



**EFFECTO DE LAS PARTÍCULAS EROSIVAS EN LA CORROSIÓN DE UN
ACERO AISI SAE 1020 EN UN SISTEMA SALMUERA-CO₂-ARENA.**



**NELSY SOCORRO RAGUÁ CALDERÓN
MÓNICA JOHANNA VERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2007

**EFFECTO DE LAS PARTÍCULAS EROSIVAS EN LA CORROSIÓN DE UN
ACERO AISI SAE 1020 EN UN SISTEMA SALMUERA-CO₂-ARENA.**

**NELSY SOCORRO RAGUÁ CALDERÓN
MÓNICA JOHANNA VERA**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Metalúrgico**

**Director:
DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS
Ing Metalúrgico M.Sc. Ph.D**

**Codirector :
NUBIA ESPERANZA MEJÍA CAJICÀ
Ing Metalúrgica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2007

DEDICATORIA

A las personas más importantes en mi vida quienes han sido mi fortaleza, mi apoyo y mi alegría:

A Dios por ser mi guía, mi camino y mi vida.

A mi mamá Piedad Vera, por ser el motor de mi vida y la fuente de mi inspiración.

A l amor de mi vida A lvaro A lexis Mendoza, por su gran apoyo en los momentos difíciles y por acompañarme en el sendero en busca del crecimiento personal y profesional.

Y a mis amigos Javier y Niny, por ser un soporte en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada triunfo logrado.

“Las metas existen para ser establecidas y alcanzadas, no para ser cultivadas y admiradas.”

Mónica J. V.

DEDICATORIA

A I rey de reyes, Señor de Señores por ser el estandarte de mi ser.

A mi madre Socorro Calderón, por hacer de mí una persona íntegra y apoyarme en la odisea de mi vida.

A mi esposo, por ofrecerme el respaldo y el amor que tanto necesitaba.

A mi familia, por brindarme un apoyo incondicional y desinteresado.

A mi hijo, por ser la fuerza que me impulsa hacia al alcance de mis objetivos.

A la familia Lizarazo Jaimes, por ser el punto de partida de la trayectoria que me condujo hacia la meta.

Nelsy S. Raguá.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a las siguientes instituciones y personas por su aporte científico y profesional durante el desarrollo de este Trabajo de Investigación y nuestra formación profesional:

- La Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de formarme en todos los aspectos.
- La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales y a todos sus docentes por permitirnos el desarrollo profesional e integral.
- A la División de Investigación en Fisicoquímicas, por el soporte económico en el desarrollo de este proyecto.
- Al profesor Darío Yesid Peña y la Ingeniera Nubía Mejía, por su apoyo invaluable en la dirección de este proyecto.
- Al ingeniero Jesús Machuca, por su apoyo incondicional y constante colaboración en la ejecución de este proyecto.
- Al profesor Custodio Vásquez por su asesoría académica en el análisis de los resultados de esta investigación.
- A Orlando Buitrago, Ambrosio Carrillo, Daniel Garavito, Javier Gaitán, y Mario Navarrete por la colaboración prestada para el desarrollo de esta investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS	21
1.1 OBJETIVOS GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. MARCO TEÓRICO	22
2.1 CORROSIÓN POR CO ₂	22
2.2 MECANISMO DE LA CORROSIÓN POR CO ₂	23
2.3 FACTORES QUE INFLUENCIAN LA CORROSIÓN POR CO ₂	24
2.3.1 Temperatura	25
2.3.2 Velocidad del fluido	25
2.3.3 Presión Parcial	27
2.3.4 pH	29
2.3.5 Presencia de partículas	30
2.4 EROSIÓN-CORROSIÓN	31
2.4.1 Factores Críticos de la Erosión-Corrosión	34
2.4.2 Mitigación de la Erosión-Corrosión	35
2.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN	36
2.5.1 Pruebas potenciodinámicas	36
2.6 ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO	40

2.6.1 Características del Electrodo de Cilindro Rotatorio	42
3. METODOLOGIA	43
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	43
3.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS	44
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE TRABAJO	45
3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA	47
3.5 EQUIPOS Y MATERIALES EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN	48
3.6 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE REALIZADO EN LOS ENSAYOS	49
3.7 RELACIONES HIDRODINÁMICAS	51
3.8 VARIABLES DEL SISTEMA	52
3.9 DESARROLLO EXPERIMENTAL	54
4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA TÉCNICA DE EXPERIMENTACIÓN	55
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
5.1 CURVAS ELECTROQUÍMICAS SIN PARTÍCULAS	56
5.2 CURVAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL SISTEMA SALMUERA-N ₂ -(5%) CO ₂ EN VOLUMEN CON DIFERENTES % DE PARTÍCULAS Y VELOCIDAD DE 1000 RPM	60
5.3 CURVAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL SISTEMA SALMUERA-N ₂ -(5%) CO ₂ EN VOLUMEN CON DIFERENTES % DE PARTÍCULAS Y VELOCIDAD DE 2000 RPM	64
5.4 CURVAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL SISTEMA SALMUERA -N ₂ -(5%) CO ₂ EN VOLUMEN CON DIFERENTES % DE PARTÍCULAS Y VELOCIDAD DE 3000 RPM	67
5.5 ASPECTOS GENERALES DE LA COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN	71

5.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	73
5.6.1 Correlación matemática	74
5.6.2 Análisis de Pareto	76
5.6.3 Morfología de la superficie corroída del acero 1020 y de la arena	78
6. CONCLUSIONES	84
7. RECOMENDACIONES	86
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	87
BIBLIOGRAFIA	90
ANEXOS	92

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mecanismo de corrosión por CO ₂ en presencia de arena.	24
Figura 2. Variación de la velocidad de corrosión con la velocidad crítica de flujo	26
Figura 3. Variación de la velocidad de corrosión con la velocidad de flujo.	27
Figura 4. Circuito equivalente que simula la interfaz metal-solución.	39
Figura 5 Diagramas de Impedancia de Nyquist y Bode.	40
Figura 6. Esquema de un cilindro rotatorio.	41
Figura 7. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.	55
Figura. 8. Curva de resistencia a la polarización para el sistema salmuera- CO ₂ -N ₂ sin partículas.	57
Figura. 9. Curva Tafel para el sistema salmuera- CO ₂ -N ₂ sin partículas.	58
Figura 10. Diagrama de Nyquist para el sistema salmuera - CO ₂ -N ₂ - sin Partículas	59
Figura 11. Curva de resistencia a la polarización para el sistema salmuera- CO ₂ -N ₂ a 1000 rpm con diferentes porcentajes de partículas.	60
Figura 12. Curva Tafel para el sistema salmuera- CO ₂ -N ₂ a 1000 rpm con con diferentes porcentajes de partículas.	61
Figura 13. Diagrama de Nyquist para el sistema salmuera - CO ₂ -N ₂ a 1000 rpm y diferentes porcentajes de partículas.	62

Figura 14. Curva de resistencia a la polarización para el sistema salmuera- CO ₂ -N ₂ a 2000 rpm con diferentes porcentajes de partículas	64
Figura 15. Curva Tafel para el sistema salmuera- CO ₂ -N ₂ a 2000 rpm con diferentes porcentajes de partículas.	65
Figura 16. Diagrama de Nyquist para el sistema salmuera - CO ₂ -N ₂ a 2000 rpm a diferentes porcentajes de partículas	66
Figura 17. Curva de resistencia a la polarización para el sistema salmuera-CO ₂ -N ₂ a 3000 rpm con diferentes porcentajes de partículas	68
Figura 18. Curva Tafel para el sistema salmuera -CO ₂ -N ₂ a 3000 rpm con diferentes porcentajes de partículas	69
Figura 19. Diagrama de Nyquist para el sistema salmuera- N ₂ - CO ₂ a 3000 rpm a diferentes porcentajes de partículas.	70
Figura 20. Área de trabajo basado en los valores máximos y mínimos del sistema a trabajar	74
Figura 21. Gráfica comparativa de resultados sistema Salmuera- N ₂ - CO ₂ (5%) con partículas.	75
Figura 22. Interacciones entre las variables (método de pareto) sistema Salmuera -N ₂ -CO ₂ (5%) con partículas.	76
Figura 23. Gráfico de probabilidad normal para la variable respuesta variando el porcentaje de partículas a diferentes velocidades de rotación.	77
Figura 24. Gráfico de efectos principales para la velocidad de corrosión.	78
Figura 25. Espectro de la superficie corroída Acero AISI-SAE 1020 en un sistema Salmuera /CO ₂ /arena, a 1000 rpm y 30% de partículas.	79
Figura 26. Espectro de la superficie corroída Acero AISI-SAE 1020 en un sistema Salmuera /CO ₂ /arena, a 3000 rpm y 30% de partículas.	80
Figura 27. Corrosión asistida por erosión.	81

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Probeta de acero AISI SAE 1020	44
Fotografía 2. Microestructura del acero AISI-SAE 1020	46
Fotografía 3. Sílice de alta pureza a 20X	47
Fotografía 4. Electrodo de Cilindro Rotatorio	48
Fotografía 5 Controlador de velocidad del cilindro rotatorio	49
Fotografía 6 Potenciostato Gamry	49
Fotografía 7 Electrodo de Cilindro Rotatorio	50
Fotografía 8 Cilindro de N ₂ y N ₂ -CO ₂	50
Fotografía 9. Micrografía del Acero AISI-SAE 1020 en un sistema Salmuera /CO ₂ /arena, a 1000 rpm y 30% de partículas (90X).	79
Fotografía 10 Micrografía del Acero AISI-SAE 1020 en un sistema Salmuera /CO ₂ /arena, a 3000 rpm y 30% de partículas (90x).	80
Fotografía 11 Fotografía y Análisis Superficial de la arena antes de los ensayos.	82
Fotografía 12. Fotografía y Análisis superficial de la arena después de los ensayos.	83

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Predicción de la corrosividad para pozos de condensado de gas dulce.	28
Tabla 2. Efecto del pH en la etapa controlante de la corrosión.	30
Tabla 3. Composición química del acero AISI - SAE 1020.	45
Tabla 4. Dureza del acero AISI SAE 1020.	46
Tabla 5. Caracterización de la sílice de alta pureza.	48
Tabla 6. Conversión de velocidades lineales a rpm en el cilindro rotatorio.	52
Tabla 7. Variables establecidas en el desarrollo de los experimentos.	52
Tabla 8. Determinación del número de ensayos.	53
Tabla 9. Velocidades de corrosión obtenidas para el sistema salmuera-CO ₂ -N ₂ por medio de resistencia a la polarización y pendientes de Tafel.	58
Tabla 10. Velocidades de corrosión obtenidas para el sistema salmuera-CO ₂ -N ₂ por medio de resistencia a la polarización y pendientes de Tafel, para 1000 rpm con diferentes porcentajes de partículas.	62
Tabla 11. Valores de Rp hallados por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica a 1000 rpm.	63
Tabla 12. Velocidades de corrosión obtenidas para el sistema salmuera-CO ₂ -N ₂ por medio de resistencia a la polarización y pendientes de Tafel, para 2000 rpm con diferentes porcentajes de partículas.	66
Tabla 13. Valores de Rp hallados por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica a 2000 rpm.	67

Tabla 14. Velocidades de corrosión obtenidas para el sistema salmuera-CO ₂ -N ₂ por medio de resistencia a la polarización y pendientes de Tafel a 3000 rpm.	69
Tabla 15. Valores de Rp hallados por espectroscopía de Impedancia Electroquímica a 3000 rpm.	70
Tabla 16. Rango de valores de las variables	74

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Gráficos de la variación del R_p con la velocidad de rotación y con el porcentaje de partículas	93
Anexo B. Diagrama de Nyquist a Porcentajes de partículas constantes, variando la velocidad de rotación del ECR.	94
Anexo C. Análisis de varianza para el sistema salmuer a- N_2 - CO_2 (5%)-arena.	95
Anexo D. Diagramas de Bode: (A) En presencia de lazos inductivos. Sin la formación de inductancia.	96
Anexo E. Tabla de valores de Betas para el cálculo de la constante de Stern Geary.	97
Anexo F. Análisis de regresión múltiple para la velocidad de corrosión.	98
Anexo G. Resumen del análisis de los efectos estimados e interacciones.	99

RESUMEN

TÍTULO:

EFFECTO DE LAS PARTÍCULAS EROSIVAS EN LA CORROSIÓN DE UN ACERO AISI SAE 1020 EN UN SISTEMA SALMUERA-CO₂-ARENA*

AUTORES:

**MÓNICA JOHANNA VERA
NELSY SOCORRO. RAGUÁ CALDERÓN****

PALABRAS CLAVES:

Electrodo de cilindro rotatorio, sistema multifásico salmuera-CO₂-arena, Corrosión por dióxido de carbono, Erosión-corrosión, corrosión asistida por erosión.

La velocidad del fluido y el arrastre de partículas sólidas a través del crudo transportado por las tuberías son factores críticos en el proceso de deterioro de los aceros de bajo carbono en presencia de CO₂. Para el estudio del fenómeno de corrosión por CO₂ influenciado por el transporte de arena en flujo multifásico, se realizaron simulaciones de las condiciones de campo con el electrodo de cilindro rotatorio y se determinó el comportamiento a la corrosión de un acero AISI SAE 1020 en un sistema CO₂-salmuera-arena, mediante el uso de técnicas electroquímicas.

Técnicas de corriente directa y corriente alterna se utilizaron para determinar los valores de velocidad de corrosión, para cada una de las condiciones evaluadas. Las técnicas de corriente directa usadas fueron resistencia a la polarización, y pendientes de Tafel; las medidas electroquímicas con corriente alterna se realizaron por espectroscopia de impedancia electroquímica.

La difusión es el mecanismo que controla la corrosión del sistema evaluado, donde la reacción de corrosión se encuentra controlada por el transporte de masa, estos resultados se pueden observar en las curvas Tafel, donde la corriente de corrosión se aproxima a la corriente límite. Los productos de corrosión formados sobre la superficie son escamas de siderita irregular no protectora. Mediante un análisis estadístico se observó que la influencia de las partículas de arena, la velocidad de rotación y su interacción son factores significativos en la velocidad de corrosión del acero. Finalmente, con la variable respuesta, se obtuvo la relación matemática entre la velocidad de corrosión y las variables del sistema.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Darío Yesid Peña B

ABSTRACT

TITLE:

EFFECT OF THE EROSIVE PARTICLES ON THE CORROSION OF AN AISI SAE 1020 STEEL IN A BRINE-CO₂-SAND SYSTEM *

AUTHORS:

MÓNICA JOHANNA VERA

NELSY SOCORRO. RAGUÁ CALDERÓN **

Key words: rotating cylinder, multiphase systems brine-CO₂-sand, carbon dioxide corrosion, erosion-corrosion, corrosion enhanced erosion.

The velocities of the fluid and the haulage of solid particles through the oil transported by pipelines are critical factors in the process of deterioration of the low carbon steels in presence of CO₂. For the study of the corrosion phenomenon for CO₂ influenced by the transport of sand in multiphase flow, simulations of the field conditions with the rotating cylinder electrode were carried out and the corrosion behavior of a steel AISI SAE 1020 in a brine-CO₂-sand system was determined, by means of electrochemical techniques.

In order to determine the corrosion rate, techniques as polarization resistance, Tafel slopes and electrochemical impedance spectroscopy were carried out.

The diffusion is the mechanism that controls the corrosion of the evaluated system, where the reaction is controlled by the mass transport, these results are confirmed in the Tafel curves, in which the current of corrosion approaches to the average limit current. The products of corrosion formed on the surface are irregular non protector flakes of FeCO₃. By means of a statistical analysis, it was observed that the influence of the particles of sand, the rotation velocity and their interaction are significant factors in the corrosion rate of steel. Finally, with the variable answer, a mathematical relationship was obtained between the corrosion rate and the variables system studied in this research.

* Undergraduate Thesis

** Faculty of Physical Chemistry Engineering. School of Metallurgical Engineering. Darío Yesid Peña B.

INTRODUCCIÓN

Para el control de la corrosión de los aceros que se utilizan en la industria del petróleo y gas, se ha implementado el uso de recubrimientos, procesos metalúrgicos, protección catódica, inhibidores, y otros métodos; llevando a la creación de industrias dedicadas solamente al control de la corrosión en áreas específicas. Uno de los tipos de corrosión más peligrosos es el ocasionado por la presencia de CO_2 , que bajo la influencia de factores como la velocidad de flujo y presencia de arena, aumentan la velocidad de corrosión y por consiguiente, la pérdida y destrucción del material expuesto. Por lo tanto, se observa la necesidad de un estudio profundo sobre el deterioro que ocasiona este sistema corrosivo, debido a que éste es el causante de la corrosión que se presenta en las tuberías que lo transporta, pues de no ser controlado obligará a paradas en la producción, cambios o reparaciones costosas, tiempo perdido, reemplazo de materiales de construcción y la implicación constante del personal que controle la corrosión.

El agua es la causante de que el CO_2 sea corrosivo, pues de no presentarse, este gas no causaría mayor daño. La presencia de agua en la producción de gas y petróleo, surge de dos fuentes: H_2O condensada y H_2O de depósito. En los campos petroleros el agua es su centro de funcionamiento, puesto que es utilizada para la explotación, producción y transporte del petróleo. Se ha estimado que en solo producción son llevados a la superficie 325 billones de galones de agua salada cada año, la cual se maneja rutinariamente con diferentes composiciones, impurezas debidas al contacto con sólidos y formaciones rocosas, ocasionándose indudablemente serias complicaciones^[1]. El arrastre de sólidos con los flujos multifásicos en la

producción de hidrocarburos, generan daños ocasionados por fenómenos de erosión-corrosión que disminuyen la vida útil de los equipos.

Como parte fundamental para el estudio del fenómeno de corrosión por CO₂ influenciado por el transporte de arenas en flujos multifásicos, en este trabajo, se realizaron simulaciones de las condiciones de campo con el electrodo de cilindro rotatorio y se efectuaron pruebas electroquímicas en las probetas utilizando corriente alterna y corriente directa, para determinar las velocidades de corrosión.

Las probetas se elaboraron en acero AISI SAE 1020 porque tiene una microestructura similar a la del acero utilizado en las tuberías de transporte de crudo y por ser un acero con menor número de aleantes que adiciona mínimas variables al sistema; además es de fácil disponibilidad, y menor costo.

En Colombia el estudio del fenómeno de corrosión asistida por erosión, se encuentra en un estado incipiente, las técnicas que se requieren para comprenderlos se deben mejorar y los problemas generados no están lo suficientemente claros, ni controlados.

Es por esto que se desarrolló el presente proyecto con el cual se pretende realizar un aporte a los estudios de investigación realizados y así contribuir a la disminución o mitigación de los fenómenos de corrosión por transporte de flujos multifásicos en las líneas de producción y transporte de crudo, por lo que un futuro se puedan aplicar los resultados en el monitoreo, predicción y prevención de la corrosión en la industria petrolera, disminuyendo la cantidad de dinero que se invierte en estos problemas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el comportamiento a la corrosión de un acero AISI SAE 1020 en un sistema CO₂-salmuera-arena, mediante el uso de técnicas electroquímicas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Evaluar el efecto de la velocidad del fluido y el porcentaje de partículas sobre la velocidad de corrosión del acero AISI SAE 1020, en un sistema CO₂-salmuera-arena.
- Determinar la velocidad de corrosión en el acero AISI SAE 1020 expuesto a un sistema CO₂-salmuera-arena; por medio de resistencia a la polarización, espectroscopia de impedancia electroquímica y pendientes de Tafel.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CORROSIÓN POR CO₂

La corrosión ocasionada por el CO₂ en la producción de petróleo y gas es comúnmente conocida como corrosión dulce “sweet corrosion”, la cual ocurre como resultado de la presencia de dióxido de carbono, ácidos orgánicos y agua.

La corrosión por CO₂ resulta de la reacción de la superficie del acero con ácido carbónico que surge de la disolución de CO₂ en una fase acuosa la cual no es una reacción directa con CO₂ gaseoso^[2]. En la producción del petróleo cuando se transporta un fluido con alto contenido de componentes ácidos, tal como el CO₂, se presenta corrosión en la tubería que lo transporta, debido a que éste puede reaccionar con el agua presente, formando compuestos altamente corrosivos, por lo tanto se puede afirmar que si no se tiene el suficiente contenido de agua en el flujo para que se produzcan estos compuestos, no se presentará una corrosión significativa en la tubería.

El CO₂ puede encontrarse en el sistema de forma natural o por inyección, el cual proporciona buenas propiedades de fluidez, permitiendo mejorar la extracción y recuperación del crudo. Los problemas en la producción de petróleo se encuentran con mayor facilidad cuando el CO₂ es inyectado.

El dióxido de carbono es un gas ácido y es corrosivo cuando está disuelto en agua, sin embargo el CO₂ debe primero hidratar al ácido H₂CO₃ (una reacción relativamente lenta), este ácido ataca el Fe y el efecto de la

corrosión es directo sobre la tubería, ocasionando altas velocidades de corrosión. Este efecto corrosivo se agrava cuando el crudo transportado en las tuberías arrastra partículas sólidas de arena, que aceleran el deterioro de la capa protectora de la tubería; debido al choque de estas partículas a altas velocidades, la cual, genera un ambiente propicio para el incremento de la corrosión.

2.2 MECANISMO DE LA CORROSIÓN POR CO₂

Extensos estudios se han realizado durante las pasadas cuatro décadas en el mecanismo de corrosión por CO₂ de los aceros aumentando la comprensión de los parámetros que la afectan. Sin embargo, todavía existen muchos cuestionamientos mecánicos sin resolver o son materia de discusión y requieren una investigación adicional. La primera revisión general en la corrosión por CO₂ de los aceros fue realizada en 1983 y resumida por Burke y Schmitt en 1984.^[2]

Se han postulado varios mecanismos para el proceso de corrosión entre los cuales se puede destacar los de De Waard y Williams^[3], Schmitt^[4], Nestic, entre otros; los cuales involucran ácido carbónico (H₂CO₃), o el ión bicarbonato (HCO₃⁻) formado en la disolución del CO₂ en agua, esto conduce a velocidades de corrosión mayores que las esperadas para la corrosión en ácidos fuertes con el mismo pH. El CO₂ disuelto en agua produce ácido carbónico, un ácido débil comparado a los ácidos minerales que no se disocian completamente, este ácido carbónico, desciende el pH de la solución, e incrementa su corrosividad. En la figura 1 se esquematiza el mecanismo de corrosión por CO₂ en presencia de sólidos. Los siguientes son algunos de los pasos de la reacción con ácido carbónico^[3]:

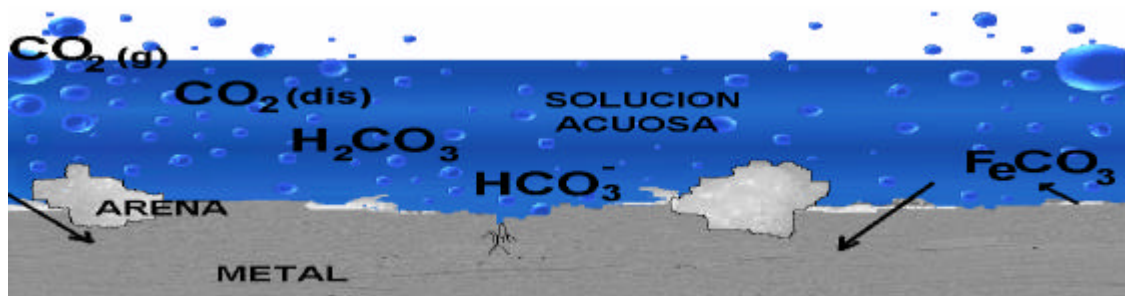




Reacción global:



Figura 1. Mecanismo de corrosión por CO₂ en presencia de arena.



Dependiendo de la formación y de las características de la película de carbonato de hierro, la corrosión por CO₂ puede ser clasificada como corrosión general o corrosión localizada. En los rangos de temperatura < 60°C (el paso que controla la velocidad de corrosión es la evolución de hidrógeno, que a la vez es controlada por la formación del H₂CO₃) no se forma ninguna película protectora en la superficie debido a la alta solubilidad del carbonato y, por lo tanto, domina la corrosión general. En las temperaturas por encima de 80°C (la transferencia de masa es la que controla la velocidad de corrosión) la solubilidad de FeCO₃ disminuye considerablemente y la sobresaturación conlleva a su precipitación, formándose una película de carbonato de hierro muy densa y protectora [2].

2.3 FACTORES QUE INFLUENCIAN LA CORROSIÓN POR CO₂

2.3.1 Temperatura. La temperatura influencia fuertemente la corrosión por CO₂ debido a su efecto sobre la velocidad de formación de la película. A bajas temperaturas, las velocidades de corrosión aumentan debido a la alta solubilidad de la película de FeCO₃. Mientras que si se aumenta la temperatura alrededor de (60-80 °C) la capa del carbonato de hierro llega a ser más adherente a la superficie del metal y más protectora por naturaleza dando como resultado una disminución en la velocidad de corrosión. Esta correlación entre la temperatura y la velocidad de corrosión fue divulgada por muchos investigadores, Ueda y colaboradores atribuyen la velocidad máxima de corrosión a una temperatura crítica T_{max} encontrada en aceros al carbono y al cromo^[2].

Los autores De Waard y Williams^[3] relacionaron la velocidad de corrosión con la temperatura de acuerdo a la relación de ARRHENIUS, aplicada a una solución con un pH de 4 y un rango de temperatura entre 0 y 80°C.^[5]

$$\text{Log } I_c = 7.58 - (10700 / 2.3 R T) \quad (8)$$

Donde I_c = velocidad de corrosión [mm/y]

R = Constante universal de los gases [cal / mol °K]

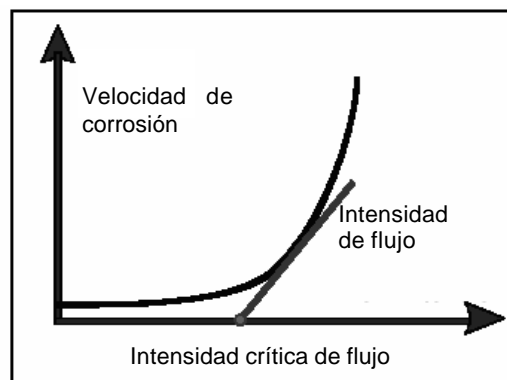
T = Temperatura absoluta [°K]

2.3.2 Velocidad del fluido. El flujo afecta la velocidad de disolución del metal de diferentes formas. Por debajo de la intensidad crítica de flujo la velocidad de corrosión aumenta solo gradualmente con el aumento de la intensidad del flujo (figura 2). Por arriba de la intensidad crítica de flujo la



interacción entre el líquido y la pared llega a ser tan alta que las películas protectoras son destruidas por los elementos de turbulencia cercanos a la pared que también previenen la regeneración de la película protectora. En este caso la disolución de la superficie del metal desprotegida es controlada por el transporte de masa. La apariencia típica de las superficies es en forma de estrías, picado, agujeros redondeados como resultado de acciones caóticas de la turbulencia cercana a la pared.

Figura 2. Variación de la velocidad de corrosión con la velocidad crítica de flujo.



Fuente: CORROSION NACEExpo 2006 paper 06112

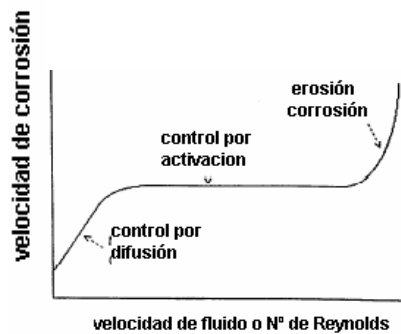
La corrosión por CO_2 también presenta casos donde no hay formación de películas protectoras, bajo tales condiciones la velocidad de disolución del metal es también controlada por el transporte de masa, siendo éste menor que en el caso anterior.

En presencia de películas protectoras en ambientes con CO_2 la intensidad del flujo puede influenciar en un cierto grado el transporte de la especie catódica hacia la superficie del acero dando un aumento de la velocidad de disolución del metal a altas velocidades del flujo. Al mismo tiempo el flujo puede estimular la remoción de los iones Fe^{2+} de la superficie del acero

originando poros y pueden causar una baja sobresaturación de los productos de corrosión y velocidades de precipitación más lentas, originando una alta velocidad de corrosión.

A elevadas temperaturas la intensidad del flujo crítico necesario para la destrucción de películas protectoras y la iniciación de la corrosión localizada aumenta porque las películas más protectoras se forman a temperaturas altas. La figura 3 muestra el control de la velocidad de corrosión en función de la velocidad del fluido.^[2]

Figura 3. Variación de la velocidad de corrosión con la velocidad de flujo.



Fuente: CORROSION ENGINEERING Vol. 48 3, 1992.

2.3.3 Presión Parcial. La presión parcial del CO₂ desempeña un papel importante en la corrosión por CO₂ tanto para las condiciones de formación y de la no formación de películas protectoras. Sin embargo, entre más alta sea la presión parcial de CO₂ no significa necesariamente velocidades de corrosión más altas, pues esto depende de las condiciones ambientales. Generalmente, bajo condiciones de ausencia de película, altas presiones parciales aumentan las velocidades de corrosión por la reducción del pH y por el aumento de la velocidad de reducción del ácido carbónico.

Está demostrado que la reacción anódica no es afectada cuando se aumenta la presión parcial de CO₂ de 3 a 20 bar, mientras que la densidad de corriente límite catódica se aumenta fuertemente debido a un alto contenido de ácido carbónico. Esto indica otra vez que en la corrosión por CO₂, el pH es sólo un parámetro de orientación para determinar la corrosividad. Lo que realmente importa es la disponibilidad del ácido carbónico y los sitios superficiales para su reducción. [2]

Bajo condiciones favorables de formación de la película protectora (alta sobresaturación en la interfaz con subsecuente precipitación del carbonato), la presión parcial alta de CO₂ puede también reducir el ataque de la corrosión debido a una baja disponibilidad de sitios catódicos.

La presión parcial del dióxido de carbono puede ser usada como un primer estimativo de corrosividad de un pozo con condensado de gas, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{CO_2} = X_{CO_2} * P \tag{9}$$

Donde; **P_{CO₂}** ⇒ es la presión parcial del dióxido de carbono.

X_{CO₂} ⇒ es la fracción molar de dióxido de carbono.

P ⇒ es la presión total

Tabla 1. Predicción de la corrosividad para pozos de condensado de gas dulce.

PP DEL CO ₂	GRADO DE CORROSIVIDAD
> 30 psi	Usualmente indica corrosión
3 - 30 psi	Puede indicar corrosión
< 3 psi	No corrosivo

Fuente: Estudio sobre la corrosión en líneas de producción de pozos de petróleo.

Las relaciones mostradas en la tabla 1 utilizando la presión parcial de dióxido de carbono, se pueden usar como un criterio para predecir la corrosividad. Estas relaciones no aplican cuando el agua producida tiene un alto contenido de minerales o el vapor de gas contiene oxígeno y/o sulfuro de hidrógeno en adición al dióxido de carbono.^[6]

2.3.4 pH. El pH afecta la corrosión por CO₂ de los aceros al carbono por diferentes mecanismos. El aumento de los valores de pH conducen generalmente a una reducción de la velocidad de corrosión, por la influencia de los mecanismos electroquímicos y la formación de las películas protectoras de carbonato de hierro. Al aumentar el pH la reducción catódica de H⁺ se retrasa lo cual disminuye la velocidad de disolución anódica del hierro. Además a valores altos de pH se forman películas protectoras de carbonato sobre la superficie reduciendo la velocidad de corrosión significativamente.^[2]

En condiciones de flujo multifásico, el aumento del pH conduce a una disminución significativa de la velocidad de corrosión del acero al carbono debido a la formación de las películas protectoras a valores de pH mayores de 6.2. Un estudio reveló una disminución de la velocidad de corrosión en un factor de 3 con un aumento del pH de 3.5 a 5.5 dependiendo de la velocidad del flujo.

De Waard y Milliams^[3] en sus investigaciones definieron un factor de corrección de pH, debido al efecto causado en la velocidad de corrosión cuando varía la cantidad de hierro disuelto. A un volumen de agua y presión de CO₂ constantes, la concentración de Fe⁺² aumenta mientras la concentración de H⁺ decrece. De Waard y Milliams definieron el pH como:

$$\text{pH (agua + CO}_2\text{)} = 3.71 + 0.00417 - 0.5 \log (\text{Fco}_2) \quad (10)$$

También introdujeron un parámetro que representa el efecto de los productos de corrosión en la velocidad de corrosión:

$$\text{Log } F_{\text{pH}} = 0.32 \times (\text{pH}_{\text{sat}} - \text{pH}_{\text{act}}) \tag{11}$$

Donde F_{pH} , pH_{sat} y pH_{act} , son el factor de corrección para la velocidad de corrosión que tiene en cuenta el efecto de los productos de corrosión, el pH de saturación y el pH actual respectivamente, siempre y cuando el pH_{sat} sea mayor que el pH_{act} .

La tabla 2 muestra la influencia del pH en el mecanismo controlante de la corrosión.

Tabla 2. Efecto del pH en la etapa controlante de la corrosión

pH	ETAPA CONTROLANTE DE LA CORROSIÓN
3 a 4	Transferencia de masa (la difusión de H ⁺ controla el proceso)
4 a 6	Transferencia de carga de H ₂ CO ₃ y bicarbonato

Fuente: Estudio sobre la corrosión en líneas de producción de pozos de petróleo.

2.3.5 Presencia de partículas. A altas velocidades de flujo, las partículas de arena evitan la formación de una capa protectora, ocasionando una alta velocidad de penetración en la pared debido al impacto de las partículas sobre las paredes de la tubería. Características de las partículas como la concentración, velocidad de impacto, ángulo de impacto, tamaño, morfología, densidad, dureza y fragilidad pueden tener efectos determinantes en la velocidad de corrosión.

2.4 EROSIÓN-CORROSIÓN

La corrosión es un proceso de degradación de un material que ocurre debido a la acción química o electroquímica, mientras que la erosión es un proceso de remoción mecánica acelerada del material superficial dada por el impacto de los sólidos, líquidos, vapores o cualquier combinación de estos como resultado del movimiento relativo. Cuando estos dos procesos actúan juntos la acción conjunta de erosión y corrosión en ambientes acuosos se conoce como erosión-corrosión.^[7]

La erosión-corrosión es un mecanismo común de falla de componentes usados en la industria del petróleo. La erosión-corrosión es uno de los más severos problemas en los pozos de producción de gas debido al choque a altas velocidades de gotas líquidas y partículas de arena que penetran en la corriente del gas. Todas las líneas de tuberías pueden estar expuestas a la erosión-corrosión, pero los puntos donde presentan constricciones como estrangulaciones y válvulas de seguridad subsuperficiales están particularmente en riesgo.

En la producción y transporte de hidrocarburos además de la fase acuosa y gaseosa rica en CO₂, existen los sólidos y sedimentos que provienen de los yacimientos de los pozos productores de gas y petróleo. Estos sólidos influyen en algunos casos en el deterioro de los materiales por diferentes mecanismos, como: Un mecanismo de solo erosión, cuando los fluidos a altas velocidades transportan arena que impacta las paredes de accesorios como codos y tes; un mecanismo de erosión – corrosión, cuando las partículas impactan o en su movimiento de rozamiento remueven las películas protectoras de óxidos, carbonatos e inhibidores, permitiendo que los agentes corrosivos actúen sin barreras en la superficie del metal; y otro

mecanismo, el de deposición de los sólidos, que permite la corrosión localizada bajo los depósitos.

Este fenómeno se define como la aceleración de la velocidad de deterioro de un metal a causa del movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie metálica, se caracteriza en su apariencia por la presencia de crestas, ondas, canales, huecos redondeados y generalmente por la existencia de una tendencia direccional. En esta forma de ataque, la velocidad del fluido es un factor importante en la determinación de la velocidad de remoción del material. La velocidad del fluido (líquido o gas) es suficiente para remover productos de corrosión débilmente adheridos a la superficie, reduciendo su polarización o su efecto inhibidor.

Las partes de equipos que usualmente presentan este tipo de corrosión son las tuberías y accesorios como codos, tees, bombas, válvulas, y en general toda parte de equipo sometido a la acción de fluidos en movimiento.

El flujo en forma turbulenta favorece la corrosión-erosión, por el mayor contacto entre el ambiente y el metal, los productos de corrosión pueden retirarse más fácilmente que en un flujo laminar.

Una manera de evitar los daños por alguno de estos mecanismos es el uso de materiales o recubrimientos de alta dureza, pero sus costos son bastante altos; otra opción es el manejo de los fluidos a velocidades adecuadas, de acuerdo con el contenido de los sólidos, para permitir el uso de las aleaciones comunes de acero al carbono. Por mucho tiempo se ha venido utilizando una guía conocida como el API RP 14E, para estimar la velocidad adecuada bajo la cual no se esperaría la erosión. La ecuación que permite calcular esta velocidad es la siguiente:

$$V_e = \frac{C}{(r)^{1/2}} \quad (12)$$

Siendo,

V_e = la máxima velocidad permisible (m/s)

C = constante empírica

r = densidad de la mezcla del fluido (Kg/m^3)

Para el caso de un flujo en dos fases, sin la presencia de sólidos, el valor recomendado de C es 100, y si contiene sólidos el valor debe ser mas bajo, no siendo especificado por la guía. Probablemente mediante algunas pruebas experimentales se podría fijar este valor de C .

La ecuación anterior se ha ido modificando, debido a las limitaciones en su uso, al no considerar en su estructura el efecto de una gran cantidad de variables como la hidrodinámica, variables geométricas y propiedades fisicoquímicas tanto de los fluidos como de los sólidos. ^[1]

Existe cierta discusión en cuanto a las limitaciones de esta fórmula simple. Es una relación completamente empírica; la fórmula del API RP-14 se realizó inicialmente para usarla como pauta en la predicción de la erosión-corrosión en flujo multifásico de una tubería de acero al carbono sin inhibir. Debido a la carencia de modelos alternativos, se ha utilizado la fórmula para una variedad de sistemas seleccionando los valores de la constante a partir de la experiencia. Tales sistemas incluyen sistemas anticorrosivos, sistemas monofásicos, y aleaciones resistentes a la corrosión.

La Universidad de Tulsa^[8], ha estado trabajando en dirección del entendimiento del efecto de la arena en la erosión de los materiales, y para ello, B. S. McLaury^[9] ha propuesto varias ecuaciones que involucran factores

como la hidrodinámica, variables geométricas y propiedades fisicoquímicas tanto de los fluidos como de los sólidos; no considerados en el API RP 14E . Basados en datos experimentales para un flujo simple, anular y en software avanzado de dinámica de fluidos para trayectorias de partículas, la Universidad mencionada ha desarrollado modelos que pueden predecir las velocidades de erosión, de erosión – corrosión por CO₂, las velocidades límites para evitar erosión, la velocidad crítica de deposición y la velocidad de sedimentación de la arena, entre otros.

S. Nestic, J. Bienkowski, K. Bremhorst, and K.-S. Yang, proponen una serie de nuevos experimentos para el estudio de la erosión-corrosión utilizando una geometría de cilindro rotatorio modificado. Los autores creen que esta geometría puede volverse una herramienta eficaz para estudiar la erosión-corrosión bajo condiciones de flujo turbulento y se volvería un sustituto para un sistema más complejo y caro como es el loop.^[10]

2.4.1 Factores Críticos de la Erosión-Corrosión.^[11]

- En la mayoría de los casos, la corrosión desempeña un papel importante de modo que muy pocas veces se presenta erosión pura. Por tal razón es crítico considerar la contribución que hace la corrosión al proceso de deterioro de un material.
- La velocidad de pérdida de metal dependen de la velocidad y de la concentración del medio (es decir, partículas, líquidos, gotitas, mezclas, flujo bifásico), el tamaño, densidad y la dureza de partículas del medio, la dureza y resistencia a la corrosión del material sujeto a erosión, y el ángulo de impacto.

- Aleaciones dúctiles tales como cobre y aleaciones de aluminio que sufren fácilmente daño mecánico pueden estar sujetas a severas pérdidas de metal bajo condiciones de alta velocidad de flujo.
- El aumento de dureza del metal no siempre mejora la resistencia a la erosión, especialmente donde la corrosión desempeña un papel significativo.
- Para cada combinación de ambiente-material, hay a menudo una velocidad máxima por encima de la cual el impacto de las partículas pueden producir pérdida del metal.
- El aumento de la corrosividad del ambiente puede reducir la estabilidad de las películas superficiales protectoras y aumentar la susceptibilidad a la pérdida del metal. El metal se puede eliminar de la superficie como iones disueltos, o como productos sólidos de la corrosión que se retiran mecánicamente de la superficie del metal.
- Factores que contribuyen a un aumento en la corrosividad del ambiente, tal como la temperatura, pH, etc., puede aumentar la susceptibilidad a la pérdida del metal.

2.4.2 Mitigación de la Erosión-Corrosión.^[11] Para prevenir los problemas originados por el fenómeno de erosión-corrosión se recomienda:

- Realizar un buen diseño que implica cambios en la selección de la forma, geometría y materiales. Como por ejemplo aumentarel diámetro de la tubería para disminuir la velocidad; aerodinamizar curvas para reducir el choque; aumentar el espesor de pared; y usar baffles para amortiguar el choque.

- Mejorar la resistencia a la erosión aumentando la dureza del sustrato y usando aleaciones más duras, endurecido superficialmente o por tratamiento térmico. Los refractarios resistentes a la erosión son muy utilizados en ciclones y válvulas.
- Usar aleaciones más resistentes a la corrosión y/o alterar el ambiente para reducir la corrosividad, por ejemplo, desaireando, adicionando inhibidores.

2.5 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN.^[6]

2.5.1 Pruebas potenciodinámicas. En las pruebas potenciodinámicas el electrodo de trabajo es monitoreado a través de un rango de potenciales donde se mide la corriente resultante. El potencial controlado se aplica al electrodo de trabajo y el de referencia desde una fuente externa, y la corriente es medida entre el electrodo de trabajo y los electrodos auxiliares. Las curvas obtenidas son analizadas según la norma técnica ASTM G5-90.

▪ **Curvas de polarización.** En las curvas de polarización se aplica un barrido de potencial de ± 250 mV con respecto al potencial de corrosión. El barrido se empieza en -250 mV, es decir en la zona catódica. El logaritmo de la densidad de corriente obtenida se grafica en función del barrido de potencial.

En las curvas de polarización (E vs Log i) se obtienen unos segmentos lineales cerca al potencial de corrosión, estos segmentos son conocidos como las regiones Tafel donde se hallan las pendientes anódica y catódica;

la extrapolación de estos segmentos al potencial de corrosión permiten encontrar la densidad de corriente de corrosión.

Este método desarrollado en principio por Evans y Wagner, exige hacer las curvas de polarización completa, lo cual facilita un análisis electroquímico del proceso de corrosión y da lugar a modificaciones en la superficie del electrodo por las elevadas polarizaciones.

▪ **Resistencia a la polarización.** Un método más exacto para encontrar la corriente de corrosión es usar la técnica de resistencia a la polarización, junto con los datos de las pendientes de Tafel anódica y cátodica. La resistencia a la polarización, se define como la tangente de la curva de polarización (E vs I) en el potencial de corrosión, basándose en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno del potencial de corrosión, E_{corr} .

$$R_p = (dE/di)_{E=E_{corr}} \quad (13)$$

Este método tiene la ventaja de requerir solo la aplicación de polarizaciones pequeñas, que en la mayoría de los casos no alteran la superficie del electrodo de trabajo o material de prueba. Consiste en aplicar mediante un potenciostato un sobrepotencial de $\pm 20\text{mV}$ alrededor del potencial de reposo y obtener una respuesta de corriente lineal con el voltaje. Con la resistencia a la polarización (R_p) y las pendientes Tafel a partir de las curvas de polarización, la densidad de corriente de corrosión se puede hallar por la ecuación de Stern-Geary, cuando el control de la corrosión es por difusión:

$$i_{corr} = [B_a / (2.3)] / R_p \quad (14)$$

Donde:

i_{corr} = Densidad de corriente de corrosión [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]

b_a = Pendiente de Tafel anódica [mV]

R_p = Resistencia a la polarización [$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$]

Por lo tanto, la velocidad de corrosión esta dada por:

$$V_{corr} = 0.13 i_{corr} PE / r \quad (15)$$

Donde:

V_{corr} = Velocidad de corrosión [mpy]

PE = Peso específico del material [g] para el acero (7.87)

ρ = Densidad del material [g/cm^3] para el acero (7.87)

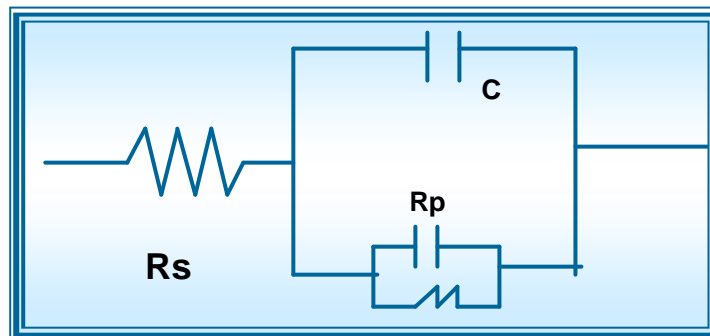
Ensayos con corriente alterna (Impedancias). El método de impedancia proporciona una información amplia, ya que permite deducir el comportamiento de la interfaz metal/solución como una red de elementos resistivos y capacitivos, ya que el diagrama de impedancias ofrece una visión completa de los fenómenos corrosivos que tienen lugar.

Esta técnica se caracteriza por utilizar una señal de corriente alterna para excitar el electrodo de trabajo, a una amplitud de voltaje de ± 20 mv y un barrido de frecuencia desde los 0.1 mHz hasta los 100 KHz. Cuando la corriente alterna atraviesa la interfaz del electrodo esta se divide en dos partes: una corriente motivada por el comportamiento capacitivo de la interfaz y la otra como una corriente de transferencia que se refiere al intercambio de cargas de las reacciones electroquímicas. Para analizar la variación de la impedancia con la frecuencia, se recurre al concepto de circuito equivalente, (figura 4).



La interfaz electroquímica se representa como un condensador (doble capa) en paralelo con la impedancia Faradaica R_T , además se incluye una resistencia en serie R_e (resistencia del electrolito). Mediante la técnica de espectroscopía de impedancias se pueden determinar los valores de resistencia a la transferencia de carga, que se puede sustituir en la ecuación de Stern-Geary, al igual que en la técnica de resistencia a la polarización lineal, y obtener un valor de la velocidad de corrosión.

Figura 4. Circuito equivalente que simula la interfaz metal-solución.

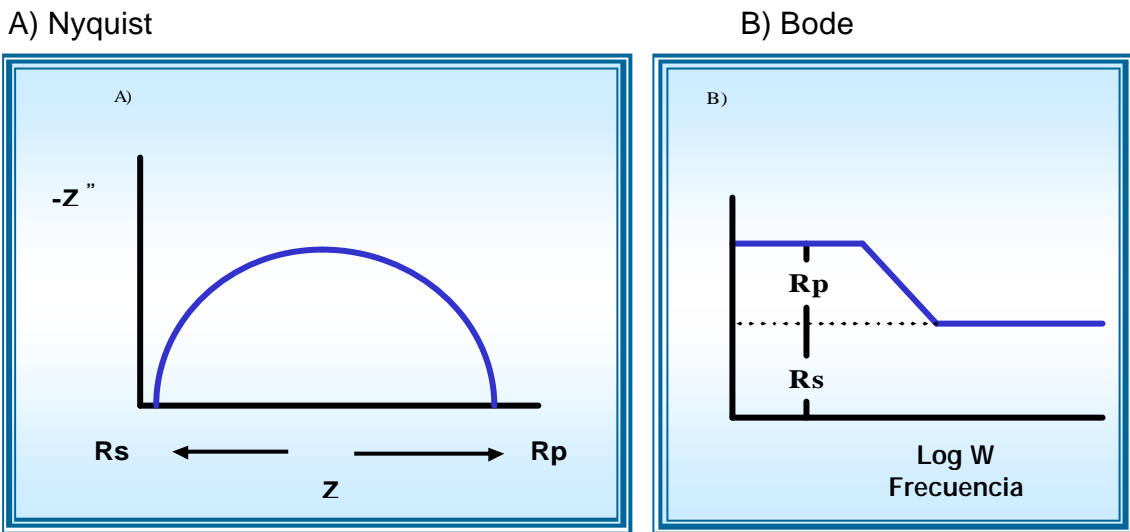


Fuente: Control de la corrosión, estudio y medida por técnicas electroquímicas

El método de impedancias tiene la ventaja de ser utilizado con buen resultado en medios de baja conductividad eléctrica. Las interfaces no son circuitos resistivos sencillos, sino que involucran además películas y capas con diferentes propiedades dieléctricas, difusión de especies desde o hacia la superficie, transferencia de carga, etc. Una celda electroquímica se comporta como una impedancia al aplicar un potencial eléctrico de tipo sinusoidal entre sus electrodos, luego es costumbre en los estudios por esta técnica representar el comportamiento del sistema por circuitos equivalentes. Existen los diagramas de Nyquist en donde se representa la respuesta de las resistencias en función de la impedancia y el diagrama de Bode en donde se

relacionan resistencias, impedancias, frecuencias y ángulos de fase, (figura 5).

Figura 5. Diagramas de Impedancia:



Fuente: Control de la corrosión, estudio y medida por técnicas electroquímicas

2.6 ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO

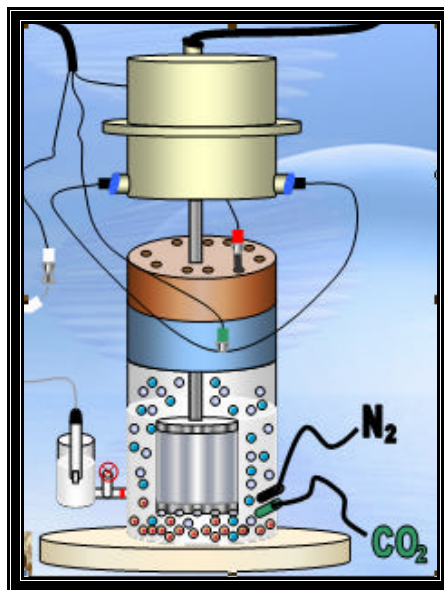
El electrodo de cilindro rotatorio (ECR) es uno de los dispositivos útiles para la evaluación de los efectos del flujo mono y multifásico en erosión y corrosión, probablemente el aparato más sencillo de construir y operar bajo hidrodinámica definida en el régimen de flujo turbulento.^[12]

El sistema de prueba ECR es compacto, relativamente económico, y controlado fácilmente. Provee un flujo estable y reproducible en volúmenes de fluido relativamente pequeños. Opera en régimen turbulento sobre un amplio rango de números de Reynolds, bajo condiciones hidrodinámicas controladas y conocidas. Los experimentos requieren pequeñas cantidades



de fluido, y se pueden hacer simultáneamente mediciones electroquímicas y gravimétricas. Es esencial que el electrodo de trabajo pueda ser rotado, tanto a altas como bajas velocidades, y que esta última variable pueda ser medida y mantenida constante. ^[13]. Ver figura 6.

Figura 6. Esquema de un Cilindro Rotatorio



Un cilindro rotatorio causa turbulencia del fluido debido al arrastre de la superficie. La extensión dependerá de la geometría exacta, particularmente el grado de desviación. El flujo laminar ocurre a bajas velocidades de rotación, por ejemplo, 10 r.p.m., y el Re crítico es de aproximadamente 200. ^[10]

En este equipo se desarrollan tres regímenes de flujo:

1. A bajas velocidades rotacionales el flujo es laminar y tangencial.
2. Sobre un valor crítico de $Ta = f(Re, d_o, d_i)$, continua el régimen laminar, pero se desarrollan los vórtices de Taylor dando un movimiento radial y axial.

3. Sobre un valor crítico de Re , se desarrolla la turbulencia total.

2.6.1 Características del Electrodo de Cilindro Rotatorio. Las características principales del ECR son:

- Hidrodinámica definida, que es turbulenta aún a bajas velocidades de rotación.
- Correlaciones empíricas razonablemente bien definidas de cantidades tales como: coeficiente de transferencia de masa (número de Sherwood), velocidad del fluido (número de Reynolds) y propiedades físicas del fluido (número de Schmidt).
- Distribución uniforme de potencial y corriente.
- Características del fluido independientes de la posición de la superficie del electrodo.
- Fácil montaje y uso.
- Velocidad de erosión estimable por pérdida de masa (gravimetría) y por técnicas electroquímicas.
- Facilidad de uso de los resultados para predecir los efectos del fluido en otras geometrías.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se empleó en esta investigación estuvo encaminada a realizar una determinación de la velocidad de corrosión asistida por erosión en electrodos de acero AISI SAE 1020 en sistemas multifásicos CO₂-salmuera-arena, cuyos resultados servirán para tener un mejor conocimiento de los problemas generados en el campo por la corrosión en medios que involucren estos agentes.

Esta sección contiene las especificaciones de los materiales empleados, dimensiones de las muestras a ensayar, los equipos de laboratorio y las técnicas utilizadas.

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta primera etapa se hizo una recopilación de la información y estado del arte necesaria para el desarrollo de este proyecto, en cuanto a investigaciones relacionadas con el estudio del fenómeno de corrosión por CO₂ bajo condiciones de flujo multifásico, fenómeno de erosión-corrosión, utilización de las técnicas electroquímicas (RP, TAFEL y EIS), y consulta de las normas requeridas para el desarrollo de las pruebas.

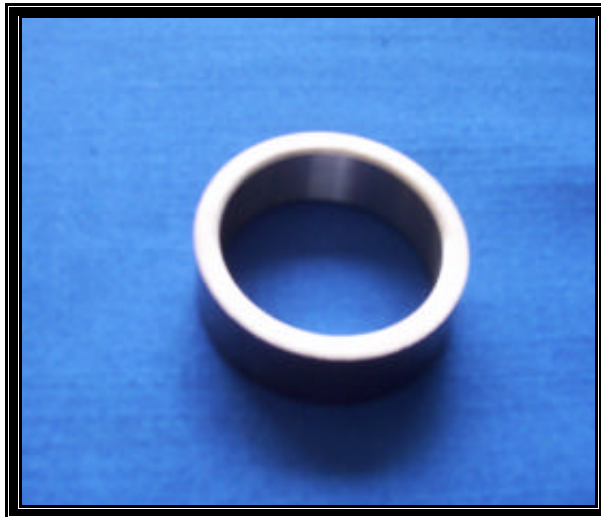
Para este fin se recurrió a los diferentes medios, como libros, artículos, revistas, Internet, bases de datos, investigaciones y la interacción de información con el grupo de investigación en corrosión de la UIS y el Grupo de tribología de la UIS .



3.2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

Se fabricaron 15 probetas de acero AISI SAE 1020 (fotografía 1), un acero de baja aleación y de composición química aproximada a los aceros de las normas API 5L grado B y ASTM A 53 grado B, de gran uso en la fabricación de tuberías y transporte de crudo. El acero AISI SAE 1020 fue seleccionado por su composición química, mínimos aleantes y disponibilidad en las dimensiones de las probetas a trabajar.

Fotografía 1. Probeta de acero AISI SAE 1020



Las dimensiones de las probetas fueron las siguientes:

- 3.8 cm. de diámetro externo.
- 3,2 cm. de diámetro interno.
- 12 cm². de área externa.
- 1 cm. de altura.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE TRABAJO

La caracterización del material fue realizada mediante la técnica de Espectroscopía de Emisión Óptica (EEO), de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM E – 415 de 1999. Los resultados promedio se muestran en la tabla 3. y adicionalmente se relacionaron los valores estipulados para un acero AISI 1020.

Tabla 3. Composición química del acero AISI - SAE 1020

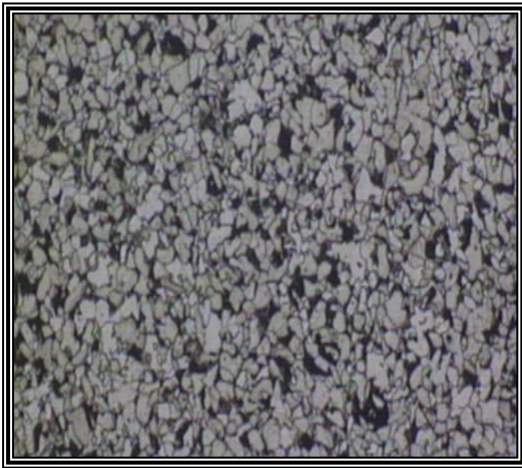
ELEMENTO	MUESTRA AISI - SAE 1020	AISI - SAE 1020
C	0.21 ±0.0014	0.18 – 0.23
Mn	0.58 ±0.0071	0.30 – 0.60
P	0.013 ±0.0012	0.040 máx.
S	0.022 ±0.0041	0.050 máx.
Si	0.19 ±0.0031	
Cu	0.18 ±0.0366	
Ni	0.07 ±0.0053	
Cr	0.09 ±0.0017	
Mo	0.02 ±0.0005	
Al	< 0.001	
Fe	Balance	

Fuente: Técnica de Espectroscopía de Emisión Óptica

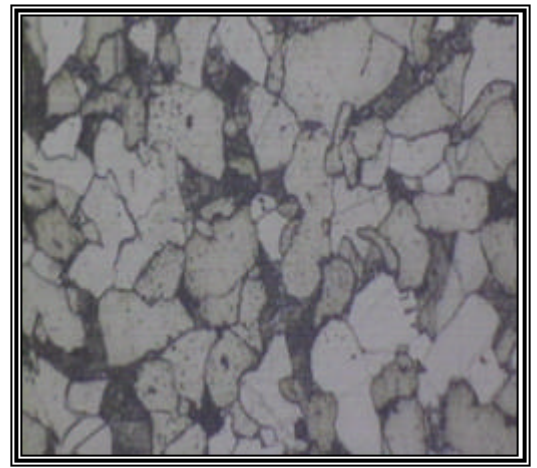
La microestructura observada es característica de aceros de bajo contenido de carbono en estado normalizado y está compuesta de granos de ferrita y perlita con un tamaño de grano ferrítico fino No. 8 de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM E–112 de 1996, (Véase fotografía 2).

Fotografías 2. Microestructura del acero AISI-SAE 1020:

(a) Micrografía tomada a 50x



(b) Micrografía tomada a 200x



Fuente: Analizador de imágenes, Universidad Industrial de Santander

Dureza. Se determinó la dureza del acero por medio del medidor de dureza Clark (Harness Tester) en escala Brinell y Rockwell A; con 60 kg de carga aplicada y punta de diamante. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Dureza del acero AISI SAE 1020

PUNTO	DUREZA ROCKWELL A
1	50
2	53
3	51
D prom=	51.33 ±1.43

Fuente: Medidor de Dureza Clark (Harness Tester). UIS.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA

Fotografía 3. Sílice de alta pureza a 20X



Fuente: Imagen de la técnica EDS.

El tipo de arena utilizada tuvo las siguientes características:

- Forma: Angular
- Procedencia: Sabana de Torres
- Tamaño de Partícula: 150 μ m
- Dureza: 7 en escala de Mohs (aprox . 650 Brinell)

La caracterización de la arena fue realizada mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica de llama usando patrones certificados. La muestra de arena fue sometida a digestión con HF concentrado en crisol de platino y el residuo se disolvió en HCl al 50%. En la disolución obtenida se determinó Al, Fe, K, Na, Mg y Ca. La arena tenía un porcentaje de 99,651% de SiO₂.

En la tabla 5 se muestra el análisis químico de la muestra caracterizada.

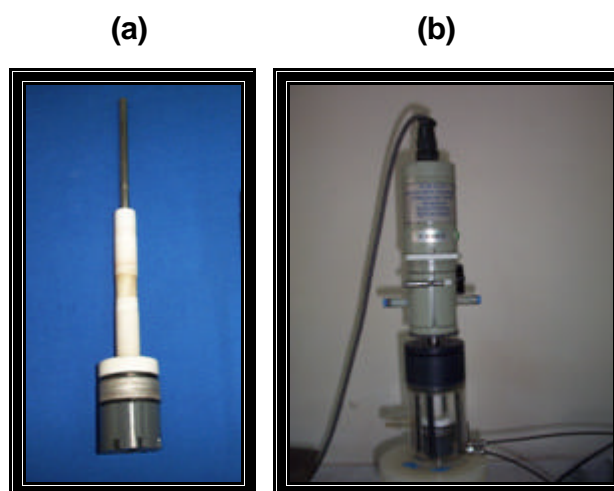
Tabla 5. Caracterización de la sílice de alta pureza

Descripción de la muestra	Sólido, material pétreo						
Informe de resultados	Los resultados se presentan en porcentaje en peso (%) de cada elemento cuantificado						
Nombre de la muestra	Parámetros analizados						
	Al₂O₃ [%]	Fe₂O₃ [%]	MgO [%]	K₂O [%]	Na₂O [%]	CaO [%]	Total [%]
Arena	0,094	0,028	0,033	0,060	0,107	0,027	0,349

Fuente: Laboratorio de Biohidrometalúrgia. UIS.

3.5 EQUIPOS Y MATERIALES EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

Fotografía 4. Electrodo de Cilindro Rotatorio: (a) Eje adaptado para ensayos con partículas (b) montaje de la celda en el electrodo de cilindro rotatorio



Fuente: Autores del Proyecto

Se utilizó un electrodo de cilindro rotatorio con una celda modificada de erosión-corrosión (fotografía 4), la cual consistió de una coraza de polimetil



metacrilato (acrílico) con capacidad de 200 ml de solución, que contiene un eje con rotación variable, ajustable con el controlador de velocidad (fotografía 5), las medidas electroquímicas se determinaron por medio del potencióstato-galvanostato Gamry EG&G (fotografía 6).

Fotografía 5. Controlador de velocidad del cilindro rotatorio



Fotografía 6. Potencióstato Gamry



3.6 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE REALIZADO PARA LOS ENSAYOS

A continuación se presenta los pasos para la realización del montaje de los ensayos:

1. Preparación del tubo lugin.
2. Instalación de las conexiones de los gases. N_2 y $CO_2(5\%) -N_2$.
3. Montaje de la probeta al eje del cilindro.



4. Ubicación del contraelectrodo de platino.
5. Montaje de la celda en el electrodo de cilindro rotatorio. Fotografía 7
6. Activación del controlador de velocidad. Fotografía 5
7. Conexión de los cables del equipo.
8. Corrida de pruebas electroquímicas. Fotografía 6

Fotografía 7. Electrodo de Cilindro N_2 y N_2-CO_2



Fotografía 8. Cilindro de Rotatorio



3.7 RELACIONES HIDRODINÁMICAS

Se puede definir la hidrodinámica del sistema con el número de Reynolds, la velocidad del fluido y el factor de fricción el cual contiene tres variables físicas que proporcionan información de la interacción entre la superficie y la capa límite hidrodinámica.

Para encontrar la velocidad de rotación en el laboratorio que simule el flujo en una tubería bajo condiciones de campo, es necesario determinar el esfuerzo de corte en ambos casos e igualarlos:

$$\tau_{\text{laboratorio}} = \tau_{\text{campo}} \quad (16)$$

* **Flujo en tubería.** El esfuerzo de corte en la pared de la tubería, está definido por la ecuación 17, asumiendo que no existe deslizamiento en la pared.

$$\tau_t = f \cdot r \cdot u^2 / 2 \quad (17)$$

Donde,

τ_t : esfuerzo de corte en la pared de la tubería (N/m²)

f: factor de fricción

ρ : densidad del fluido (kg/m³)

u: velocidad en la tubería (m/s)

El factor de fricción es una función del número de Reynolds y de la rugosidad.

Re < 2000	f = 16 / Re
2300 < Re < 10 ⁵	f = 0.079 Re ^{-0.25}
Re > 10 ⁵	f = 0.046 Re ^{-0.2}

* **Flujo en laboratorio para el ECR**

$$Re_c = r \cdot w \cdot r_c \cdot d_c / \mu \quad (18)$$

$$\tau_{\text{laboratorio}} = f \cdot r \cdot w^2 \cdot r^2 / 2 \quad (19)$$

$$f = 0.0791 Re^{-0.30} \quad (20)$$

Combinando las ecuaciones se obtiene la expresión para simular las velocidades de campo en el ECR:

$$\omega^{1.7} = 0.6148 \rho^{0.05} * u^{1.75} * d^{-0.25} r_c^{-1.4} * \mu^{-0.05} \quad (21)$$

Donde,

ω : velocidad de rotación (rad/s)

ρ : densidad del fluido (kg/m³)

d: diámetro de la tubería (m)

r_c : radio del cilindro (m)

μ : viscosidad (Pa.s)

Según la ecuación (21) la equivalencia de velocidades de flujo lineales a velocidades angulares, para trabajar en el electrodo de cilindro rotatorio se puede observar en la tabla 6

Tabla 6. Conversión de velocidades lineales a rpm en el cilindro rotatorio.

VELOCIDAD (m/s)	rpm
2.5	1000
4.75	2000
7	3000

3.8 VARIABLES DEL SISTEMA

Tabla 7. Variables establecidas en el desarrollo de los experimentos.

Pruebas	Vel. rotación (rpm)	% Arena	T (°C)	% NaCl	Tamaño partícula (mm)
RP	1000	10	27 ± 1 °C	3	150
Tafel	2000	20			
EIS	3000	30			

Definidas las variables del sistema CO₂-salmuera-arena se procedió a establecer el diseño de experimentos. El diseño estadístico utilizado como herramienta para la investigación fue un diseño factorial 3ⁿ, en donde el 3 indica el número de niveles que serán tomados; n representa el número de variables independientes seleccionadas y el resultado de 3ⁿ es el número de ensayos a realizar. Para este caso el diseño fue 3², donde 3 representa los niveles (10-20-30 de % de partículas y 1000-2000-3000 para velocidades de rotación); y el 2 corresponde a las dos variables que se trabajaron, de esta forma la matriz factorial queda formulada como se muestra en la tabla 8, la cual también incluye tres repeticiones correspondientes al diseño y tres blancos, uno para cada velocidad de rotación sin la presencia de partículas.

Tabla 8. Determinación del número de ensayos

Diseño de experimentos		
Número de experimentos	Velocidad de rotación (rpm)	Concentración partículas (%)
1	1000	10
2	1000	20
3	1000	30
4	2000	10
5	2000	20
6	2000	30
7	3000	10
8	3000	20
9	3000	30
10	1000	0
11	2000	0
12	3000	0
13	Repetición al azar	
14	Repetición al azar	
15	Repetición al azar	

Nota: el orden de los experimentos establecidos se realizaron al azar.

3.9 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La realización de los ensayos se efectuaron en un electrodo de cilindro rotatorio con una celda para evaluar corrosión bajo la influencia de partículas de arena, que impacta la probeta de acero AISI SAE 1020 inmersa en un sistema CO₂-salmuera-arena; a la acción de diferentes velocidades de rotación y porcentajes de partículas.

El procedimiento realizado antes de la pruebas electroquímicas fue:

- Pulido de los electrodos de acero AISI SAE 1020 con papel Carburo de Silicio hasta lija 600.
- Desengrasado de las probetas mediante la utilización de agua y etanol.
- Secado con aire caliente.

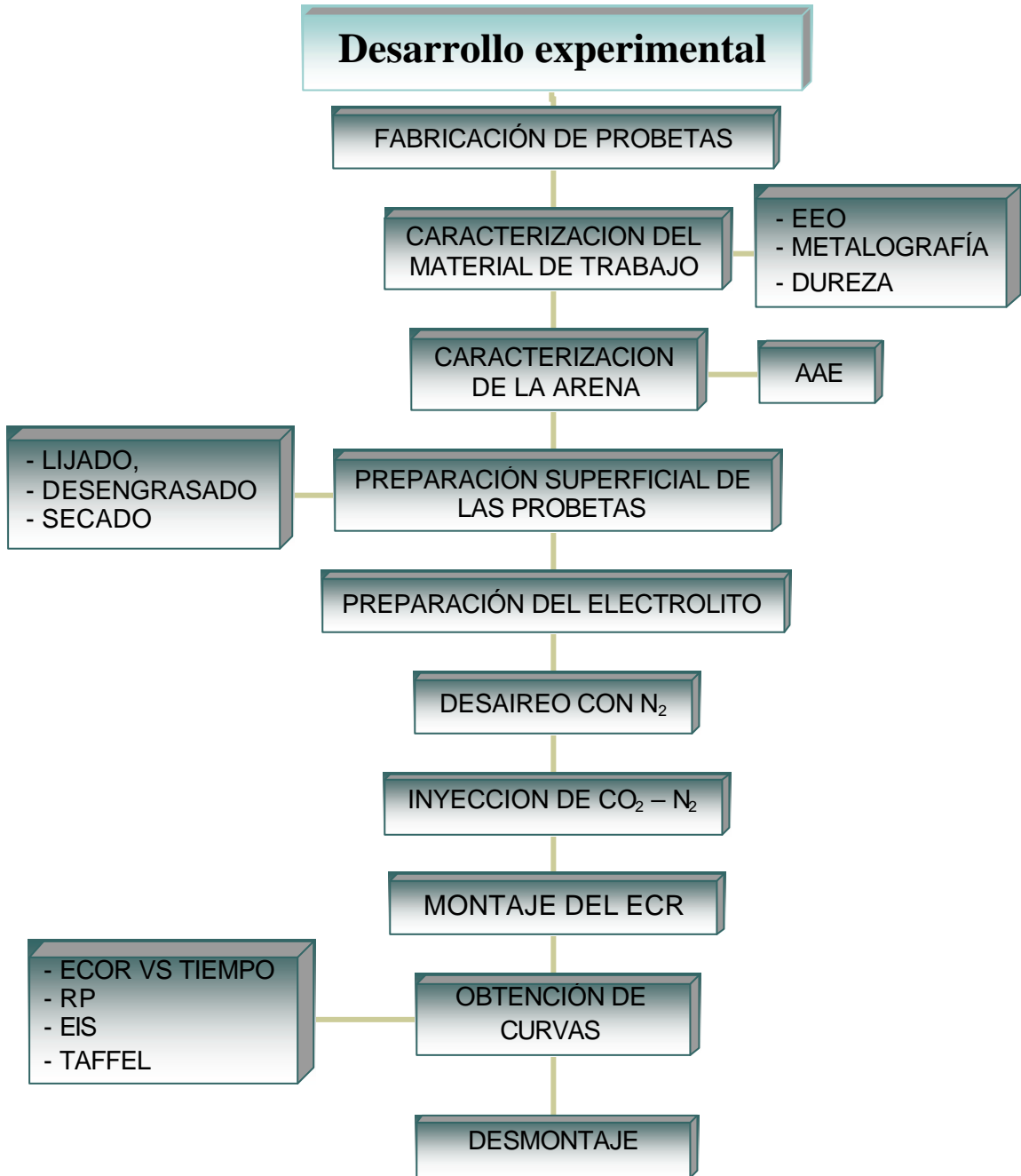
Este procedimiento se hace según la norma ASTM G1-90.

El montaje para la realización de los ensayos se realizó de la siguiente manera:

Se vierte 200 ml de salmuera (3% de NaCl) en la celda electroquímica, se desairea con nitrógeno, para purgar la solución durante media hora a una razón de 150 cc/min, según la norma **ASTM G5-90**, posteriormente se suspende el burbujeo de N₂, luego se realiza el montaje del electrodo de cilindro rotatorio adicionando previamente las partículas respectivas para cada ensayo, y se inicia el burbujeo de la mezcla de CO₂-N₂ por 45 minutos. Luego se inicia la rotación con el cilindro según el diseño experimental, posteriormente, se mide el potencial de corrosión de circuito abierto a las condiciones de ensayo, con el objetivo de observar la estabilidad del sistema, finalmente se procede a correr las pruebas electroquímicas de Rp, Tafel y EIS. El diagrama de flujo empleado para llevar a cabo el desarrollo experimental se puede apreciar en la figura 7.

4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA TÉCNICA DE EXPERIMENTACIÓN

Figura 7. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.



5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto. Inicialmente se presentan las curvas electroquímicas (R_p , EIS y Tafel), mediante las cuales se determina la velocidad de corrosión y se realiza el correspondiente análisis de resultados. Posteriormente, se determinan los efectos de cada una de las variables del sistema, por medio de un análisis estadístico. Finalmente, se analiza los resultados de SEM y EDS para la morfología de la superficie del acero y de la arena respectivamente.

5.1 CURVAS ELECTROQUÍMICAS SIN PARTÍCULAS

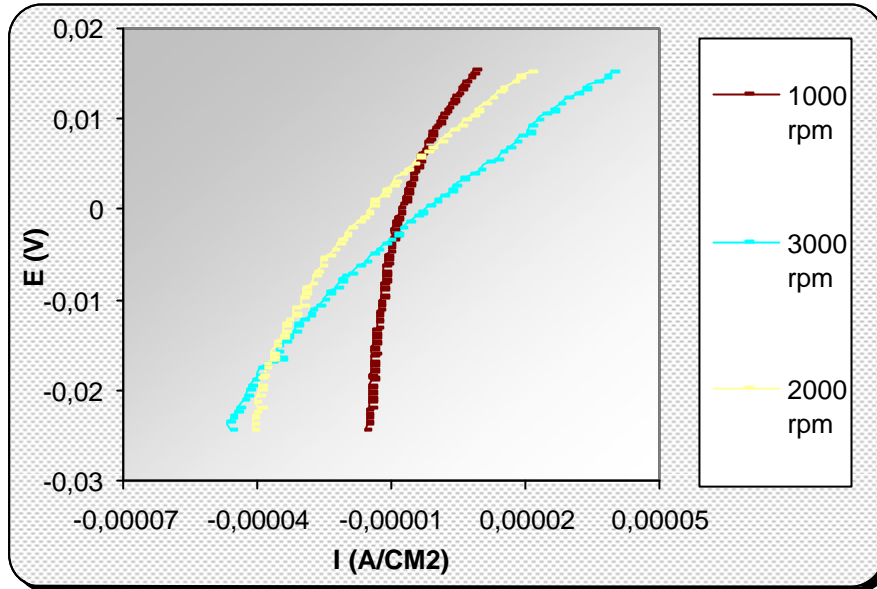
La realización de blancos se llevó a cabo con el fin de utilizarlos como punto de referencia para determinar la influencia de las partículas en el sistema CO_2 -salmuera-arena sometidas a diferentes velocidades de rotación.

La figura 8 muestra las curvas de resistencia a la polarización en un sistema salmuera- CO_2 - N_2 , variando las velocidades de rotación y sin la adición de partículas.

En las curvas, se observa como las pendientes disminuyen a medida que aumenta la velocidad de rotación, por lo cual las resistencias a la polarización disminuyen llevando a un aumento de la velocidad de corrosión; comportamiento esperado para este tipo de sistema.

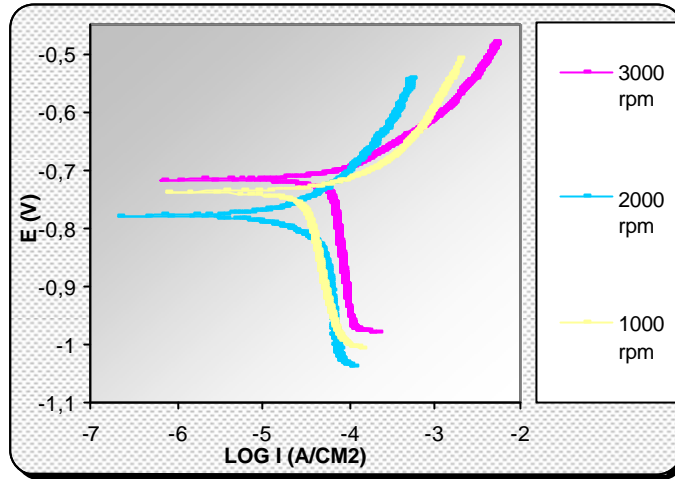
Los valores de resistencia a la polarización (R_p) son reportados en la tabla 9.

Figura 8. Curva de resistencia a la polarización para el sistema salmuera-
CO₂-N₂ sin partículas.



En la figura 9 se presentan las gráficas de pendientes de Tafel para el sistema CO₂-N₂ sin presencia de partículas, estas muestran que al aumentar la velocidad de rotación, la curva a 3000 rpm se desplaza levemente hacia la derecha, mientras que las curvas de 1000 y 2000 rpm muestran un comportamiento similar en términos de densidad de corriente, para comprobar esta tendencia, se determinan las pendientes anódicas de cada curva en la figura 9, con las cuales se halla el valor de la constante de Stern Geary ($B = \beta_a / 2.3$), posteriormente la corriente de corrosión (i_{corr}) y el valor de la velocidad de corrosión respectivo, los resultados se pueden observar en la tabla 9. Efectivamente la corriente de corrosión aumentó con el aumento de la velocidad de rotación del sistema.

Figura 9. Curva Tafel para el sistema salmuera- $\text{CO}_2\text{-N}_2$ sin partículas



La etapa controlante de la corrosión es la transferencia de masa, debido a que la corriente catódica se acerca a la corriente límite de difusión, además el desplazamiento de la corriente límite hacia la derecha es originado por el aumento de la velocidad de rotación lo que conllevó a la aceleración de la velocidad de corrosión.

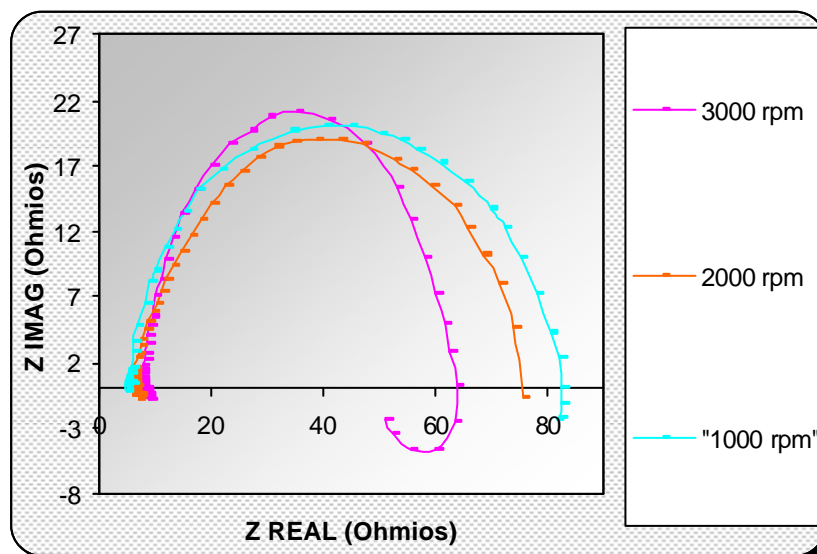
Tabla 9. Velocidades de corrosión obtenidas para el sistema CO_2 (5%) - N_2 por medio de resistencia a la polarización y pendientes de Tafel.

V ROTACIÓN (rpm)	Rp (ohm* cm ²)	I CORROSIÓN (A/Cm ²)	V CORROSIÓN (mpy)
1000	960,5	1.66E-5	7,6
2000	790,6	3.68E-5	16,9
3000	563	5.40E-5	24,9

La figura 10 muestra los diagramas de Nyquist para el sistema evaluado cuando se varía la velocidad de rotación, se observa que la resistencia a la polarización disminuye a medida que aumenta la velocidad del flujo, es así como a 3000 rpm se obtiene la menor R_p , lo que indica que la velocidad de corrosión es mayor que la obtenida a velocidades de rotación más bajas. Los diagramas de Nyquist muestran semicírculos capacitivos a altas frecuencias, y la tendencia de arcos inductivos en la parte inferior a más bajas frecuencias. El semicírculo capacitivo muestra la influencia de las propiedades dieléctricas de la doble capa electroquímica. El arco inductivo puede ser explicado por la disminución de la concentración de la superficie (variación sinusoidal con el cambio de fase, contra la medida de señal de voltaje) de una especie intermedia adsorbida, involucrada en el mecanismo de disolución posiblemente por la adsorción de ácido carbónico sobre el sustrato metálico, según la bibliografía consultada.^[14]

La velocidad de corrosión se calculó según la ecuación 15.^[15]

Figura 10. Diagrama de Nyquist para el sistema salmuera - N_2 - CO_2 - sin partículas

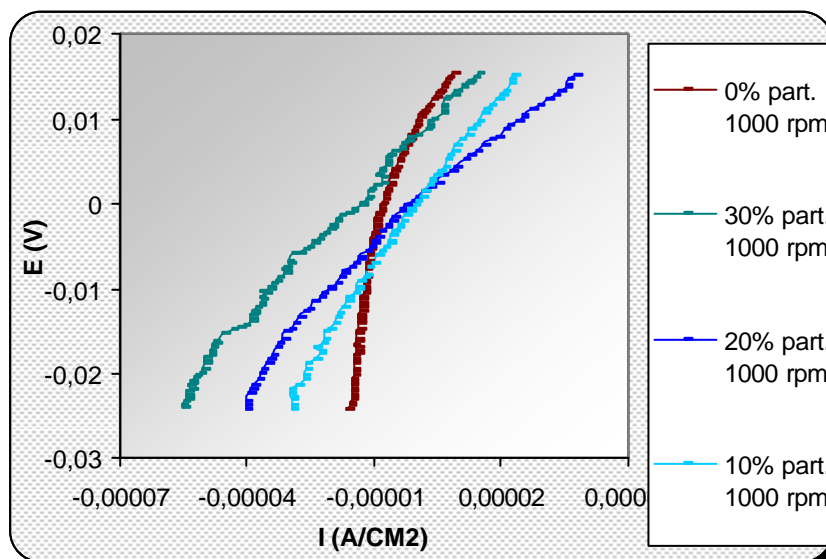


5.2 CURVAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL SISTEMA SALMUERA-N₂-(5%)CO₂ EN VOLUMEN CON DIFERENTES % DE PARTÍCULAS Y VELOCIDAD DE 1000 RPM

La figura 11 muestra la resistencia a la polarización cuando las condiciones de ensayo se llevaron a cabo a una velocidad de 1000 rpm variando los porcentajes de partículas, se observa que la mayor resistencia a la polarización (R_p) dada por la pendiente de las curvas, corresponde a la obtenida con cero porcentaje de partículas, a su vez, la menor R_p se observa para la curva con 20 %, lo cual significa que en este grupo corresponde a la mayor velocidad de corrosión.

Los valores de resistencia a la polarización (R_p) son reportados en la tabla 10.

Figura 11. Curva de resistencia a la polarización para el sistema salmuera-CO₂-N₂ a 1000 rpm con diferentes porcentajes de partículas

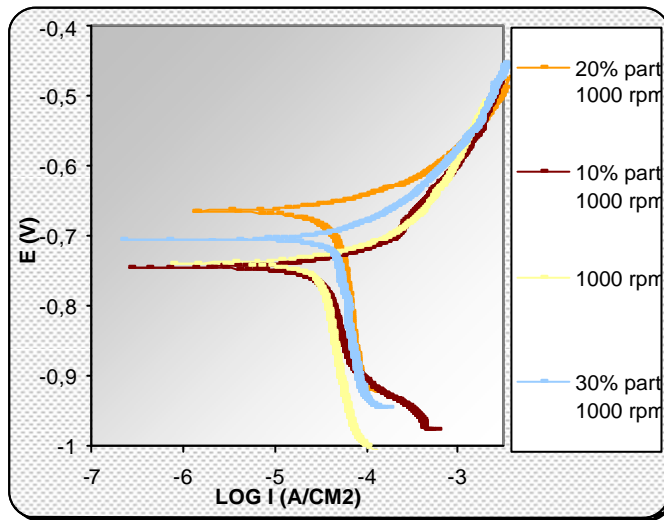


Las curvas de Tafel de la figura 12 muestran la curva de 20% de sólidos desplazada hacia la derecha, indicando el mayor valor de I_{corr} en este grupo.

Se esperaría que la mayor velocidad de corrosión (a 1000 rpm), se alcanzará a 30% de partículas, hecho que se atribuye a que esta velocidad de rotación no todas las partículas impactan el blanco debido a la cantidad de sólidos en la celda. La menor velocidad de corrosión fue a 1000 rpm sin la presencia de partículas, demostrando la influencia de la arena en el sistema.

Nuevamente se observa que la etapa controlante de la corrosión en las curvas electroquímicas de Tafel es la transferencia de masa.

Figura 12. Curva Tafel para el sistema salmuera- $\text{CO}_2\text{-N}_2$ a 1000 rpm con diferentes porcentajes de partículas



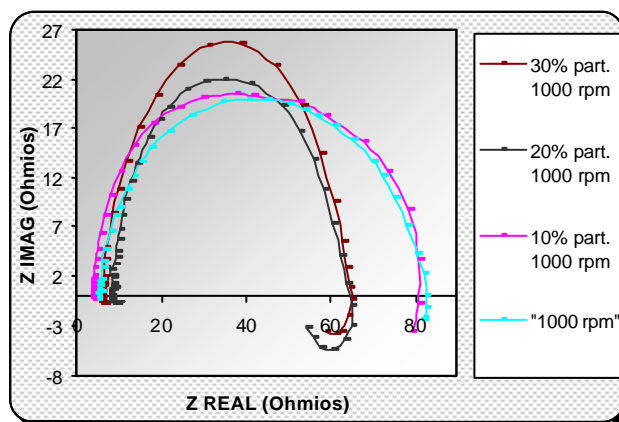
Por medio de estas gráficas se determinaron las pendientes anódicas con las cuales se halló la constante de Stern-Geary ($B = \beta_a/2.3$), posteriormente se calcularon las velocidades de corrosión, utilizando la ecuación 15. Ver tabla 10.

Tabla 10. Velocidades de corrosión obtenidas para el sistema CO₂ (5%) -N₂ por medio de resistencia a la polarización y pendientes de Tafel, para 1000 rpm con diferentes porcentajes de partículas.

V ROTACIÓN (rpm)	% Partículas	Rp (ohm* cm ²)	I CORR. (A/Cm ²)	V CORR. (mpy)
1000	0	960.5	1.66E-5	7,6
1000	10	877.6	3.86E-5	17,7
1000	20	598	4.58E-5	21,1
1000	30	609.12	4.15E-5	19,1

El diagrama de Nyquist (figura 13) a diferentes porcentajes de partículas y 1000 rpm muestran que a 20% de partículas se obtuvo la menor resistencia a la polarización, lo que significa que presenta la mayor velocidad de corrosión (de acuerdo con los resultados a corriente directa), seguida de la curva a 30% de partículas. La mayor Rp se obtuvo a 0% de partículas (tabla 11), lo que indica que en este grupo ésta presenta la menor velocidad de corrosión (Véase tabla 10).

Figura 13. Diagrama de Nyquist para el sistema salmuera- N₂ -CO₂ a 1000 rpm y diferentes porcentajes de partículas



En la figura 13, algunos diagramas presentan la formación de un segundo semicírculo o lazo inductivo al igual que en el sistema que no tuvo adición de partículas (blancos), la presencia de éste fenómeno fue mencionada con anterioridad.

Bajo un proceso de desgaste como es este sistema en estudio, el tamaño y la forma del diagrama cambia. El tamaño del arco capacitivo se incrementa, indicando un aumento en la resistencia a la transferencia de carga (R_t)^[16]. Esto puede ser interpretado por una disminución en la reactividad de la superficie, como sucede cuando no hay partículas.

El Nyquist no presenta semicírculos perfectos, se observa que al aumentar el porcentaje de sólidos la forma del diagrama es ovalada, donde su eje mayor es paralelo al Z (Imag), esto se debe a las altas perturbaciones en la superficie ocasionadas por la arena.^[17]

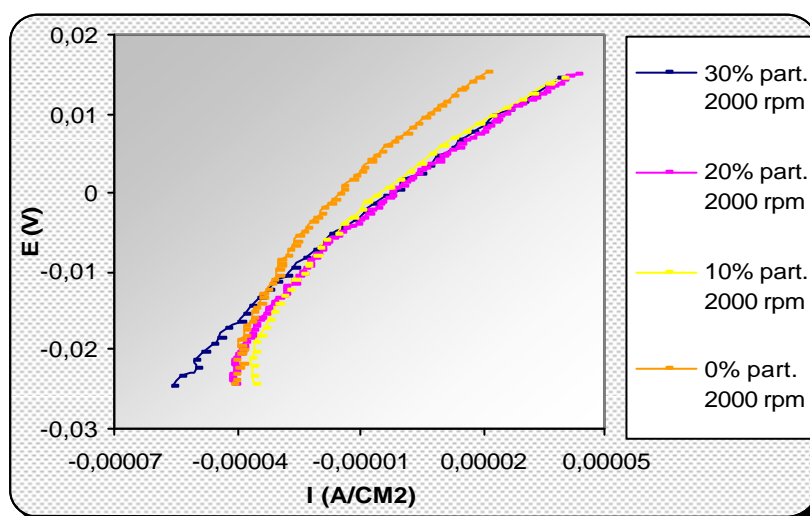
Tabla 11. Valores de R_p hallados por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica a 1000 rpm.

V ROTACION (rpm)	% Partículas	R_p (ohm* cm ²)
1000	0	937.2
1000	10	865.2
1000	20	552
1000	30	609.6

5.3 CURVAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL SISTEMA SALMUERA-N₂-(5%)CO₂ EN VOLUMEN CON DIFERENTES % DE PARTÍCULAS Y VELOCIDAD DE 2000 RPM

Las curvas de resistencia a la polarización (figura 14) a 2000 rpm no muestran una clara disminución de R_p para los % de partículas de 10, 20 y 30, situación que se aclara cuando se determinan los valores de las pendientes de estas curvas. La mayor pendiente se observa para 0% de partículas, obteniéndose un valor alto de R_p . Los valores de resistencia a la polarización (R_p) son reportados en la tabla 12.

Figura 14. Curva de resistencia a la polarización para el sistema salmuera-CO₂-N₂ a 2000 rpm con diferentes porcentajes de partículas

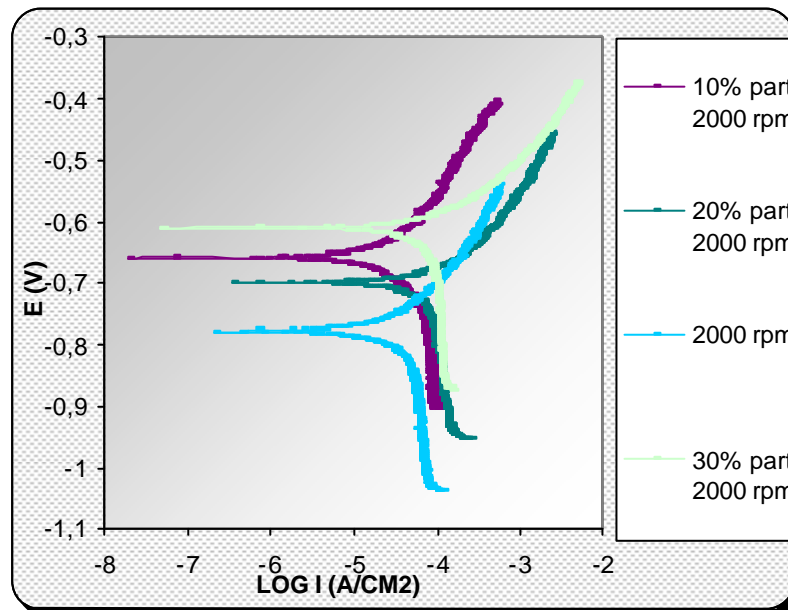


La técnica Tafel para velocidades de 2000 rpm (figura 15), presentan mayor variación en el potencial de corrosión y un desplazamiento hacia la derecha de las curvas a medida que se aumenta el porcentaje de partículas; lo cual

indica que para estas condiciones de flujo, las partículas son más erosivas cuando se encuentran en altos porcentajes.

En este caso la mayor densidad de corrosión se presenta cuando se adiciona 30% de partículas lo que origina un alto valor de velocidad de corrosión, correspondiendo con los resultados de la técnica de resistencia a la polarización (figura 14). Por el contrario la menor densidad de corriente de corrosión a la velocidad evaluada se obtiene sin adición de partículas, lo cual se refleja en el valor bajo de corrosión que ésta presenta con respecto a los valores para la adición de 10,20 y 30% de partículas a 2000 rpm.

Figura 15. Curva Tafel para el sistema salmuera- $\text{CO}_2\text{-N}_2$ a 2000 rpm con diferentes porcentajes de partículas



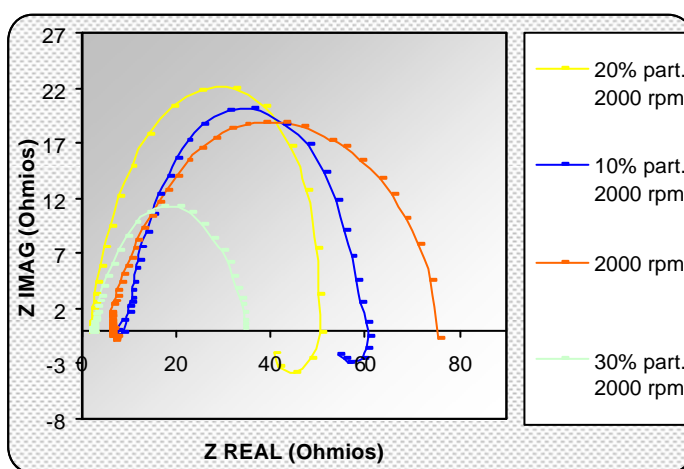
De las curvas se obtienen los valores de β_a para posteriormente determinar B (constante de Stern-Geary $B= \beta_a/2.3$) y las velocidades de corrosión utilizando la ecuación 15. (los valores se reportan en la tabla 12).

Tabla 12. Velocidades de corrosión obtenidas para el sistema CO₂ (5%) -N₂ por medio de resistencia a la polarización y pendientes de Tafel, para 2000 rpm con diferentes porcentajes de partículas.

V ROTACIÓN (rpm)	% Partículas	Rp (ohm* cm ²)	I CORR. (A/Cm ²)	V CORR. (mpy)
2000	0	790.6	3.68E-5	16,9
2000	10	577	4.96E-5	22,8
2000	20	501.1	6.54E-5	30,1
2000	30	436.3	7.67E-5	35,3

Los diagramas de Espectroscopía de impedancia electroquímica de Nyquist, (figura 16), muestran el efecto de los porcentajes de partículas para el sistema a condiciones desaireadas y a una velocidad de 2000 rpm. En ellos se observó que la mayor resistencia a la polarización fue para 0% de partículas, y la menor Rp se presenta cuando se adiciona al sistema 30% de partículas.

Figura 16. Diagrama de Nyquist para el sistema salmuera- N₂ -CO₂ a 2000 rpm a diferentes porcentajes de partículas



La forma del espectro de impedancia de la figura 16 es característico de un sistema donde el control puede ser por transferencia de carga o por difusión^[17], en éste caso el diagrama corresponde a un sistema controlado por difusión, lo cual fue confirmado mediante las curvas de Tafel, donde la densidad de corriente de corrosion se acerca a la corriente limite.

Los datos de Resistencia a la polarización obtenidos por espectroscopia de impedancia electroquímica se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Valores de Rp hallados por Espectroscopía de Impedancia Electroquímica a 2000 rpm.

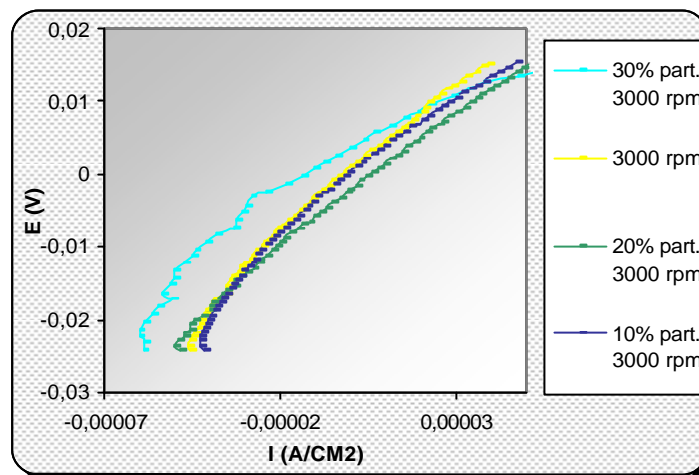
V ROTACION (rpm)	% Partículas	Rp (ohm* cm ²)
2000	0	840.24
2000	10	540
2000	20	469.2
2000	30	387.6

5.4 CURVAS ELECTROQUÍMICAS PARA EL SISTEMA SALMUERA-N₂-(5%)CO₂ EN VOLUMEN CON DIFERENTES % DE PARTÍCULAS Y VELOCIDAD DE 3000 RPM

Las curvas potenciodinámicas de Rp (figura 17) denotan que las pendientes (resistencia a la polarización) conservan similar inclinación. Sin embargo, cuando se determinan los valores de Rp se observa que éstos disminuyen con el aumento del porcentaje de arena; por lo tanto, cuando no hay partículas, la Rp es mayor y corresponde a 563 ohm*cm², en el caso contrario la mínima Rp se encuentra cuando se le adiciona al sistema 30%

de partículas. Los resultados de la técnica de resistencia a la polarización se muestran en la tabla 14.

Figura 17. Curva de resistencia a la polarización para el sistema salmuera- $\text{CO}_2\text{-N}_2$ a 3000 rpm con diferentes porcentajes de partículas



La figura 18 presenta las curvas de polarización de Tafel para diferentes porcentajes de partículas a 3000 rpm. Las curvas exhiben un aumento en la densidad de corriente y en el potencial de corrosión cuando se incrementa el porcentaje de sólidos, lo que significa que la velocidad de corrosión se incrementa respectivamente. Siendo así a 30% de partículas se observa mayor densidad de corriente que la observada cuando no hay partículas, los resultados de velocidad de corrosión se registran en la tabla 14. Por lo tanto bajo estas condiciones de flujo las partículas son más erosivas cuando se encuentran en altos porcentajes en la celda electroquímica.

La etapa controlante de corrosión es la misma que para las velocidades de 1000 y 2000 rpm variando el porcentaje de partículas.

Figura 18. Curva Tafel para el sistema salmuera-CO₂-N₂ a 3000 rpm con diferentes porcentajes de partículas

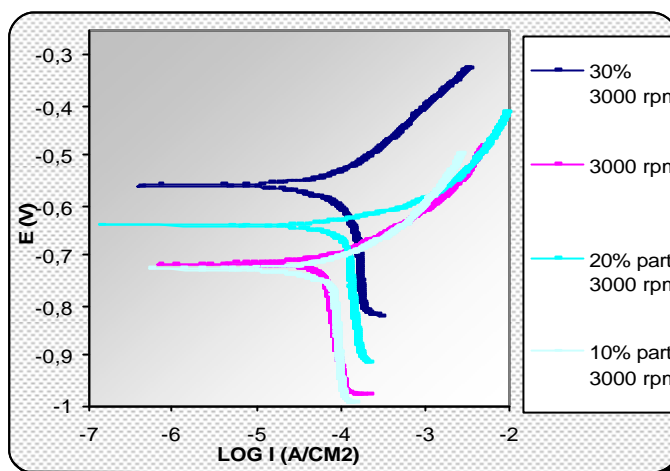


Tabla 14. Velocidades de corrosión obtenidas para el sistema CO₂ (5%) -N₂ por medio de resistencia a la polarización y pendientes de Tafel a 3000 rpm.

V ROTACIÓN (rpm)	% Partículas	Rp (ohm* cm ²)	I CORR. (A/Cm ²)	V CORR. (mpy)
3000	0	563	5.40E-5	24,9
3000	10	444,3	6.43E-5	29,5
3000	20	410,88	8.35E-5	38,4
3000	30	403,2	9.38E-5	43,1

El diagrama de Nyquist a 3000 rpm muestra como la variación de sólidos produce un cambio notable en la resistencia a la polarización, esto se puede apreciar en la figura 19; en donde las Rp de las curvas aumentan con la disminución de partículas. La mayor Rp se observa para el sistema sin partículas y la menor para el sistema con 30% de sólidos.

Al igual que en los demás sistemas se observa la presencia de lazos inductivos posiblemente debido a la absorción de especies intermedias involucradas en el mecanismo de disolución o por la topografía y defectos de la superficie del acero expuesto a las partículas.

Los datos de Resistencia a la polarización obtenidos por espectroscopia de impedancia electroquímica se muestran en la tabla 15.

Figura 19. Diagrama de Nyquist para el sistema salmuera- N_2 - CO_2 a 3000 rpm a diferentes porcentajes de partículas.

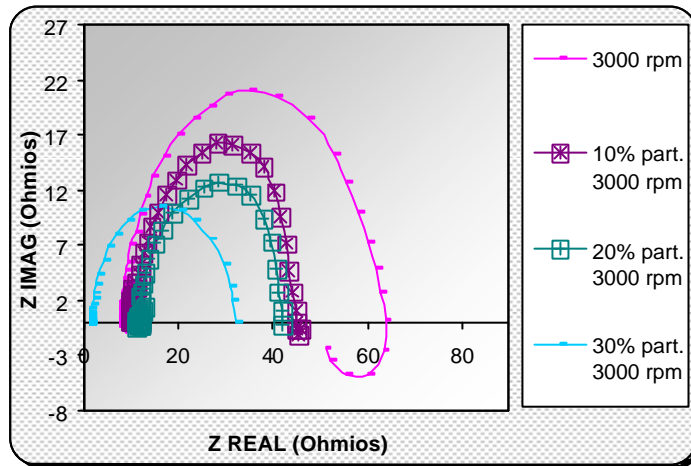


Tabla 15. Valores de R_p hallados por espectroscopia de Impedancia Electroquímica a 3000 rpm.

V ROTACIÓN (rpm)	% Partículas	R_p (ohm* cm^2)
3000	0	528
3000	10	420
3000	20	374,4
3000	30	369,6

Mediante la observación de los resultados, se puede decir que los valores de R_p por corriente continua (CD) y corriente alterna (CA), para las tres velocidades de flujo son comparables ya que se obtuvieron valores similares.

5.5 ASPECTOS GENERALES DE LA COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN

Cuando se observa las curvas de resistencia a la polarización a las velocidades de rotación bajo estudio se encuentra que la que presentó mayor R_p fue la evaluada a 0% de partículas y 1000 rpm, la cual proporciona la menor velocidad de corrosión, ver tabla 10. De igual manera se puede observar que los valores de R_p encontrados por resistencia a la polarización son similares o cercanos a los encontrados por la técnica de espectroscopias de impedancia electroquímica (tabla 10 y 11).

En el ensayo realizado a 3000 rpm con 30% de sólidos se obtuvo la mayor velocidad de corrosión, si se examina la R_p para estas condiciones de prueba, se confirma que tiene los menores valores tanto por espectroscopia de impedancia electroquímica como por resistencia a la polarización.

Al inspeccionar los blancos, se apreció que la velocidad de corrosión aumentó con el incremento de la velocidad del fluido, lo que se corrobora con resultados de estudios internacionales en sistemas similares. ^[18,19]

De igual manera que a 2000 y 3000 rpm donde la máxima velocidad de corrosión se alcanzó cuando se adicionó el 30% de partículas; se esperaba que el mayor porcentaje de partículas a 1000 rpm presentara la mayor velocidad de corrosión, sin embargo, ésta se obtuvo cuando se adicionó el 20%. Situación que podría darse porque a esta velocidad no todas las partículas impactan a la probeta. Ver anexo A.

Los valores de velocidad de corrosión de todos los ensayos (Tabla 10, 12 y 14), revelan un efecto significativo de las partículas, debido a que la varianza en los resultados también mostraron un claro aumento. Este hecho se confirmó con el análisis estadístico de los resultados. (Sección 5.6).

Si se detalla la forma de las curvas de Tafel, se comprobó que la reacción catódica es controlada por corriente límite (Etapa lenta), mientras que la reacción anódica es controlada por activación. Por lo tanto la etapa controlante de la reacción total es la transferencia de masa.

El cambio en el potencial de corrosión observado en las curvas Tafel a 1000, 2000 y 3000 rpm variando el porcentaje de sólidos, se atribuye a las perturbaciones que ocasiona la arena sobre la superficie metálica, es así como en términos generales con el aumento del porcentaje de arena y velocidad de rotación el potencial de corrosión se hace más positivo.

El anexo B muestra la tendencia de los diagramas de Nyquist cuando el porcentaje de arena permanece constante y se varía la velocidad de rotación para las tres velocidades de ensayo, estos resultados junto con el análisis de varianza (anexo C) confirmó la influencia de la velocidad en el sistema evaluado.

Por otro lado en el anexo D se reportan dos diagramas de Bode, uno cuando se presentan los lazos inductivos a bajas frecuencias y otro en ausencia de ellos; haciendo un barrido desde las altas frecuencias hacia las bajas frecuencias, en la curva de Log de Modulo de Z vs Log de la frecuencia, se observa que la curva presenta un comportamiento atípico, ya que la resistencia a la solución disminuye, luego la conductividad aumenta. Este comportamiento se debe a la acidificación del sistema posiblemente por la presencia de los iones HCO_3^- .

La descripción del comportamiento en la doble capa electroquímica, esta representado por la zona que muestra una mayor pendiente, donde $m < -1$, mostrando un comportamiento capacitivo. La inductancia presentada en los diagramas de Nyquist se refleja en el Bode por un descenso dado a bajas frecuencias. La formación de L conlleva al aumento de V_{corr} por medio de la transferencia de masa que arrastra metal hacia la solución.

El comportamiento de la curva de ángulo de fase vs el Log de la frecuencia muestra un comportamiento típico de disolución. Inicialmente muestra ángulos de fase pequeños, pero al ingresar en la doble capa los ángulos de fase se hacen mayores, hasta que de nuevo disminuye porque se alcanza la superficie metálica.

Los valores de betas para el cálculo de la constante de Stern Geary son reportados en el Anexo E.

5.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Después de recopilar los datos de las pruebas realizadas para los diferentes sistemas estudiados con base en el diseño experimental, se realizó el análisis estadístico, en donde se pudo comprobar la veracidad de los resultados, la interacción entre las variables y los efectos e influencia sobre la velocidad de corrosión.

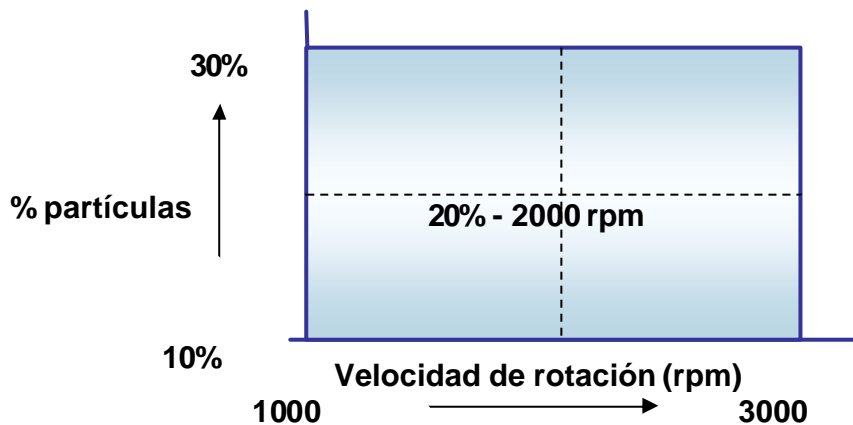
Por medio de este análisis también se puede establecer una relación matemática que permite correlacionar las variables y así poder predecir el comportamiento de la velocidad de corrosión para valores no establecidos experimentalmente en los sistemas estudiados, con ayuda de herramientas computacionales. Para realizar este estudio se cuenta con la ayuda del ANOVA (análisis de varianza), curvas de PARETO, Gráfico de Daniel, y Gráfica de efectos principales.

El diseño experimental garantiza el comportamiento de todos los puntos que se encuentren en el área definida por los valores máximos y mínimos de las variables, (véase tabla16 y figura 20).

Tabla 16. Rango de valores de las variables

VARIABLES	VR min.	VR max
Vel rotación (rpm)	1000	3000
% partículas	10	30

Figura 20. Área de trabajo según los valores de la tabla 16.



5.6.1 Correlación matemática. La siguiente es la ecuación ajustada conocida como polinomio respuesta que relaciona la variable respuesta (Velocidad de corrosión) como una función de los factores y sus interacciones. Sin embargo, el polinomio respuesta debe considerarse como una aproximación solamente dentro de la región cubierta por los niveles de las variables estudiadas en el experimento y no es extrapolable. El procedimiento y cálculo del polinomio se puede observar en el anexo F.

El polinomio respuesta para el sistema Salmuera-N₂-CO₂(5%) bajo la influencia de partículas es el siguiente:

$$\text{Vel corr} = 1,7 + 0,458333*\% \text{ partícu las} + 0,00885*V \text{ rotac} \quad (22)$$

Donde:

Vcorr= Velocidad de corrosión (mpy)

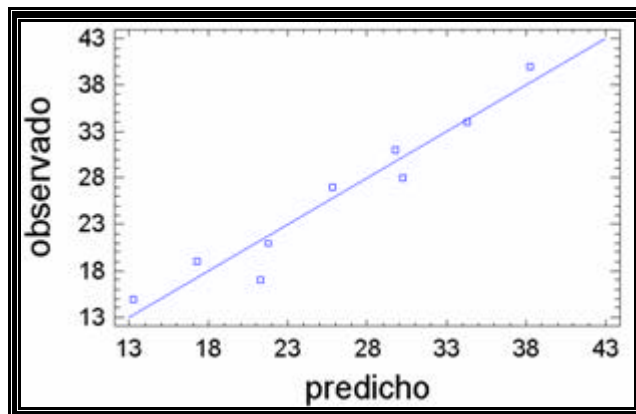
Vrot= Velocidad de rotación (rpm)

% part= porcentaje de partículas

Los datos de la regresión lineal múltiple fueron analizados teniendo en cuenta el factor de correlación (R²), el cual indica el porcentaje de ajuste del modelo, y el valor de probabilidad (P) del análisis de varianza (ANOVA), ver Anexo C.

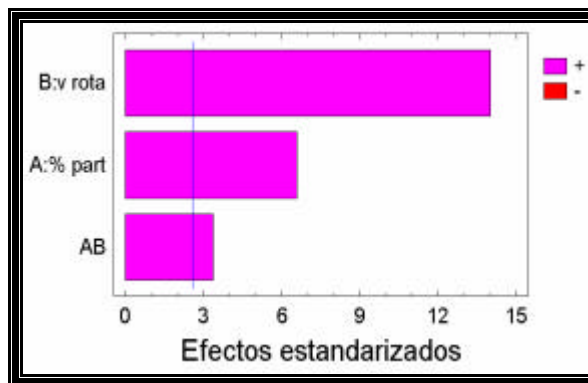
En la figura 21 se observa la buena reproducibilidad de los datos obtenidos, ya que se advierte un comportamiento lineal en los dos tipos de resultados (datos experimentales—datos del polinomio respuesta).

Figura 21. Gráfica comparativa de resultados sistema Salmuera-N₂-CO₂(5%) con partículas.



5.6.2 Análisis de Pareto. En la figura 22 se muestra el diagrama de Pareto, y como puede apreciarse, proporciona un orden de los efectos en cuanto a su magnitud. Sin embargo, este diagrama no ofrece la información acerca de la importancia estadística de cada uno de los efectos involucrados. Pero los efectos que finalmente resulten significativos conservarán el orden marcado. En este caso, se podría decir que los factores significativos son la velocidad de rotación (B), el porcentaje de partículas (A) y la interacción entre las variables (AB); esta última en menor proporción que las anteriores, sin embargo el efecto de AB, contribuye en el comportamiento a la corrosión del acero cuando se trabaja a diferentes velocidades de rotación (B), variando el porcentaje de partículas (A).

Figura 22. Interacciones entre las variables (método de Pareto) sistema Salmuera-N₂-CO₂(5%) con partículas.

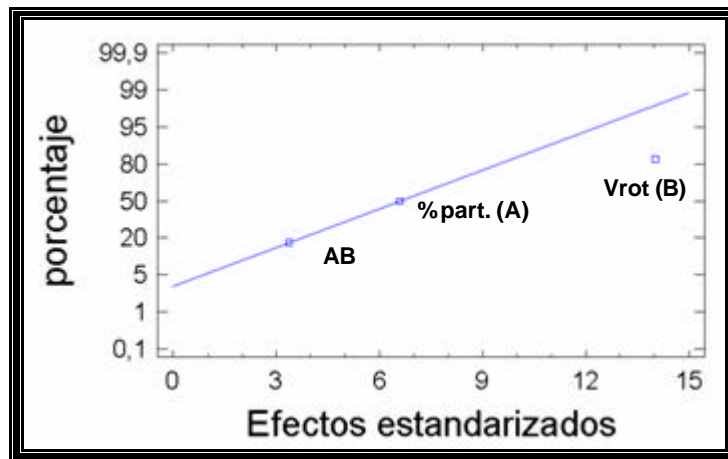


En el anexo G se muestra el resumen del análisis de los efectos estimados e interacciones para el diagrama de Pareto.

Como se mencionó anteriormente, el diagrama de Pareto solo presenta un orden en su magnitud de los efectos de los diferentes factores en estudio. En el diagrama de Daniel (Gráfico de Probabilidad figura 23), se confirma que

la velocidad de rotación (B) es la que tiene mayor efecto en la variable respuesta de este sistema, mientras que los otros dos factores no muestran claramente su influencia; por lo cual se debe revisar la tabla ANOVA (análisis de varianza) para confirmar resultados (Anexo C). La influencia del factor B, es confirmada por la no linealidad con los demás factores, como se presenta en el gráfico de probabilidad normal para velocidad de corrosión (figura 23).

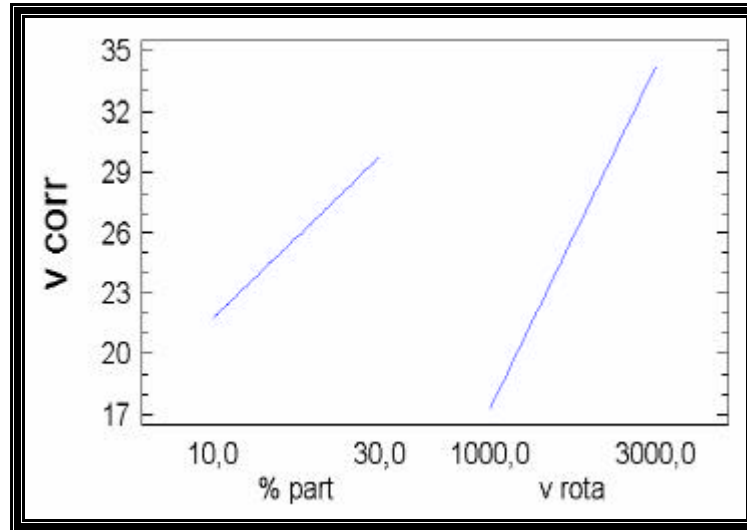
Figura 23. Gráfico de probabilidad normal para la variable respuesta variando el porcentaje de partículas a diferentes velocidades de rotación.



El grado de significancia de estos efectos se comprobó con un análisis de varianza. En la tabla ANOVA, los tres factores tienen los p-valores inferiores a 0.05; lo cual indica que estas variables tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta para un 95% de confianza.

Para determinar el mejor tratamiento de los factores sobre la variable V_{corr} se construyó los diagramas de efectos principales y de efectos de interacción.

Figura 24. Gráfico de efectos principales para la velocidad de corrosión.

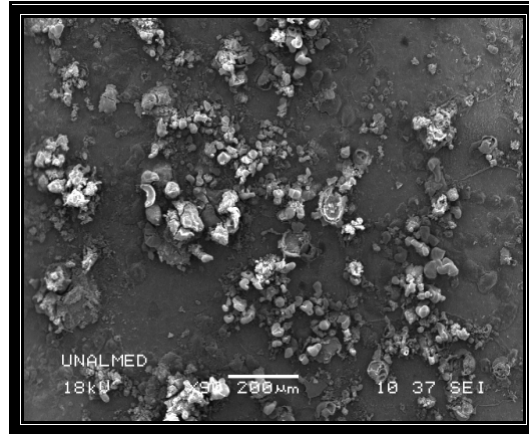


En la gráfica anterior de efectos principales para la variable respuesta V_{corr} , se observa que la velocidad es afectada por la velocidad de rotación, observándose también un grado de significancia con el porcentaje de partículas.

5.6.3 Morfología de la superficie corroída del Acero 1020 y de la arena.

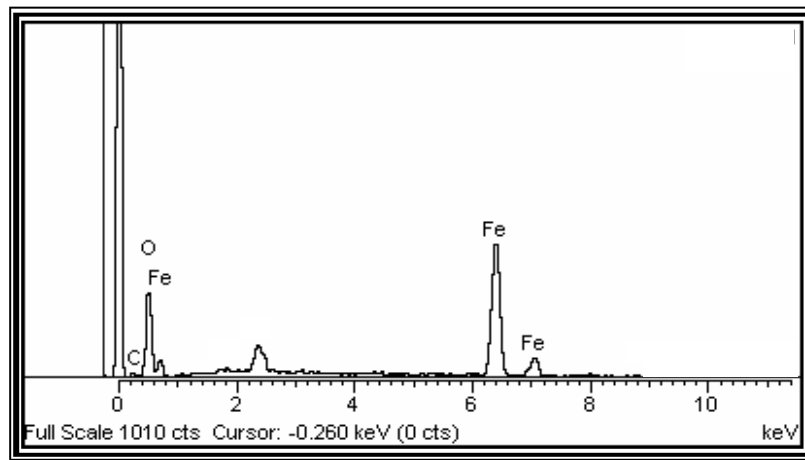
Análisis de la superficie del acero sometida a 1000 rpm de velocidad de rotación y 30% de partículas. La morfología de la superficie corroída en la fotografía N° 9 muestra los productos de corrosión, en este caso la formación de escamas de siderita ($FeCO_3$), distribuida en forma discontinua e irregular, también se observa un adelgazamiento de la capa generada por el impacto de las partículas, dejando la superficie parcialmente expuesta a la acción del ambiente corrosivo.

Fotografía 9. Micrografía del Acero AISI-SAE 1020 en un sistema Salmuera /CO₂/arena, a 1000 rpm y 30% de partículas (90X).



Fuente: Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Figura 25. Espectro de la superficie corroída Acero AISI-SAE 1020 en un sistema Salmuera /CO₂/arena, a 1000 rpm y 30% de partículas.



Fuente: Microscopía Electrónica de Barrido

Análisis de la superficie del acero sometida a 3000 rpm de velocidad de rotación y 30% de partículas. La imagen de SEM (fotografía 10) a 90x revela la presencia de escamas de FeCO₃, y regiones del acero donde se produce un mayor adelgazamiento de la capa, por consiguiente el transporte

de masa a través de ella es más rápida, originando el aumento de la velocidad de corrosión. Se puede decir que el sistema es corrosión asistida por erosión.

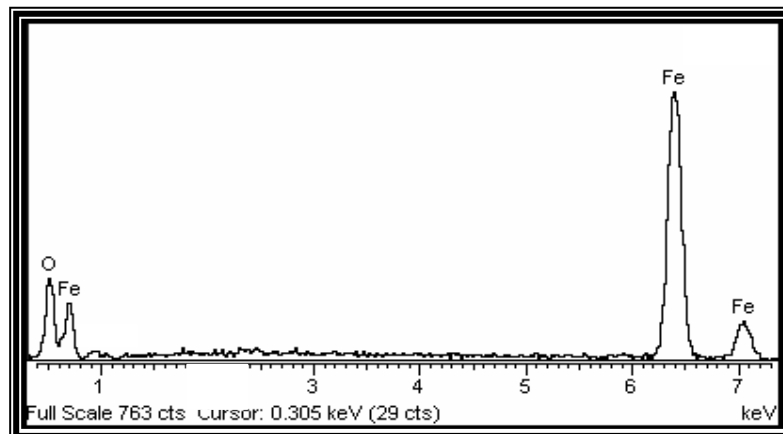
Fotografía 10. Micrografía del Acero AISI-SAE 1020 en un sistema Salmuera /CO₂/arena, a 3000 rpm y 30% de partículas (90x).



Fuente: Microscopía Electrónica de Barrido

El espectro de la figura N°26 muestra la semi-cuantificación de los elementos presentes en la interfaz de la fotografía 10.

Figura 26. Espectro de la superficie corroída Acero AISI-SAE 1020 en un sistema Salmuera /CO₂/arena, a 3000 rpm y 30% de partículas.

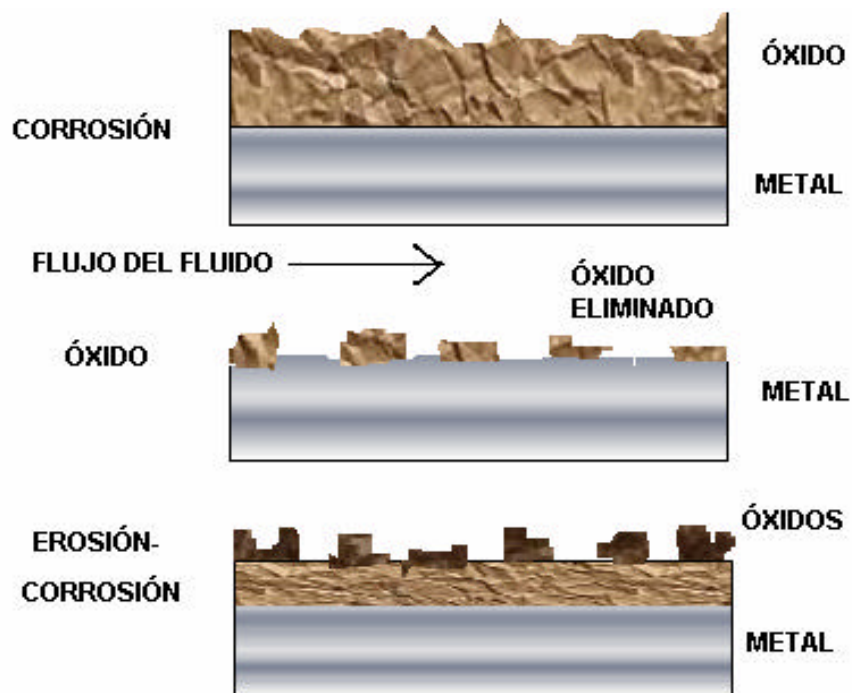


Fuente: Microscopía Electrónica de Barrido

En ninguno de las imágenes del SEM se observó sílice embebida en la superficie del óxido o del acero.

Un diagrama del tipo de corrosión asistida por erosión se esquematiza a continuación:

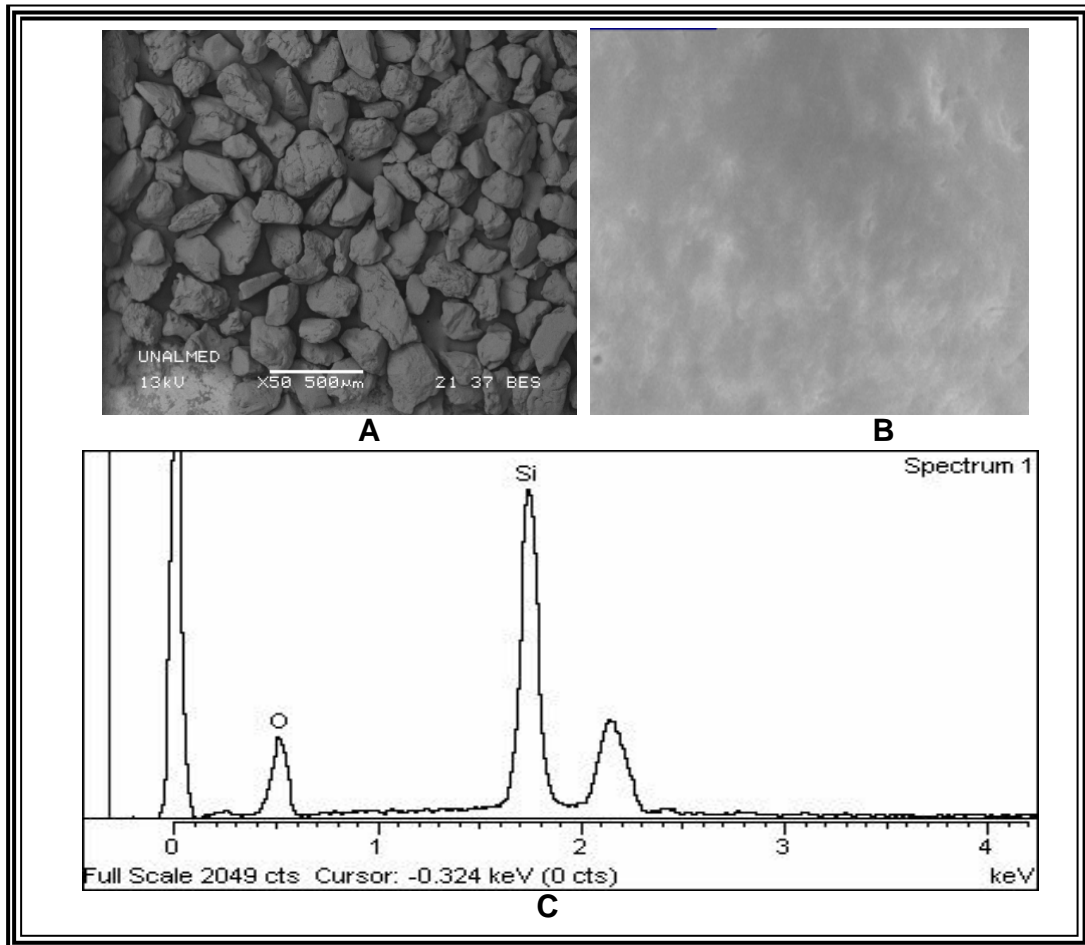
Figura 27. Corrosión asistida por erosión.



Morfología de la superficie de la arena. Se analizaron las partículas sólidas (arena sílice de alta pureza), antes de los ensayos mediante la técnica EDS (fotografía 11), donde se puede apreciar a 50X de aumentos, que inicialmente las partículas de sílice presentaban forma angular evidente y un tamaño uniforme entre ellas, también se puede observar en el análisis de la superficie de una de las partículas que el espectro solo contiene Si y O, como habría de esperarse.

Fotografía 11. Fotografía y Análisis Superficial de la arena antes de los ensayos.

(A) arena sílice vista a 50X (B) Capa superficial de una partícula (C) Espectro obtenido para la capa superficial



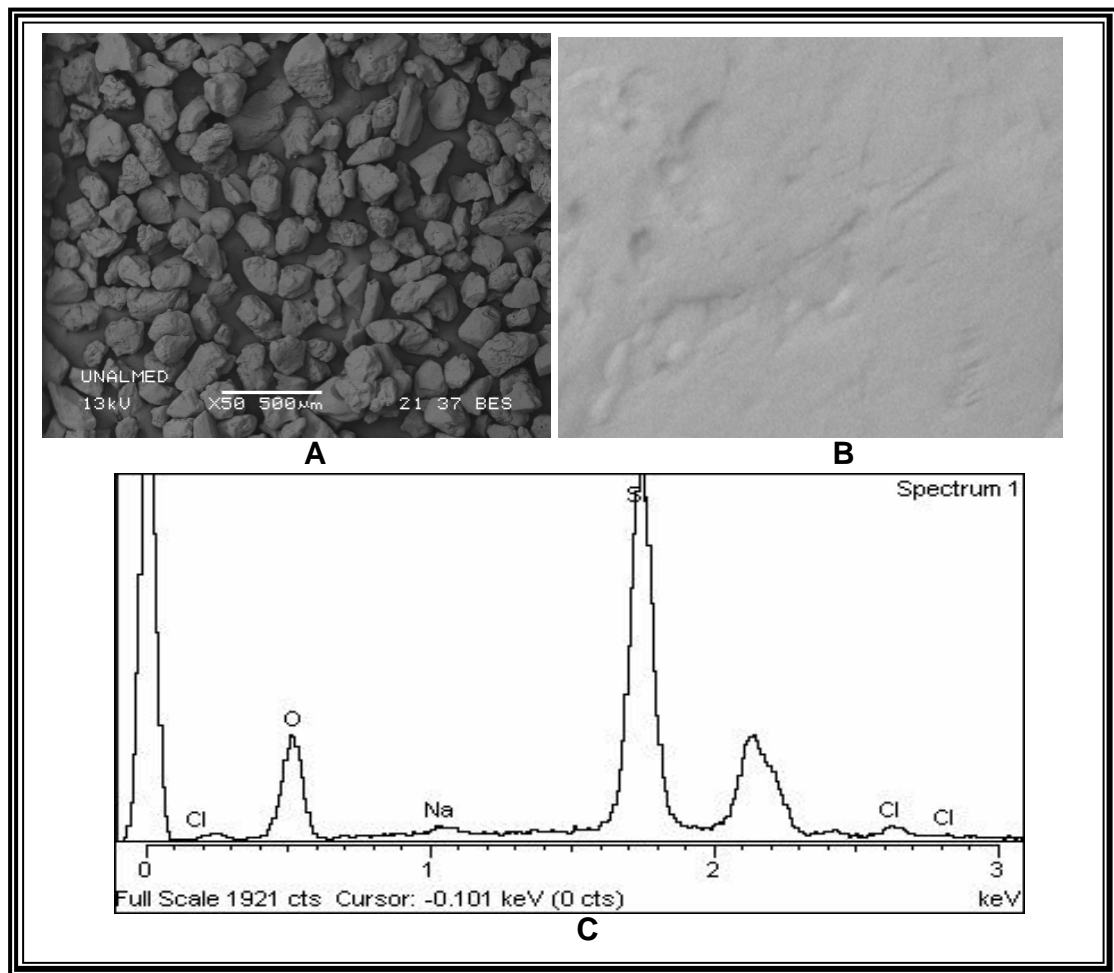
Fuente: Barrido de Emisión Dispersible

En la fotografía 12 se puede apreciar a los mismos aumentos de la fotografía 11, una conveniente reducción de tamaño de partícula, confirmando que la arena fue degradada parcialmente en la duración del experimento, puede

observarse la agudeza de algunas partículas, así como su superficie áspera. Por otro lado, la imagen muestra también sólidos de forma redondeada.

Fotografía 12 Fotografía y Análisis superficial de la arena después de los ensayos.

- (A) arena sílice vista a 50X
- (B) Capa superficial de una partícula
- (C) Espectro obtenido para la capa superficial



Fuente: Barrido de Emisión Dispersible

6. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas como resultado del trabajo realizado a lo largo del desarrollo de la investigación.

- En el sistema de estudio salmuera- N_2 - CO_2 (5%) con adición de diferentes porcentajes de arena, la velocidad de corrosión del acero AISI SAE 1020, está influenciada por la velocidad de rotación del fluido, por el porcentaje de partículas y su interacción. La velocidad del fluido y el choque de las partículas contra la superficie del acero remueven la capa de siderita formada a estas condiciones, dejando la superficie del acero expuesta al ambiente corrosivo, de modo que la velocidad de corrosión aumenta con respecto al sistema sin partículas.
- Los valores de velocidad de corrosión obtenidos para los blancos confirma el efecto de la velocidad de rotación sobre la velocidad de corrosión, comportamiento que persiste cuando se trabaja con los diferentes porcentajes de partículas y se aumenta la velocidad del fluido. Se presenta una mayor velocidad de corrosión en el sistema con 30% de partículas a 3000 rpm, mientras a 1000 rpm con 0% de sólidos se obtuvo la velocidad de corrosión más baja.
- Se afirma según el análisis estadístico de los resultados (Pareto, Gráfico de efectos principales y ANOVA) que los factores con efecto significativo para este sistema, son la velocidad de rotación, el porcentaje de partículas y la interacción de las variables, este último en menor magnitud.

- Los productos de corrosión formados en este sistema bajo las condiciones de ensayo fue siderita irregular y no protectora, por ello el impacto repetido de las partículas originan el adelgazamiento de la capa, dejando la superficie del metal parcialmente expuesta al ambiente corrosivo y aumentando la corrosión significativamente.
- Se determinó que la etapa controlante del sistema es la transferencia de masa, pues las curvas de polarización catódica en los diagramas de Tafel, presentan un acercamiento de la corriente de corrosión a la corriente límite, además, para el sistema estudiado los diagramas de Nyquist representan espectros de impedancia cuando la reacción catódica esta controlado por difusión.
- La forma de degradación del acero en este sistema fue corrosión asistida por erosión, cuya ecuación empírica fue:

$$V_{\text{corr}} = 1,7778 + 0,4583 * \% \text{ part} + 0,00885 * v \text{ rota}$$

7. RECOMENDACIONES

Los efectos del arrastre de arena necesita ser investigado bajo condiciones más severas de erosividad y a más altas temperaturas para examinar la posibilidad que la presencia del arrastre de arena pueda conducir a la corrosión localizada para las mismas condiciones que, sin la arena, formarían películas altamente protectoras.

Realizar estudios similares de otros materiales también usados en líneas de producción de petróleo, con el fin de establecer bases para poder seleccionar así lo más adecuados.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. PEREZ y NÚNCIRA Saúl. "Efecto de la microestructura sobre la corrosión de aceros en soluciones acuosas conteniendo CO₂", Trabajo de Grado Ingeniería Metalúrgica .Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Noviembre 2000.

[2] SCHMITT, Guenter. "Fundamental Aspects of CO₂ Metal Loss Corrosion – Part II: Influence Of Different Parameters On CO₂ Corrosion Mechanisms". Corrosion Nacexpo 2006 paper 06112. (2006)

[3] WAARD, C. y MILLIAMS, D.E. "Prediction of carbonic acid corrosion in natural gas pipelines. Corrosion Volume 31. First int. Conferences "internal and external protection of pipes. University of Durham, Held, September, 1975.

[4] SCHMITT, G. y ROTHMANN, B. "Studies on the corrosion mechanism of unalloyed steel in oxygen – free carbon dioxide solutions: part I. kinetics of the liberation of Hydrogen. Part II. Kinetics of iron dissolution", CO₂ Corrosion in oil and gas production, pag. 54, 163, NACE, Houston, 1984.

[5] IKEDA A., UEDA M., MUKAY S., "CO₂ Behavior of carbon and Cr steels", Advanced in CO₂ Corrosion Vol 1, NACE, 1984, p 39

[6] GARCIA R. Mónica, ARCHILA Edwin A. "Evaluación De La Corrosión Del Acero AISI-SAE 1020 Por Medio De Técnicas Electroquímicas En Los Sistemas Hidrodinámicos: Salmuera -CO₂-N₂ Y Salmuera-H₂S-N₂", Trabajo de

Grado Ingeniería Metalúrgica .Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga Noviembre 2003.

[7] RAMAKRISHNA, Malka. SRDJAN Nestic, And Daniel A. Gulino."Erosion Corrosion And Synergistic Effects In Disturbed Liquid-Particle Flow". Usa. 2006.

[8] J. R. Shadley, S. A. Shirazi, E. Dayalan, E. F. Rybicki, "Prediction of Erosion – Corrosion Penetration Rate in a CO₂ Environment with Sand", CORROSION 98 paper No. 59.

[9] BRENTON S. McLaury, Siamack A. Shirazi, "Is API RP 14E Reliable for Predicting an Erosional Production Velocity when Sand Production is anticipated", ETCE00-PR054, feb 2000, New Orleans, Louisiana.

[10] S. Nestic, J. Bienkowski, K. Bremhorst, and K.-S. Yang. "Testing for Erosion-Corrosion Under Disturbed Flow Conditions Using a Rotating Cylinder with a Stepped Surface". CORROSION VOL 56 paper N° 10. June 2000.

[11] Norma API RP 571. "Damage Mechanisms Affecting fixed Equipment in the Refining Industry". American Petroleum Institute. First Edition, 2003.

[12] P. Andrews, T.F. Illson, S.J. Mattheus. "Erosion–corrosion studies on 13 Cr steel in gas well environments by liquid jet impingement. Elsevier Science S.A. 1999.

[13] SUÁREZ SANTOYO, María Teresa. " Influencia de Las Variables Hidrodinámicas Y de Transferencia de Masa, En La Corrosión Del Sistema

Oxígeno-Agua-Cloruro de Sodio Y Acero Al Carbono". Trabajo de Grado Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Noviembre 2004.

[14] C. VÁSQUEZ, L.O.AGUIRRE, J. VILLARREAL, "Estudio sobre la Corrosión en líneas de producción de pozos de petróleo". Bucaramanga 1996.

[15] Norma ASTM, G 102. Calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements. 1999

[16] P. Ponthioux, F. Wenger. "Electrochemical techniques for studying tribocorrosion processes". Elsevier Science S.A. Volume 256. 2003.

[17] COTTIS Robert, TURGOOSE Stephen. "Electrochemical Impedance and Noise". NACE international. Series Editor. 1999.

[18] T. Hara, H. Asahi, Y. Suehiro, and H. Kaneta. Effect of Flow Velocity on Carbon Dioxide Corrosion Behavior in Oil and Gas Environments. Corrosion Engineering Section, NACE Internacional 2000.

[19] Efecto de las condiciones hidrodinámicas del fluido en la predicción de velocidades de corrosión. I congreso nace región latinoamericana memorias 1994) intevep s.a.

BIBLIOGRAFÍA

ANDERKO, A. "Simulation of FeCO_3/FeS scale formation using thermodynamic and electrochemical models". Paper No 102, Corrosion international, 2000.

ARANGO B. y SUAREZ ORTIZ Carlos. "Comportamiento a la Corrosión en aceros API N80 y AISI SAE 1020 en soluciones de NaHCO_3 , CO y Cl". Trabajo de Grado Ingeniería Metalúrgica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Noviembre 1997

CARROLL, J. J., SLUPSKY, J. D. and MATHER, A. E., "The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure", J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 20, No. 6, p. 1201 (1991).

CRAIG, B. Practical Oil Field Metallurgy. PennWell Books, Tulsa, Oklahoma.

CROVETTO, R. "Evaluation of Solubility Data of the System $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ from 273 K to the Critical Point of Water", J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 20, No. 3, p.575 (1991).

DENPO K. and OGAWA H.. "Fluid Flow Effects on CO_2 Corrosion Resistance of Oil Well Materials". NACE Internacional 1993.

FONSECA J.. "Desarrollo de una técnica experimental para la evaluación hidrodinámica de inhibidores de corrosión en el acero API 5LB en presencia de dispersiones aceite/agua saturadas con CO_2 ". Tesis Magister Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1999.

FONTANA M. G. Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1978

FORERO BALLESTEROS, Adriana."Evaluación Hidrodinámica Del comportamiento De Inhibidores Genéricos Para Sistemas Multifásicos Salmuera-CO₂/H₂S-Hidrocarburo Mediante Aplicación De Técnicas Electroquímicas".Trabajo de Investigación. 2004.

GONZALEZ FERNANDEZ J.A. "Control de la Corrosión, Estudio y medida por técnicas Electroquímicas"

PYE Nicholas. "Sand Transport in Multiphase Slugging Flow Using Liquids of Varying Viscosity", Part II Research Project 1996-1997, Department of Chemical Engineering University of Cambridge

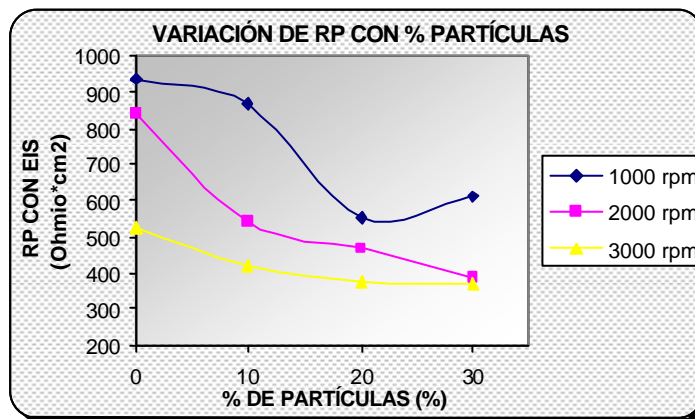
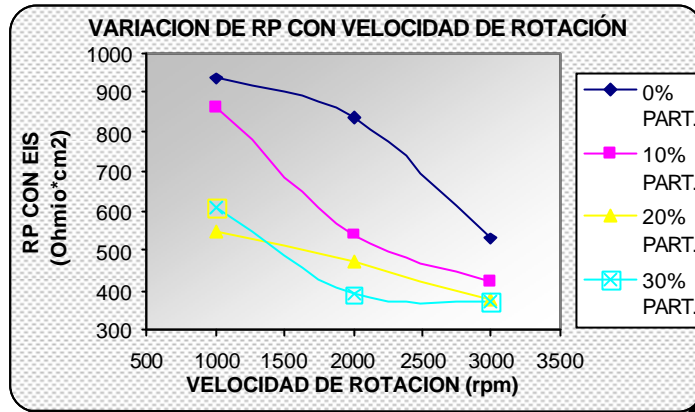
ZHOU S., STACK M.M., and. NEWMAN R.C ".Characterization of Synergistic Effects Between Erosion and Corrosion in an Aqueous Environment Using Electrochemical Techniques. 1996

Volume 13 Handbook. Corrosion. ASM. The materials information society.1998.

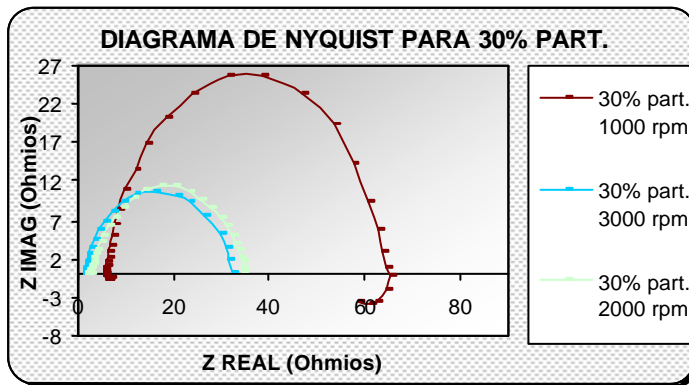
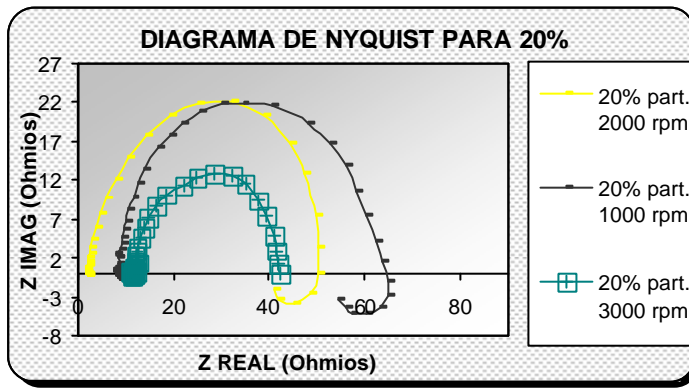
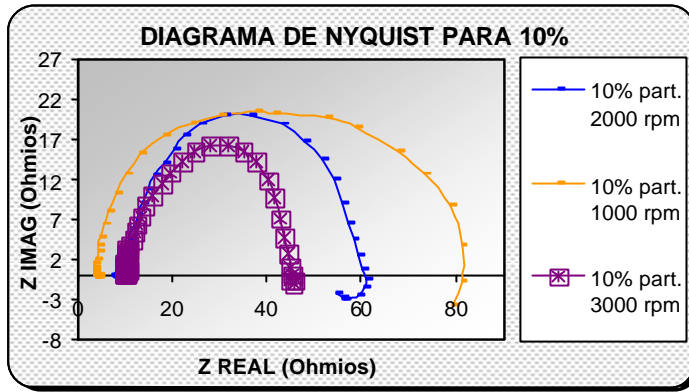


ANEXOS

Anexo A. GRÁFICOS DE LA VARIACIÓN DEL RP CON LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN Y CON EL PORCENTAJE DE PARTÍCULAS.



Anexo B. DIAGRAMA DE NYQUIST A PORCENTAJES DE PARTÍCULAS CONSTANTES, VARIANDO LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN DEL ECR.



Anexo C. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL SISTEMA SALMUERA-N₂-CO₂(5%)-ARENA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
A:% part	96,0	1	96,0	43,42	0,0012
B:v rota	433,5	1	433,5	196,06	0,0000
AB	25,0	1	25,0	11,31	0,0201
Error Total	11,0556	5	2,21111		
Total (corr.)	565,556	8			

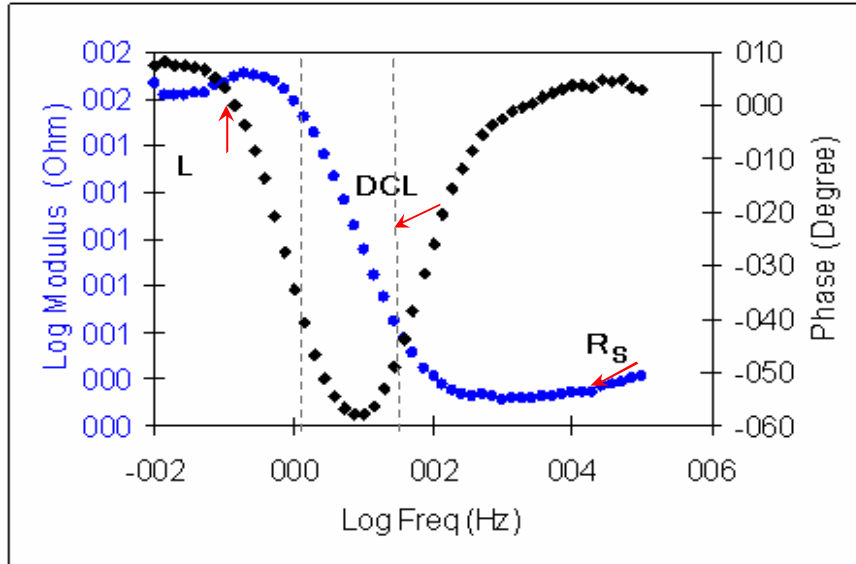
R-cuadrado = 98,0452 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96,8723 por ciento
 Error Estándar de Est. = 1,48698
 Error absoluto de la media = 0,975309
 Estadístico Durbin-Watson = 2,26131 (P=0,1669)
 Autocorrelación residual Lag 1 = -0,185371

El StatAdvisor

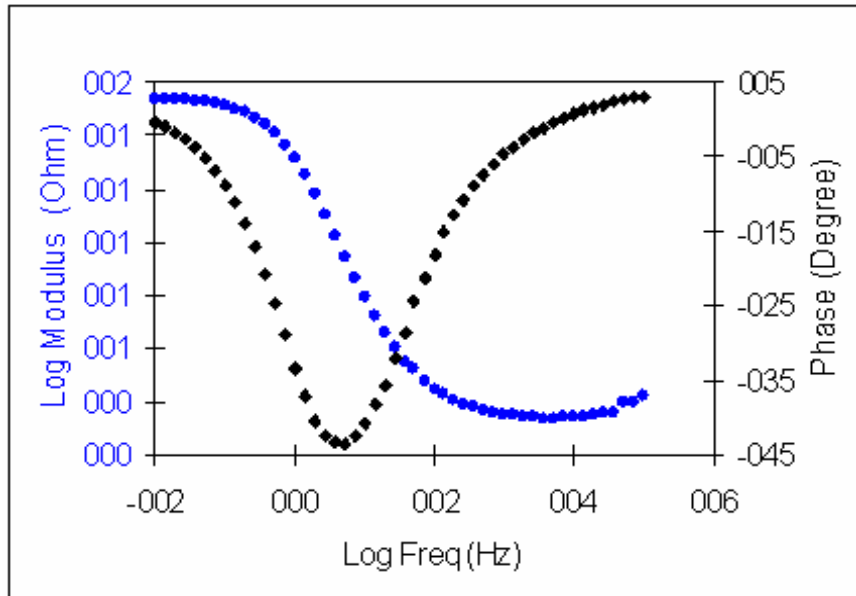
La tabla de ANOVA divide la variabilidad en v corr en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Después pruebe la significación estadística de cada efecto comparando la media al cuadrado contra una estimación del error experimental. En este caso, 3 de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0% de nivel de confianza. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 98,0452% de la variabilidad en v corr. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 96,8723%. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 1,48698. El error absoluto de la media (MAE) de 0,975309 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el pvalor es superior a 0.05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos.

Anexo D. DIAGRAMAS DE BODE

(A) En presencia de lazos inductivos.



(B) Sin la formación de inductancia.



**Anexo E . TABLA DE VALORES DE BETAS PARA EL CÁLCULO DE LA
CONSTANTE DE STERN GEARY**

V ROTACION (rpm)	% Partículas	β_a (V/D)	β_c (V/D)	B (V)
3000	20	0,0789	0,6894	0,0343
3000	30	0,087	1,1374	0,0378
1000	20	0,06307	0,7925	0,0274
2000	0	0,067	1,4884	0,0291
1000	10	0,078	0,4711	0,0339
1000	0	0,0368	0,4306	0,016
2000	20	0,0754	0,7038	0,0328
2000	30	0,077	0,6082	0,0335
3000	10	0,0657	1,67	0,0286
3000	0	0,07	0,5898	0,0304
1000	30	0,0581	0,7291	0,0253
2000	10	0,0659	0,7699	0,0286

Anexo F. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE PARA LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

Variable dependiente: v corr

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	0,777778	2,94619	0,263994	0,8006
% part	0,4	0,100077	3,99692	0,0071
v rota	0,0085	0,00100077	8,49345	0,0001

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	529,5	2	264,75	44,06	0,0003
Residuo	36,0556	6	6,00926		
Total (Corr.)	565,556	8			

R-cuadrado = 93,6248 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91,4997 porcentaje

Error estándar de est. = 2,45138

Error absoluto medio = 1,69136

Estadístico de Durbin-Watson = 2,01079 (P=0,3523)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,0876562

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre v corr y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$V \text{ corr} = 1,7 + 0,4583 * \% \text{ part} + 0,00885 * v \text{ rota}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

Anexo G. RESUMEN DEL ANÁLISIS DE LOS EFECTOS ESTIMADOS E INTERACCIONES

Nombre de fichero:
Efectos estimados para v corr

promedio = 25,7778 +/- 0,49566
A:% part = 8,0 +/- 1,21411
B:v rota = 17,0 +/- 1,21411
AB = 5,0 +/- 1,48698

Los errores estándar están basados en un error total con 5 g.l.

El StatAdvisor

Esta tabla muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones. También se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo. Trazar las estimaciones en orden decreciente de importancia, seleccionar Gráficos de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significación estadística de los efectos, seleccione la Tabla de ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Después puede eliminar los efectos insignificantes pulsando el botón derecho del ratón, seleccionando Opciones del Análisis, y pulsando el botón Excluir.