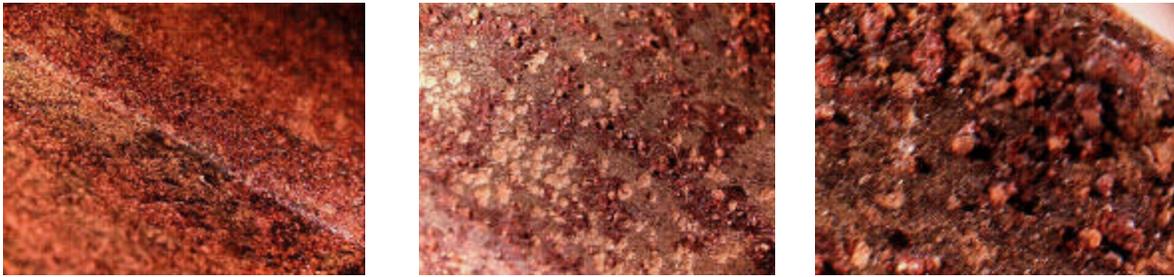
**Foto 3. Estructura de acero galvanizado a través del tiempo. Izquierda segundo monitoreo, centro tercer monitoreo, derecha quinto monitoreo**

Además se observaron en la inspección visual, características de los componentes químicos **como la influencia de Carbonatos en exceso en el proceso de corrosión como agentes pasivadores.**



**Foto 4. Diferentes estructuras en soluciones que contienen diferentes tipos de concentración de Carbonatos además de otros contaminantes monitoreo 3. Izquierda sistema SG03, centro sistema SG07, derecha sistema SG08.**

<sup>18</sup> Observar carpeta de registro fotográfico.



**Foto 5. En el acero al carbono se puede observar al igual que en el galvanizado una variación en el comportamiento de las diferentes estructuras, teniendo una tendencia al picado en los sistemas que contienen mayor cantidad de carbonatos, pasivando el proceso de corrosión en forma uniforme (monitoreo 3). Izquierda sistema SC03., Centro sistema SC07, derecha sistema SC08.**

Así mismo la variación en la cantidad de Cloruros dentro de los sistemas, modifica las características en el proceso de corrosión, lógicamente **a mayor cantidad de cloruros mayor velocidad de corrosión, pero esto también varía en relación con los otros componentes de las soluciones.** En sistemas donde la presencia de carbonatos era mayor se presentaba una disminución del efecto de los cloruros pero había mayor tendencia al picado.

**De igual manera en los sistemas con pH muy corrosivo se presentaba una tendencia a encontrar un nivel de corrosión más severo, pero en los sistemas con igual pH y con la existencia de diferencias en Sulfatos se encontraba un mayor nivel de corrosión en los sistemas donde se presentaban en mayor cantidad.**



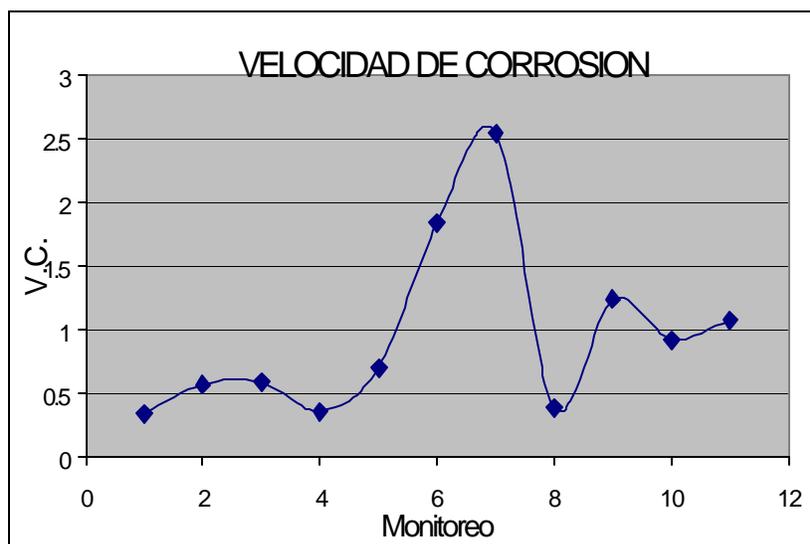
**Foto 6. Diferentes sistemas de acero al carbono monitoreo 2. Izquierda sistema SC04. Centro sistema SC03. Derecha sistema SC05.**

## 5.6. CARACTERIZACION DEL COMPORAMIENTO DE UN METAL A TRAVÉS DEL TIEMPO.

En esta fase se hizo una caracterización de una estructura enterrada en un recipiente de aproximadamente 20 litros el cual se sometió a una contaminación con la solución del sistema 1. La estructura se sometió a un proceso de corrosión acelerada por corriente impresa.

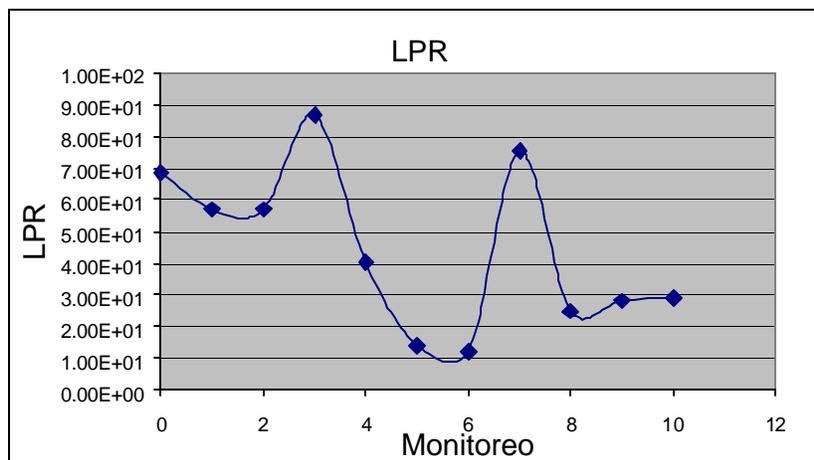
Para esta fase se desarrollaron 10 monitoreos en las cuales se realizaron las pruebas de LPR; EIS; TAFEL. En cada una de ellas se observan los parámetros determinados en la primera fase, pero en ellos se vio una mejor disposición de los datos a través de los monitoreos. Mirar ANEXO 4.

**En las pruebas de LPR se obtuvieron los potenciales de corrosión y ellos van disminuyendo a medida que se observa daño en la estructura.**

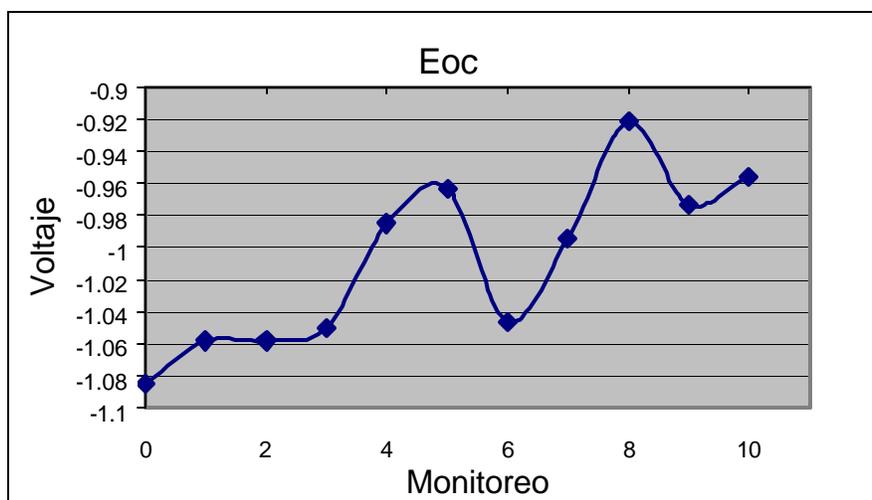


**Figura 25. Velocidades de corrosión en los diferentes monitoreos, en los monitoreos iniciales se observan un incremento de la velocidad de corrosión que estuvo por debajo del máximo,**

Se observa que en el monitoreo 7 la estructura tuvo un aumento considerable, en la LPR, pero en el monitoreo 8 la estructura se pasivo dejando ver una velocidad de corrosión muy baja.



**Figura 26.** EL cambio a través del tiempo de la LPR es muy representativo de los sistemas de acero galvanizado, vemos en el monitoreo 7 que la LPR es muy grande y esta ligada a la alta velocidad de corrosión del sistema.



**Figura 27.** El potencial de corrosión muestra el fenómeno de pasivación (monitoreo 6, 9) y activación o rompimiento de la capa de oxido en los demás monitoreos.

A cada uno de los electrolitos montados en laboratorio con base en la matriz de pruebas y con cada uno de los materiales (acero al carbono y acero galvanizado), se les realiza las pruebas electroquímicas en laboratorio de:

*ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIAS*

Barrido en frecuencia: 2 KHz a 2 mHz

Amplitud de la señal: 20 mV

*RESISTENCIA A LA POLARIZACION*

Rango de potencial: -20 mV a 20 mV

Barrido 0.2 mV/seg.,

*CURVAS TAFEL*

Rango de potencial: -250 mV a 250 mV.

Barrido 0.5 mV/seg.

Además se mantuvo una oxigenación constante por medio de un burbujeador para así mantener la solución aireada y homogénea y contribuir al proceso de corrosión debido a la presencia de oxígeno.

Contraelectrodos: acero inoxidable y electrodos de referencia de Ag/AgCl en electrolitos acuosos.

Acero inoxidable, electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub>\* para electrolitos sólidos.

Total de monitoreos 7 monitoreos

Intervalo de monitoreo 22 días

Para las pruebas de EIS se realizó el montaje de la configuración de celda de 2 electrodos y para las curvas LPR y TAFEL se utilizó la configuración de 3 electrodos. Sobre cada una de los sistemas se realiza las pruebas anteriormente mencionadas siendo realizadas primero la curva LPR, después la EIS y después la TAFEL.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> Las pruebas realizadas se encuentran en el archivo CORROSION\portafolio\proyectos\ISAPATAS\isa electroquimica\datos.

## 6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA FUZZY

Como producto final del proceso de investigación, se propuso desarrollar un sistema Fuzzy que correlacionará las variables electroquímicas con el estado de corrosión de una estructura enterrada. A lo largo del desarrollo metodológico se estudiaron varios criterios y técnicas que podrían proporcionar herramientas para el análisis de toda la información obtenida y la consecución del objetivo planteado en el proyecto.

En este capítulo se retomará la evaluación hecha en el capítulo anterior, y se analizarán las variables encontradas a lo largo del desarrollo del presente proyecto, con el objeto de encontrar desde el punto de vista de la lógica polivalente, las variables que implementarán un modelo inicial para ser usado en el monitoreo de corrosión por medio de técnicas electroquímicas.

Inicialmente el modelo propuesto se presenta por medio de un esquema, varias entradas y una salida, con el fin de partir de un modelo sencillo y muy concreto, que pueda ser evaluado una vez construido. Partiendo de este modelo inicial se harán los cambios necesarios que conlleven a la obtención de un modelo un poco más complejo, que pueda entrenado fuera del ambiente laboratorio, es decir en campo, por medio de un sistema neurofuzzy.

## 6.1. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES FUZZY

Las variables Fuzzy se clasifican en dos conjuntos, las variables de entrada y las variables de salida. Las primeras definen el conjunto de pruebas de tipo electroquímico que se deben realizar para obtener la correlación con el conjunto de salida, que para este caso se determinó como el estado de corrosión de la estructura.

Partiendo del análisis realizado a las pruebas electroquímicas de laboratorio se deben escoger las variables de entrada que determinen mayor correlación con el estado de corrosión de la estructura evaluada en laboratorio. Estas estructuras son inspeccionadas visualmente y con base en la tabla propuesta que indica los estados de corrosión para el acero galvanizado, se clasifica. De esta manera se constituye el conjunto de salida.

A continuación se presenta una tabla donde se pueden ver las posibles variables de entrada y su explicación acerca de su aceptación dentro del modelo inicial planteado para el sistema Fuzzy. Vale la pena mencionar que en la tabla aparecen las variables elegidas para la construcción del sistema Fuzzy así como las variables descartadas en el proceso; para un mejor entendimiento del proceso de elección, el lector se debe referir al capítulo anterior que habla del análisis de las posibles variables.

La variable de salida como se mencionó anteriormente es el estado de corrosión de la estructura evaluada, para este caso la determinada bajo la inspección visual.

**Tabla 18. Variables Fuzzy a implementar.**

VARIABLE	EXPLICACIÓN	IMPLEMENTACIÓN
Resistencia a la polarización lineal LPR	El incremento en esta variable determina que el nivel de corrosión va en aumento.	NO
Velocidad de corrosión.	Determina que los sistemas cinéticamente están reaccionando. Esta variable está ligada al medio de exposición de la probeta.	SI
Fase máxima (EIS).	Presenta mucha variación a través del tiempo.	NO
Pendiente a bajas frecuencias (EIS).	Presenta mucha variación a través del tiempo y su tendencia no es buena.	NO
Criterio de la derivada.	El análisis de las tres primeras derivadas de la ecuación característica del sistema no muestra una buena tendencia en el tiempo.	NO
Análisis de polos y ceros.	Su ubicación no representa el estado de corrosión, esta más ligado al proceso de corrosión en sí.	NO
Análisis del lugar geométrico de las raíces	Muy similar al anterior, se recomienda su mayor estudio.	NO
Ganancia en lazo cerrado.	A través del tiempo no presenta una clara tendencia.	NO
Diagrama de Bode (pico de respuesta)	No presenta una clara tendencia a través del tiempo.	NO
Diagrama de Nichols.	No ofrece datos de tendencia claros.	NO
Diagrama de Nyquist.	El valor máximo de impedancia real presenta un aumento a medida que el estado de corrosión aumenta.	SI

VARIABLE	EXPLICACIÓN	IMPLEMENTACIÓN
Respuesta al impulso.	La amplitud pico de la respuesta al impulso se hace más negativa a medida que el estado de corrosión es más avanzado.	SI
Respuesta al escalón.	La amplitud pico de la respuesta se hace más negativo a mayor estado de corrosión.	SI
Potencial de corrosión Ecorr.	El cambio en esta variable determina el estado de corrosión o de las capas de metal y óxido formadas.	SI
pH	Esta variable fisicoquímica determina la corrosividad del medio. Indirectamente permite visualizar el estado de corrosión. A pH ácidos es mayor la probabilidad de encontrar estados de corrosión más severos.	SI
Sulfatos.	Ocurre lo mismo que para el pH, a mayores concentraciones de sulfatos hay mayor probabilidad de encontrar sistemas más corroídos.	SI
Alcalinidad	La medida de los carbonatos presentes determina la formación de capas protectoras. A mayores cantidades de carbonatos menor probabilidad de corrosión.	SI
Cloruros	Tienen mucha influencia en cualquier proceso corrosivo y en concentraciones altas produce estados de corrosión severos.	SI

## 6.2. DEFINICIÓN DEL UNIVERSO DEL DISCURSO.

Con las variables elegidas para constituir el modelo Fuzzy se establece el universo del discurso de cada variable de una forma muy sencilla. Debido a la complejidad de la matriz se hace necesario realizar este proceso por simple inspección.

A continuación se muestra una tabla con cada una de las variables y sus diferentes rangos (entre paréntesis se muestra el rango).

**Tabla 19. Universo del discurso de las variables Fuzzy.**

<b>pH</b>			
Ácido (3 – 4)	Ácido Básico (4 -6)	Neutro (6 – 8)	Básico (8-10)

<b>Sulfatos</b>			
Bajo (0 – 0.653)	Media (0.47 – 1)	Media-media (1.25 -9.5)	Alta (10 – 25)

<b>Cloruros.</b>			
Bajo (0 – 1)	Media-baja (1 – 7)	Media-media (6.5 -10)	Alta (10 – 17)

<b>Carbonatos</b>			
Bajo (0 – 1.6)	Media-baja (1.6 – 25)	Media-media (20 -50)	Alta (50 – 80)

<b>Vcorr. (mpy)</b>			
Bajo (0 – 1.32)	Media-baja (1 – 1.13)	Media-media (0.6 -6)	Alta (5 – 18)

<b>Ecorr. (V)</b>			
acero (0 – -0.6)	acero zinc (-0.5 – -0.65)	óxidozinc (-0.62 - -1)	zinc (-0.9 – -1.2)

Nyquist			
Bajo (0 – 250)	Media-baja (200 – 470)	Media-media (300 - 1600)	Alta (1200 – 5600)

Impulse *10 <sup>3</sup>			
Bajo (39.6 – 6)	Media-baja (6 – -10)	Media-media (-18 - -900)	Alta (-900 – -1000)

Step *10 <sup>3</sup>			
Bajo (-0.030 – -1.5)	Media-baja (-0.3 – -15)	Media-media (-15 --30)	Alta (-28 – -35)

### 6.3. REGLAS DEL SISTEMA FUZZY.

El número de reglas del sistema Fuzzy depende del número de funciones de pertenencia que se desarrollen para cada variable, para nuestro caso tenemos 9 variables de entrada, cada una con 4 funciones de pertenencia.

$$\text{Número de reglas} = e^n$$

Donde  $e$  corresponde al número de categorías o funciones de pertenencia, para nuestro modelo 4 y  $n$  es el número de variables. Al hacer este cálculo encontramos que se tendrían que generar 262.144 reglas para construir un modelo muy exacto para el monitoreo de corrosión.

Si se analiza más detenidamente el comportamiento del sistema Fuzzy, se puede observar que las medidas fisicoquímicas no tienen el mismo peso que las medidas electroquímicas por este motivo se divide el conjunto de variables de entrada en dos, lo cual reduce la complejidad del sistema y disminuye notablemente el número de reglas a implementar. El primer sistema corresponde al fisicoquímico y

tiene implícitamente las variables cloruros, carbonatos, sulfatos y pH. El segundo sistema corresponde a las variables electroquímicas como lo son la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión, la impedancia de Nyquist, la amplitud de la respuesta al impulso y la amplitud de la respuesta al escalón.

Para el primer sistema tenemos ahora 256 reglas y para el sistema 2 debemos generar 1024 reglas. Una vez se haga la fuzzyficación y defuzzyficación independiente de los sistemas anteriores, su resultado se debe introducir de nuevo en un sistema que analizará los resultados en forma de dos variables de entrada y una variable de salida, a manera de cascada, para este caso se deben generar 16 reglas.

La generación de reglas se hace de manera experimental basada en el conocimiento adquirido durante la experimentación y en las observaciones realizadas al proceso de corrosión (referirse a capítulo de análisis). Otra fuente de generación de reglas corresponde a los procesos ya estudiados por otros autores acerca del comportamiento del metal en diferentes electrolitos.

En la tabla 20 y 21 se muestran las reglas generadas a partir de la experimentación y su correlación con el estado de corrosión. Esta relación se hizo mediante el conector and y mediante la iteración if - them

#### **6.4. VISUALIZACIÓN DEL SISTEMA FUZZY**

En la figura 28 se puede apreciar la pantalla para visualización del modelo Fuzzy propuesto.

Tabla 20. Reglas generadas para el sistema Fuzzy fisicoquímico

SISTEMA FUZZY FISICOQUÍMICO																				
Variable 1				Variable 2				Variable 3				Variable 4				E:C:				
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	6
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	3
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	2
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	1
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	1
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	1
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	2
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	3
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	3
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	3
pH	Ácido	Ácido Básico	Básico	Neutro	Sulfatos	Bajo	Media	Media-media	Alta	Cloruros.	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	Carbonatos	Bajo	Media-baja	Media-media	Alta	1

Tabla 21. Reglas generadas para el sistema Fuzzy electroquímico.

SISTEMA FUZZY ELECTROQUÍMICO																
Variable 1				Variable 2				Variable 3				Variable 4				E:C:
Vcorr				Ecorr.				Nyquist				Impulse				1
bajo	medio	Medio-medio	alto	acero	Acero zinc	Oxido zinc	zinc	Bajo	Bajo medio	medio	Alto	Bajo	Bajo alto	Medio alto	Alto	
Variable 5																
Step																2
bajo	Bajo alto	Medio-alto	alto													
Variable 1				Variable 2				Variable 3				Variable 4				
Vcorr				Ecorr.				Nyquist				Impulse				3
bajo	medio	Medio-medio	alto	acero	Acero zinc	Oxido zinc	zinc	Bajo	Bajo medio	medio	Alto	Bajo	Bajo alto	Medio alto	Alto	
Variable 5																
Step																6
bajo	Bajo alto	Medio-alto	alto													
Variable 1				Variable 2				Variable 3				Variable 4				
Vcorr				Ecorr.				Nyquist				Impulse				6
bajo	medio	Medio-medio	alto	acero	Acero zinc	Oxido zinc	zinc	Bajo	Bajo medio	medio	Alto	Bajo	Bajo alto	Medio alto	Alto	
Variable 5																
Step																6
bajo	Bajo alto	Medio-alto	alto													
Variable 1				Variable 2				Variable 3				Variable 4				
Vcorr				Ecorr.				Nyquist				Impulse				6
bajo	medio	Medio-medio	alto	acero	Acero zinc	Oxido zinc	zinc	Bajo	Bajo medio	medio	Alto	Bajo	Bajo alto	Medio alto	Alto	
Variable 5																
Step																6
bajo	Bajo alto	Medio-alto	alto													
Variable 1				Variable 2				Variable 3				Variable 4				

SISTEMA FUZZY ELECTROQUÍMICO																				
Variable 1				Variable 2				Variable 3				Variable 4				E.C.				
<b>Vcorr</b>	bajo	medio	Medio-medio	alto	<b>Ecorr.</b>	acero	Acero zinc	Oxido zinc	zinc	<b>Nyquist</b>	Bajo	Bajo medio	medio	Alto	<b>Impulse</b>	Bajo	Bajo alto	Medio alto	Alto	1
Variable 5																				
<b>Step</b>	bajo	Bajo alto	Medio-alto	alto																

**SISTEMA DE MONITOREO DE CORROSIÓN EN FUNDACIONES DE TORRES DE TRANSMISIÓN**

**VARIABLES FISICOQUÍMICAS**

pH

Sulfatos

Carbonatos

Cloruros

**VARIABLES ELECTROQUÍMICAS**

Ecorr

Vcorr

Nyquist

Variables EIS

Impulse

Step

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

Estado de corrosión de la estructura  
Características

El estado de la estructura es 3.

INICIO SMC

BORRAR DATOS

SISTEMA ANFIS

ENTRENAMIENTO SMC

AYUDA

CERRAR

Figura 28. Visualización del modelo Fuzzy propuesto.

**ANEXO 1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE  
RESISTENCIA A LA POLARIZACION LINEAL ACERO  
GALVANIZADO**

Tabla 22. Valores de Rp

SISTEMA	MONITOREO	E <sub>oc</sub> (mV)	Y2	Y1	X2	X1	Rp (Ohm)
SG01	0	-989.13	-9.86E-01	-9.93E-01	4.52E-04	-3.09E-04	9.20
SG01	1	-969.63	-9.53E-01	-9.81E-01	1.31E-03	-1.06E-03	11.62
SG01	2	-912.63	-8.93E-01	-9.30E-01	4.58E-06	-4.33E-06	4224.25
SG01	3	-828.5	-8.06E-01	-8.34E-01	2.07E-04	-5.31E-05	104.63
SG01	4	-808.75	-7.91E-01	-8.15E-01	1.63E-04	-6.11E-05	103.89
SG01	5	-791.38	-7.88E-01	-7.93E-01	1.47E-05	-1.25E-05	192.68
SG01	6	-708.25	-7.04E-01	-7.09E-01	1.13E-05	-2.73E-06	375.54
SG02	0	-1013.9	-1.01E+00	-1.02E+00	9.33E-05	-5.63E-05	53.48
SG02	1	-997.38	-9.77E-01	-1.07E+00	1.81E-04	8.50E-05	949.80
SG02	2	-964.5	-9.80E-01	-9.48E-01	-7.17E-05	7.06E-05	224.82
SG02	3	-963.63	-9.72E-01	-9.51E-01	-3.44E-05	5.05E-05	238.57
SG02	4	-990.5	-9.97E-01	-9.83E-01	-1.40E-05	1.55E-05	458.03
SG02	5	-922.63	-9.27E-01	-9.15E-01	-1.22E-05	1.81E-05	371.18
SG02	6	-787.25	-7.89E-01	-7.79E-01	-1.45E-06	8.49E-06	931.15
SG03	0.00E+00	-9.88E+02	-9.69E-01	-1.00E+00	2.67E-04	-1.98E-04	7.27E+01
SG03							
SG03	2.00E+00	-9.59E+02	-9.70E-01	-9.42E-01	-2.46E-04	3.29E-04	4.87E+01
SG03	3.00E+00	-8.79E+02	-8.85E-01	8.69E-01	-6.03E-05	7.64E-05	1.28E+04
SG03	4.00E+00	-4.86E+02	-4.87E-01	-4.76E-01	-7.34E-04	5.12E-03	1.92E+00
SG03	4.10E+00	-8.98E+02	-9.00E-01	-8.98E-01	-2.78E-05	6.03E-05	2.27E+01
SG03	5.00E+00	8.55E+02	-8.59E-01	-8.47E-01	-1.36E-05	2.73E-05	2.94E+02
SG03	6.00E+00	-7.27E+02	-7.25E-01	-7.17E-01	-9.14E-06	2.84E-05	2.13E+02
SG04	0	-1012	-1.01E+00	-1.02E+00	4.05E-04	-2.41E-04	19.05
SG04	1	-515.2	-5.06E-01	-5.26E-01	2.76E-04	-3.65E-04	32.19
SG04	2	-939.5	-9.48E-01	-9.26E-01	-8.29E-05	1.11E-04	110.84
SG04	3	-808	-8.11E-01	-8.01E-01	-8.60E-06	1.99E-05	342.18
SG04	4	-792.5	-7.96E-01	-7.85E-01	-4.24E-05	6.88E-05	101.18
SG04	5	-684.5	-6.88E-01	-6.77E-01	-1.11E-05	1.64E-05	408.19
SG04	6	-590	-5.90E-01	-5.78E-01	0.00E+00	1.93E-05	609.06

SISTEMA	MONITOREO	E <sub>oc</sub> (mV)	Y2	Y1	X2	X1	Rp (Ohm)
SG05	0	-1038.8	-1.03E+00	-1.04E+00	4.11E-04	-2.98E-04	16.21
SG05	1	-546.2	-5.34E-01	5.51E-01	-8.84E-04	-3.40E-04	1994.69
SG05	2	-866.25	-8.75E-01	-8.56E-01	-6.05E-07	5.95E-07	16035.79
SG05	3	-884.6	-8.92E-01	-8.73E-01	-9.12E-05	1.19E-04	93.89
SG05	4	-802.5	-8.05E-01	-7.97E-01	-3.36E-05	7.36E-05	69.98
SG05	5	-794.88	-7.98E-01	-7.88E-01	-9.82E-06	1.61E-05	385.51
SG05	6	-625.2	-6.25E-01	-6.11E-01	-2.04E-05	2.58E-05	302.00
SG06	0	-986.75	-9.79E-01	-9.95E-01	2.36E-04	-2.12E-04	35.74
SG06	1	-504	-4.80E-01	-5.10E-01	1.10E-03	-2.66E-04	21.46
SG06	2	-942.75	-9.50E-01	-9.27E-01	-3.38E-04	5.97E-04	24.32
SG06	3	-841	-8.47E-01	-8.31E-01	-7.25E-05	1.29E-04	79.28
SG06	4	-757.75	-7.63E-01	-7.51E-01	-7.27E-05	8.12E-05	76.33
SG06	5	-720.75	-7.25E-01	-7.11E-01	-1.89E-05	3.46E-05	247.65
SG06	6	-642	-6.39E-01	-6.28E-01	-1.82E-05	5.65E-05	140.58
SG07	0	-1.06E+03	-1.05E+00	-1.06E+00	1.37E-04	-1.77E-04	2.86E+01
SG07	1	-4.63E+02	-4.55E-01	-4.71E-01	5.09E-05	-6.36E-05	1.40E+02
SG07	2	-8.70E+02	-8.70E-01	-8.69E-01	-8.28E-06	1.30E-05	4.71E+01
SG07	3	-9.01E+02	-9.03E-01	-8.96E-01	-3.34E-06	1.53E-05	4.15E+02
SG07							
SG07	5	-9.23E+02	-9.27E-01	-9.12E-01	-5.20E-05	1.08E-04	9.36E+01
SG07	6	-9.35E+02	-9.45E-01	-9.23E-01	-7.86E-05	9.31E-05	1.25E+02
SG08	0	-1.18E+03	-1.17E+00	-1.18E+00	1.30E-03	-9.08E-04	8.96E+00
SG08	1	-2.97E+02	-2.93E-01	-3.33E-01	1.86E-06	-1.96E-06	1.05E+04
SG08	2	-9.90E+02	-1.00E+00	-9.95E-01	-2.03E-06	2.00E-06	1.96E+03
SG08	3	-3.46E+02	-3.52E-01	-3.39E-01	-6.80E-08	5.92E-08	1.02E+05
SG08	4	-9.96E+02	-1.00E+00	-9.88E-01	-2.46E-05	3.64E-05	1.88E+02
SG08	5	-8.73E+02	-8.77E-01	-8.65E-01	-2.42E-06	2.77E-06	2.32E+03
SG08	6	-8.51E+02	-8.51E-01	-8.40E-01	0.00E+00	2.83E-06	3.76E+03

SISTEMA	MONITOREO	$E_{oc}$ (mV)	Y2	Y1	X2	X1	Rp (Ohm)
SG09	0	-1155.5	-1.15E+00	-1.16E+00	1.21E-03	-8.29E-04	8.67
SG09	1	-317.83	-3.09E-01	-3.24E-01	3.13E-06	-3.11E-04	47.69
SG09	2	-893	-8.95E-01	-8.92E-01	-1.95E-06	6.07E-07	1271.09
SG09	3	-905	-9.09E-01	-8.96E-01	-2.01E-06	2.91E-06	2539.41
SG09	4	-979.75	-9.82E-01	-9.72E-01	-2.33E-05	5.27E-05	128.32
SG09	5	-921.5	-9.24E-01	-9.18E-01	-2.66E-06	2.83E-06	956.23
SG09	6	-885.63	-8.87E-01	-8.74E-01	-4.37E-07	3.39E-06	3393.26
SG11	0	-941.5	-9.16E-01	-9.46E-01	1.29E-03	2.30E-04	27.84
SG11	1	-320	-3.25E-01	-3.16E-01	-7.55E-05	1.33E-04	43.10
SG11	2	-634	-6.38E-01	-6.25E-01	-7.52E-05	1.29E-04	66.01
SG11	3	-632	-6.39E-01	-6.17E-01	-1.22E-04	2.62E-04	56.69
SG11	4	-319	-3.20E-01	-3.13E-01	-9.17E-10	5.79E-09	1044319.42
SG11	5	-385.5	-3.89E-01	-3.76E-01	-8.85E-09	8.68E-09	741585.85
SG11	6	-655.63	-6.59E-01	-6.45E-01	-5.53E-05	1.38E-04	72.52
SG21	0	-7.22E+02	-7.09E-01	-7.26E-01	2.29E-04	8.66E-05	1.19E+02
SG21	1	1.19E+02	1.12E-01	1.27E-01	-3.83E-08	3.93E-08	1.93E+05
SG21							
SG21	3	-6.18E+02	-6.23E-01	-6.07E-01	-7.45E-07	1.25E-06	8.04E+03
SG21	4	-5.91E+02	-5.93E-01	-5.79E-01	-6.73E-05	2.67E-04	4.12E+01
SG21	5	-6.85E+02	-6.87E-01	-6.81E-01	-2.33E-05	4.60E-05	7.94E+01
SG21	6	-6.45E+02	-6.47E-01	-6.38E-01	-1.97E-05	8.24E-05	9.06E+01

**ANEXO 2 RESULTADOS PRUEBAS DE IMPEDANCIAS PARAMETROS  
CARACTERISTICOS**

Tabla 23. Monitoreo cero

NOMBRE	TETAMAX(GRADOS)	FTETAMAX(Hz)	F 45	PENDIENTE(BF)	RES. SOLUCION	TMAX/2	FTMX/2	IM.TMX	IMP.TMX./2
SC01	-65.9	1.036	45	-0.762	2.06	33.7	103.6	73.98	3.5
SC02	-30.7	200m		-0.308	70	-15	3.8	214.9	93.2
SC03	-59.1	386.1m	2.77	-0.771	18.15	29.5	10.36	200	30.1
SC04	-61.4	1.439	20	-0.733	1.7	30.5	74.5	30.9	2.88
SC05	-70.4	6.325	92.83	-0.832	1.2	35	136.3	18.1	2
SC06	-68.3	386m	7.455	-0.755	12.7	34.2	14.39	229	20.3
SC07	-69	536.5m	14.39	-0.791	2.33	34.1	38.61	13.17	6.07
SC08	-77.9	5.36	200	-0.909	1.15	39.7	277.9	39.01	1.77
SC09	-78.6	386.1m	38.61	-0.9	4.48	-39	53.65	347.3	6.56
SC11	8.76222E-59	1.036 ^ 10.36m	2.779	-0.61	10.1	-24.5	14.39	70.35	18.17
SC21	-60.6	2.779	53.65	-0.7	1.73	--30	200	35.75	2.912
SG01	-60.7	2	~27.79	-0.71	1.855	--28.9	103.6	31.53	2.96
SG02	-31	1.036		-0.37	37.68	-15.9	14.39	135.6	64.92
SG03	-59.9	143.9m	2	-0.64	24.51	--30.7	10.36	470.8	41.65
SG04	-58.7	5.365	53.65	-0.68	2.4	--30.5	200	23.71	3.78
SG05	-67.1	7.45	143.9	-0.75	1.227	--31.5	386.1	24.12	1.943
SG06	-63.8	2.779	38.61	-0.74	2	--33.2	103.6	350	3.58
SG07	-62.2	1.036	53.65	-0.73	1.46	--45	53.65	63.1	3.85
SG08	-67.8	5.365	200	-0.76	950m	--34.7	386.1	26.51	1.528
SG09	-68.9	7.45	200	-0.78	1.157	--32.6	386.1	24.41	1.67
SG11	-62.3	3.861	53.65	-0.71	2.32	--29.1	200	39.9	3.75
SG21	-41.1	536.6m		-0.52	66.46	--20.6	3.86	212.5	94.19

Tabla 24. Primer Monitoreo

NOMBRE	TETAMAX(GRADOS)	FTETAMAX(Hz)	F 45	PENDIENTE(BF)	RES. SOLUCION	TMAX/2	FTMX/2	IM.TMX	IMP.TMX./2
SG01	-73	200m	38.61	-0.77	2.88	--37.6	74.55	671.3	9.88
SG02	-27.1	536.5		-0.31	60	--13.7	20	247.5	104
SG03	-54	386.1m	2.779	-0.64	15.8	--27	20	249.5	34.02
SG04	-67.6	386.1m	20	-0.74	6.12	--34.7	38.61	235.7	11.34
SG05	-70.1	536.5m	103.6	-0.77	1.78	--36.8	200	216.8	3.59
SG06	-60.2	1.036	20	-0.67	3.06	--29.1	143.9	95.92	6.254
SG07	-64.3	277.9m	27.79	-0.66	5.64	--32.4	103.6	357.6	9.75
SG08	-76.5-64.3	7.455&74.55m	143.9	-0.87	2.55	--39.6	200	48.69&1.954k	3.9
SG09	-75.2	536.5m	143.9	-0.82	1.88	--39.9	200	289.5	3.37
SG11	-64.9	53.65	386.1m	-0.79	121.7	--30.4	1.036	2.365k	335
SG21	-41.8	200m		-0.36	275.9			49.23k	



Tabla 26. Tercer Monitoreo

NOMBRE	TETAMAX(GRADOS)	FTETAMAX(Hz)	F.45	PENDIENTE(BE)	RES. SOLUCION	TMAX/2	FTMX/2	IM.TMX	IMP.TMX./2
SC01	-68.3	143.9m	3.86	-0.78	22.73	--35.3	7.455	531.3	34.02
SC02	-57.8	103.6m	745.5	-0.68	62.43	--27.9	2.779	660.7	103.9
SC03	-47.5	200m	745.5m	-0.58	24.75	--25	5.365	192.3	38.27
SC04	-62.9	536.5m	14.39	-0.7	5.55	--33.9	27.79	114.8	8.99
SC05	-62.8	1.439	27.79	-0.72	2.27	--33	74.55	44.59	3.617
SC06	-65.6	386.1m	10.36	-0.72	9.49	--35.9	20	222.4	15.92
SC07	-71.1	1.439	38.61	-0.82af -0.25bf	1.78	--33.6	74.55	41.34	2.6
SC08	-73.8	2	53.65	-0.84af -0.1bf	1.51	--33.6	74.55	33.45	2.32
SC09	-74	1.439	53.65	-0.84	1.53	--34	103.6	51.04	2.26
SC11	-55	7.45	53.65	-0.63	2.05	--26.7	277.9	22.22	3.464
SC21	-59.8	3.861	103.6	-0.67	2.02	--30.9	386.1	51.1	3.42
SG01	-53.3 -22.5	-200m 38.61k	27.79	-0.57	3.77	--26.7	386.1	1.094k 6.62	18.49
SG02	46.4	74.5m	386.1m	-0.49	56.93	-23	38.61	2.083k	175.6
SG03	-54.4	200m	5.635	-0.53	18.86	-27.1	103.6	1.5k	63.7
SG04	-60.1	277.9m	200	-0.61	2.792	-30.2	1.439k	1.05k	7.41
SG05	-63.2	143.9m	200	-0.64	5.28	--31.5	745.5	1.783k	9.169
SG06	-60.2	277.9m	14.39	-0.64	6.47	-30	143.9	759	24.32
SG07	-65.3	536.5m	143.9	-0.69	2.5	--33.9	536.5	375	5.075
SG08									
SG09	-73.6	277.9m	20	-0.8	8	--36	38.61	505	13.96
SG11	-62.2	1.036	38.61	-0.72	2.18	--32.1	200	111.2	5.129
SG21	-47.3	5.635m	14.39m	-0.2	264.7	--24.4	1.439	26.56k	2.643k

Tabla 27. Cuarto Monitoreo

NOMBRE	TETAMAX(GRADOS)	FTETAMAX(Hz)	F 45	PENDIENTE(BF)	RES. SOLUCION	TMAX/2	FTMX/2	IM.TMX	IMP.TMX./2
SC01	-75	386.1m	38.61	-0.82	2.71	--35.8	4.55	206.5	4.2
SC02	-47.6	277.9m	536.5m	-0.57	56.97	--24.7	3.86	310.5	92.48
SC03	-53.6	1.036	2.77	-0.66	15.86	--25.5	10.36	70.44	21.22
SC04	-66.2	745.5m	20	-0.73	3	--34.7	53.65	99.51	5.994
SC05	-60	2	27.79	-0.67af -0.1bf	5.23	--30.4	103.6	87.18	8.741
SC06	-54.5	2.77	10.36	-0.66af -0.37bf	4.95	--26.2	38.61	28.42	6.7
SC07	-73.3	1.036	27.79	-0.81	2.52	--39	38.61	62.2	4.24
SC08	-77.9	536.5m	38.61	-0.85	2.088	--40	53.65	132.2	3.53
SC09	-75.7	1.036	38.61	-0.86	1.9	--37.4	53.65	60.83	3.049
SC11	-65.1	277.9m	3.86	-0.71	17.34	--34.3	7.45	242.9	29.08
SC21	-67.9	277.9m	38.61	-0.7	2.85	--33.7	143.9	343.8	6.8
SG01	-67.2	103.6m	20	-0.71	6.75	--32.9	53.65	750.8	11.97
SG02	-51.7	14.39m	38.61m	-0.58	761.8	--25.7	277.9m	4.53k	1.059k
SG03	-60.3	27.79m	386.1m	-0.59	25.1	--36	14.39	2.42k	67.84
SG04	-57.3	2.779	27.79	-0.67af -0.2bf	5.57	--28.7	143.9	90.57	10.7
SG05	-57.3	74.55m	200	-0.63	2.45	--28.2	1.036k	110.7	3.953
SG06	-63.1	20m	10.36	-0.63	7.69	--33.3	38.61	904.2	18.02
SG07	-81.7	200m	103.6	-0.84	2.38	--40	200	7.74k	5.787
SG08	-77.7	536.5m	74.55	-0.8727	2.38	--39.3	103.6	4.301	576.8
SG09	-78.6		74.55	-0.87	2.022	--39.2	103.6	216.4	3.508
SG11									
SG21	-56.6	277.9m	53.65	-0.56	2.84	--29.3	536.5	374.6	5.78



Tabla 29. Sexto Monitoreo

NOMBRE	TETAMAX(GRADOS)	FTETAMAX(Hz)	IM.TMX	F 45	TMAX/2	FTMX/2	IMP.TMX./2	RES. SOLUCION	PENDIENTE(BE)
SC01									
SC02	-43.2	2.779m	815.5		--20.6	3.86	95.2	60.17	-0.57
SC03	-40.2	2.779	77.11		--19.6	53.65	24.18	17.81	-0.46af -0.24bf
SC04	-41.5	3.86	40.02		--21.2	53.65	13.46	9.79	-0.48af -0.41bf
SC05	-56.8	7.45	22.17	38.61	--29.6	143.9	4.3	2.73	-0.65af -0.27bf
SC06	-51	2	43.6	7.45	--23.1	38.61	9.92	7.61	-0.62af -0.36bf
SC07	-56.5	1.439	55.26	5.365	--29.8	14.39	14.81	10.87	-0.68af -0.44bf
SC08	-70.9	1.036	56.62	20	--33.7	38.61	4.53	3.14	-0.8
SC09	-70.4	3.86	27.83	74.55	--38.64	103.6	103.6	1.65	-0.79af -0.22bf
SC11	-53.2	7.45	22.02	20	--25.6	74.55	4.64	3.44	-0.63af -0.29bf
SC21	-51.5		17.13	20	--23.3	143.9	4.17	3.01	-0.56af -0.23bf
SG01	-65.7	27.79m	4.168k	3.86	--30.9	10.36	82.44	54.65	-0.68
SG02	-53.3 -13.9	27.79m 1.036k	5.7k 221.8	277.9m	--27.4	2	586.1	136.6	-0.62
SG03	-59.1	103.6m	1.67k	3.86	--29.6	20	84.34	23.65	-0.65
SG04	-62.6	143.9m	1.016k	20	--32.6	74.55	22.59	8.039	-0.66
SG05	-63	277.9m	718.4	103.6	--31.7	38.61	7.72	5.17	-0.7
SG06	-62.8	74.55m	1.458k	14.39	--30.7	74.55	24.13	7.78	-0.66
SG07	-66.2	74.55m	1.017k	103.6	--31.9	53.65	3.926	1.86	-0.72
SG08	-70.2 -69.5	2.779m 74.55m	73.43 1.23k	103.6	--35.7	200	3.693	2.24	-0.77
SG09	-75.9	143.9m	1.031k	143.9	--37.4	277.9	3.25	1.9	-0.83
SG11	-73.2	53.65m	2.74k	38.61	--34.4	74.55	13.8	8.53	-0.81
SG21	-60.5	277.9m	331.1	103.6	--30.8	536.5	3.84	2.06	-0.69

### **ANEXO 3. RESULTADOS PRUEBAS TAFEL VELOCIDADES DE CORROSION**

Tabla 30. Monitoreo cero

SOLUCION	PENDIENTE CATODICA	PENDIENTE ANODICA	-PENDIENTE CATODICA	LPR	ICORR	PESO MOLECULAR	N. ELEC. TRANE	DENSIDAD	VCORR
SG01	-363	45.3	363	9.2	1.90331111	65.37	2	7.14	1.13267004
SG02	-417	82.1	417	53.48	0.55766374	65.37	2	7.14	0.3318685
SG03	-404	86.2	404	72.7	0.42486708	65.37	2	7.14	0.25284054
SG04	-240	45.3	240	19.05	0.86973081	65.37	2	7.14	0.51758119
SG05	-113	46.5	113	16.21	0.88360845	65.37	2	7.14	0.52583984
SG06	-93.8	64.8	93.8	35.74	0.46622148	65.37	2	7.14	0.27745075
SG07	-66.7	57.3	66.7	28.63	0.46806869	65.37	2	7.14	0.27855003
SG08	-147	77.5	147	8.96	2.46244674	65.37	2	7.14	1.46541447
SG09	-115	99.5	115	8.67	2.67514108	65.37	2	7.14	1.59198995
SG11	-85.9	92.6	85.9	27.84	0.6959353	65.37	2	7.14	0.4141546
SG21	-162	167	162	119.16	0.30003869	65.37	2	7.14	0.17855454

Tabla 31. Primer Monitoreo

SOLUCION	PENDIENTE CATODICA	PENDIENTE ANODICA	-PENDIENTE CATODICA	LPR	ICORR	PESO MOLECULAR	N. ELEC. TRANE	DENSIDAD	VCORR
SG01	-199	97.8	199	11.61	2.455658545	65.37	2	7.14	1.46137478
SG02	RUIDO	RUIDO	RUIDO		RUIDO	65.37	2	7.14	
SG03	RUIDO	RUIDO	RUIDO		RUIDO	65.37	2	7.14	
SG04	RUIDO	RUIDO	RUIDO		RUIDO	65.37	2	7.14	
SG05	-307	59	307	1994.69	0.010787134	65.37	2	7.14	0.00641948
SG06	-147	97.4	147	21.46	1.18690931	65.37	2	7.14	0.70633571
SG07	-78	140	78	139.84	0.155742411	65.37	2	7.14	0.09268309
SG08	-119	170	119	10458.43	0.002910072	65.37	2	7.14	0.0017318
SG09	-134	145	134	47.69	0.634911859	65.37	2	7.14	0.37783925
SG11	-204	202	204	43.1	1.023883153	65.37	2	7.14	0.60931803
SG21	-162	117	162	193174.31	0.000152904	65.37	2	7.14	9.0994E-05

Tabla 32. Tercer Monitoreo

SOLUCION	PENDIENTE CATODICA	PENDIENTE ANODICA	-PENDIENTE CATODICA	LPR	ICORR	PESO MOLECULAR	N. ELEC. TRANE	DENSIDAD	VCORR
SG01	-170	165	170	104.63	0.34793971	65.37	2	7.14	0.20706068
SG02	-180	148	180	238.57	0.14801874	65.37	2	7.14	0.0880867
SG03	-221	169	221	1.92	21.6862923	65.37	2	7.14	12.9056219
SG04	-126	137	126	342.18	0.08339748	65.37	2	7.14	0.04963026
SG05	-84.8	150	84.8	93.89	0.25086602	65.37	2	7.14	0.14929163
SG06	-167	172	167	79.28	0.46467974	65.37	2	7.14	0.27653326
SG07	-115	93.4	115	414.84	0.054018	65.37	2	7.14	0.03214639
SG08	RUIDO	RUIDO	RUIDO	102203.67	RUIDO	65.37	2	7.14	
SG09	-77.8	109	77.8	2539.41	0.00777264	65.37	2	7.14	0.00462554
SG11	-226	78.3	226	56.69	0.44599907	65.37	2	7.14	0.2654163
SG21	RUIDO	RUIDO	RUIDO	8036.24	RUIDO	65.37	2	7.14	

Tabla 33. Quinto Monitoreo

SOLUCION	PENDIENTE CATODICA	PENDIENTE ANODICA	E CATODICA	LPR	ICORR	PESO MOLECULAR	N. ELEC. TRANE	DENSIDAD	VCORR
SG01	-137	157	137	192.68	0.1650853	65.37	2	7.14	0.0982431
SG02	-116	147	116	371.18	0.0759464	65.37	2	7.14	0.04519608
SG03	-126	144	126	294	0.09937888	65.37	2	7.14	0.05914087
SG04	NO EXISTE	NO EXISTE	NO EXISTE	408.19	NO EXISTE	65.37	2	7.14	
SG05	-148	188	148	385.51	0.09339353	65.37	2	7.14	0.05557896
SG06	-146	199	146	247.65	0.14784978	65.37	2	7.14	0.08798615
SG07	-122	276	122	93.63	0.39286468	65.37	2	7.14	0.23379575
SG08	-122	193	122	2315.89	0.01403333	65.37	2	7.14	0.00835131
SG09	-127	187	127	956.33	0.03438587	65.37	2	7.14	0.02046321
SG11	-179	166	179	741.585.85	NO EXISTE	65.37	2	7.14	
SG21	-117	180	117	79.42	0.38818987	65.37	2	7.14	0.23101375

Tabla 34. Sexto Monitoreo

SOLUCION	PENDIENTE CATODICA	PENDIENTE ANODICA	E CATODICA	LPR	ICORR	PESO MOLECULAR	N. ELEC. TRANE	DENSIDAD	VCORR
SG01	-140	177	140	375.54	0.09050196	65.37	2	7.14	0.05385817
SG02	-178	224	178	931.15	0.0463121	65.37	2	7.14	0.02756056
SG03	-97.1	132	97.1	213	0.11419856	65.37	2	7.14	0.06796014
SG04	-110	181	110	609.06	0.04884165	65.37	2	7.14	0.02906591
SG05	-138	152	138	302	0.10413336	65.37	2	7.14	0.06197029
SG06	-133	173	133	140.58	0.2325546	65.37	2	7.14	0.13839442
SG07	-131	302	131	125.19	0.31731665	65.37	2	7.14	0.18883674
SG08	-145	248	145	3757.16	0.01058863	65.37	2	7.14	0.00630134
SG09	-112	185	112	3393.26	0.00893899	65.37	2	7.14	0.00531964
SG11	-139	138	139	72.52	0.41517241	65.37	2	7.14	0.2470712
SG21	-104	139	104	90.58	0.2855497	65.37	2	7.14	0.16993207

**ANEXO 4. PRUEBAS DE LPR, EIS Y TAFTEL EVALUACIÓN DE UNA PROBETA A TRAVÉS DEL TIEMPO EN UNA MISMA SOLUCIÓN.**

Tabla 35. Pruebas de LPR

MONITOREO	X1	X2	Y1	Y2	LPR	Foc
0	-2.03E-04	1.43E-04	-1.0975	-1.0738	6.85E+01	-1.085
1	-2.76E-04	2.33E-05	-1.074	-1.057	5.69E+01	-1.0583
2						
3	-1.14E-04	1.40E-04	-1.06	-1.038	8.66E+01	-1.05
4	-2.10E-04	2.74E-04	-9.94E-01	-9.75E-01	4.03E+01	-9.85E-01
5	-4.32E-04	6.74E-05	-9.69E-01	-9.62E-01	1.40E+01	-9.63E-01
6	-3.79E-05	5.34E-04	-9.69E-01	-9.62E-01	1.22E+01	-1.0464
7	-4.20E-04	3.48E-04	-1.044	-9.86E-01	7.52E+01	-9.95E-01
8	-2.35E-04	2.54E-04	-1.0004	-9.88E-01	2.48E+01	-0.922
9	-3.14E-04	3.22E-04	-9.32E-01	-9.14E-01	2.83E+01	-9.73E-01
10	-3.44E-04	3.30E-04	-9.82E-01	-9.63E-01	2.90E+01	-9.56E-01

Tabla 36. Pruebas de Impedancia.

MONITOREO	TETAMAX(G)	TETAMAX(Hz)	F 45	PENDIENTE(BE)	RES. SOLUCION	TMAX/2	FTMX/2	IM.TMX	IMP.TMX /2
1									
2									
3	-64.5	38.61m	536.5m	-0.73	97.06	-31.8	1.439	1.915k	203.2
4	-52.5	53.65m	200m	-0.64	110	-27.1	745.5m	738.2	178.2
5	-49.4	103.6m	277.9m	-0.58	45	-26.9	1.439	272	73.24
6	-73.5	74.55m	1.036	-0.88	104	-36.7	2	1.9k	190.2
7	-74.4	38.61m	1.036	-0.76	104.3	-35.4	2	3.066k	182.1
8	-74	10.36m	386.1m	-0.71	144.9	-38.1	745.5m	6.72k	300.1
9	-74.4	14.39m	536.5m	-0.78	116.3	-35.7	1.036	5.176k	218
10	-68.9	20m	386.1m	-0.73	124	-35.5	745.5m	2,819k	265

**Tabla 37. Velocidades de corrosión.**

SOLUCION	PENDIENTE CATODICA	PENDIENTE ANODICA	-PENDIENTE CATODICA	LPR	PESO MOLECULAR	N. ELEC. TRANE	DENSIDAD	ICORR	VCORR
0	-229	150	229	68.5	65.37	2	7.14	0.57526655	0.34234403
1	-295	218	295	56.9	65.37	2	7.14	0.95790192	0.57005226
2	-288	235	288		65.37	2	7.14		
3	-262	223	262	86.6	65.37	2	7.14	0.60480962	0.35992525
4	-227	207	227	40.3	65.37	2	7.14	1.1680827	0.6951319
5	-195	203	195	14	65.37	2	7.14	3.08881363	1.83816857
6	-240	239	240	12.2	65.37	2	7.14	4.26762217	2.53968347
7	-225	223	225	75.2	65.37	2	7.14	0.64753566	0.38535174
8	-242	233	242	24.8	65.37	2	7.14	2.08112497	1.23848796
9	-192	211	192	28.3	65.37	2	7.14	1.54441626	0.91908991
10	-223	262	223	29	65.37	2	7.14	1.80608665	1.07481127

## ANEXO 5.

### CALCULO DE LAS VELOCIDADES DE CORROSION

Teniendo en cuenta que el fenómeno de la corrosión es un fenómeno electroquímico, las Velocidades de corrosión pueden ser calculadas por métodos electroquímicos.

Para ello es necesario polarizar un electrodo lo cual consiste simplemente en aplicar una diferencia de potencial (con un potenciostato) entre un electrodo de trabajo (material que se está analizando E.T.), y un electrodo de Referencia (un electrodo inerte E.R.); la corriente generada de dicha excitación (potencial aplicado) es recogida a través de un contraelectrodo (c.e., también debe ser inerte (Pt)). Todo este sistema se encuentra inmerso en el electrolito de prueba. El diagrama es visto en la figura 1.

Con este montaje se procede a correr dos clases de curvas. La Resistencia de Polarización y las Pendientes Taffel.

#### **Resistencia de Polarización.**

Es un método electroquímico para determinar la velocidad de corrosión. Usualmente pueden ser hechas en menos de 5 minutos. Esta se lleva a cabo aplicando una señal de voltaje a la muestra, el electrodo de trabajo, a potenciales muy cercanos al potencial de corrosión  $E_{corr}$ . Generalmente se usa entre  $-20$  y  $20$  milivoltios.

De la pendiente de la gráfica de Potencial vs. corriente se obtiene la Resistencia de Polarización. Lo anterior puede ser visto en la figura 2, donde se muestra el gráfico de Resistencia de Polarización para la muestra de 0 ppm a  $90^{\circ}\text{C}$  con una velocidad de rotación de 3500 r.p.m.

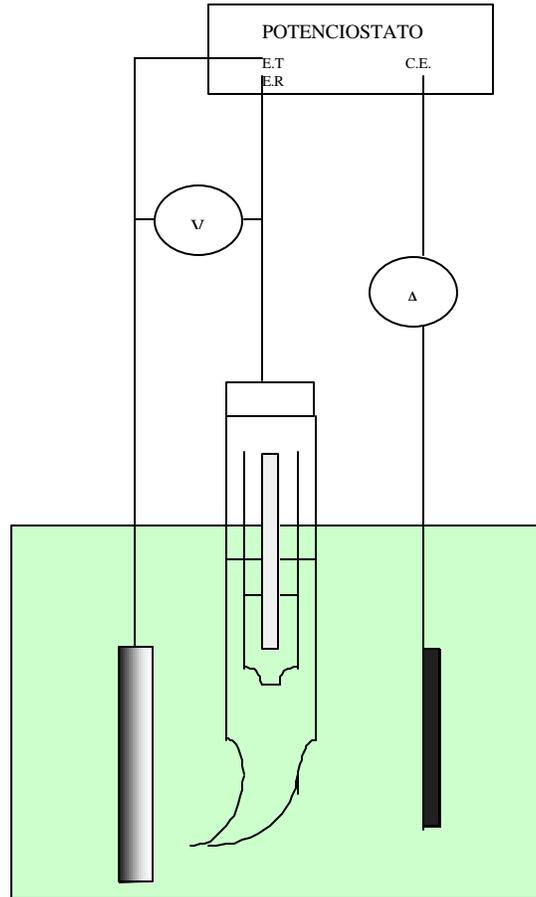


Figura 1. Esquema usado para realizar pruebas electroquímicas.

### Pendientes Taffel.

Las pendientes Taffel son la porción de una línea recta de una curva de polarización; usualmente se encuentran a 50 mV, a partir del potencial de corrosión, cuando esta se presenta en una gráfica semilogarítmica en términos de milivoltios por década de corriente tal como lo muestra la gráfica 3.

Con cada uno de los anteriores valores es posible encontrar entonces las velocidades de corrosión. A partir de las siguientes ecuaciones.

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)(Rp)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

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

$\beta_c$  y  $\beta_a$  son las pendientes catódica y anódica, respectivamente.

$R_p$  es la resistencia de Polarización.

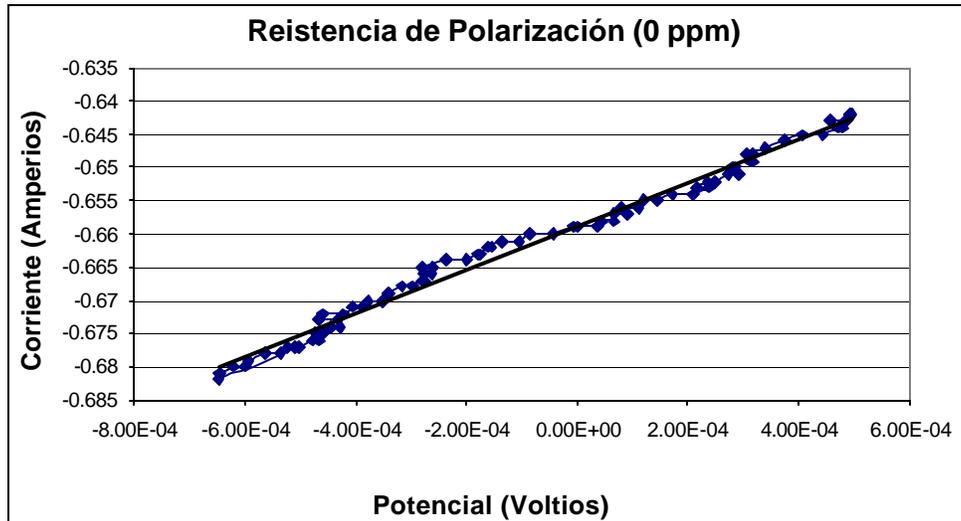


Figura 2. Gráfico de Resistencia de Polarización usado para el cálculo de la Velocidad de Corrosión

Finalmente la velocidad de corrosión puede calcularse de la ecuación

$$VelCorr(mpy) = (0.13)(i_{corr})\frac{W_e}{d} \quad (\text{ecuación 2}).$$

donde: VelCorr (mpy) es la velocidad de corrosión en milipulgadas por año.

$i_{corr}$  es la corriente de corrosión en  $\mu A/cm^2$ .

$W_e$  es el equivalente electroquímico (peso molecular/ # de electrones transferidos)

$d$  es la densidad del material de prueba en  $gr./cm^3$

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El modelo Fuzzy implementado presenta un error en su proceso de evaluación bajo, de aproximadamente 35 %, las reglas implementadas para este sistema presentan un desempeño bueno, pero existen fallas en la evaluación de sistemas que no estén dentro del universo del discurso de las variables implementadas.
- Las variables implementadas en el sistema fuzzy y que se recomiendan para el monitoreo de corrosión son: Velocidad de corrosión, Valor máximo de impedancia real del diagrama de Nyquist, Amplitud pico de la respuesta al impulso y al escalón, el potencial de corrosión, pH, Sulfatos, Cloruros, Carbonatos.
- El aumento de la  $R_p$  es debido a que se tiene una menor área activa para la reacción, por lo cual se tiene un menor flujo de corriente y por ende una mayor resistencia a la polarización. De esta forma se puede concluir que los aumentos en la velocidad de corrosión (disminución de la  $R_p$ ), se podrían deber al proceso de desprendimiento de las capas de óxidos existentes, lo cual conlleva a que se tenga nuevamente más área de metal activo.
- Los espectros de impedancias en laboratorio proporcionan criterios que pueden calificar el estado de corrosión de estructuras inmersas en electrolitos corrosivos.
- Durante el proceso de corrosión de los sistemas evaluados en laboratorio, estos están reaccionando continuamente creando capas de óxido protector que se pasivan y después se rompen, lo cual hace que los sistemas evaluados tengan cambios a lo largo de su evaluación.

- La EIS mostró ser una técnica útil en la detección de cambios en la superficie del galvanizado las cuales coinciden con la formación de capas pasivas y el subsecuente rompimiento de la mismas.
- Se ha determinado a lo largo de este proceso investigativo que las técnicas de LPR, EIS y Taffel por separado no proporcionan información del estado de corrosión de una estructura enterrada; pero una interrelación de ellas agrupadas y alimentando un sistema fuzzy suministran información del estado de la probeta.
- La existencia de cloruros en bs suelos incrementa la corrosividad de los mismos y por ello es mayor la probabilidad de que las estructuras enterradas en estos medios, tengan estados de corrosión severos. Lo mismo ocurre con concentraciones altas de sulfatos.
- El efecto de los carbonatos en los suelos es contrario al de los cloruros y los sulfatos. Este tipo de compuestos neutralizan y retardan el proceso corrosivo.
- El valor máximo de impedancia en el eje real del diagrama de Nyquist tiene una clara tendencia a aumentar a medida que el estado de corrosión es más avanzado.
- La medida del potencial de corrosión no proporciona una medida del estado termodinámico de la estructura es estos sistemas duales (acero + galvanizado).
- Las variables sulfatos, carbonatos, cloruros, pH, velocidad de corrosión, potencial de corrosión, Amplitud de la respuesta al impulso, amplitud de la respuesta al escalón, valor máximo de impedancia real de Nyquist, son la más representativas en la determinación de la correlación con el estado de corrosión de la estructura evaluada en laboratorio.
- Dentro de este trabajo se hizo el análisis de variables electroquímicas por medio de las técnicas convencionales tales como, LPR, Taffel y EIS y se plantea el uso de nuevas técnicas para análisis de este tipo de pruebas, producto del proceso de investigación. Se recomienda seguir estudiando el tema y profundizar más sobre estas técnicas e incluso

explorar técnicas electroquímicas adicionales de una manera independiente con el fin de verificar la posible interpretación de resultados de tipo electroquímico con estos métodos.

- 🖨 Las reglas encontradas a través de la implementación por medio de la lógica fuzzy deben ser complementadas y se deben generar más de ellas, para que el modelo no tenga inconvenientes a la hora de evaluar más sistemas.
- 🖨 Se recomienda la exploración de otros métodos de análisis tal como las redes neuronales para ser usados en la implementación del sistema con el cual podría obtenerse mejores correlaciones.

## BIBLIOGRAFIA

RICH, Elaine – KNIGHT, Kevin, Inteligencia artificial, segunda edición. Madrid: McGraw Hill, 1994, 703 p.

OGATA, Katsuhiko, Ingeniería de control moderna, tercera edición. México: Prentice may, 1997. 997 p.

NILSSON, Nils J., Inteligencia artificial una nueva síntesis, Madrid: MacGraw Hill, 1997. 458 p.

OPPENHEIM, Alan V., Señales y sistemas, segunda edición. México: Prentice Hill, 1997. 956 p.

MARTÍNEZ, Víctor J. Redes neuronales artificiales, Wilmington, EUA: Addison Wesley Iberoamericana, S.A., 1995. 390 p.

PROCAINSA, S.A. ¿Qué técnicas de inspección detectan posibles zonas de pérdida de metal en redes complejas de pipelines o conductos enterrados?. Passeig, 35 - TERRASSA (Barcelona)

ROYUELA, Juan J. Capitulo VI. Corrosión en estructuras enterradas

HUGHES, David, Monitoring Steel Tower Foundation Corrosion. Transmission & Distribution World. August 1996. EA Technology

KUMAR, Ashok, AC Impedance spectra of pipes buried in soil. Corrosion 92 symposium. Techniques for corrosion measurement. NACE

URUCHURTU J. Corrosion Monitoring of Electric Transmission Line Tower Legs by Electrochemical Methods. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Temixco, Morelos. México. 1995.

MAYER, P. Corrosion testing and control in electric power transmission. Ontario Hydro Technologies.

VORAUER, A. Grillage Corrosion Surveys Using the Tower Leg Integrity Monitoring 1989 Results. Ontario Hydro Research Division report N. 90-102 K, 1990, Toronto.

Revista Anti-corrosión. Methods and materials, Volumen 34 Número 3 marzo 1987.

Impedance Spectrum Analyzer Universal Electrochemical Interface Manual. Zhaner Elektrik. Kronach, Alemania. 1996.

VERINK, Ellis. The Basics, Corrosion testing made easy. NACE International, 1994, Houston Texas.

BABOIAN, R. Electrochemical Techniques for corrosion engineering. NACE International, 1986, Houston Texas.

EG & G PRINCETON APPLIED RESEARCH. Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)., p 1-11.

ELECTROANALYTICAL CHEMISTRY., Edited by Allen j. Bard, Marcel Decker, INC, New York., 1979. p 6-12.