



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS

DEPARTAMENTO DE POSGRADO

**ESTUDIO ELECTROQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE
LOS ACEROS 1018, 17-7PH, 304, 410 Y 800 EN AGUA
RESIDUAL SINTÉTICA SIN INÓCULO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIA DE MATERIALES

PRESENTA

M.C. RAÚL SANDOVAL JABALERA

**EGRESADO DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIA DE MATERIALES
CON EL ACUERDO DE RECONOCIMIENTO DE VALIDEZ OFICIAL DE ESTUDIOS
964031**

CHIHUAHUA, CHIH.

DICIEMBRE 2005

RAÚL SANDOVAL JABALERA

TESIS DE DOCTORADO

**ESTUDIO ELECTROQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE
LOS ACEROS 1018, 17-7PH, 304, 410 Y 800 EN AGUA
RESIDUAL SINTÉTICA SIN INÓCULO**

DIRECTORES

**DR. ALBERTO MARTÍNEZ VILLAFAÑE
DRA. GUADALUPE VIRGINIA NEVÁREZ MOORILLÓN
DR. JOSÉ GUADALUPE CHACÓN NAVA**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS

DICIEMBRE 2005

A mi **FAMILIA**, de la cual recibí todo el Amor y Apoyo incondicional que necesité durante mi labor como estudiante.

A todos mis seres queridos (†) y que **SÉ** estarían orgullosos.

A **Virginia H. Collins Martínez** de quien aprendí que la **VIDA** está hecha por buenos y malos momentos.

Agradecimientos

Deseo hacer extensivo mi Agradecimiento a:

Los Doctores. Virginia H. Collins Martínez y Ernesto Arias del Campo, por su Apoyo, Consejo y Asistencia durante el desarrollo de esta investigación.

Los M.C. Adán Borunda Terrazas y Víctor Orozco Carmona, por su Asistencia en el laboratorio de corrosión.

Los Ingenieros Pedro Castillo Castillo y Roal Torres Sánchez, por su Ayuda en el laboratorio de metalografía; Gregorio Vázquez Olvera por su Apoyo en el laboratorio de electrónica y Daniel Lardizábal Gutiérrez por su Asistencia en el laboratorio de análisis térmicos.

Los Doctores Citlalli Gaona Tiburcio, Erasmo Orrantia Borunda, Facundo Mauricio Almeraya Calderón, Miguel Ángel Neri Flores y Rubén Márquez Meléndez, como parte de mi Comité de Sinodales.

Doctora Hilda Esparza Ponce, por su Ayuda en el laboratorio de microscopía electrónica de barrido.

Mis Directores de Tesis, los Doctores Alberto Martínez Villafañe, Guadalupe Virginia Nevárez Moorillón, y José G. Chacón Nava, por su Dedicación en la presente investigación.

Elvira Tavárez Diego y María de los Ángeles Mendoza Ortega.

Licenciados Federico Ricardo Stockton Rejón y Jair Marcelo Lugo Cuevas por su Amistad y Apoyo en mi estancia en el Centro de Investigación.

Sin olvidar a Carmen Becerra Bencomo, Claudia López Domínguez y Luis Licón Padilla como parte de la restauración de Mí equipo de cómputo.

Al CoNaCyT, CIMAV y UACH. Y a todos aquellos que de alguna forma me brindaron su apoyo y amistad.

**A TODOS USTEDES,
MUCHAS GRACIAS**

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. Introducción	3
1.1 Termodinámica y cinética de la corrosión acuosa	5
1.1.1 Termodinámica de la corrosión acuosa	5
1.1.2 Cinética de la corrosión acuosa	9
1.2 Tipos de corrosión	13
1.2.1 Corrosión uniforme	13
1.2.2 Corrosión por picadura	14
1.2.3 Corrosión por hendidura	15
1.2.4 Corrosión galvánica	15
1.2.5 Erosión-corrosión	16
1.2.6 Corrosión asistida por esfuerzo (CAE)	17
1.3 Técnicas electroquímicas	18
1.3.1 Resistencia a la polarización (RP)	18
1.3.2 Curvas de polarización cíclica (CPC)	19
1.3.3 Ruido electroquímico (RE)	19
1.3.3.1 Análisis de datos de RE	20
1.3.3.1.1 Remoción de la tendencia de corriente	20
1.3.3.1.2 Métodos estadísticos	24
1.4 Método del número más probable (NMP) para conteo de microorganismos	25

1.5 Características generales de los aceros empleados	26
1.5.1 Aceros al carbono	26
1.5.2 Aceros inoxidable	26
1.5.2.1 Aceros inoxidable austeníticos	27
1.5.2.2 Aceros inoxidable endurecidos por precipitación	27
1.5.2.3 Aceros inoxidable martensíticos	28
1.5.2.4 Superaleaciones	28
1.6 Proceso de pasivación	29
1.6.1 Pasivación del acero al carbono	29
1.6.2 Pasivación del acero inoxidable	30
1.7 Fundamentos de la corrosión inducida por microorganismos (CIM)	32
1.7.1 Destrucción de materiales influida por microorganismos	33
1.8 Hipótesis	35
1.9 Justificación experimental	35
1.10 Objetivo principal	35
1.11 Objetivos particulares	35
2. Metodología experimental	36
2.1 Materiales utilizados	36
2.1.1 Aceros	36
2.1.2 Preparación del agua residual sintética	36
2.1.3 Preparación de los sensores de corrosión	37
2.1.4 Probetas para la recuperación de microorganismos	37
2.1.5 Sistema experimental de exposición	38

2.1.6 Medios de cultivo para el conteo de microorganismos	38
2.1.6.1 Medio de cultivo Cetrimide®	38
2.1.6.2 Medio de cultivo Postgate B	40
2.1.6.3 Medio de cultivo Iron-Oxidizing	40
2.2 Desarrollo experimental	40
2.2.1 Pruebas electroquímicas	40
2.2.2 Recuperación y estimación de microorganismos	41
2.2.3 Obtención del NMP de microorganismos	44
2.2.4 Medición de pH y temperatura	44
2.2.5 Microscopía electrónica de barrido	44
2.3 Equipos empleados para la obtención de resultados	45
3. Resultados y discusión	46
3.1 Agua residual sintética, valores de pH y temperatura	46
3.2 Número más probable (NMP)	48
3.3 Probetas para la recuperación de microorganismos después de 90 días de exposición	51
3.4 Resistencia a la polarización (RP) vs. número más probable (NMP)	52
3.5 Ruido electroquímico (RE)	58
3.5.1 Índice de localización (IL)	63
3.5.2 Comparación entre resistencia en ruido (RR) y resistencia a la polarización (RP)	64
3.6 Curvas de polarización cíclica (CPC)	67
3.7 Micrografías electrónicas de barrido	72

4. Conclusiones	75
5. Recomendaciones para trabajos posteriores	77
6. Referencias	78
Apéndices	86
A1. Preparación de medios de cultivo	86
A2. Curvas de polarización cíclica	89

RESUMEN

Los problemas de corrosión que se presentan en la industria relacionada con el tratamiento de agua residual, son muy variados y escasamente estudiados. De aquí, se decidió realizar un estudio sobre el comportamiento electroquímico y microbiológico de los aceros 1018, 17-7PH, 304, 410 y 800 expuestos a un medio de agua residual sintética sin inóculo para esclarecer el posible efecto de formación microbiana sobre dichos aceros en condiciones a nivel laboratorio.

Dentro de la revisión de publicaciones disponibles, se encontraron investigaciones que solo relacionan la presencia microbiana o los cambios de los potenciales de corrosión con procesos de deterioro, y reportes relacionados con la protección de la corrosión en plantas tratadoras. Hasta el momento no se ha encontrado literatura con el enfoque relativo al estudio en conjunto de técnicas electroquímicas y microbiológicas en este tipo de medio.

Las técnicas electroquímicas que se emplearon fueron resistencia a la polarización (RP) para determinar la velocidad de corrosión, curvas de polarización cíclica (CPC) para identificar la susceptibilidad a formación y/o crecimiento de picaduras y ruido electroquímico (RE) para conocer el tipo de corrosión que se está llevando a cabo. También se utilizó el método de número más probable (NMP) para estimar la cantidad de bacterias aerobias y anaerobias presentes sobre la superficie de estos aceros.

Los resultados obtenidos indican que los aceros estudiados no presentaron corrosión localizada. El tipo de corrosión predominante fue el de corrosión uniforme o generalizada. El crecimiento de microorganismos tuvo comportamientos diferentes entre las bacterias aerobias las cuales presentaron una progresión de forma constante, mientras que las anaerobias, no tuvieron un desarrollo constante. De esta forma, no se encontró relación entre la presencia de microorganismos y un proceso de deterioro localizado. En general, los aceros estudiados mostraron un mejor comportamiento frente a la corrosión en el siguiente orden: 304>800>410>17-7>1018.

ABSTRACT

Due to the fact that corrosion problems affecting the residual water treatment industry are varied and scarcely studied, this work presents an investigation of the corrosion behaviour of important engineering materials such as 1018, 17-7PH, 304, 410 and 800 steels exposed to synthetic residual water without inoculate, in order to get an understanding of the steels performance in laboratory conditions.

From the analysis of the available literature, we found a number of investigations dealing only with microbial aspects or, at most, with changes in corrosion potentials to investigate the deterioration processes. Some reports are related to corrosion protection systems in treatment plants. To date, we couldn't find any approach to ascertain the most likely corrosion mechanism by using electrochemical and microbiological techniques in this type of environment.

The electrochemical techniques used were linear polarization resistance (RP) cyclic polarization curves (CPC) and electrochemical noise (ECN) techniques to determine corrosion rates, the susceptibility to localized corrosion and the most probably corrosion mechanism, respectively. Also the most probable number method (MPN) was employed to ascertain the amount of aerobic and anaerobic bacteria present on the steel surface.

The results indicate that the studied steels did not show a tendency for localized corrosion. Instead, from the results generated by ECN and SEM analysis, a uniform corrosion process was more likely. The results from the MPN method indicated that the aerobic bacteria growth was constant, whereas for the anaerobic ones a growth and fall was noted as function of the exposure time the exposure time. Thus, a relationship between the amount of microorganisms and deterioration processes was not evident. On the whole, the steels studied showed a better corrosion resistance in the following order: 304>800>410>17-7>1018.

1. Introducción

Las plantas de tratamiento de aguas residuales procesan algunos de los líquidos más agresivos que viajan a través de cualquier sistema de tuberías. La tubería, los tanques, las bombas, y el equipo relacionado con el tratamiento de aguas residuales, están constantemente expuestos a una alta concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos, productos químicos corrosivos, sólidos, microorganismos de todas formas, así como varios gases. De acuerdo con la American Waterworks Association (AWWA), se ha estimado que \$36 mil millones de dólares es el costo por año en daños debido a la corrosión ocurriendo en sistemas como el transporte del agua potable, así como de aguas residuales. De aquí, un porcentaje importante comprende los daños que existen en las plantas de tratamiento de aguas residuales. La corrosión afecta los componentes de las plantas comprometiendo su integridad. Por otra parte, también afecta la tubería secundaria, es decir, la requerida para la entrega de aire comprimido, la alimentación de productos químicos del tratamiento, y las líneas de gas producidas por el digestor de metano. Este monto fue atribuido a la sustitución de la infraestructura envejecida, al uso de inhibidores de corrosión, al uso de protecciones internas del mortero, y de sistemas que son utilizados en relación a la protección catódica (Bronger, 2004).

De acuerdo a lo anterior, se han realizado investigaciones concernientes a la reparación y protección de tuberías tanto de transporte de agua potable, como en los sistemas de tratamiento de agua residual. Porter y Quick (2001), reportaron el uso de un compósito (combinación de dos o más materiales diferentes) con la finalidad de reparar una tubería. De Vito (2002), publicó que los materiales más empleados para el control de la corrosión en sistemas de tuberías para el transporte de agua doméstica fueron cobre, latón y acero galvanizado. Tator (2003) demostró que el uso de una cubierta interna de las tuberías compuesta por alquitranes epóxicos de carbón, proveían de una protección a la corrosión debida a la producción de ácido sulfhídrico en un rango de entre 10 y 15 años.

Barret (2003) empleó cubiertas protectoras de ésteres vinílicos, aminas epóxicas, uretanos aromáticos elastoméricos y morteros epóxicos de aminas aromáticas elastoméricas para evitar daños por la formación de ácido sulfhídrico. Rahrig (2003) reportó el uso de acero galvanizado como parte de la infraestructura de una planta tratadora de agua ubicada en la ciudad de Baltimore, Maryland. Basu, et al. (2001) comprobó que el uso de materiales que contenían molibdeno

presentaban mayor resistencia al ataque de los agentes corrosivos en una planta tratadora de agua residual. Iversen (2002) indicó que los cambios de potencial en aceros inoxidable tipo 304 era factor de importancia en la corrosión de estos materiales dentro de una serie de trabajos realizados en diferentes plantas de tratamiento de agua en Europa. En otro estudio con los aceros anteriores, Tuthill (1995) menciona que estos tuvieron buen desempeño en sistemas de agua residual, pero solo se reportan curvas de polarización en soldaduras de acero 304 y el efecto de la zona afectada por calor. Un reporte reciente (www.corrosionsource.com/news/01AugNews.htm#duplex), indica que los aceros inoxidables tipo duplex presentan una buena resistencia en bombas de sistemas de agua residual. Sin embargo, el reporte no indica la manera o método empleado para la afirmación anterior.

Hasta nuestros días, no existe industria libre de problemas de corrosión y más del 50% de los casos se encuentran asociados, directa o indirectamente, con algún tipo de microorganismo (Marcus y Oudar, 1995; Jones, 1996).

A la corrosión se le ha otorgado una gran cantidad de definiciones, teniendo como criterio común, el concepto del deterioro que sufren los metales y sus aleaciones debido a la acción de las diversas constituciones del medio ambiente. Este ataque es lento, pero continuo. La causa principal del fenómeno de corrosión reside en la inestabilidad que tienen los metales y sus aleaciones en sus formas refinadas que tienden a volver a su estado natural mediante el proceso de corrosión (Bradford, 1998).

La corrosión metálica es esencialmente de naturaleza electroquímica y superficial, en medios acuosos o al menos húmedos, esto incluye la corrosión en soluciones que contengan agua, exposición atmosférica, a las que presenten una película de humedad superficial y la corrosión en suelos (Roberge, 2000).

La disolución del metal en medios acuosos se realiza en sitios anódicos que dan lugar a que el metal se transforme parcial o totalmente del estado metálico al iónico como lo indica la siguiente ecuación:



Esta es la reacción de corrosión generalizada que remueve el átomo metálico por oxidación en su ión. En esta reacción, el número de electrones producidos es igual a la valencia del ión metálico producido. La teoría del potencial mixto propone que todos los electrones

generados por las reacciones anódicas (o de oxidación) son consumidos por las correspondientes reacciones catódicas (o de reducción). Las reacciones de reducción ocurren en los sitios catódicos de un metal que se corroe o en el cátodo de una celda electroquímica.

Las reacciones catódicas (consumo de electrones) más comunes encontradas en la corrosión acuosa son las siguientes (Sedriks, 1996):

- > Reducción de iones hidrógeno: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
- > Reducción de oxígeno (soluciones ácidas): $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
- > Reducción del oxígeno (soluciones básicas o neutras): $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$
- > Reducción del ión metálico: $\text{M}^{n+} + \text{e}^- \rightarrow \text{M}^{+(n-1)}$
- > Depositación metálica: $\text{M}^{n+} + n\text{e}^- \rightarrow \text{M}$

La naturaleza de las reacciones catódicas depende del pH de la solución y la presencia de oxígeno disuelto u otros oxidantes. Por ejemplo, en un rango de pH de 4 a 10, en donde la difusión del oxígeno disuelto en la superficie del metal controla la velocidad de corrosión, esto significa, que si no hay presencia de oxígeno disuelto, habrá velocidades de corrosión muy bajas (Torres, 2002).

1.1 Termodinámica y cinética de la corrosión acuosa

1.1.1 Termodinámica de la corrosión acuosa

Las reacciones electroquímicas debido a la corrosión producen un potencial: el potencial de circuito abierto, ξ . La relación entre la energía química y la energía eléctrica está dada por la ecuación (2) (Strehblow, 2000):

$$\Delta G = -nF\xi \quad (2)$$

donde ΔG es el cambio de energía libre de Gibbs de la reacción electroquímica global, en joules, ξ se da en volts, n es el número de electrones que participan en la reacción electroquímica y F es la constante de Faraday, $\sim 96,500$ coulombs (C) por peso equivalente. Si ΔG corresponde al estado estándar (es decir, es ΔG°), entonces ξ también corresponde al estado estándar, ξ° , y, la ecuación 2 cambia a:

$$\Delta G^\circ = -nF\xi^\circ \quad (3)$$

La relación entre el cambio de la energía libre de Gibbs y la concentración de los iones o gases presentes en la solución acuosa está dada por la ecuación de Nernst como se explica a continuación.

Considérese la reacción química global:



donde B y C son los reactivos con sus coeficientes respectivos, b y c, y D y F son los productos con sus coeficientes respectivos, d y f. La reacción indica que b moles de B y c moles de C reaccionan para formar d moles de D y f moles de F.

El cambio de energía libre, ΔG , de la reacción anterior es

$$\Delta G = (d \cdot G_D + f \cdot G_F + \dots) - (b \cdot G_B + c \cdot G_C + \dots) \quad (5)$$

donde las G son las energías libres por mol de los reactivos y de los productos. En el estado estándar,

$$\Delta G^\circ = (d \cdot G_D^\circ + f \cdot G_F^\circ + \dots) - (b \cdot G_B^\circ + c \cdot G_C^\circ + \dots) \quad (6)$$

donde las G° son las energías libres estándar por mol de los reactivos y de los productos. La diferencia entre las G y las G° de una sustancia guarda relación con su actividad, a , que puede considerarse como una concentración o presión corregida. Por ejemplo,

$$d (G_D - G_D^\circ) = d RT \ln a_D = RT \ln a_D^d \quad (7)$$

donde R es la constante de los gases ($8,3 \text{ J grado}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) y T es la temperatura absoluta en K. Restando la ecuación 6 de la ecuación 5, y con base en la ecuación 7, se obtiene la expresión:

$$\Delta G - \Delta G^\circ = RT \ln [(a_D^d)(a_F^f)\dots / (a_B^b)(a_C^c)\dots] \quad (8)$$

Se puede observar que ΔG de la reacción es igual al correspondiente estado estándar, ΔG° cuando el lado derecho de la ecuación 8 es igual a cero. Esto sucede sólo cuando todas las actividades, las a de la ecuación 8 son iguales a 1. Ésta es la definición del estado estándar de una sustancia, es decir, cuando su actividad, $a = 1$.

La cantidad encerrada entre corchetes en la ecuación 8 se define como la constante de equilibrio, K, de la reacción global:

$$K \equiv (a^d_D)(a^f_F).../(a^b_B)(a^c_C)... \quad (9)$$

en el equilibrio, $\Delta G = 0$, y

$$\Delta G^\circ = - RT \ln K \quad (10)$$

Aplicando lo anterior a una reacción química global, y sustituyendo las ecuaciones 2 y 4 en la 7, obtenemos lo siguiente:

$$\xi = \xi^\circ + \frac{RT}{nF} \ln (a^d_D)(a^f_F).../(a^b_B)(a^c_C)... \quad (11)$$

Ésta es la ecuación de Nernst, que correlaciona el voltaje de celda con la actividad, en este caso debida a la concentración de las sustancias que participan en la reacción química global.

Se puede aplicar este desarrollo a las reacciones de oxidación-reducción, para obtener la ecuación de Nernst de los potenciales de electrodo.

Generalizando una reacción de oxidación-reducción con la expresión siguiente:



En esta reacción, Ox significa el estado oxidado del metal y Red su estado reducido, n es el número de electrones que participan en la reacción. Aplicado la ecuación 8 para obtener el cambio de energía libre, ΔG , de la ecuación 12, tenemos que

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}}} \quad (13)$$

Si se sustituye $\Delta G = -nFE$ y $\Delta G^\circ = -nFE^\circ$, obtenemos, la ecuación de Nernst de los potenciales de electrodo de las reacciones de oxidación-reducción

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Ox}}} \quad (14)$$

En un entorno acuoso, también se pueden formar hidróxidos u óxidos metálicos en virtud de la reacción siguiente:



La ecuación de Nernst correspondiente a la ecuación 15 es:

$$\begin{aligned} E_{M(OH)_n} &= E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(a_{M(OH)_n})(a_{H^+}^n)}{(a_M)(a_{H_2O}^n)} \\ &= E^\circ + \frac{2.303RT}{F} \log a_{H^+} \\ &= E^\circ - \frac{2.303RT}{F} \text{pH} \end{aligned} \quad (16)$$

donde $\text{pH} \equiv -\log a_{H^+}$. La relación entre E y el pH se expresa en la ecuación 16.

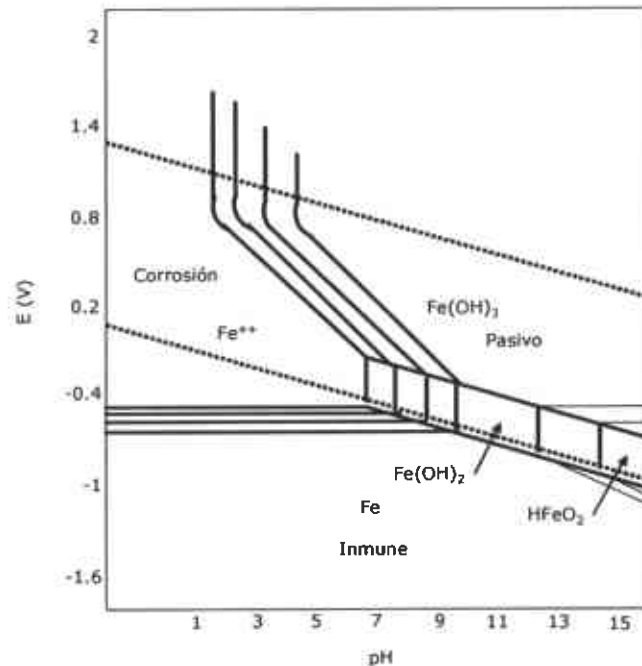
La ecuación de Nernst para la ecuación 1 se describe como

$$E_{M^{n+}/M} = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{M^{n+}}}{a_M} = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln a_{M^{n+}} \quad (17)$$

Las ecuaciones 16 y 17 se pueden graficar como un diagrama de potencial-pH (E-pH) o diagrama de Pourbaix. Estos diagramas son muy útiles porque muestran las condiciones específicas de potencial y pH en las cuales un metal se corroe, es pasivo o es inmune.

La gráfica 1 muestra el diagrama de Pourbaix para el sistema hierro puro – agua a 25°C, que es la base de los aceros.

Las regiones de los diagramas están marcadas como corrosión, pasivo e inmune. En la zona de corrosión, el estado estable del metal es en forma de iones; por lo tanto, el metal se corroe. La región pasivo supone la formación de un óxido o hidróxido que actúa como una barrera contra el electrolito, y la zona inmune muestra un material no ionizado (Pourbaix, 1963).



Gráfica 1. Diagrama de potencial-pH o de Pourbaix para el hierro en agua a 25°C.

1.1.2 Cinética de la corrosión acuosa

La cantidad de material anódico corroído o consumido cuando pasa corriente por un circuito está gobernada por dos leyes de Faraday, a saber (Piron, 1991):

- (1) Primera ley: En la electrólisis, las cantidades de las sustancias que participan en el cambio químico son proporcionales a la cantidad de electricidad que pasa por el electrolito.
- (2) Segunda ley: La masa de las diferentes sustancias liberadas o disueltas por una cantidad determinada de electricidad es proporcional a su equivalente respectivo.

En honor a Michael Faraday, la cantidad de carga que libera o disuelve un equivalente químico de una sustancia se denomina Faraday, y es igual a 96,500 Coulombs/equivalente. Por lo tanto, si I es la corriente en amperes que pasa por el circuito durante un tiempo t , en segundos, la cantidad de electricidad o carga es:

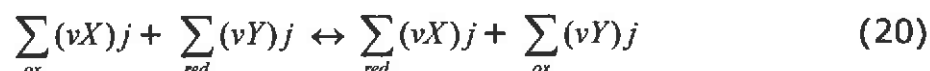
$$Q = I \times t, \text{ en coulombs} \quad (18)$$

y

$$Q/F = (I)(t)/F \quad (19)$$

$$Q/F = \text{número de equivalentes del material}$$

Si se combinan las reacciones de oxidación-reducción, se puede generalizar la reacción electroquímica global mediante la reacción balanceada siguiente, en la cual el número de electrones de la reacción es igual para la oxidación como para la reducción.



donde v de cada sustancia se refiere al número de moles que participan en la reacción electroquímica.

Para cada una de las sustancias participantes,

$$v_j/n \quad (21)$$

se conoce como el equivalente químico, y

$$v_j M_j/n \quad (22)$$

es la masa o peso equivalente, donde n es el número total de electrones que participan en la reacción global de la ecuación 20, y M_j es la masa atómica o peso molecular de la sustancia. Por lo tanto,

$$F = v_j M_j/n \quad M_j = nF/v_j \quad (23)$$

Si m es la masa de la sustancia disuelta (oxidada) o liberada (reducida), y aplicando las ecuaciones 22 y 19, el número de pesos equivalentes es igual a:

$$m/M_j \times n/v_j = Q/F \quad (24)$$

$$\text{masa de la sustancia, } m = v_j Q M_j/nF = v_j I t M_j/nF \quad (25)$$

$$\text{número de moles} = m/M_j = v_j Q/nF = v_j I t/nf \quad (26)$$

y la velocidad de reacción específica, r_j , es:

$$r_j \equiv \text{masa de la sustancia que reacciona/área} \times \text{tiempo}$$

$$r_j = v_j i M_j / nF \quad (27)$$

donde $i = I/A$ es la densidad de corriente y A es el área total de la superficie del material.

La velocidad de la reacción está determinada por la densidad de corriente, i . La corriente I en amperes es la cantidad que es igual para cada electrodo. La densidad de corriente para el cátodo es

$$i_c = I/A_c \quad (28)$$

y para el ánodo

$$i_a = I/A_a \quad (29)$$

Se ha observado que la corrosión ocurre solo si pasa una corriente por la celda electroquímica. Si pasa una corriente, esto significa que las condiciones de equilibrio en los electrodos han cambiado y, por lo tanto, que los potenciales de electrodo cambian durante la corrosión. El cambio de los potenciales de equilibrio se denomina polarización, y con mucha frecuencia se le denomina sobrepotencial (Piron, 1991).

El equilibrio en las reacciones de oxidación-reducción se refiere a que ambas reacciones ocurren con la misma velocidad. Puesto que la velocidad es proporcional a una densidad de corriente en la ecuación 27, en el equilibrio, la densidad de corriente es igual para ambas reacciones. Esta corriente se llama densidad de corriente de intercambio, y se le asigna el símbolo i_0 . La densidad de corriente de intercambio de la reacción del metal depende de la concentración del electrolito (Jones, 1996).

Se establece una corriente neta cuando la velocidad en un sentido de la reacción es mayor que en el otro y, si esto ocurre, las condiciones de equilibrio se alteran y la corrosión se inicia. Si se parte de la ecuación de Nernst, la condición de equilibrio para el potencial de electrodo, es descrita por la ecuación 14.

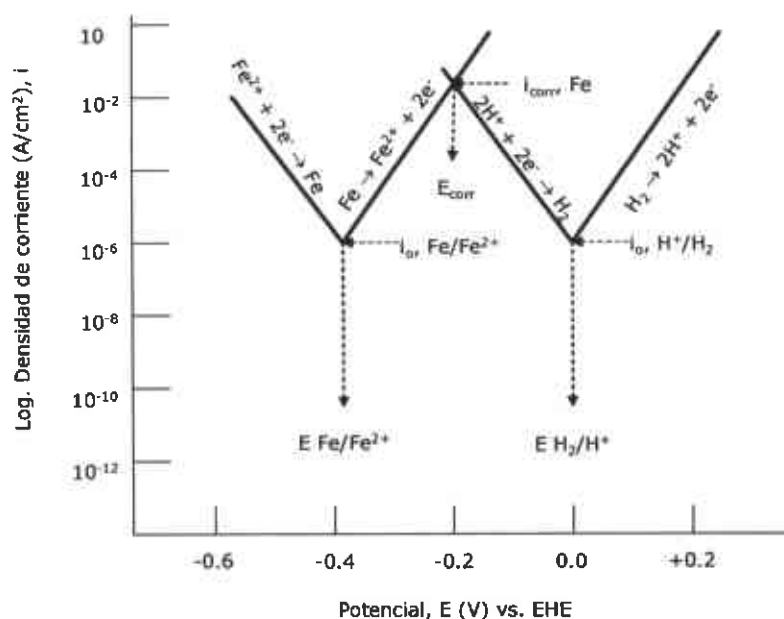
Cuando hay una corriente presente en la celda, los potenciales de electrodo se determinan mediante las actividades o concentraciones del electrolito que esta en contacto con el electrodo.

En las reacciones de oxidación, por ejemplo, hay más iones oxidados en la superficie por que están siendo transferidos del metal al electrolito, y se necesita tiempo para que la difusión uniformice la composición del

electrolito. Esto significa que si la a_{ox} aumenta, de acuerdo a la ecuación 14, el potencial de electrodo será mayor cuando ocurre corrosión que el potencial en equilibrio. El cambio de potencial (polarización) es positivo, y se afirma que el material anódico adquiere mayor carácter catódico.

Respecto a la reacción de reducción, los iones del electrolito que está en contacto con el electrodo se reducen y, por lo tanto, su concentración disminuye. Por consiguiente, de acuerdo a la ecuación 14, el potencial de electrodo con corriente es menor que el potencial de electrodo en el equilibrio. La polarización es negativa y, por ende, el material catódico adquiere mayor carácter anódico (Jones, 1996).

Los cambios de potencial se pueden mostrar en un diagrama de polarización (gráfica 2), que es una gráfica de los potenciales de electrodo en función de la corriente de corrosión.



Gráfica 2. Diagrama de polarización para el hierro e hidrógeno.

En las reacciones indicadas en el diagrama de polarización, el metal actúa a la vez como el ánodo y como la superficie catódica para la reacción del hidrógeno. Cuando la corrosión comienza, el potencial del ánodo aumenta y el potencial del cátodo disminuye. Este proceso continúa hasta que el potencial de las reacciones catódica y anódica es el mismo, dando como resultado un potencial mixto o potencial de

corrosión, E_{corr} . La corriente en el potencial de corrosión se denomina densidad de corriente de corrosión, i_{corr} , y es el valor que se utiliza en la ecuación 27.

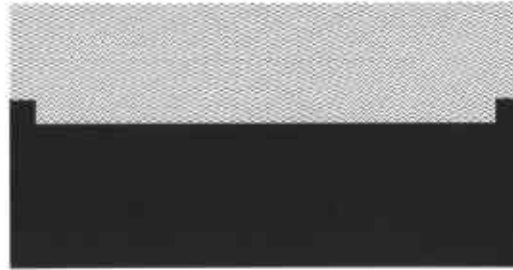
1.2 Tipos de corrosión

La corrosión ocurre en varias formas. Su clasificación es generalmente basada en uno de los tres siguientes factores (Bradford, 1998):

- *Naturaleza del corrosivo*: La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca. Un líquido o la humedad es necesaria en la primera y corrosión seca generalmente involucra reacciones con gases en ambientes de alta temperatura.
- *Mecanismo de corrosión*: Esto implica reacciones electroquímicas o reacciones químicas directas.
- *Apariencia del metal corroído*: La corrosión puede presentarse de forma general o uniforme, indicando que el metal se corroe a la misma velocidad sobre toda la superficie, o en forma localizada, en la cual solo una pequeña área de la superficie es afectada.

1.2.1 Corrosión uniforme

La corrosión uniforme o general, resulta en una equitativa penetración (o adelgazamiento) sobre toda la superficie expuesta del metal. El ataque general resulta de una acción corrosiva celular localizada; esto es, muchos ánodos y cátodos están operando sobre la superficie del metal a cualquier tiempo. La localización de las áreas anódicas y catódicas es continua sobre la superficie, resultando en una corrosión uniforme (esquema 1). Representa la mayor tasa de destrucción de un metal sobre la base de tonelaje. La corrosión uniforme a menudo resulta de la exposición atmosférica (especialmente a contaminantes industriales); exposición a agua fresca, salitres, suelos, agua salada (ambientes marinos), y a sustancias químicas diversas (Fontana y Green, 1986 a).



Esquema 1. Corrosión uniforme.

1.2.2 Corrosión por picadura

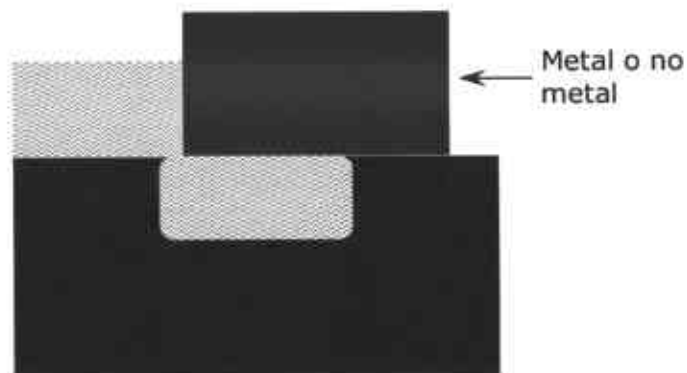
La picadura es una forma de corrosión altamente localizada que produce formas de hoyos bien definidos (esquema 2). Estos hoyos pueden ser de diámetro grande o pequeño, pero en la mayoría de los casos son relativamente pequeños. Pueden ser aislados unos de otros sobre la superficie o tan cerca unos de otros que semejan una superficie rugosa. La picadura ocurre cuando un área del metal o aleación se convierte en ánodo con respecto al resto de la superficie o cuando hay cambios altamente localizados en la estructura del metal, como grietas, que causan un ataque localizado acelerado. Algunas causas de picadura son la no - homogeneidad de la superficie del metal, pérdida local de pasividad, ruptura mecánica o química de una cubierta de protección, corrosión galvánica de un cátodo relativamente distante, la formación de un ión metálico o concentración de oxígeno bajo un depósito sólido (corrosión por grietas) y la presencia de microorganismos (Van Delinder, 1984).



Esquema 2. Corrosión por picadura.

1.2.3 Corrosión por hendidura

La corrosión por hendidura es una forma de ataque localizado que ocurre en aberturas estrechas o desfases entre componentes metal-metal o metal-no metal (esquema 3). Este tipo de ataque resulta de la celda de concentración formada entre el electrolito dentro de la hendidura, en la cual hay oxígeno estancado, y el electrolito fuera de la hendidura, donde el oxígeno es más abundante. El material dentro de la hendidura actúa como ánodo y el material exterior como cátodo. Las hendiduras son producidas por diseño o por inadecuadas prácticas de reparación y/o mantenimiento. En general, las causadas por diseño ocurren en soportes, pestañas, anillos-O rings de goma, agujeros de pernos, tubos con rosca final, uniones enroscadas, costura de remaches, rollos de alambre traslapado, etc. Se forma también en regiones obstruidas formadas por un proceso denominado tuberculación, en depósitos y debajo de acumulaciones. En forma similar, las hendiduras no intencionales como fracturas, costuras y otros defectos metalúrgicos sirven como sitios de corrosión (Herro y Port, 1993).

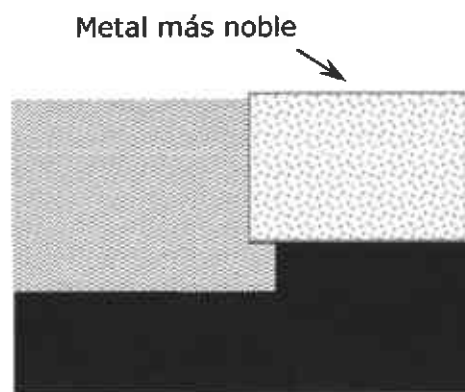


Esquema 3. Corrosión por hendidura.

1.2.4 Corrosión galvánica

La corrosión galvánica ocurre cuando un metal o aleación es acoplado eléctricamente a otro metal o no metal conductor en el mismo electrolito (esquema 4). Los tres componentes esenciales para este tipo de corrosión son: a) que los materiales posean diferente potencial de superficie, b) un electrolito común y c) una ruta eléctrica. Un sistema de mezcla de metales en un electrolito común que es eléctricamente aislado no experimentará corrosión galvánica, a pesar de la proximidad de los metales, su potencial relativo o su tamaño. Durante el

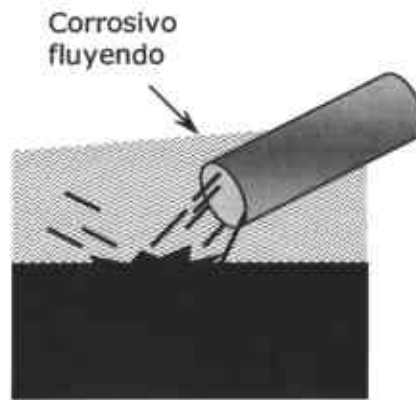
acoplamiento galvánico, la corrosión del metal menos resistente a la corrosión aumenta, y la superficie se vuelve anódica, mientras que la corrosión del material más resistente a la corrosión disminuye, y la superficie actúa como cátodo. La fuerza impulsora de corrosión es el potencial desarrollado entre metales diferentes. La diferencia de potencial entre metales o aleaciones diferentes causan un flujo de electrones (corriente) entre ellos cuando están acoplados eléctricamente en un electrolito. La dirección de flujo y, por lo tanto, el comportamiento galvánico depende de cual metal o aleación sea más activo (Corbett, 1998).



Esquema 4. Corrosión galvánica.

1.2.5 Erosión-corrosión

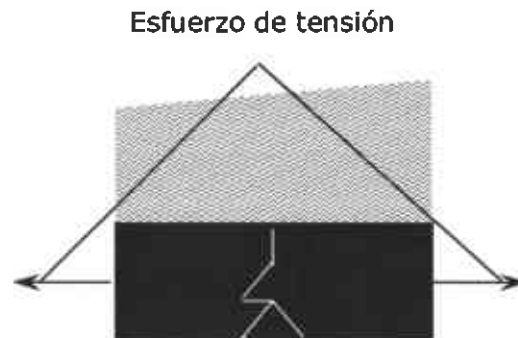
La erosión-corrosión resulta del movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie del metal (esquema 5). Es caracterizada por la aparición de ondas, agujeros redondeados y/o surcos en forma de herradura. La erosión-corrosión es la aceleración o aumento de la velocidad de deterioro sobre un metal debido a la combinación de deterioro mecánico inducido por ejemplo por una alta velocidad de flujo (efecto mecánico), con la corrosión (efecto electroquímico). La acción sinérgica de estos factores resulta en un ataque más severo que el que ocurriría con cada una de los factores actuando por sí solos (Fontana y Green, 1986 b).



Esquema 5. Erosión - corrosión.

1.2.6 Corrosión asistida por esfuerzo (CAE).

La corrosión asistida por esfuerzo (también conocida por corrosión bajo tensión), es un fenómeno que ocurre solo en aleaciones susceptibles y es causada por la acción conjunta de esfuerzos de tensión y/o compresión en una superficie y un ambiente corrosivo específico (esquema 6). Se necesitan tres condiciones simultáneas para que se presente la CAE: i) un ambiente específico promotor de fractura, ii) que el material de la aleación sea susceptible, y iii) que el esfuerzo este por arriba del valor límite para esa aleación. Los esfuerzos requeridos para causar CAE son pequeños, por lo general por debajo del esfuerzo macroscópico de fatiga. Los esfuerzos pueden ser aplicados externamente, pero algunas veces los esfuerzos residuales pueden inducir fallas. Este fenómeno de fractura es de particular importancia para aleaciones potencialmente susceptibles, ya que si se presenta la CAE bajo condiciones de servicio, puede resultar en una falla de magnitudes catastróficas (Parkins, 1995).



Esquema 6. Corrosión asistida por esfuerzo.

1.3 Técnicas electroquímicas

1.3.1 Resistencia a la polarización (RP)

La resistencia a la polarización esta relacionada con la velocidad de corrosión de metales cerca de su potencial de corrosión, E_{corr} . Las mediciones de resistencia a la polarización son una ruta rápida y precisa para medir la velocidad de corrosión, y ofrece una aplicación común para el monitoreo de corrosión en tiempo real. Esta técnica consiste en aplicar un pequeño potencial de barrido del orden de ± 20 mV con respecto al potencial de corrosión del material bajo estudio. Se registran las corrientes resultantes de acuerdo a la Norma ASTM G59 (ASTM G59, 1998).

La resistencia a la polarización, RP, de un electrodo que se corroe es definida como la pendiente de un potencial contra la densidad de corriente de acuerdo a (Stern y Roth, 1957):

$$RP = \Delta E / \Delta i \quad (30)$$

La densidad de corriente esta dada por i . La densidad de corriente, i_{corr} , esta relacionada a la resistencia a la polarización por el coeficiente de Stern-Geary, B, (Mansfeld, 1976).

$$i_{corr} = B / RP \quad (31)$$

RP esta dada en Ohm cm^{-2} , i_{corr} en mA cm^{-2} , y B es en mV. El coeficiente de Stern-Geary está relacionado con la pendiente anódica, b_a y la catódica, b_c , de Tafel como se indica a continuación (Stern y Geary, 1957):

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (32)$$

El cálculo de la velocidad de corrosión, VC, es dado por:

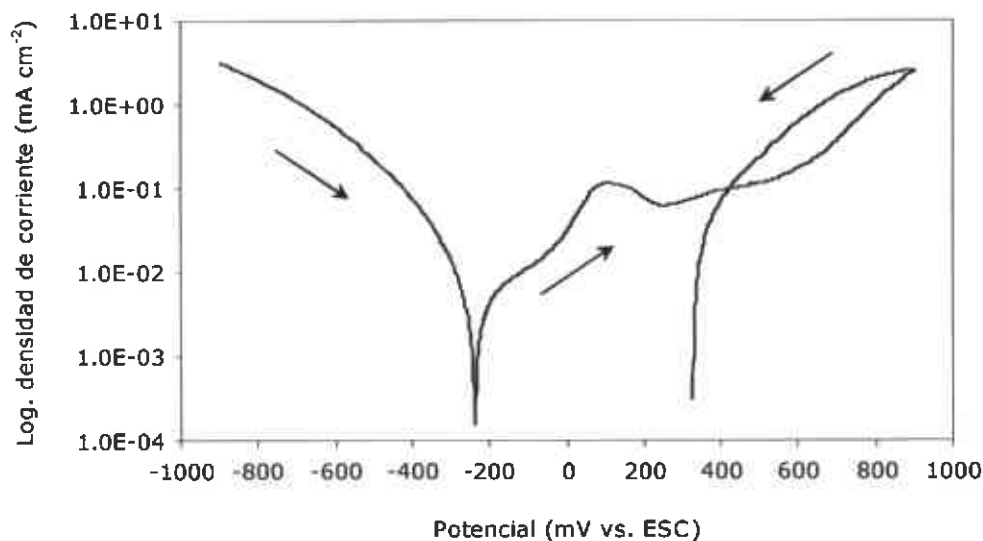
$$VC = 3.27 \left(\frac{i_{corr}}{\rho} \right) PE \quad (33)$$

donde PE es el peso equivalente del material en estudio en gramos, ρ es la densidad del material en g cm^{-3} . Se tomó 3.27 como factor de conversión para obtener la VC en mm año^{-1} (ASTM G102, 1999).

1.3.2 Curvas de polarización cíclica (CPC)

Este método se realiza para determinar la susceptibilidad relativa a corrosión localizada (picado y hendidura) en cualquier tipo de ambiente. La corrosión por picadura ocurre debido al rompimiento de la película de pasivación de la superficie. El picado es caracterizado por un rápido aumento en la corriente con solo un pequeño cambio en el potencial. El potencial donde éste aumento de corriente inicia es llamado potencial de picado. Generalmente, una forma de rompimiento ocurre en la curva de polarización cuando el potencial de pasivación presenta una ruptura (Thompson y Payer, 1998).

En la gráfica 3 se muestra la gráfica típica de un proceso de corrosión localizada.



Gráfica 3. Curva de polarización típica de un proceso de corrosión localizada.

1.3.3 Ruido electroquímico (RE)

El ruido electroquímico se ha instituido como una eficaz técnica para el análisis de procesos de corrosión, no solamente por ser una técnica no perturbativa (no requiere introducir alguna variable al sistema electroquímico, como corriente o voltaje), sino por que a partir del análisis de la información obtenida, además de hacer una estimación de VC, es posible inferir acerca del tipo de mecanismo que gobierna la

corrosión, ya sea uniforme o localizada (Eden y Rothwell, 1992; Pistorius, 1996; Wharton, et al., 2000).

El ruido electroquímico es un término general que describe las fluctuaciones aleatorias, tanto de potencial como de corriente en los sistemas electroquímicos (Kearns, 1996; Gusmano et al., 1997).

Las fluctuaciones de potencial de un electrodo en relación a un electrodo de referencia se denominan ruido electroquímico en potencial, y las fluctuaciones de corriente entre dos electrodos nominalmente idénticos se denominan ruido electroquímico en corriente (Cottis y Turgoose, 1999).

1.3.3.1 Análisis de los datos de RE

1.3.3.1.1 Remoción de la tendencia de corriente

El análisis de datos es clave en la aplicación de ruido electroquímico. La extracción de ruido real del ruido de datos es el primer paso para el análisis.

Los datos recolectados son una combinación de componentes de ruido al azar y de la tendencia de corriente directa (CD). Un tratamiento de remoción puede ser esencial para el posterior análisis de datos, por que la tendencia puede causar distorsiones en el procedimiento de análisis de ruido. En este trabajo se utilizó el método de remoción motriz del promedio (RMP) (Tan et al., 1996). El objetivo de este método es remover los valores promedio de los datos de ruido obtenidos, por que los valores promedio son una buena estimación de la tendencia de CD.

La explicación de este método se describe a continuación:

Se registra una serie de voltaje-tiempo (k puntos de datos (2048 para este trabajo)), $\{V_n\}_{n=1,2,3,\dots,i+1,i+2,\dots,k}$, obtenida experimentalmente. En cualquier punto individual en el grupo $\{V_n\}$, V_i es una combinación del ruido y la tendencia de CD, las cuales están en función del tiempo, t , de acuerdo a la ecuación

$$V_i(t) = V_{i,\text{ruido}}(t) + V_{i,\text{CD}}(t) \quad (34)$$

donde $V_{i,\text{ruido}}(t)$ es el ruido real y es requerido para el posterior análisis, y $V_{i,\text{CD}}(t)$ es la tendencia componente que será removida.

La suposición central es que un valor promedio de los datos adyacentes de V_i , $V_i(p)$, puede ser tomado como una estimación de $V_{i,CD}(t)$ de acuerdo a la ecuación

$$V_i(p) = \left\{ \sum_{i-p}^{i+p+1} V_i \right\} / (2p+2) \quad (35)$$

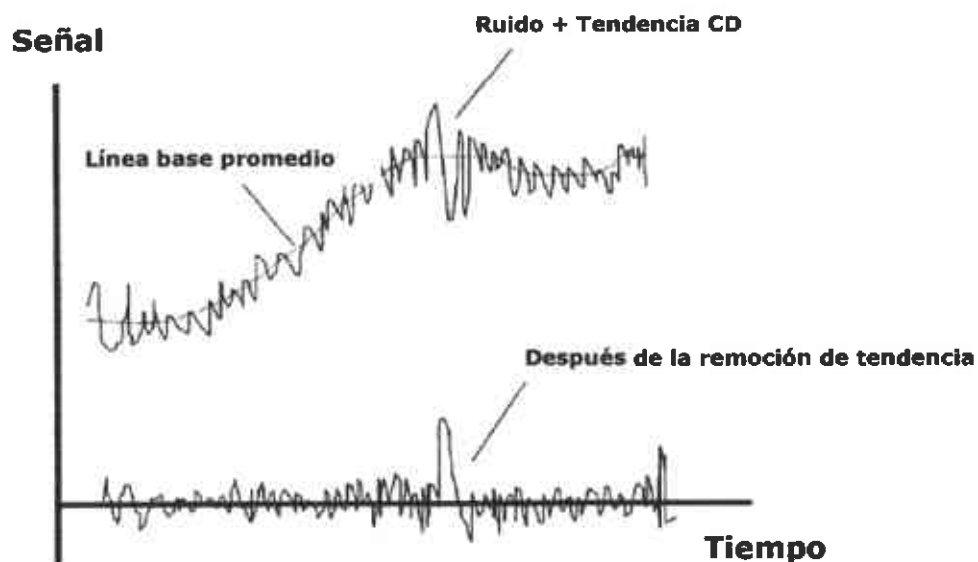
Donde p puede ser 1,2,3 o más. Por ejemplo, si tomamos $p = 3$, significa que se tomaran tres puntos a la izquierda y cuatro puntos a la derecha de V_i para el cálculo del promedio según la expresión

$$V_i^{prom}(3) = [V(i-1) + V(i-2) + V(i-3) + V(i) + V(i+1) + V(i+2) + V(i+3) + V(i+4)]/8 \quad (36)$$

La tendencia de CD en el registro de voltaje-tiempo puede entonces ser removida, y las fluctuaciones aleatorias $V_{i,ruido}$ pueden ser deducidas de acuerdo a

$$V_{i,ruido} = V_i - V_i^{prom} \quad (37)$$

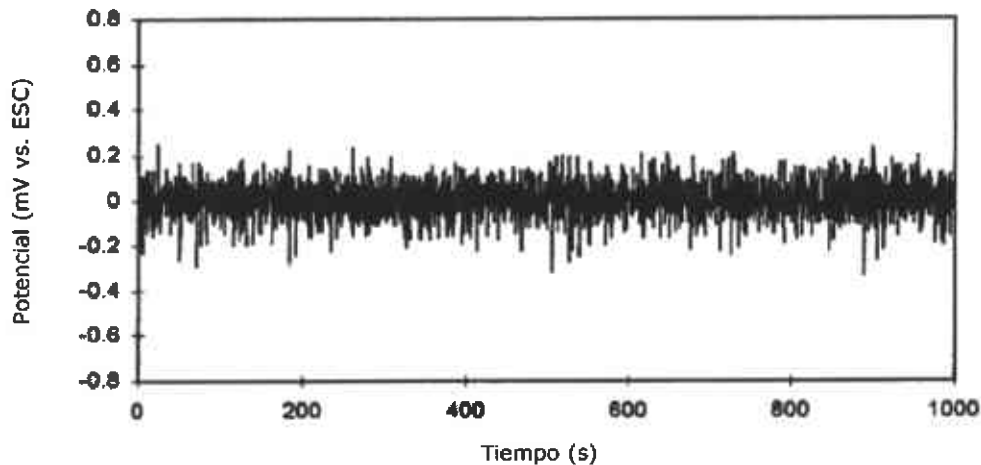
Para cada punto voltaje-tiempo, se calcula un voltaje promedio y también el voltaje promedio es cambiado. Este valor promedio forma una línea base a lo largo de la cual las señales de ruido fluctúan. Lo mismo se puede aplicar para corriente en ruido (Tan et al., 1996). La gráfica 4 muestra un diagrama esquemático del método de remoción de tendencia CD.



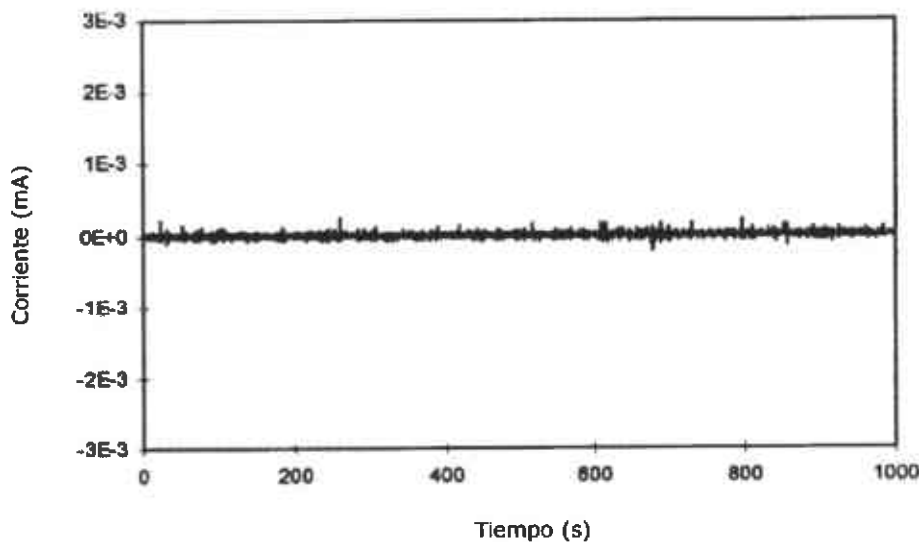
Gráfica 4. Diagrama esquemático del método de remoción de tendencia CD.

Las gráficas 5 y 6 muestran el resultado de la remoción de tendencia en el ruido en potencial y ruido en corriente para un acero al carbono que no presenta un proceso de corrosión localizada (Tan et al., 1996).

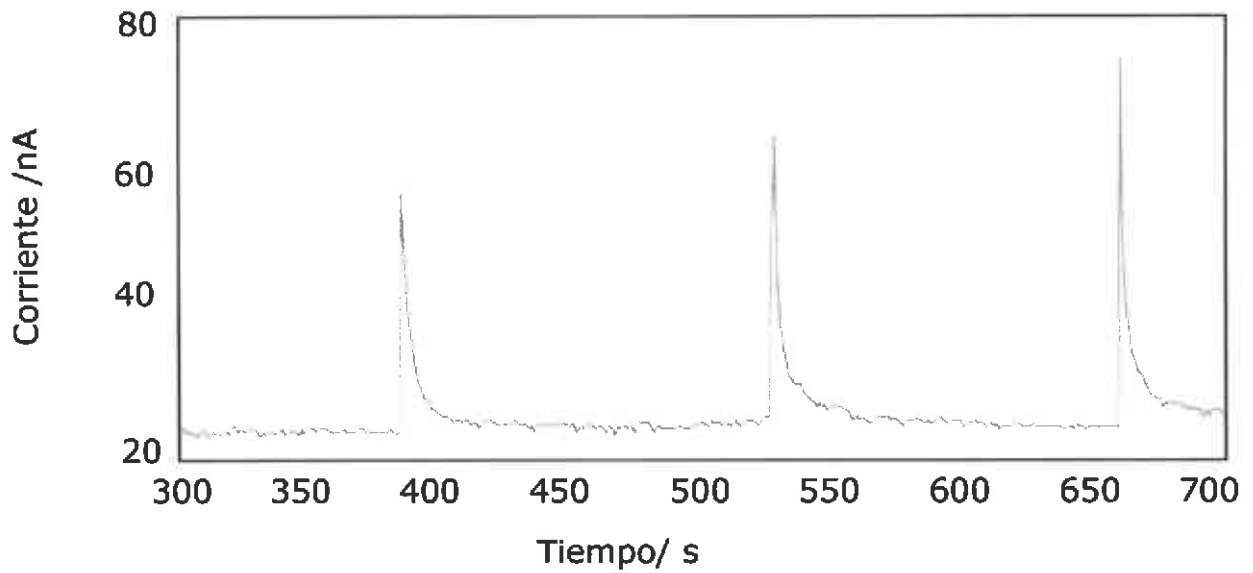
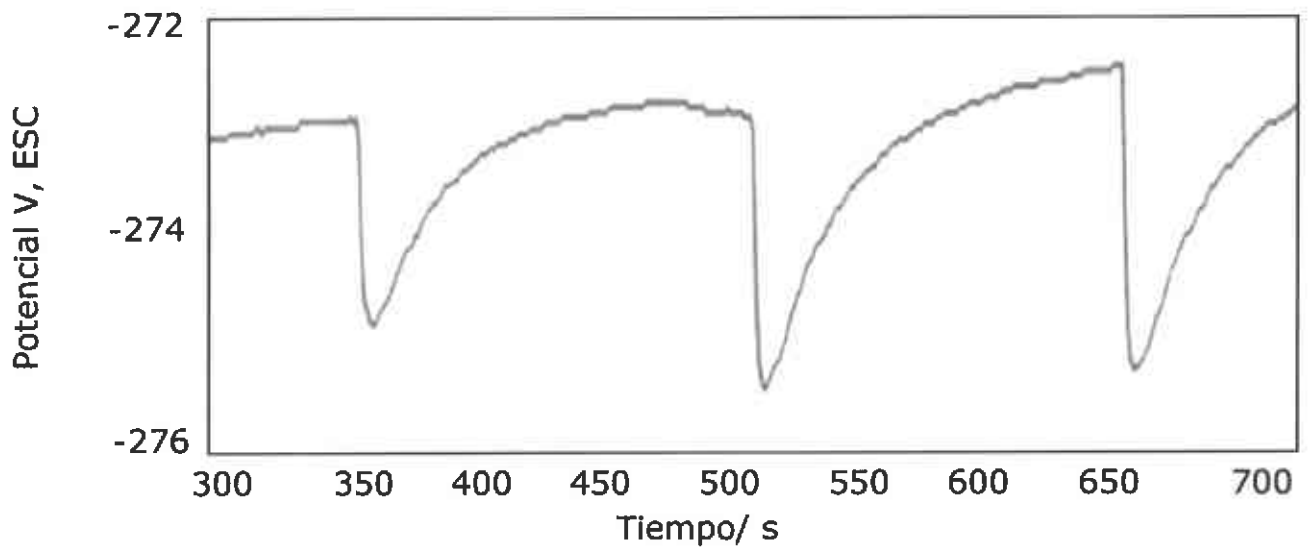
La gráfica 7 muestra la remoción de tendencia de CD del ruido en potencial y la gráfica 8 para ruido en corriente de un material que presenta corrosión localizada (Cottis y Turgoose, 1999).



Gráfica 5. Ruido en potencial de un acero al carbono sin corrosión localizada (Tan et al., 1996).



Gráfica 6. Ruido en corriente de un acero al carbono sin corrosión localizada (Tan et al., 1996).



1.3.3.1.2 Métodos estadísticos

Se han desarrollado criterios estadísticos para determinar si un proceso de corrosión es o no localizado debido a las señales de respuesta de ruido electroquímico, dentro de ellas están el Índice de Localización (IL) y la Resistencia en Ruido Electroquímico (RRE) (Dawson y Hladky, 1981; Eden y Rothwell, 1992; Wharton et al., 2000).

El índice de localización, IL, se define como la relación entre la desviación estándar de las señales de corriente entre la raíz cuadrada del promedio de las mismas señales de acuerdo a

$$IL = \sigma_i / I_{rcp} \quad (38)$$

donde σ_i es la desviación estándar de la corriente e I_{rcp} es la raíz cuadrada del promedio de la corriente que incluya la tendencia CD.

De acuerdo con Eden et al. (1987), existe una relación entre los valores de IL y el tipo de corrosión que prevalece en el sistema dado de acuerdo a los siguientes valores:

Tabla 1. Valores de IL para cada Tipo de Corrosión

Índice de Localización	Tipo de Corrosión
0,001 < IL < 0,01	General
0,01 < IL < 0,1	Mixta
0,1 < IL < 1,0	Localizada
1,0 < IL	Inicio de picado

La resistencia en ruido electroquímico (RRE) es calculada de acuerdo a

$$RR = \sigma_p / \sigma_c \quad (39)$$

Donde σ_p es la desviación estándar del potencial y σ_c es la desviación estándar de la corriente (Cottis y Turgoose, 1999).

La desviación estándar es el parámetro usado para describir la amplitud de onda de una señal de ruido. Con la obtención de RRE se puede calcular i_{corr} de acuerdo a la ecuación 31 (Stern y Geary, 1957) y con la ecuación 33 se estima la velocidad de corrosión.

1.4 Método del número más probable (NMP) para conteo de microorganismos.

El número más probable es un método que emplea análisis estadísticos y diluciones sucesivas de la muestra para alcanzar un punto de extinción (Alexander, 1965; Melchiorri, 1972; Colwell, 1979; Madigan, et al., 1998).

Las réplicas de las diluciones, normalmente de 3 a 10 réplicas de cada nivel de dilución, puntúan como positivas o negativas, y se emplea conjuntamente con análisis estadísticos apropiados para obtener el número más probable de microorganismos viables. Los patrones estadísticos de los resultados positivos y negativos para 3, 5 y 10 réplicas suelen estar contenidos en tablas NMP, lo cual simplifica el proceso de convertir los resultados experimentales en el número más probable de microorganismos. El procedimiento NMP proporciona un cálculo, con base estadística, del número de microorganismos en una muestra, y cuando se emplean relativamente pocos tubos de réplica los intervalos de confianza son bastante amplios (Atlas y Bartha, 2002).

La tabla 2 muestra un ejemplo de como se efectúa este conteo.

Tabla 2. Obtención del NMP

Dilución 10^{-3}	Dilución 10^{-4}	Dilución 10^{-5}
Positivo	Positivo	Positivo
Positivo	Positivo	Negativo
Positivo	Negativo	Negativo

Donde la combinación de positivos: 3-2-1, proporciona el NMP de 150, que al ser multiplicado por el inverso de la dilución mayor (10^{-3}): resulta en 150,000, siendo este el NMP real, que es reportado ya sea en ml o en área de exposición como lo fue para esta investigación.

1.5 Características generales de los aceros empleados.

1.5.1 Aceros al carbono.

Las aleaciones de hierro y carbono que tienen desde una pequeña cantidad (aproximadamente 0,03%) a 1,2% de carbono y de un 0,25 a 1% de manganeso y menores cantidades de otros elementos (silicio, fósforo y azufre) reciben la denominación de aceros ordinarios al carbono o de bajo carbono (Flinn y Trojan, 1990).

Todos los aceros al carbono contienen manganeso, como un elemento de aleación para aumentar la resistencia mecánica. El contenido de manganeso de la mayoría de estos aceros varía entre 0,30 a 0,95%. Además contienen impurezas de azufre, fósforo, silicio y algunos otros elementos. Los aceros de bajo carbono tienen relativamente baja resistencia mecánica y alta ductilidad. Se utilizan para fabricar láminas destinadas a aplicaciones de conformado, tales como guardabarros y paneles de cuerpo para automóviles. A medida que el contenido de carbono aumenta, los aceros se hacen más resistentes mecánicamente pero menos dúctiles. Los aceros de medio carbono (1020-1040) se emplean para ejes y engranajes. Los aceros de alto carbono (1060-1095) se utilizan, por ejemplo, para ballestas, cuchillas y hojas de tijeras (Smith, 1993).

Los aceros tales como el 1018, se pueden utilizar con éxito si los requerimientos mecánicos no son demasiado severos. Estos aceros tienen algunas limitaciones (Ashby y Jones, 1980) tales como:

- No pueden ser forzados más allá de 100,000 psi (690 MPa) sin que se produzca una sustancial pérdida de ductilidad y resistencia a impactos.
- Tienen poca resistencia a la corrosión y oxidación.
- Tienen poca resistencia al impacto a bajas temperaturas.

1.5.2 Aceros inoxidables.

Los aceros inoxidables son materiales con una alta resistencia a la corrosión en muchos medios, y esto en buena medida se debe a su alto contenido de cromo. Típicamente son aleaciones base-hierro con un contenido mínimo de 10,5% de cromo. Con el incremento del contenido

de cromo y la presencia y variación del contenido de elementos diferentes (principalmente níquel, molibdeno, tungsteno, cobre, selenio, azufre, fósforo, nitrógeno, carbono, silicio, manganeso, etc.), el acero inoxidable puede ser provisto de un intervalo extraordinario de resistencias a la corrosión (Smith, 1993).

Los aceros inoxidables resisten la corrosión, debido a la formación de una película delgada, compacta, adherente y continua de óxido que protege efectivamente la superficie metálica. En general, hay cuatro familias básicas de aceros inoxidables: austeníticos, endurecidos por precipitación, martensíticos y ferríticos. En esta investigación se emplearon aceros de las tres primeras familias (Flinn y Trojan, 1990).

1.5.2.1 Aceros inoxidables austeníticos

Estos aceros son básicamente aleaciones terciarias Fe-Cr-Ni conteniendo entre 16 y 25% de Cr, y desde 7 a 20% de Ni. El acero 304 es la aleación más producida de la familia, encontrándosele en una amplísima variedad de aplicaciones esencialmente en equipos para procesos químicos y de la industria de alimentos (Sedriks, 1996). A su vez, este acero tiene buena resistencia a la corrosión y resiste casi todos los ácidos oxidantes, muchas soluciones esterilizadoras, la mayor parte de los compuestos químicos orgánicos y colorantes, así como una amplia variedad de compuestos químicos inorgánicos. Una de las debilidades del acero 304, es su susceptibilidad a compuestos que presenten cloruros, ya que estos inducen corrosión localizada (picaduras), (Mangonon, 2001).

1.5.2.2 Aceros endurecidos por precipitación

Los aceros endurecidos por precipitación fueron conocidos en los 1930s, y el primer material comercial, denominado Inoxidable W, no estuvo disponible hasta 1946. Los aceros endurecidos por precipitación se subdividen en austeníticos, semiausteníticos y martensíticos. Se emplean generalmente para la fabricación de alabes de turbinas y en la industria aeroespacial (Sedriks, 1996).

Los aceros tipo semiausteníticos como el 17-7PH, no se transformarán a martensita cuando se enfrían de la temperatura de austenitización porque la temperatura de transformación martensítica está por debajo de la temperatura ambiente. A estos aceros se le debe dar un tratamiento de acondicionamiento que consiste en calentarlos en el rango 732 a 954°C para precipitar carbono y/o elementos de aleación como carburos o compuestos intermetálicos.

Esto remueve elementos de aleación de la solución, desestabilizando así a la austenita, lo cual aumenta la temperatura de transformación martensítica, de tal forma que una estructura martensítica será obtenida durante enfriamiento a temperatura ambiente. Con un posterior tratamiento de envejecimiento entre 454 a 593°C, se tendrá un relevado de esfuerzos y martensita revenida, aumentando resistencia mecánica, la dureza, la ductilidad y la resistencia a la corrosión (www.linconelectric.com/pdfs/products).

1.5.2.3 Aceros inoxidable martensíticos

Son esencialmente aleaciones Fe-Cr que contienen del 12 al 17% de cromo con suficiente carbono (0,15 a 1,0%). Puesto que la composición de los aceros inoxidable martensíticos se ajusta para optimizar resistencia y dureza, la resistencia a la corrosión de estos aceros es relativamente pobre comparada con los otros tipos de inoxidable. El acero inoxidable con 12% de cromo es un acero inoxidable martensítico de baja resistencia y es un tipo de acero de aplicación general tratable térmicamente, usado para aplicaciones tales como piezas de máquinas, ejes de bombas y cerrojos. Los aceros inoxidable martensíticos son magnéticos, pueden trabajar en frío sin dificultad, especialmente los que tienen bajo contenido de carbono; pueden maquinarse satisfactoriamente, tienen buena tenacidad, buena resistencia a la corrosión atmosférica y a algunos agentes químicos (Sedriks, 1996). Su resistencia a la corrosión es considerable hasta temperaturas de 750 °C. Algunos ejemplos de este grupo son las aleaciones 403, 410, 510 y 520.

1.5.2.4 Superaleaciones

Desde el punto de vista de resistencia a la corrosión, es importante describir algunos materiales altamente aleados que contienen menos del 50% de hierro. Las superaleaciones son materiales basados en el contenido de níquel, cromo, hierro y cobalto. En general, se caracterizan por tener alta resistencia mecánica y a la corrosión. (Smith, 1993).

Las aleaciones denominadas 800, 600 y 690, son aleaciones Ni-Cr-Fe de propósito general para su aplicación en una variedad de condiciones en alta temperatura. Como no contienen molibdeno, no deben ser usados en condiciones que involucren agua de mar, donde la resistencia a la corrosión por picaduras y/o hendidura es un parámetro importante. Ciertas composiciones modificadas de estas aleaciones son empleadas en generadores de vapor de plantas nucleares enfriadas por agua ligera.

Por ejemplo, la aleación 800 es usada en Alemania en tuberías de vapor (Their, et al., 1969).

1.6 Proceso de pasivación

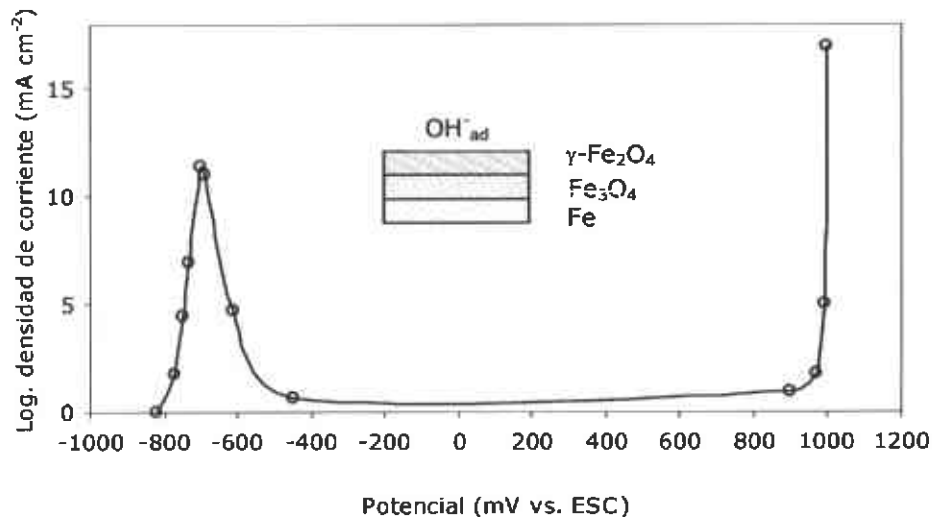
La pasividad es el estado de un metal o aleación donde la superficie está cubierta por una delgada, compacta y adherente película de óxido o hidróxido la cual protege al metal o aleación contra la corrosión.

Como un ejemplo, los aceros inoxidable tienen un uso tan amplio esencialmente debido a la estabilidad de la película de pasivación que se forma en su superficie. Sin embargo, la película de pasivación puede sufrir rompimientos debido al efecto, entre otros, de ambientes químicamente agresivos, y la pasividad se rompe y puede permitir varias formas de corrosión localizada (picadura, hendidura, corrosión bajo tensión). El entendimiento de factores que controlan la pasividad y su rompimiento son factores importantes para la protección de un material contra su deterioro (Marcus y Maurice, 2000).

1.6.1 Pasivación del acero al carbono

La composición de la película pasiva sobre el acero al carbono ha sido objeto de numerosos estudios. Los modelos propuestos involucran tanto capas sencillas como dobles conteniendo óxidos (Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) u oxihidróxidos e hidróxidos (FeOOH , $\text{Fe}(\text{OH})_2$) de hierro. Se ha reportado que para películas pasivas en solución buffer de borato (pH 8,4), el barrido del potencial pasa por valores altos en la región de pasivación, dando como resultado la formación de una doble capa donde el $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ está sobre el Fe_3O_4 como se muestra en la gráfica 9 (Nagayama y Cohen, 1963; MacDougall y Graham, 1995).

El grosor de la película sobre el acero al carbono incrementa con el potencial anódico a un valor límite de ≤ 5 nm cuando es formada en soluciones buffer de borato.



Gráfica 9. Curva anódica de polarización de un electrodo de hierro en una solución buffer de borato pH 8,4 (Nagayama y Cohen, 1963). El inserto muestra el modelo de doble capa de la composición de la película pasiva con la capa interior de Fe_3O_4 , y la exterior de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y grupos hidroxilo adsorbidos (MacDougall y Graham, 1995).

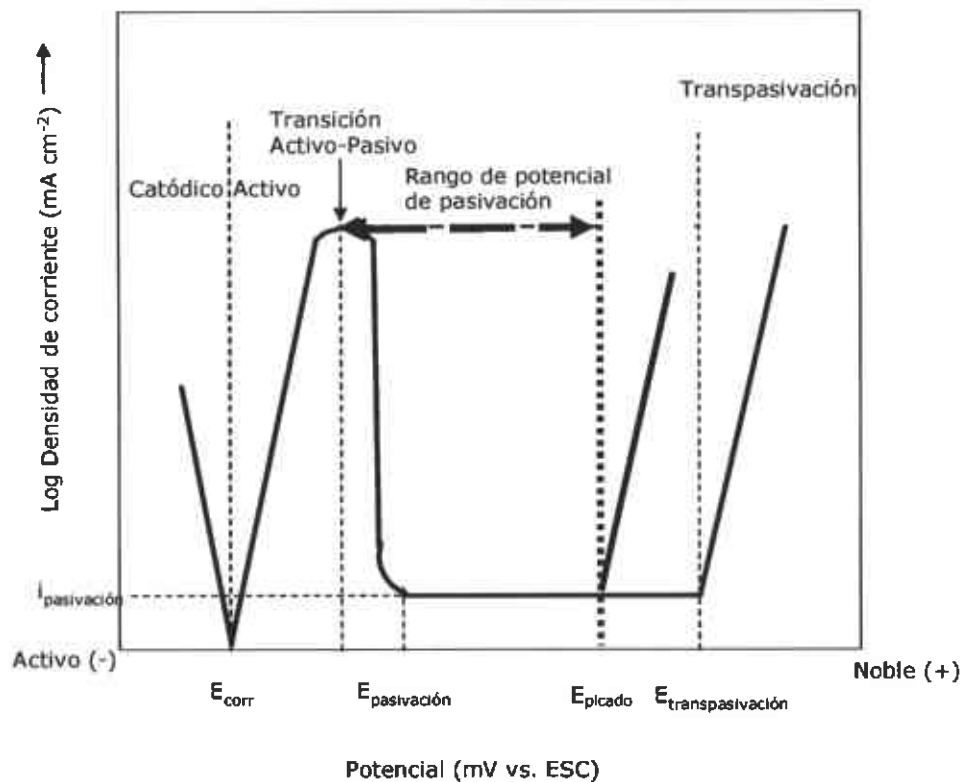
1.6.2 Pasivación del acero inoxidable

El mecanismo de resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables difiere de los aceros al carbono; ya que estos últimos presentan una capa protectora más gruesa y que puede ser observada a simple vista, mientras que los aceros inoxidables forman una película protectora muy delgada sobre su superficie. En el estado de protección, el acero inoxidable está pasivado. La resistencia a la corrosión depende de la integridad y durabilidad de la película pasivante. El rompimiento de la película conduce a corrosión localizada (Davis, 1996).

La pasividad existe bajo ciertas condiciones en ambientes particulares. El rango de condiciones sobre las cuales la pasividad puede ser mantenida depende del medio y sobre la familia y composición del acero inoxidable. Cuando las condiciones son favorables para que se mantenga la pasividad, el acero inoxidable exhibe extremadamente bajas velocidades de corrosión. Si la pasividad es destruida bajo condiciones que no permitan una repasivación, la velocidad de corrosión puede ser considerable debido al carácter localizado del ataque.

Por otra parte, es conocido que la presencia de oxígeno es esencial para estabilizar la capa pasiva del acero inoxidable. La resistencia es mejor cuando el acero es expuesto sin recubrimiento y si la superficie es mantenida libre de depósitos mediante un ambiente fluido hasta un cierto límite de velocidad de flujo (Davison y Redmond, 1990).

En la gráfica 10 se muestra como la densidad de corriente en la región catódica disminuye de acuerdo al incremento del potencial aplicado hasta llegar al potencial de corrosión, E_{corr} . En la región anódica, la densidad de corriente de corrosión se incrementa conforme aumenta el potencial hasta llegar al punto de transición de comportamiento activo-pasivo. El potencial en este punto se conoce como potencial crítico de pasivación, E_{crit} . Es común que ligeramente arriba de este potencial, se presenta una drástica caída de corriente, llegando a un valor muy bajo denominado corriente de pasivación, $i_{pasivación}$, (donde en general la velocidad de corrosión es muy baja) y el potencial correspondiente a este punto se conoce como potencial de pasivación, $E_{pasivación}$. El intervalo de valores de potencial donde la $i_{pasivación}$ permanece muy baja se denomina "rango de potencial de pasivación". Al finalizar el rango de pasivación, inicia el potencial de picado, E_{picado} , en el cual da inicio la nucleación de picaduras. Posteriormente, a potenciales más nobles se presenta el llamado potencial de transpasivación, $E_{transpasivación}$, donde también se presenta el desencadenamiento de la evolución de oxígeno gaseoso por electrolisis del agua (Sedriks, 1996).



Gráfica 10. Esquema de una curva de polarización para un acero inoxidable indicando las diferentes etapas de comportamiento activo-pasivo.

1.7 Fundamentos de la corrosión inducida por microorganismos (CIM).

La corrosión inducida por microorganismos (CIM) es también conocida como corrosión biológica, corrosión microbiana, corrosión bacteriana o biocorrosión (Borestein, 1994).

Se define como un proceso electroquímico donde la participación de los microorganismos es capaz de iniciar, facilitar o acelerar la reacción de deterioro, sin modificar su naturaleza electroquímica (Herro y Port, 1993).

Los microorganismos, de acuerdo a su resistencia y requerimientos de oxígeno, pueden ser clasificados en aerobios, como aquellos que resisten la presencia de oxígeno e incluso lo utilizan dentro de su metabolismo, y anaerobios, aquellos que no utilizan oxígeno en su metabolismo, y es incluso tóxico para las células microbianas (Ghaheri, 1999).

Si se toma en cuenta que cada microorganismo produce uno o más productos metabólicos de posible actividad corrosiva, se entiende que el medio circundante a la interfase metal-solución puede ser drásticamente modificado por su metabolismo. Generalmente la presencia microbiana es la resultante de asociaciones de diversas especies conocidas como consorcios, que actúan en forma sinérgica en la producción de efectos de corrosión, por lo que resulta fácil entender porqué situaciones de corrosión sumamente frecuentes en la práctica carecen aún de mecanismos que las interpreten o de sistemas de protección o prevención efectivos (Romero, 2003).

Hoy en día es claro que todo proceso de corrosión microbiológica involucra en forma activa tres elementos fundamentales: metal, solución y microorganismos (Videla, 1996).

De acuerdo con lo anterior, la corrosión microbiológica no es, fundamentalmente, diferente de algún otro tipo de corrosión electroquímica, simplemente se debe considerar que las condiciones fisicoquímicas que dan lugar al medio agresivo, son debido a los productos del metabolismo microbiológico (Stott, 1993).

Los procesos metabólicos de los microorganismos involucran las reacciones químicas para la generación de energía, a través de la asimilación de nutrientes que se encuentran en el medio circundante. Dichos procesos influyen el comportamiento de la corrosión de los

materiales metálicos, introduciendo o incrementando la heterogeneidad de la superficie metálica debido a (Pope, 2000):

- Destrucción de la película protectora de la superficie.
- Producción de ambientes ácidos localizados.
- Creación de depósitos corrosivos.
- Alteración de las reacciones anódicas y catódicas, dependiendo del ambiente y el o los microorganismos involucrados.
- Interferencia de los mecanismos de protección contra la corrosión.

No obstante lo anterior, se debe tener en cuenta que la simple presencia de microorganismos en un sistema, no necesariamente es indicativo de que ellos son causa de problemas, ya que las poblaciones de bacterias que son problemáticas en un sistema específico, pueden ser inocuas en otro sistema diferente (Romero, 2003). En términos generales, algunos de los microorganismos que la literatura reporta como comúnmente relacionados con los procesos de biocorrosión se muestran en la tabla 2 (Videla, 1996).

Tabla 3. Microorganismos asociados con biocorrosión

Género o Especie	Rango de pH	Rango de Temperatura (°C)	Requerimiento de oxígeno
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	4 - 8	10 - 40	Anaerobia
<i>Clostridium</i> sp	6 - 8	10 - 40	Anaerobia
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	0,5 - 8	10 - 40	Aerobia
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	1 - 7	10 - 40	Aerobia
<i>Gallionella ferruginea</i>	7 - 10	20 - 40	Aerobia
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	4 - 8	20 - 40	Aerobia

1.7.1 Destrucción de materiales influida por microorganismos.

La corrosión es de gran importancia en el daño de materiales y por consiguiente la destrucción de los materiales (Taylor et al., 1990).

Una serie de diferentes fenómenos y mecanismos de deterioro microbiológicamente influenciados se deben tomar en consideración. Los más importantes son los siguientes:

- Ataque por ácidos inorgánicos: Una serie de microorganismos específicos excretan ácido como parte de sus productos de metabolismo final (ácido sulfúrico o ácido nítrico); si este tipo de microorganismos crecen sobre un material capaz de reaccionar con el ácido, el deterioro puede ser una consecuencia (Gaylarde et al., 1991).
- El ácido sulfúrico es formado por bacterias del grupo *Acidithiobacillus*, estas bacterias son acidófilas o ácido tolerantes. Algunas especies son viables en medios de cultivo o ambientes naturales a pH menor de 1 (Sand y Bock, 1991).
- Ataque por ácidos orgánicos: Prácticamente todos los microorganismos excretan productos intermedios o finales de su metabolismo. Algunos son ácidos orgánicos que pueden reaccionar con los materiales. Aparte de ácidos débiles como el acético o cítrico, los microorganismos también excretan moléculas complejas como proteínas o polisacáridos que contienen grupos polares (ácido sulfónico como un ejemplo) y otros grupos similares (Reynolds et al., 1989).
- Ataque por ácido sulfhídrico (H₂S): Los microorganismos involucrados son del grupo de las bacterias sulfato y/o tiosulfato reductoras. Bajo condiciones de anaerobiosis, en las cuales ciertas bacterias se desarrollan, excretan ácido sulfhídrico como producto metabólico final. Este reacciona con iones del metal, formando generalmente precipitados insolubles de sulfuro metálico. Debido a la liberación de los iones metálicos de acuerdo a la solubilidad del producto, el material pierde continuamente iones metálicos que se precipitan como sulfuros. En el caso de los metales, este proceso causa deterioro, ya que se evita la formación de la capa de pasivación sobre el material (Jack, 1988).

Videla (1996) ha reportado que en un medio con una cantidad de 10⁴ bacterias sulfatorreductoras es indicativo que pueden aparecer problemas de corrosión en un periodo de tiempo muy corto.

1.8 Hipótesis

Los aceros empleados presentarán un comportamiento de corrosión uniforme en presencia de los microorganismos que pudieran desarrollarse en agua residual sintética sin inocular.

1.9 Justificación experimental

Los aceros comúnmente empleados en medios de agua residual son aceros al carbon e inoxidable austeníticos (tipo 304) y se estudian tanto de forma electroquímica y microbiológica por separado o en medios con microorganismos previamente identificados. Debido a esto, se realiza un estudio tanto electroquímico como microbiológico para una serie aceros con diferentes características microestructurales y de composición química, expuestos en condiciones de laboratorio a un medio sintético de agua residual sin inocular.

1.10 Objetivo principal

Evaluar el comportamiento electroquímico y la influencia de crecimiento microbiológico en los aceros 1018, 17-7PH, 304, 410 y 800 expuestos en agua residual sintética sin inóculo.

1.11 Objetivos particulares

- Determinar la velocidad de corrosión de estos aceros empleando la técnica de Resistencia a la Polarización (RP).
- Identificar el tipo de proceso electroquímico empleando la técnica electroquímica de Ruido Electroquímico (RE).
- Determinar la susceptibilidad a la corrosión localizada empleando la técnica de Curvas de Polarización Cíclica (CPC).
- Relacionar la concentración de microorganismos presentes en el agua residual sintética como posible agente de deterioro de estos materiales.

2. Metodología experimental

2.1 Materiales utilizados

2.1.1 Aceros

Los materiales de prueba en esta investigación, fueron los aceros 1018, 17-7PH, 304, 410 y 800. La tabla 3 muestra la composición química teórica de los mismos.

Tabla 4. Composición química teórica de los aceros empleados

Acero	Composición (%)										
	C	Fe	Mn	S	P	Cr	Ni	Si	Al	Ti	Cu
1018	0,18	98,9	0,75	0,05	0,04	-	-	-	-	-	-
17-7PH	0,07	73,6	0,7	-	-	17	7	0,4	1,15	-	-
304	0,08	70,8	2	0,030	0,045	18	8	1	-	-	-
410	0,15	85,2	1	0,030	0,040	12,5	-	1	-	-	-
800	0,1	42,9	1,5	0,015	-	21	32,5	1	0,6	0,6	0,75

2.1.2 Preparación del agua residual sintética

El agua residual sintética se elaboró disolviendo 5 g de materia orgánica previamente molida de comida canina (Purina®) por cada litro de agua potable de la red municipal para tener un medio adecuado de crecimiento bacteriano. La cantidad total de agua residual preparada fue de 70 litros. Nota: no hay reportes para la preparación de agua residual.

La caracterización del agua residual fue llevada a cabo en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, con los resultados que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Características del agua residual sintética

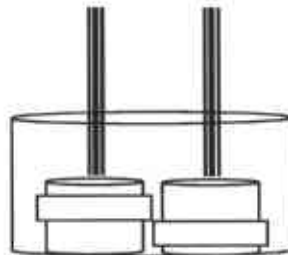
Parámetro	Concentración
Demanda Bioquímica de Oxígeno	776 ppm
Demanda Química de Oxígeno	1293 ppm
pH	8.1
Calcio	36 ppm
Alcalinidad (HCO ₃)	55 ppm
Cloruro (Cl ⁻)	10 ppm
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	46 ppm

El agua residual no fue inoculada con algún género bacteriano, para de esta manera recuperar solo los microorganismos que en determinado momento se desarrollen, estén presentes y tengan alguna posible relación con el comportamiento de los de aceros empleados.

2.1.3 Preparación de los sensores de corrosión.

1. Los materiales empleados fueron en forma de varillas, las cuales fueron cortadas en pequeños cilindros de 1,27 cm Ø por 1 cm y 0,635 cm Ø por 1 cm para el 410.
2. Se les colocó una conexión eléctrica de alambre de cobre aislado sujeto por una banda de plástico. Así mismo esta banda prevenía el contacto entre los cilindros.
3. Se colocaron dentro de moldes tubulares para ser encapsulados con resina epóxica, con un tiempo del secado de 24 horas.
4. Una vez secas, se extrajeron de los moldes y se desbastaron con lijas de carburo de silicio (SiC) en una secuencia de #400, #600, #800 y #1200 hasta obtener una superficie homogénea.

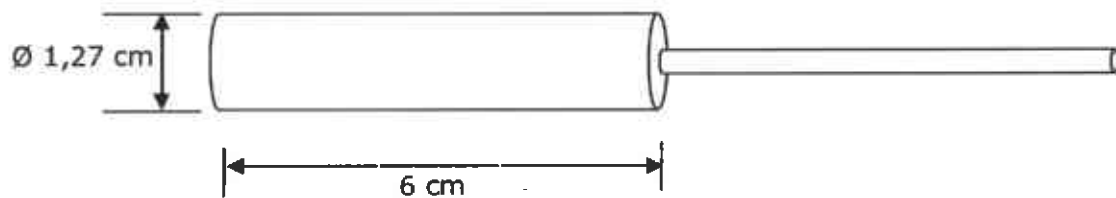
El esquema 7 muestra un diagrama de los sensores de corrosión empleados.



Esquema 7. Diagrama de los sensores en arreglo de dos electrodos idénticos

2.1.4 Probetas para la recuperación de microorganismos

Las probetas para recuperación de microorganismos fueron varillas con mismo diámetro y una altura de 6 y 11 cm. A las varillas se les realizó una perforación en una de las caras y se les atornilló una varilla de acero inoxidable para su colocación en un porta muestras (placa angular de acero inoxidable) que las mantendría sujetas e inmersas 5 y 10 cm con la finalidad de tener un área de exposición de 20 cm². El esquema 8 muestra un diagrama esquemático de las probetas empleadas.



Esquema 8. Probeta para recuperación de microorganismos

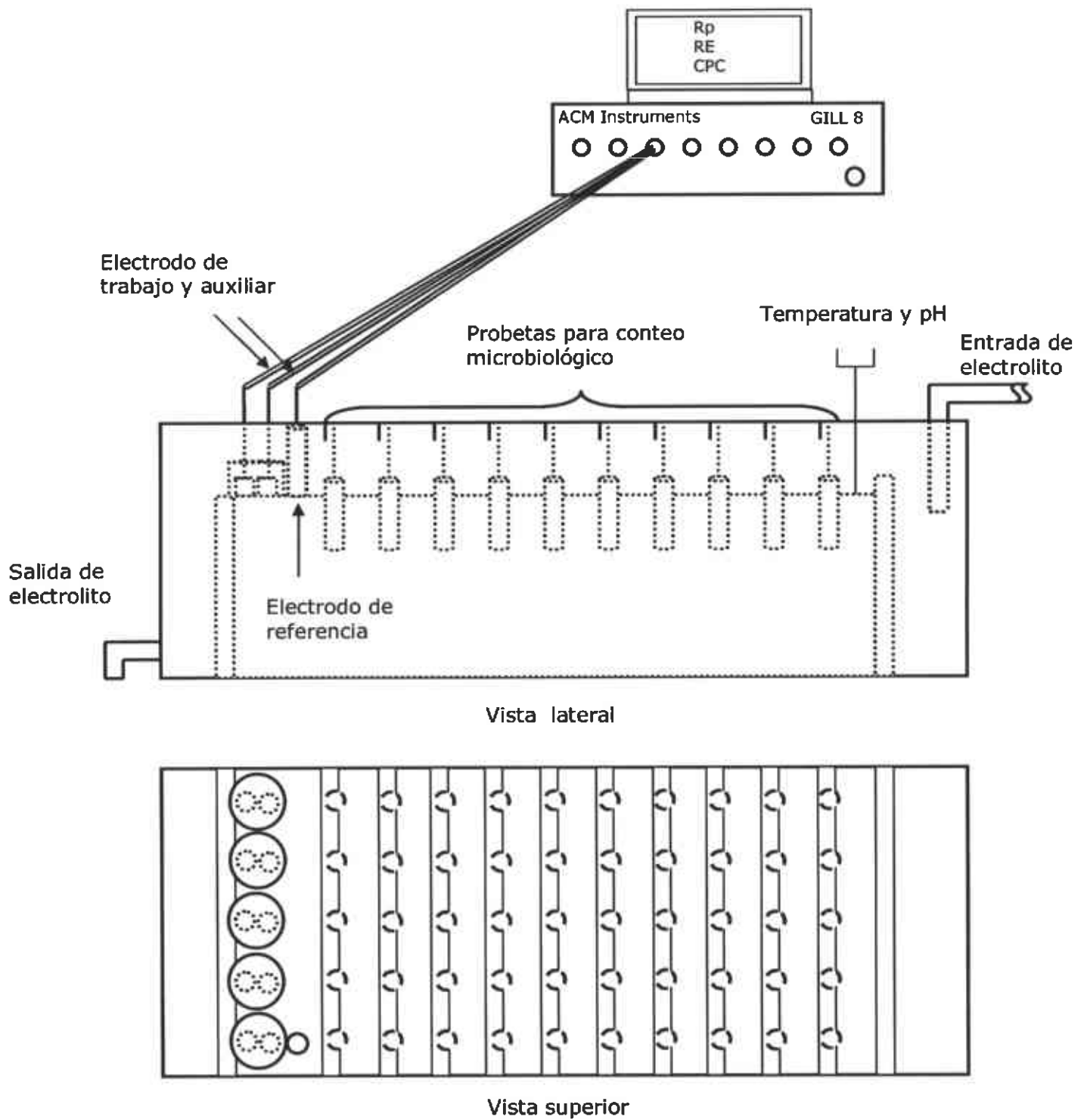
2.1.5 Sistema experimental de exposición

El sistema experimental de exposición se presenta en el esquema 9, en el cual se muestra un contenedor para la colocación de los electrodos y las probetas para recuperación de microorganismos (anteriormente descritas). Estas probetas fueron una sección de cada uno de los aceros y dispuestos de tal forma que estuviera inmersa un área de 20 cm²; con la finalidad de reportar Número Más Probable (NMP) de bacterias por unidad de área. El tiempo de exposición de 90 días. El conteo microbiológico y monitoreo electroquímico fue cada 9 días. El contenedor se diseñó de tal forma que permitiera tener la recirculación del electrolito, el cual llevaba una velocidad de 5 L/min. Esto fue con la finalidad de evitar condiciones de estancamiento al simular un flujo por una tubería.

2.1.6 Medios de cultivo para el conteo de microorganismos

2.1.6.1 Medio de cultivo Cetrimide®

Se utilizó el medio de Cetrimide® marca Bioxon® que es un medio específico para el crecimiento de *Pseudomonas aeruginosa*, este medio ya viene preparado para ser empleado.



Esquema 9. Diagrama del sistema experimental.

2.1.6.2 Medio de cultivo Postgate B

Este medio es específico para bacterias sulfato-reductoras (BSR). Los reactivos de este medio son los siguientes: difosfato de potasio (KH_2PO_4), cloruro de amonio (NH_4Cl), sulfato de calcio (CaSO_4), sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), lactato de sodio, extracto de lavadura, ácido ascórbico, ácido tioglicólico y sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (Postgate, 1979) de la marca comercial J.T. Baker®.

2.1.6.3 Medio de cultivo iron-oxidizing

Este medio es específico para bacterias oxidadoras de hierro (BOH). Los reactivos de este medio son los siguientes: sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), difosfato de potasio (KH_2PO_4), sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), cloruro de potasio (KCl), nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y ácido sulfúrico 10 Normal (H_2SO_4 10N) (Atlas, 1997) de la marca comercial J.T. Baker®

La preparación de estos medios se encuentra en el Apéndice A1.

2.2 Desarrollo experimental

Como se ilustra en esquema 9, una vez colocados los sensores y las probetas para recuperación de microorganismos y preparada el agua residual sintética, se procedió iniciar la exposición de los aceros dejando correr el agua residual por una duración de 90 días.

2.2.1 Pruebas electroquímicas

Cada 9 días se realizó el monitoreo electroquímico con un equipo ACM Instruments Potenciostato Galvanostato Amperímetro de Resistencia Cero GILL 8, con la siguiente secuencia: resistencia a la polarización; seguido de ruido electroquímico y finalmente con curvas de polarización cíclica iniciando con el acero 1018, luego el 17-7PH, siguiendo con el 304, continuando con el 410 para terminar con el 800. Se procedió de esta forma debido a que tanto resistencia a la polarización como ruido electroquímico son técnicas que no perturban la estabilidad del sistema con la introducción de variables externas como lo son voltaje o corriente, y proporcionan la información electroquímica del sistema en equilibrio, mientras que las curvas de polarización si perturban el sistema obligándolo a que actúe dependiendo del rango de barrido de

valores de voltaje que se tiene establecido. El electrodo de referencia empleado fue un electrodo de calomel saturado (ECS). Y como se indico en la sección anterior; los electrodos de trabajo y auxiliar fueron del mismo material.

Tabla 6. Parámetros de las técnicas electroquímicas

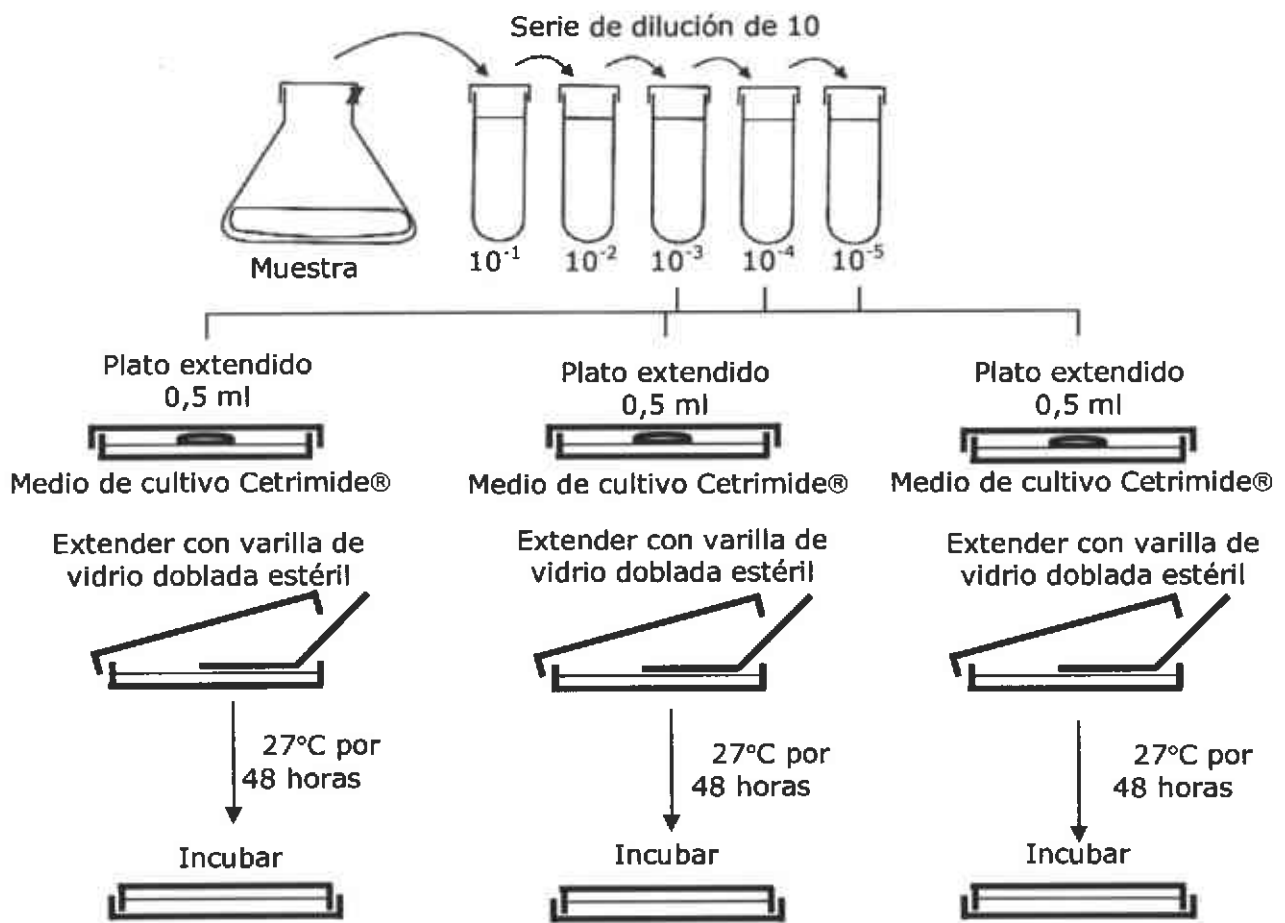
Técnica	Parámetros
Resistencia a la polarización	Potencial barrido con respecto a E_{corr} : ± 20 mV, velocidad de barrido: 10 mV/min.
Ruido electroquímico	Una lectura de potencial y corriente por segundo durante 2048 segundos.
Curvas de polarización cíclica	Potencial de barrido con respecto a E_{corr} : ± 1 V, velocidad de barrido: 90 mV/min.

2.2.2 Recuperación y estimación de NMP de microorganismos

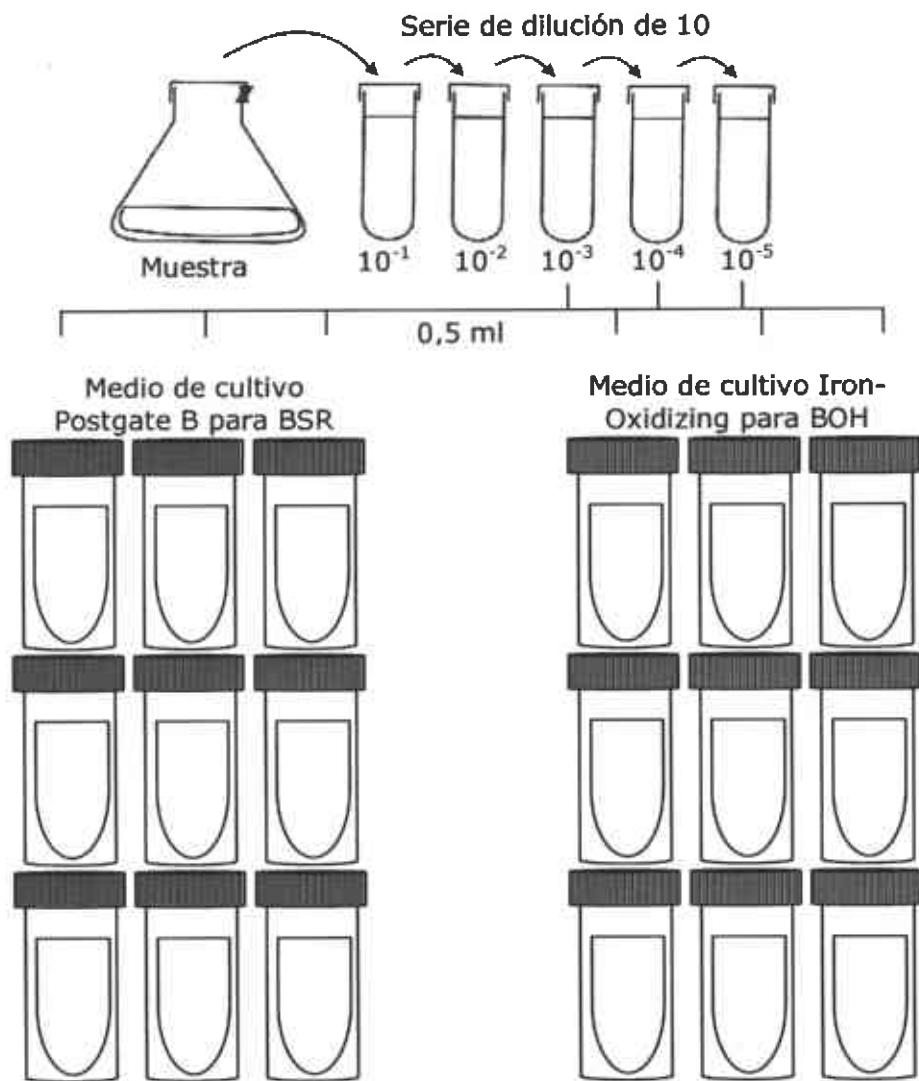
La recuperación de microorganismos se realizó retirando de los porta probetas cada una de ellas a tiempos específicos, y enjuagándolas en el interior de un matraz Erlen-Meyer el cual contenía agua bidestilada.

Para efectuar una predicción del número más probable (NMP) de microorganismos, se emplearon 5 diluciones, de las cuales, sólo las diluciones 10^{-3} , 10^{-4} y 10^{-5} fueron seleccionadas para obtener NMP, como se muestra en el esquema 10 para *Pseudomonas aeruginosa*.

Para la predicción de NMP de bacterias sulfatorreductoras (BSR) y bacterias oxidadoras de hierro (BOH), se empleó el mismo método, solo que los medio de cultivo fueron los específicos para ellas y era en caldo; como se puede observar en el esquema 11.



Esquema 10. NMP para el conteo de *Pseudomonas aeruginosa*.



Incubar con
agitación a 70 rpm
a 30°C por 28 días

Esquema 11. NMP para conteo de BSR y BOH.

Este método se realizó de acuerdo a lo publicado por Videla en 1996. La obtención de turbidez en los caldos después de la incubación fue tomada como positiva. En el medio sólido la presencia de crecimiento de textura cerosa fue tomada como positiva.

2.2.3 Obtención del NMP de microorganismos

El método de NMP de microorganismos se llevo a cabo de la siguiente manera:

Después de cada periodo de incubación, se toman las cajas de Petri con el crecimiento de *Pseudomonas aeruginosa*, los caldos de cultivo de BSR y BOH, y se procede a hacer la lectura correspondiente de la siguiente manera: de cada caja o vial, se hace anotación de cuantos medios de cultivo fueron positivos para cada dilución. La estimación de NMP que se obtiene esta relacionado con la combinación de cultivos positivos. Este valor se multiplica por el inverso de la dilución mayor y así se conoce el número más probable de microorganismos en unidades de NMP/ml (NOM-112-SSA1-1994), o por área de exposición como se realizó para esta investigación.

2.2.4 Medición de pH y temperatura

La medición del pH se realizó extrayendo 100 ml del agua residual sintética sin inóculo en un vaso de precipitado y era llevada a otro laboratorio en donde se hacía la medición. Para medir la temperatura, se introdujo un termómetro en el agua residual sintética sin inóculo y se mantuvo de esa forma durante el tiempo de la exposición.

2.2.5 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Como parte complementaria para las técnicas electroquímicas y microbiológicas, se tomaron fotografías electrónicas de barrido al final de la exposición a cada uno de los materiales estudiados. Con la finalidad de observar la presencia o ausencia de algún tipo de daño en la superficie de los aceros.

2.3 Equipos empleados para obtención de resultados.

Potenciostato - Galvanostato ACR GILL 8, ACM Instruments.

Con este equipo y su software asociado, se realizaron las técnicas electroquímicas empleadas en este trabajo, es decir: RP, RE y CPC.

Microscopio Electrónico de Barrido Jeol/JSM/5800/LV operando con un voltaje de aceleración de 15 kV.

Incubadora VWR Mod. 1535 e Incubadora con agitación SI-600.

Medidor de pH ORION Mod. 370.

Termómetro de mercurio Lloyd's Register Quality Company® con un rango de -10 a 260°C.

3. Resultados y Discusión

Los resultados que a continuación se presentan, fueron obtenidos bajo las condiciones experimentales detalladas en el capítulo II, realizadas por duplicado.

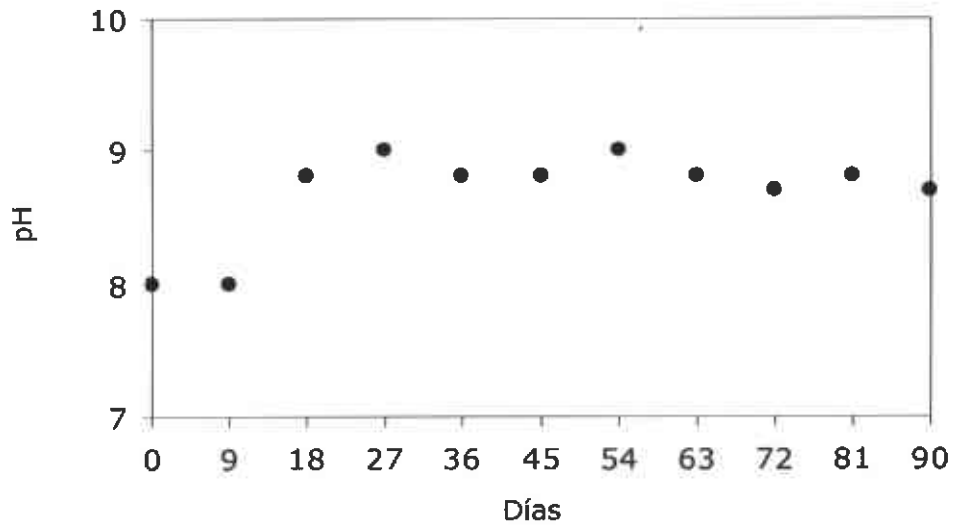
3.1 Agua residual sintética, valores de pH y temperatura

La fotografía 1 muestra el agua residual sintética desarrollada para esta investigación.



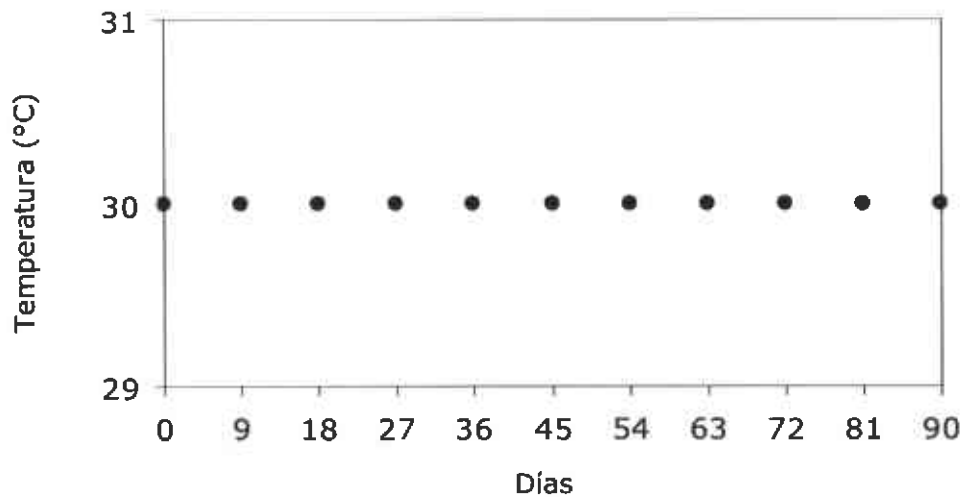
Fotografía 1. Agua residual sintética.

Las gráficas 11 y 12 muestran los valores de pH y temperatura (respectivamente) registrados durante los monitoreos.



Gráfica 11. Valores de pH durante el monitoreo.

Los valores de pH se mantuvieron en valores alcalinos, indicando que la presencia de microorganismos no fue significativa para lograr una acidificación del medio y que este fenómeno estuviera involucrado en el proceso de corrosión de acuerdo a lo reportado por Eashwar et al. (1993).

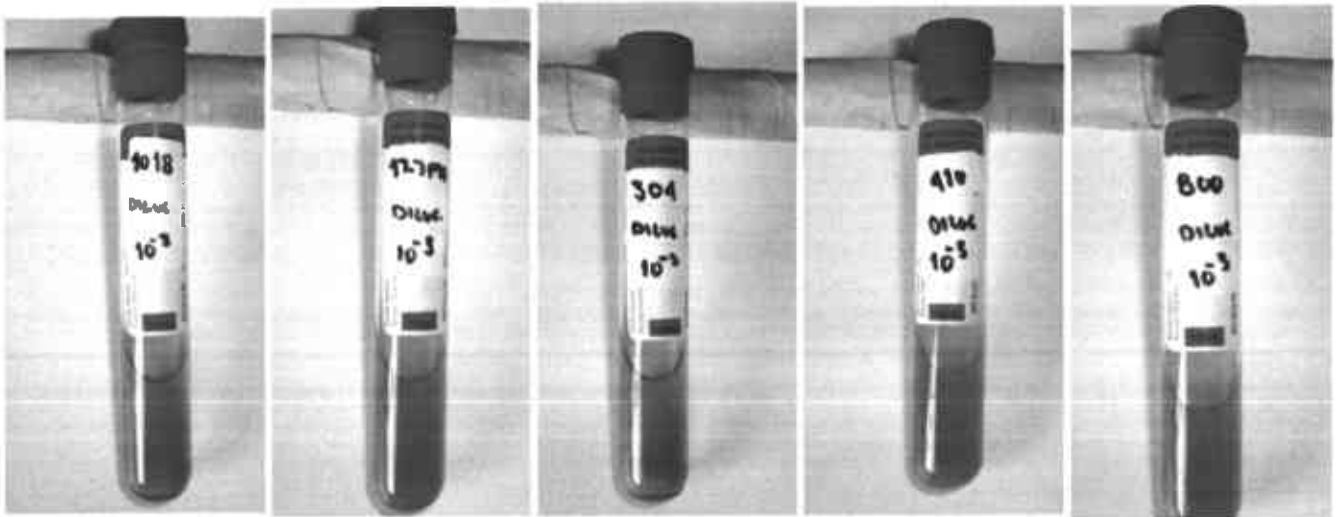


Gráfica 12. Valores de la temperatura (°C) durante el monitoreo.

La temperatura se mantuvo en 30 °C durante el tiempo de exposición, esta temperatura registrada es adecuada para el crecimiento óptimo de una gran variedad de microorganismos como se menciona en la tabla 3.

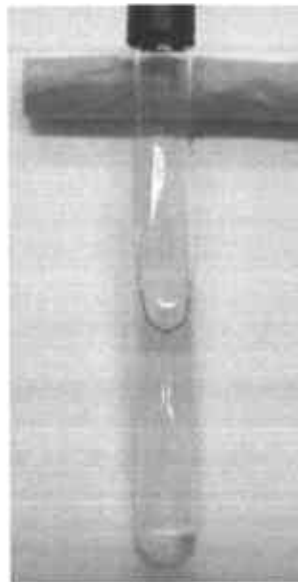
3.2 Número más probable (NMP)

La fotografía 2 muestra el crecimiento de bacterias sulfatorreductoras en el medio Postgate B de cada uno de los aceros estudiados.



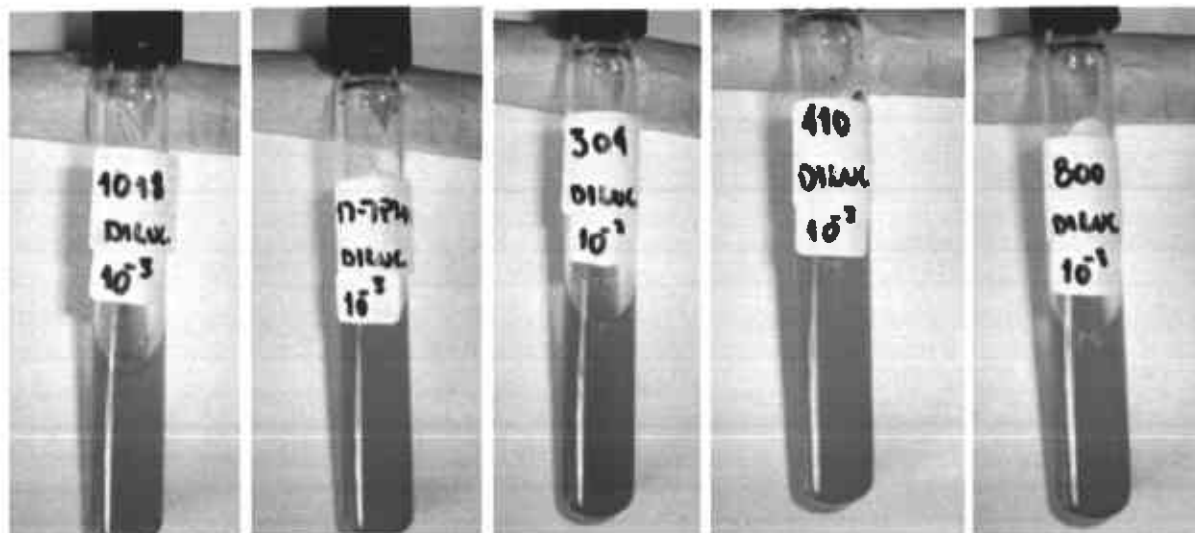
Fotografía 2. Crecimiento de BSR para cada acero estudiado.

En la fotografía 3 se puede observar el medio de cultivo Postgate B sin crecimiento bacteriano.



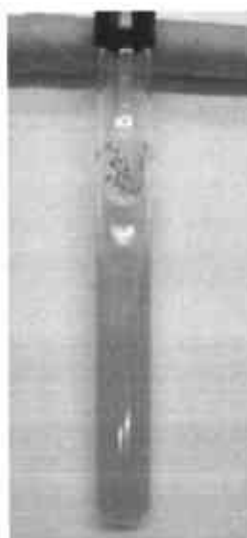
Fotografía 3. Medio de cultivo Postgate B para BSR sin crecimiento.

La fotografía 4 muestra el crecimiento de bacterias oxidadoras de hierro en el medio Iron-Oxidizer de cada uno de los aceros estudiados.



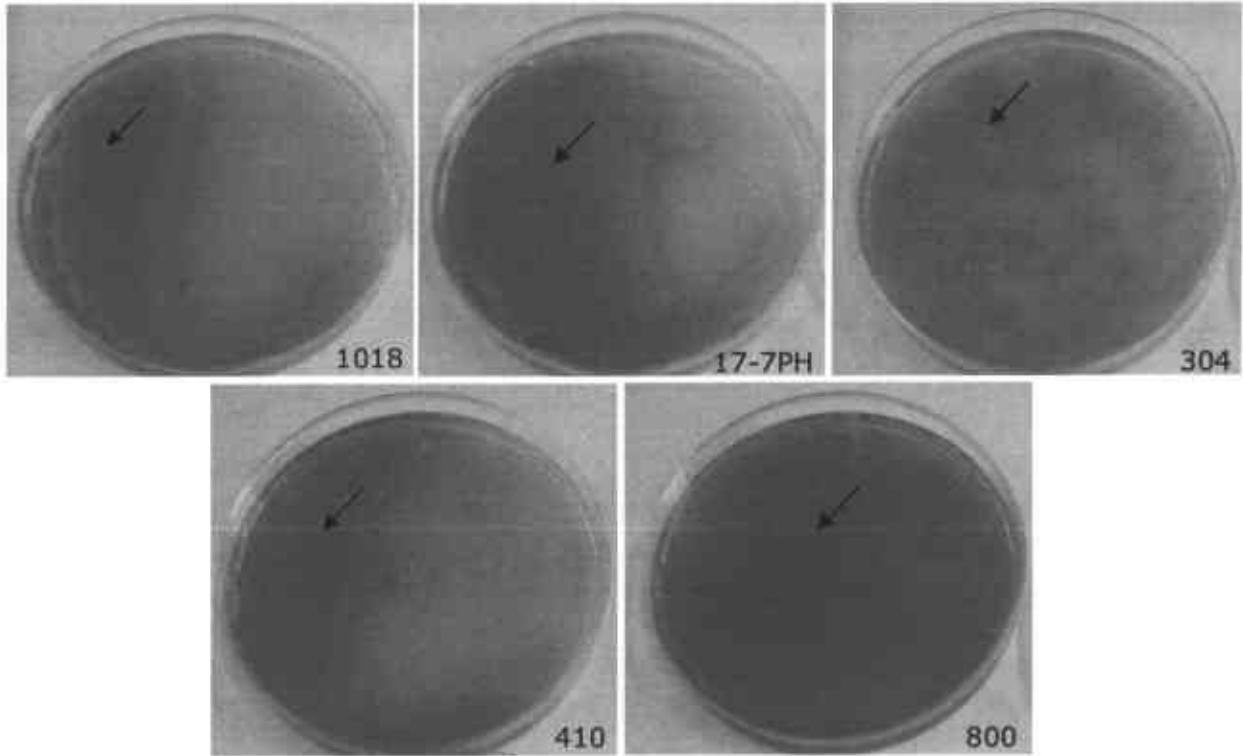
Fotografía 4. Crecimiento de BOH para cada uno de los aceros estudiados.

En la fotografía 5 se puede observar el medio de cultivo Iron-Oxidizer sin crecimiento.



Fotografía 5. Medio de cultivo Iron-Oxidizer para BOH sin crecimiento.

La fotografía 6 muestra la zona del crecimiento (flecha) de *Pseudomonas aeruginosa* en el medio Cetrimide® para cada uno de los aceros estudiados de la dilución 10^{-3} .



Fotografía 6. Crecimiento de *Pseudomonas aeruginosa* de la dilución 10^{-3} para cada acero estudiado.

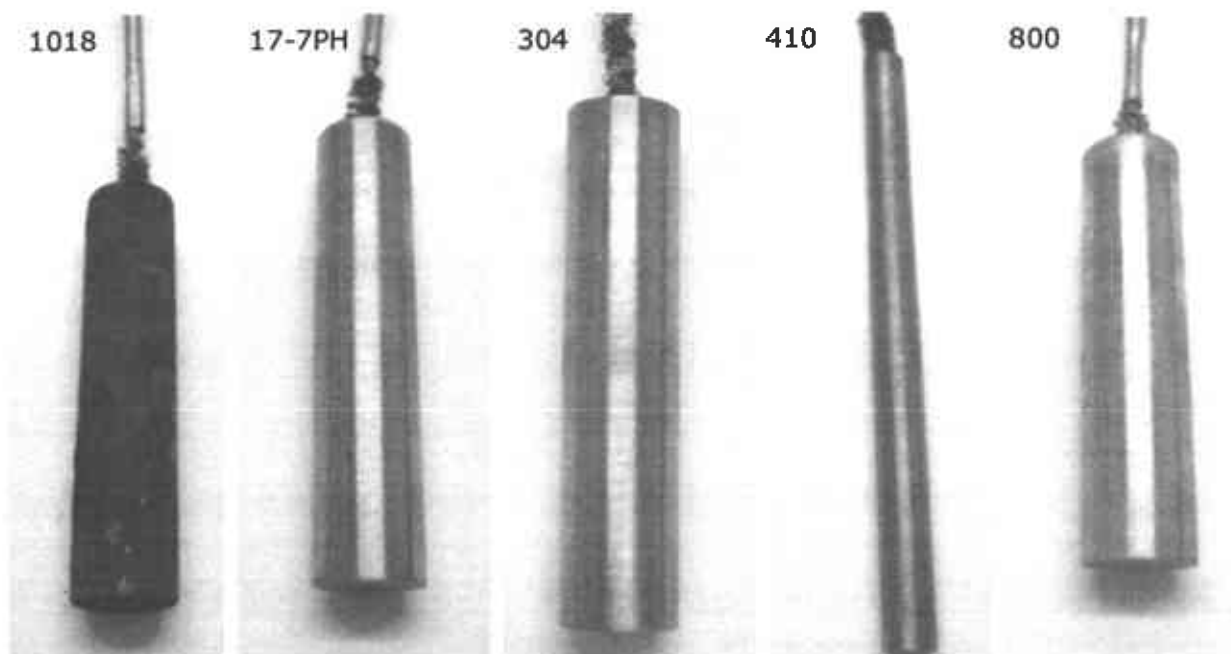
En la fotografía 7 a continuación, se observa el medio de cultivo Cetrimide® sin crecimiento.



Fotografía 7. Medio de cultivo Cetrimide® para *Pseudomonas aeruginosa* sin crecimiento.

3.3 Probetas para recuperación de microorganismos después de 90 días

La fotografía 8 muestra las probetas de recuperación de microorganismos después de 90 días de exposición.



Fotografía 8. Probetas de recuperación de microorganismos para cada acero estudiado después de 90 días de exposición.

Como se puede observar, el acero 1018 presenta sobre su superficie una capa de productos de corrosión después de 90 días de exposición al agua residual sintética.

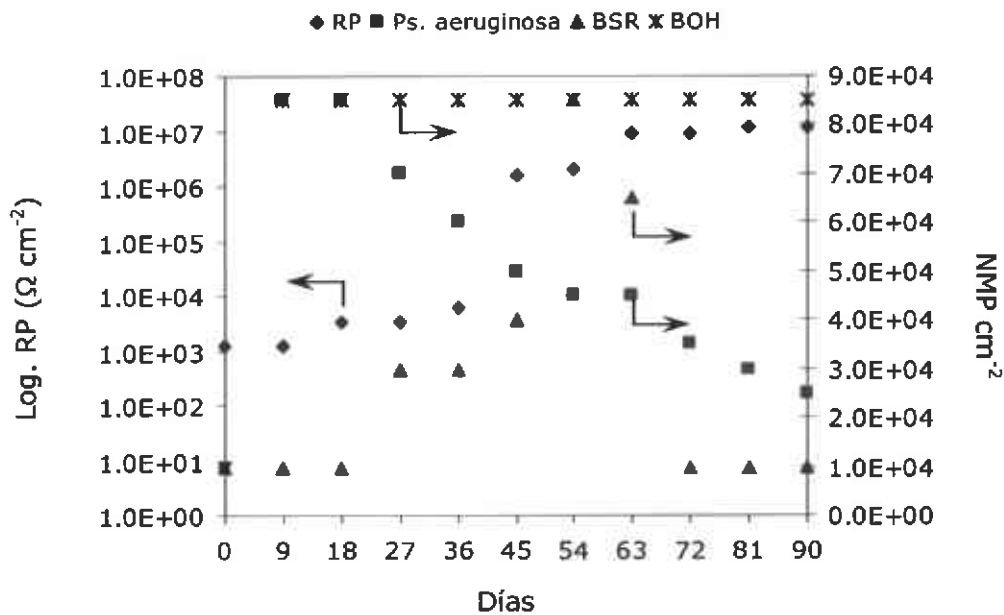
En cambio, los aceros inoxidable 17-7PH, 304 y 410 presentaron solo la pérdida del brillo natural y un manchado superficial, pero sin evidencia visual de deterioro.

De manera similar, el acero 800 presentó pérdida del brillo natural y también manchado superficial, sin haber daño aparente.

La apariencia final de los aceros concuerda con lo reportado por Corbett (2001), donde la decoloración superficial del material es un problema muy común en la industria farmacéutica, en la superficie interior de unidades de destilación de agua de alta pureza, tanques de almacenamiento, sistemas de distribución (tuberías, válvulas, bombas, etc.).

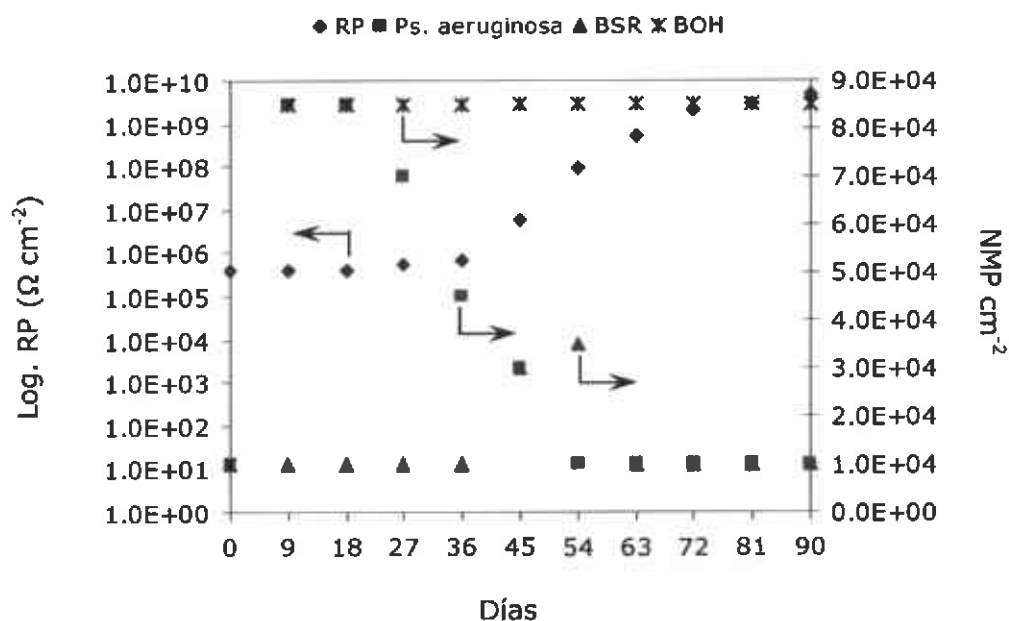
3.4 Resistencia a la polarización (RP) vs. número más probable (NMP)

Los valores del logaritmo de la resistencia a la polarización (RP) fueron graficados contra NMP para determinar si hay o no alguna relación de la presencia de microorganismos con la resistencia del material.



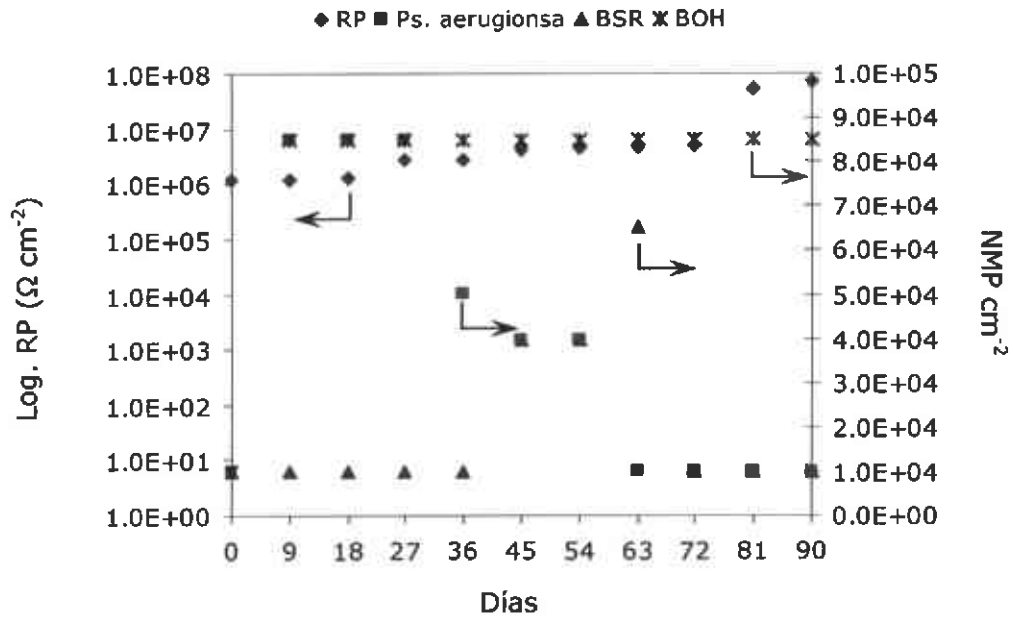
Gráfica 13. RP vs. NMP del acero 1018.

El acero 1018 presentó un aumento en la resistencia a la polarización durante el tiempo que estuvo expuesto al medio sintético. La concentración de bacterias de la especie *Pseudomonas aeruginosa* (*Ps. aeruginosa*) presentó una disminución después del primer día de contabilización, las bacterias sulfatorreductoras (BSR) presentan su máximo crecimiento al día 54 para luego disminuir considerablemente durante el transcurso de la prueba. Por otra parte, las bacterias oxidadoras de hierro (BOH), presentaron estabilidad de la población microbiana durante el transcurso de la exposición, lo que supondría una mayor susceptibilidad de este tipo de acero para que este tipo de bacteria crezca su superficie. Esto sugiere que la RP no se vio alterada por la presencia de bacterias durante el tiempo de exposición (gráfica 13).



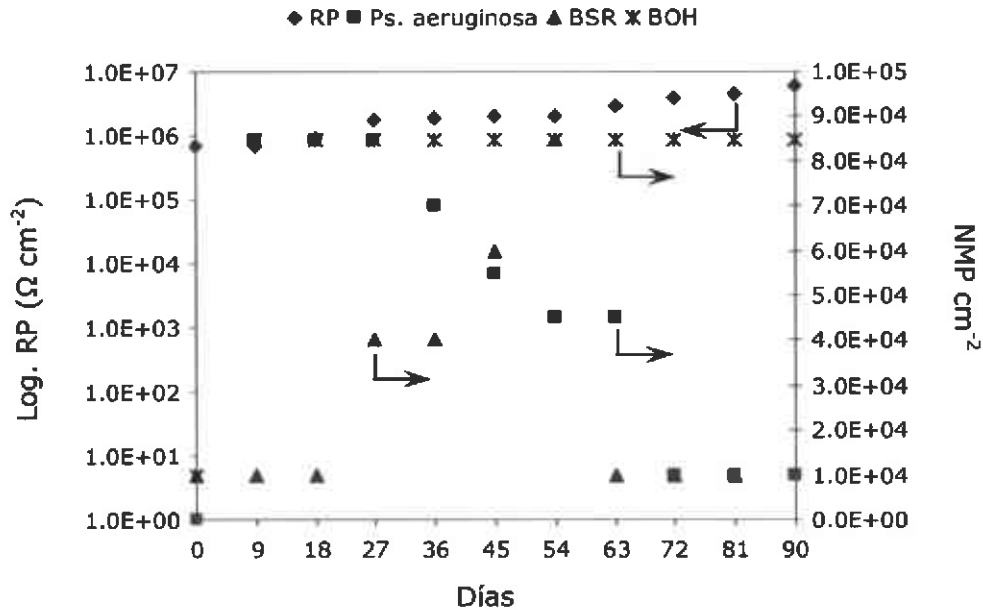
Gráfica 14. RP vs. NMP del acero 17-7PH.

El acero 17-7PH presentó un aumento en su resistencia a la polarización durante los 90 días que estuvo expuesto al medio sintético. Este incremento podría indicar de que el material se cubrió de una capa pasiva (óxidos de hierro y cromo principalmente) infiriéndole la propiedad de protección al medio. La concentración de bacterias de la especie *Pseudomonas aeruginosa* en este acero presentó una disminución después del primer día de contabilización; las bacterias sulfatorreductoras presentan su máximo crecimiento al día 54 para luego disminuir considerablemente el resto de los días, y las bacterias oxidadoras de hierro, presentan una estabilidad de la población microbiana durante el transcurso de la exposición. En general, la RP siguió aumentando en presencia de microorganismos (gráfica 14).



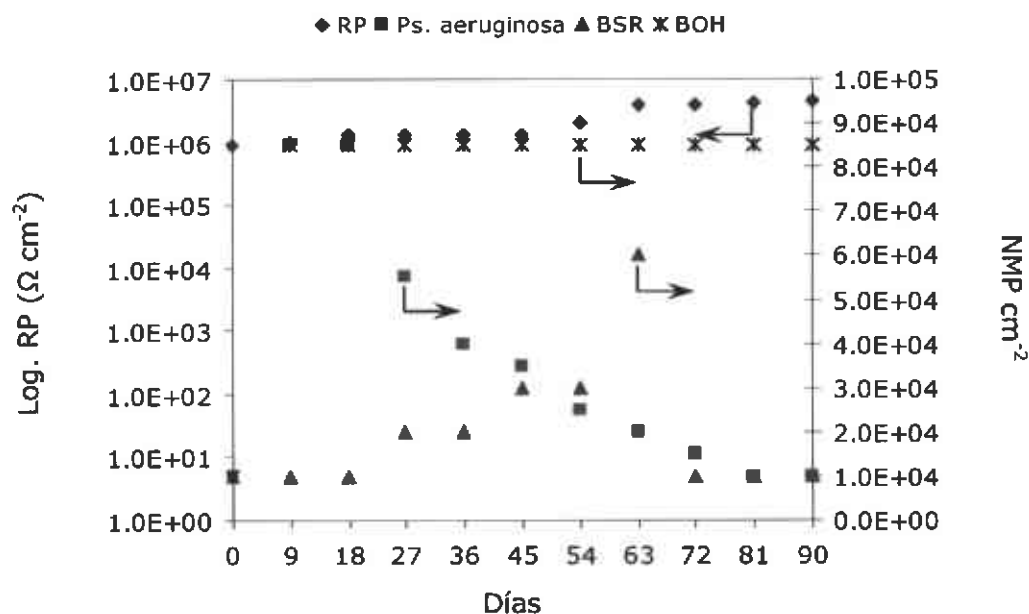
Gráfica 15. RP vs. NMP del acero 304.

El acero 304 presentó un aumento en su resistencia a la polarización durante el tiempo de experimentación. La concentración de bacterias oxidadoras de hierro presentó una progresión constante durante el tiempo de exposición, mientras que tanto las sulfatorreductoras como *Pseudomonas aeruginosa* presentaron aumento y caída en su crecimiento (gráfica 15).



Gráfica 16. RP vs. NMP del acero 410.

La resistencia a la polarización del acero 410 aumentó conforme el paso del tiempo de exposición en el agua residual sintética. Este incremento en la resistencia indica que presentó una capa de pasivación o protectora ante el medio en el que estuvo expuesto. La presencia de bacterias no fue significativa para que se pudiera considerar como factor de influencia en la corrosión del acero 410. Al igual que en los aceros anteriores, las bacterias que permanecen con un crecimiento constante fueron las oxidadoras de hierro. *Pseudomonas aeruginosa* y las bacterias sulfatorreductoras, no logran permanecer con un crecimiento constante (gráfica 16).



Gráfica 17. RP vs. NMP del acero 800.

La resistencia a la polarización del acero 800, al igual que la de las otras aleaciones, también registró un aumento en función del tiempo de exposición. La concentración microbiológica presente en este acero tuvo un constante crecimiento de las bacterias oxidadoras de hierro, al igual que en los otros aceros. Sin embargo, tanto *Pseudomonas aeruginosa* como las sulfatorreductoras presentaron decremento en su crecimiento (gráfica 17).

De acuerdo a lo mencionado por Videla (1996), en que la presencia de BSR en una concentración de 10^4 bacterias es indicativo de un daño a corto plazo, todos los aceros estudiados aquí se verían en problemas por

bacterias sulfatorreductoras en este medio. Sin embargo, bajo las condiciones del presente estudio, quizás el acabado superficial de los aceros no fue el adecuado para tener indicios de daño superficial.

Los aceros empleados presentaron aumento de la resistencia a la polarización durante su exposición, a diferencia de los reportes de Shi et al. (2003) debido a la presencia de *Leptothrix discophora* en el acero 316L; George et al. (2003) con *Pseudomonas* sp. para el acero 304; Romero (2003) con bacterias como *Vibrio hollisae*, *Alteromonas macleodii*, *Ferrimonas balearica* y *Aeromonas enteropelogenes* sobre el acero API 5L X52; Torres (2002) con *Desulfotomaculum nigrificans* para el acero 304 y Angell y Urbanic (2000) con *Desulfotomaculum nigrificans* y *Pseudomonas aeruginosa* sobre los aceros 800 y 825.

Por otra parte, Jeffrey y Melchers (2003) observaron, que los consorcios bacterianos tienen un lugar importante en la corrosión uniforme de aceros al carbono en ambientes marinos, donde la oxidación del hierro a formas de óxido y esto a compuestos sulfurados son los procesos que aparecen en el acero bajo condiciones marinas. Pesic (2001) reportó que hay una relación directa en el crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en un proceso de deterioro a valores de pH de 1-4, donde la resistencia de mayor valor que obtuvieron fue a pH 3. La influencia de *Pseudomonas aeruginosa* en la corrosión del acero 304 en una solución buffer que contenía NaCl 0,5M disminuía la resistencia a corrosión localizada de este material. Esto era debido a la formación de microhendiduras formadas debajo de los depósitos biológicos y a la muy delgada película de pasivación debida a la producción de metabolitos agresivos (Morales et al., 1993). El estudio realizado por Da Silva et al. (2002), determinó que la presencia de la enzima hidrogenasa de la bacteria *Ralstonia eutropha* tiene un efecto directo sobre la transferencia de electrones del acero a la enzima. Los autores sugieren que este proceso puede ser considerado como un fenómeno de despolarización catódica. La corrosión microbiana de aceros inoxidables en agua potable es el resultado de varios efectos sinérgicos, incluyendo el potencial de pasivación y la formación de depósitos de oxihidróxido de hierro, de acuerdo a lo reportado por Chamristki et al. (2001).

Por otra parte, hay estudios que proporcionan evidencia de que las bacterias pueden evitar o reducir el proceso de deterioro de los aceros, como el reportado por Dubiel et al. (2002), donde se comenta que la respiración bacteriana puede reducir la velocidad de corrosión de un acero, ya que la reducción de iones férricos a ferrosos y el aumento del consumo de oxígeno, son procesos de consecuencias directas de la respiración microbiana; Kielemoes et al. (2002) reportaron que no hubo

evidencia de biocorrosión en un acero 316L durante su experimentación. De los resultados obtenidos por Werner et al. (1997), las BSR tienen muy poco efecto sobre el potencial de picado del que se esperaba y encontraron que las biopelículas tenían propiedades inhibitorias de corrosión. En el estudio realizado por Nagiub y Mansfeld (2001), se reporta la inhibición de la corrosión en acero al carbono e inoxidable debido a la presencia de contaminación bacteriana empleando diversas técnicas electroquímicas.

De lo anteriores estudios y el presente trabajo, podemos inferir que es razonable no generalizar el concepto de que necesariamente una presencia bacteriana incide de manera negativa en el comportamiento de un material dado, ya que las condiciones experimentales de cada estudio en particular, son de la mayor relevancia.

La tabla 7 muestra los valores de velocidad de corrosión promedio para los aceros estudiados.

Tabla 7. Velocidad de corrosión promedio para cada acero

Acero	Velocidad de corrosión promedio (mm año⁻¹)
1018	2,07E-02
17-7PH	2,34E-04
304	9,30E-05
410	1,60E-04
800	1,49E-04

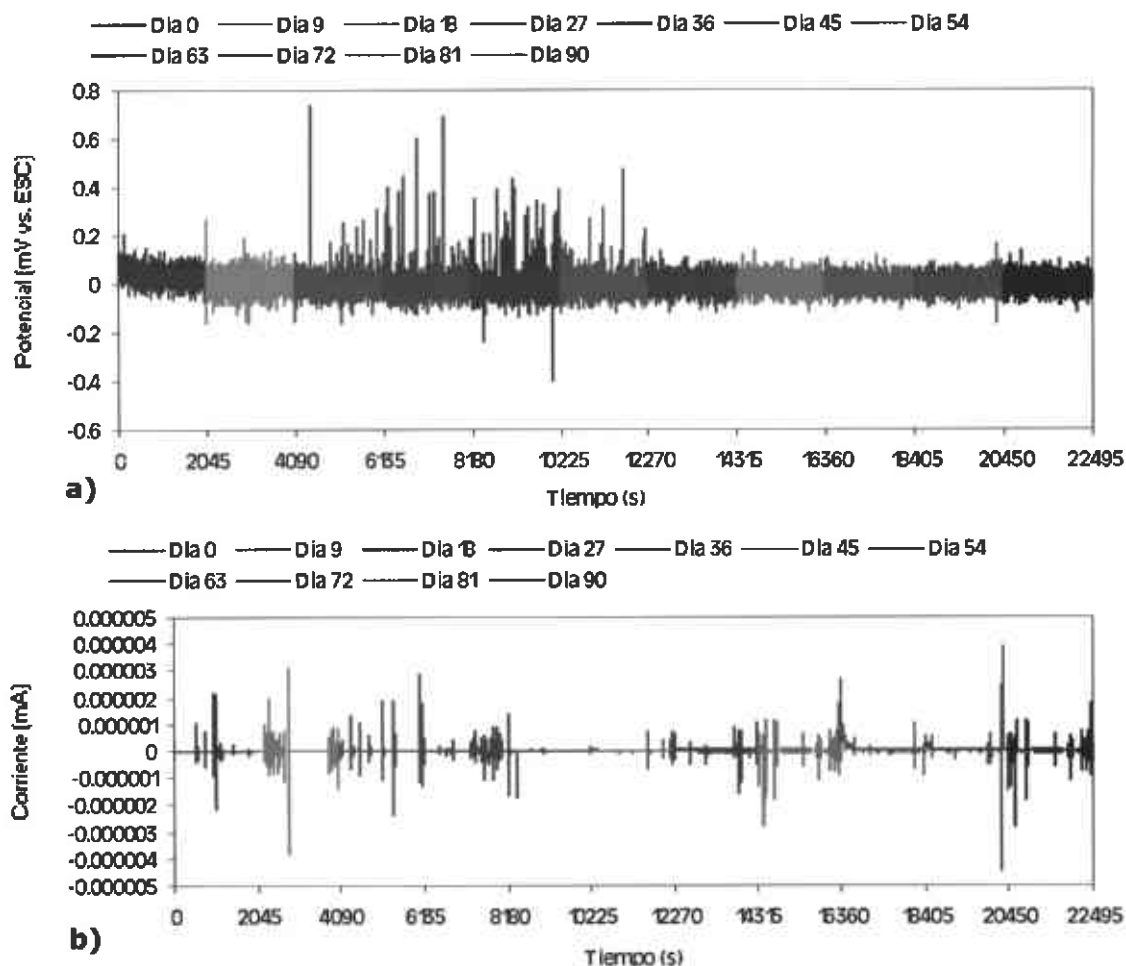
El valor de la velocidad de corrosión del acero al carbono, concuerda con lo reportado por Hernández et al. (2004) pero en la etapa inicial de su experimentación, ya que posteriormente aumenta. Este comportamiento pudo ser explicado debido a que el electrolito que ellos emplearon era un medio de cultivo puro de BSR, en donde la actividad microbiana es mayor. Por otra parte, las velocidades de corrosión obtenidas para los aceros 1018 y 304, Tabla 5, concuerdan muy bien con los resultados de campo reportados por Tuthill (1995), empleando cupones de prueba.

De los resultados de la tabla 5, los valores de velocidad de corrosión de los aceros inoxidables fueron mayores que los reportados por Gaona (1999) en un medio de baja conductividad como lo es agua destilada y bajo condiciones de corrosión asistida por esfuerzo (CAE). Esto puede indicar que el electrolito empleado presenta mayor agresividad que el agua destilada. También, es interesante observar que la velocidad de

corrosión del acero 800, a pesar de su mayor contenido de aleación, es muy parecida a la de los aceros inoxidable. De alguna forma este resultado o concuerda con lo reportado por Schweitzer (1996) donde menciona que la resistencia a la corrosión del acero 800 cae entre la de los aceros 304 y 316 en medios acuosos.

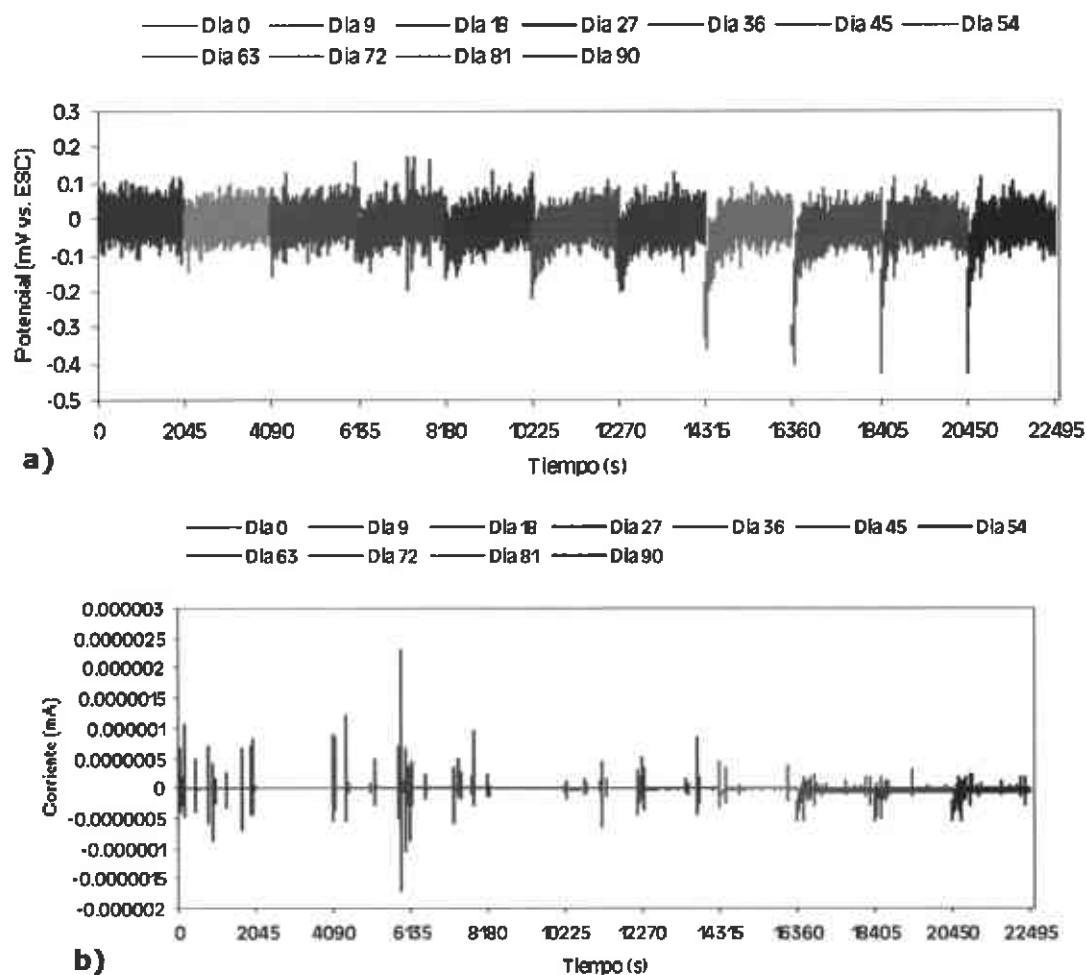
3.5 Ruido electroquímico (RE)

Las gráficas 18 a 22 muestran el comportamiento de las señales de RE (después de la remoción de la tendencia de corriente directa como se explicó en la sección 1.3.3.1.1) para los diferentes materiales.



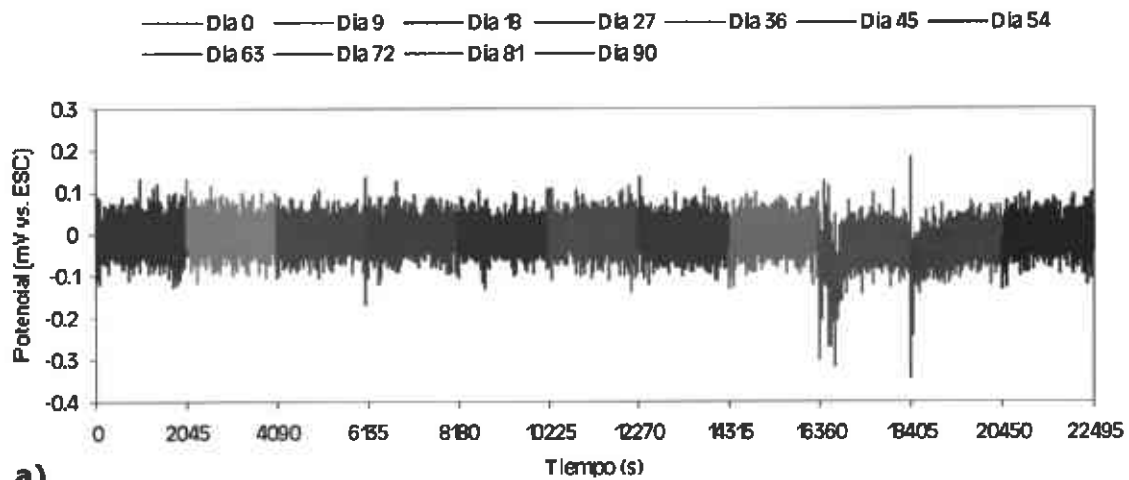
Gráfica 18. Ruido electroquímico del acero 1018.
a) ruido en potencial y b) ruido en corriente.

El acero 1018 (gráfica 18) presentó una amplitud de voltaje alrededor de ± 0.2 mV (tomando como línea base 0 mV) para el comportamiento general de los datos obtenidos cada monitoreo. Este rango de la amplitud es indicativo de un proceso electroquímico de corrosión no localizada, esto es debido a que no hubo presencia de señales transitorias que rigen una activación con rompimiento de la pasivación. Esto concuerda con lo reportado por Legat y Zevnik en 1993 en toda la serie de medio que ellos emplearon, a diferencia de lo que obtuvieron tanto Brossia y Cragnolino (2000), y Roberge et al. (1989); quienes reportaron corrosión localizada para aceros al carbono en agua subterránea y cloruro de sodio al 3% respectivamente.

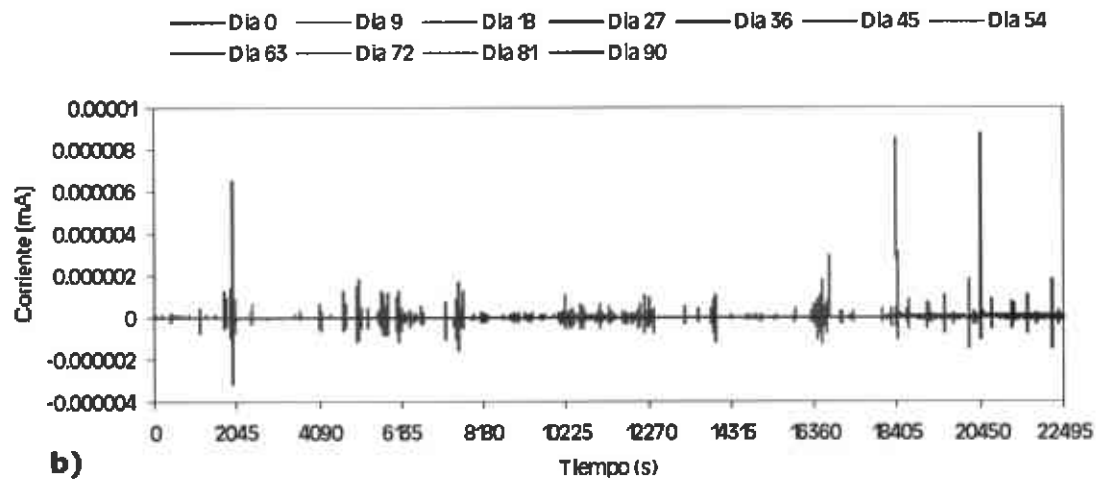


Gráfica 19. Ruido electroquímico para el acero 17-7PH.
a) ruido en potencial y b) ruido en corriente.

El acero 17-7PH presentó una amplitud de voltaje de ± 0.1 mV con respecto a su línea base de 0.0 mV, para el comportamiento general de los datos obtenidos en cada monitoreo; con respecto a la corriente, se amplitud fue mantenida alrededor de ± 0.000005 mA, con respecto al grueso de los datos. No hubo indicio de señales de corrosión localizada.



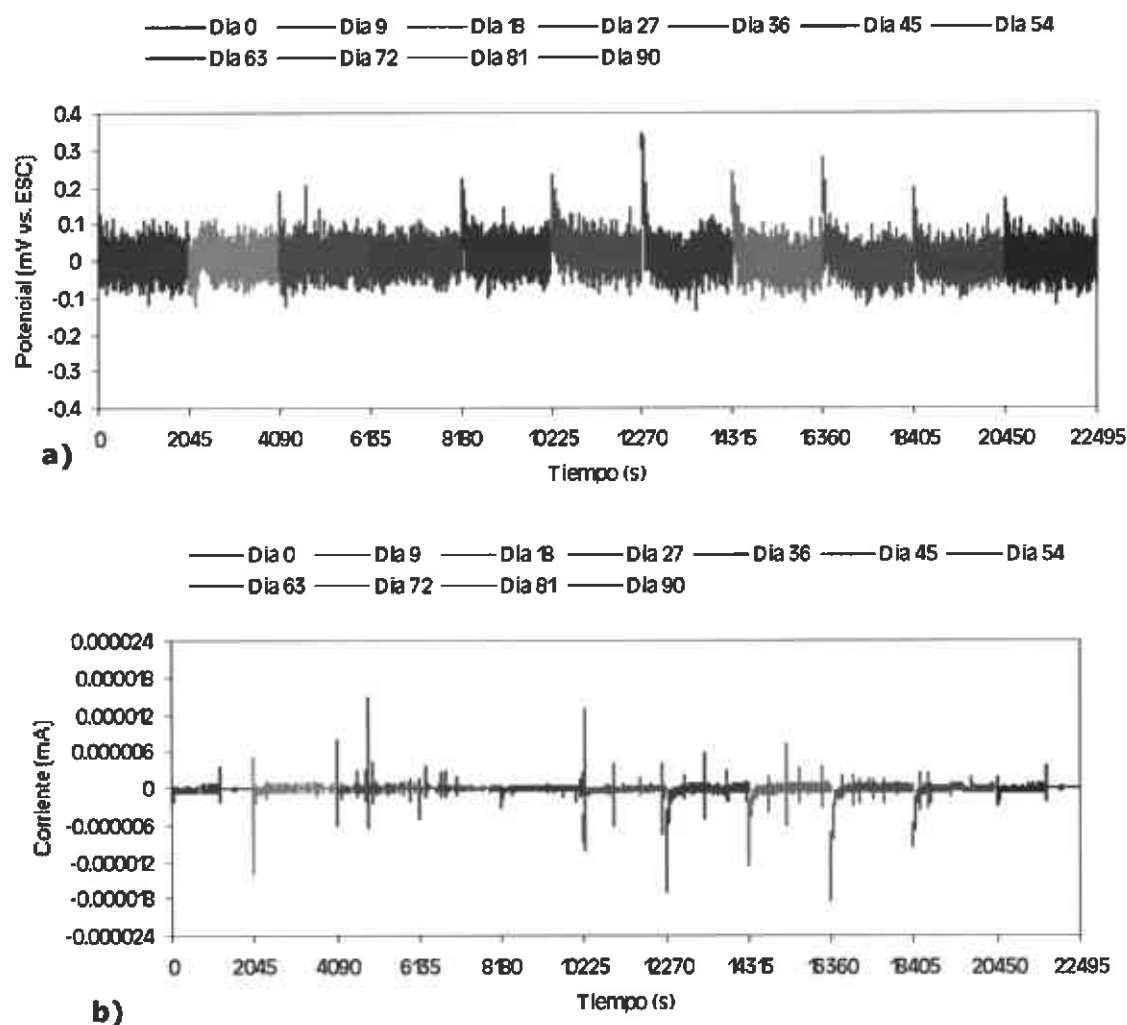
a)



b)

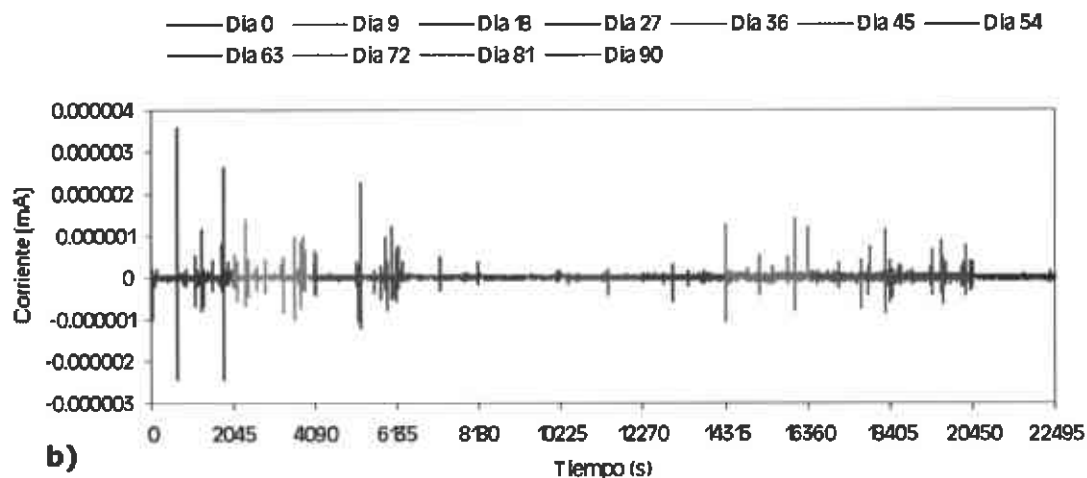
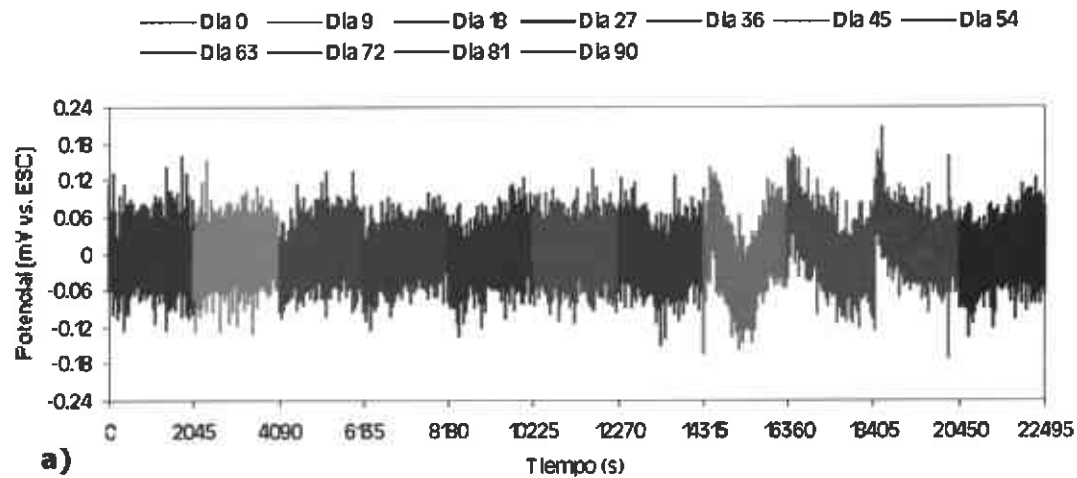
Gráfica 20. Ruido electroquímico para el acero 304.
a) ruido en potencial y b) ruido en corriente.

La amplitud de potencial para el acero 304 (gráfica 20) fue de ± 0.1 mV y la amplitud de corriente fue ± 0.000002 mA con respecto al total de los datos obtenidos. Sin embargo, no se encontraron señales que pudieran indicar la formación de corrosión localizada.



Gráfica 21. Ruido electroquímico para el acero 410.
a) ruido en potencial y b) ruido en corriente.

El acero 410 no presentó señales indicativas de corrosión localizada a lo largo de la exposición en el medio sintético. La amplitud de voltaje se presentó entre ± 0.1 mV y la amplitud de la corriente fue de ± 0.0000006 mA (gráfica 21).



Gráfica 22. Ruido electroquímico para el acero 800.
a) ruido en potencial y b) ruido en corriente.

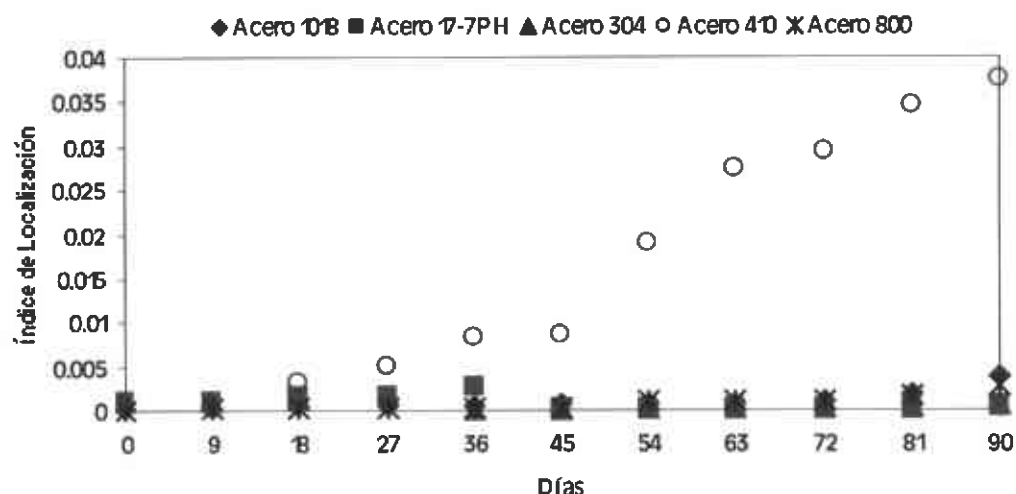
La superaleación 800 (gráfica 22) presentó datos de comportamiento que no corresponden a un proceso de corrosión localizada, a diferencia de los resultados de Elshawesh et al. (2003) que reportaron un proceso de corrosión localizada en tubería de acero inoxidable 304 en condiciones de agua potable estancada. En los reportes de Kaneko e Isaacs (2000); MacDonald et al. (2000), en medios como bromuro y cloruro de litio; agua supercrítica respectivamente, el resultado también fue de corrosión por picadura.

Legat y Zevnik (1993) reportaron un proceso de pasivación para el acero 302, en un medio de NaOH 0,1%. Mientras que en medios como ácido sulfúrico y cloruro de sodio encontraron procesos de corrosión uniforme y picadura, respectivamente.

3.5.1 Índice de localización (IL)

Como se mencionó en la sección 1.3.3.1.2, el IL es un criterio que define la desviación estándar de las señales de corriente dividida entre la raíz cuadrada del promedio de las mismas señales. Se realizó como parte del análisis de los datos de RE para corroborar el tipo de proceso de corrosión que se está llevando a cabo en el día monitoreado.

La gráfica 23 muestra los resultados obtenidos para cada material de estudio.



De manera general, los aceros 1018 y 800 presentaron comportamientos similares, con valores de IL del orden de 0.001 a 0.0015 en promedio, y con una tendencia a aumentar a partir del día de exposición 72 para el acero 1018 y del día 45 para el acero 800.

Una tendencia similar se observó para el acero 410 aunque aquí la diferencia en valor promedio de IL fue de un orden de magnitud mayor que para los aceros arriba mencionados.

El comportamiento de IL para los aceros 17-7PH y 304 fue muy parecido y dentro de los mismos ordenes de magnitud, incrementando su valor y alcanzando un máximo a los 36 días para el 17-7PH y a los 27 días de

exposición para el 304. Después de los períodos señalados, IL cayó a valores significativamente bajos mostrando una muy ligera tendencia a aumentar hacia el final de la prueba.

De acuerdo a lo reportado por Eden (1987), el IL para los aceros estudiados entran en el rango de tendencia hacia un proceso de corrosión uniforme, ya que dichos valores obtenidos están por debajo de 0,001. Sin embargo, la excepción fue dada por el acero 410 (figura 61) el cual presentó una tendencia hacia un proceso mixto, es decir en rangos entre 0,001 y 0,1. Esto pudiera ser indicativo que el acero 410 es más susceptible a ser afectado por el tipo de medio empleado en el presente trabajo.

Los rangos de valores de IL obtenidos para los aceros estudiados difieren del estudio reportado por Romero (2003), quién obtuvo valores de IL del orden de 0.9–1.0 muy cercanas al fenómeno de corrosión localizada. Romero trabajó con un acero API 5L X52 típicamente empleado en la industria petrolera y relacionó el daño observado con la presencia de bacterias del género *Ferrimonas balearica*. En el estudio realizado por Towley, et al. (2002), se reportaron índices de localización cercanos a 1 en el acero 1018 en un medio de agua potable. Ramírez et al. (2001), registraron un índice de localización aproximado al índice que marca corrosión por picado en un ambiente marino simulado para el acero 1018, a diferencia de lo reportado arriba para un acero similar (1018) empleado aquí. De nuevo, esto confirma el efecto del medio ambiente para un material dado.

3.5.2 Comparación entre resistencia en ruido (RR) y resistencia a la polarización (RP)

En las tablas 8 a 12 muestran los valores de resistencia en ruido y resistencia a la polarización de cada uno de los aceros estudiados.

Tabla 8. Valores de resistencia en ruido y resistencia a la polarización para el acero 1018

Acero 1018	Resistencia en ruido (RR) (Ohm cm⁻²)	Resistencia a la polarización (RP) (Ohm cm⁻²)
Día 0	1.00E+04	1.02E+03
Día 9	1.03E+04	1.22E+03
Día 18	1.05E+05	3.30E+03
Día 27	1.20E+05	3.50E+03
Día 36	3.18E+05	3.50E+03
Día 45	1.16E+06	1.50E+06
Día 54	1.16E+06	1.90E+06
Día 63	5.28E+06	8.50E+06
Día 72	9.85E+06	8.60E+06
Día 81	1.58E+07	1.10E+07
Día 90	1.66E+08	1.10E+07

Tabla 9. Valores de resistencia en ruido y resistencia a la polarización para el acero 17-7PH

Acero 17-7PH	Resistencia en ruido (RR) (Ohm cm⁻²)	Resistencia a la polarización (RP) (Ohm cm⁻²)
Día 0	1.01E+06	3.02E+05
Día 9	1.10E+06	3.82E+05
Día 18	1.23E+06	4.21E+05
Día 27	1.60E+06	5.66E+05
Día 36	3.00E+06	6.77E+05
Día 45	5.20E+06	5.60E+06
Día 54	8.50E+06	1.25E+06
Día 63	8.80E+06	5.00E+08
Día 72	1.20E+07	2.10E+09
Día 81	1.30E+07	2.90E+09
Día 90	2.00E+07	5.00E+09

Tabla 10. Valores de resistencia en ruido y resistencia a la polarización para el acero 304

Acero 304	Resistencia en ruido (RR) (Ohm cm⁻²)	Resistencia a la polarización (RP) (Ohm cm⁻²)
Día 0	1.08E+05	1.04E+06
Día 9	1.18E+05	1.40E+06
Día 18	1.81E+05	1.42E+06
Día 27	2.22E+05	3.82E+06
Día 36	2.85E+05	3.83E+06
Día 45	3.29E+05	3.85E+06
Día 54	3.40E+05	3.87E+06
Día 63	3.97E+05	3.90E+06
Día 72	7.17E+05	4.94E+06
Día 81	9.04E+05	5.27E+07
Día 90	1.46E+06	7.36E+07

Tabla 11. Valores de resistencia en ruido y resistencia a la polarización para el acero 410

Acero 410	Resistencia en ruido (RR) (Ohm cm⁻²)	Resistencia a la polarización (RP) (Ohm cm⁻²)
Día 0	5.05E+03	1.02E+05
Día 9	5.50E+03	1.92E+05
Día 18	9.32E+03	7.00E+05
Día 27	1.12E+04	9.00E+05
Día 36	1.25E+04	1.74E+06
Día 45	2.99E+04	2.00E+06
Día 54	3.51E+04	2.10E+06
Día 63	3.75E+04	3.00E+06
Día 72	6.13E+04	4.00E+06
Día 81	1.62E+05	4.50E+06
Día 90	5.82E+05	6.00E+06

Tabla 12. Valores de resistencia en ruido y resistencia a la polarización para el acero 800

Acero 800	Resistencia en ruido (RR) (Ohm cm⁻²)	Resistencia a la polarización (RP) (Ohm cm⁻²)
Día 0	1.09E+06	9.00E+05
Día 9	1.19E+06	1.00E+06
Día 18	3.15E+06	1.30E+06
Día 27	3.17E+06	1.30E+06
Día 36	3.57E+06	1.30E+06
Día 45	3.94E+06	1.30E+06
Día 54	5.24E+06	2.00E+06
Día 63	7.02E+06	3.80E+06
Día 72	7.29E+06	4.00E+06
Día 81	7.81E+06	4.30E+06
Día 90	1.11E+07	4.50E+06

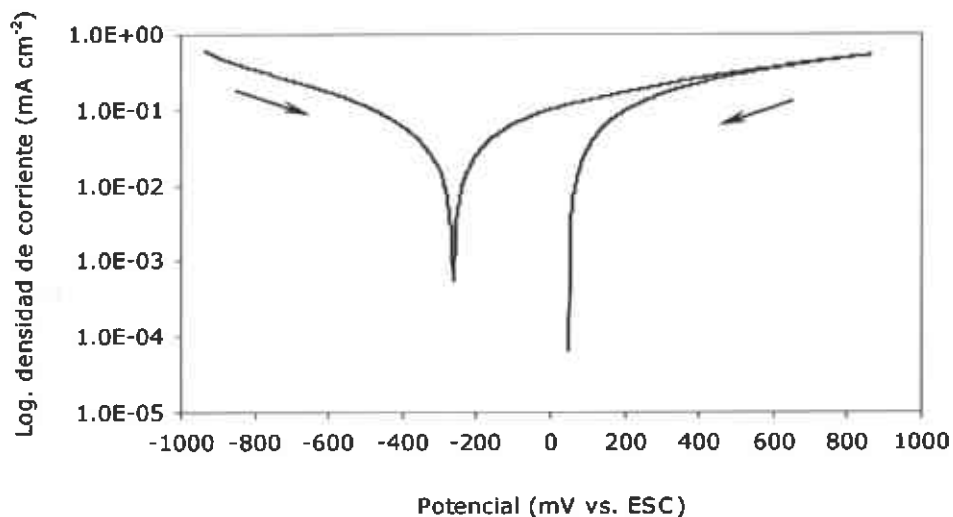
La comparación entre los datos de resistencia a la polarización y resistencia en ruido nos indica lo siguiente:

- En general, con la excepción del acero 800, las diferencias entre RR y RP fueron de 1 o 2 órdenes de magnitud para un tiempo de exposición dado. En el caso del acero 800 prácticamente los datos están dentro del mismo orden de magnitud.
- Hubo una tendencia general de aumento en los valores de RR o RP en función del tiempo de exposición. Sin embargo, aún en el caso donde los valores de resistencia son mas bajos (i.e. valores de RP en el acero 1018) la velocidad de corrosión desde un punto de vista ingenieril es muy baja (Fontana and Green, 1986 b; Heiderbach, 2005)

Towley et al. (2002), reportaron valores de RR similares a los obtenidos aquí para el acero 1018 con un material de la misma naturaleza bajo condiciones de agua potable. En condiciones de ambiente marino simulado, Ramírez et al. (2001), registraron que el acero 1018 presentaba una resistencia en ruido similar a la obtenida en el presente estudio en el mismo acero en un medio de agua residual sintética. Gusmano et al. (1997), trabajando con el acero 1040, indicaron que existe una correlación estrecha entre RR y RP, ya que en sus resultados, ambas resistencias permanecían del mismo orden de magnitud.

3.6 Curvas de polarización cíclica (CPC)

Las curvas de polarización cíclica obtenidas, son las representativas del comportamiento general de cada material. El total de las curvas, se presenta en el Apéndice A2. Las flechas indican la dirección del potencial de ida (flecha izquierda) y de reversa (flecha derecha). Debido al pH del electrolito, el sistema dominante fue el oxígeno.

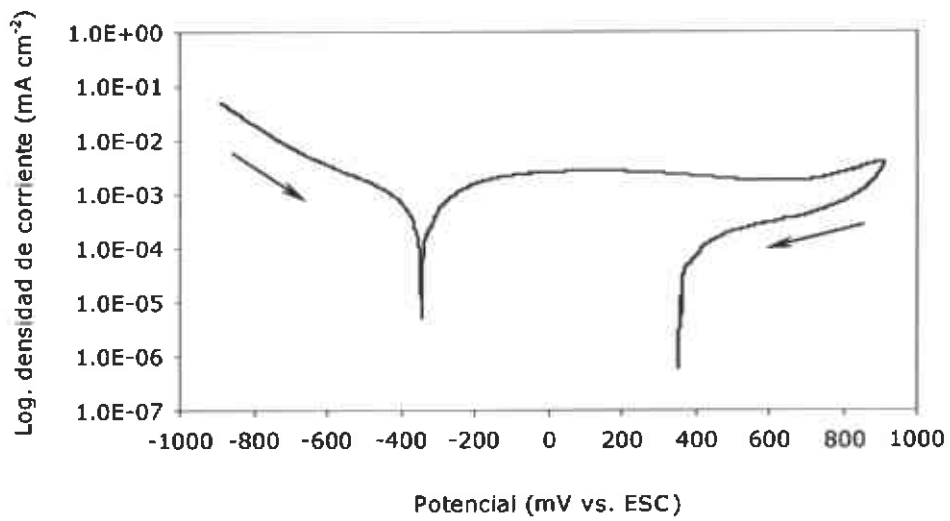


Gráfica 28. Curva de polarización cíclica representativa del comportamiento general acero 1018.

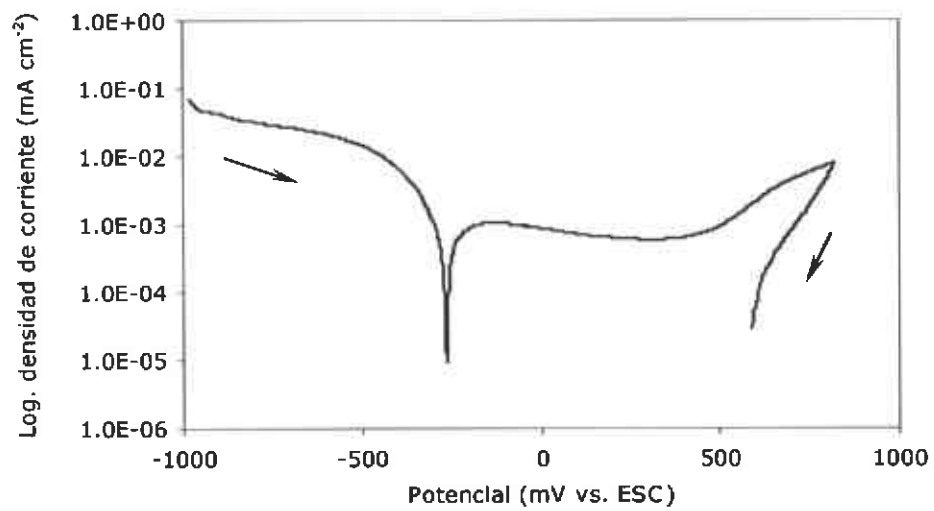
El acero 1018 (figura 63) presentó un proceso electroquímico de corrosión uniforme con un potencial de corrosión de -263 mV vs. ECS, presentando un proceso similar con lo reportado por Sfaira et al. (2001) para este tipo de acero en medios con baja conductividad. A diferencia de lo que Pearson y Brook (1991) encontraron, reportando que el acero al carbono presentaba un proceso de pasivación en una solución alcalina.

También, Arenas y Reddy (2003) demostraron que el acero 1018 presentó un comportamiento activo/pasivo. Mientras que en el estudio realizado por Lian y Jones (1999), determinaron que el acero 1016 presentaba un proceso de corrosión localizada en un medio de alta concentración de sales minerales.

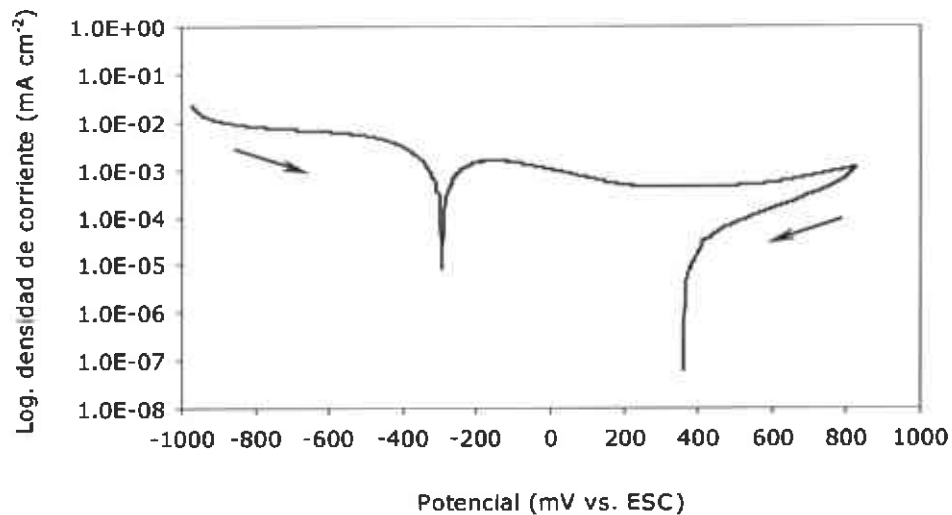
De acuerdo con lo anterior, es claro que el acero al carbono tiene la capacidad de presentar diferentes tipos de procesos electroquímicos dependiendo del tipo de medio al que sea expuesto.



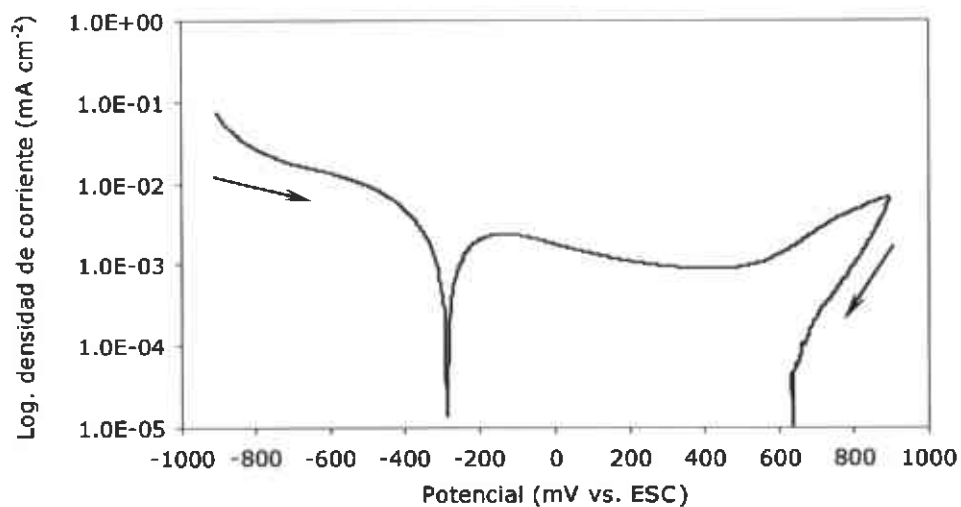
Gráfica 29. Curva de polarización cíclica representativa del comportamiento general del acero 17-7PH.



Gráfica 30. Curva de polarización cíclica del comportamiento general del acero 304.



Gráfica 31. Curva de polarización cíclica representativa del comportamiento general del acero 410.



Gráfica 32. Curva de polarización cíclica representativa del comportamiento general del acero 800.

Los aceros inoxidable (gráficas 29-31) y la superaleación 800 (gráfica 32) presentaron un proceso de repasivación, de acuerdo a lo registrado por curvas de polarización cíclica. En el estudio realizado por Turnbull et al. (2003), el acero inoxidable 316L presentaba un proceso de doble pasivación en un medio de ácido acético con un potencial de corrosión

de -200 mV vs. ESC. En otro estudio, Elfström et al., (2001), registraron que el acero 316, se comportaba de forma pasiva en un medio de agua potable, durante un periodo de 12 meses que duró su experimentación. También Dexter y Maruthamuthu (2001) demostraron que superaleaciones diferentes al Incoloy 800 presentaron un comportamiento de pasivación empleando curvas catódicas.

Por otra parte, Gaona (1999) reportó un comportamiento de pseudopasividad para el acero 17-7PH, un comportamiento de pasivación para el acero 304, y para el acero 410 un comportamiento caótico. En el reporte de Alonso-Falleiros et al. (1999), el acero 410 presentó un proceso de pasivación en un medio de ácido sulfúrico 1N. Una diferencia notable fue lo registrado por Sridhar y Cragnolino (1993), ya que el acero 825 presentó un proceso de corrosión localizada en un medio con pH 8.2 a 95 °C. Los resultados obtenidos por Venugopalan y Trépanier (2000) mostraron que el material conocido como Nitinol (NiTi) exhibe una instantánea repasivación en el barrido de reversa, (de manera hasta cierto punto similar a los resultados obtenidos en el presente estudio para los aceros inoxidable), mientras que el acero inoxidable 316L exhibió una histéresis significativa, por lo tanto, el acero inoxidable fue más susceptible a la propagación de daño por corrosión localizada que el NiTi.

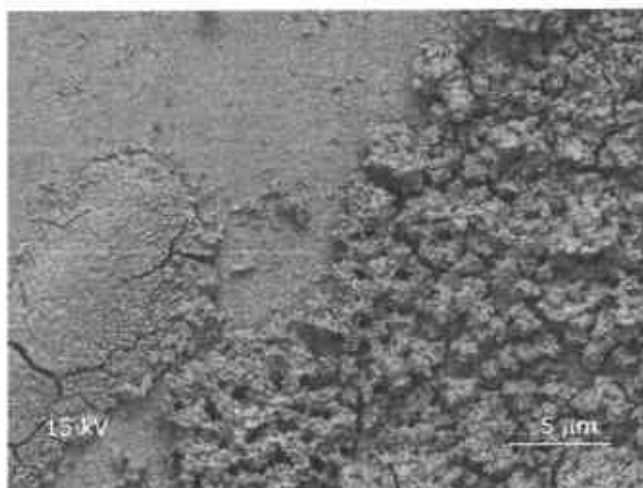
Parámetros electroquímicos obtenidos de las curvas de polarización cíclica para los aceros se presentan en la tabla 13.

Tabla 13. Parámetros electroquímicos de CPC para los aceros estudiados

Acero	Potencial de corrosión (E_{corr} , mV vs. ESC)	Corriente de pasivación (i_{pas} , mA cm^{-2})	Potencial de pasivación (E_{pas} , mV vs. ESC)	Corriente de repasivación (i_{repas} , mA)	Potencial de repasivación (E_{repas} , mV vs. ESC)	Susceptibilidad a corrosión localizada
1018	-263	No se registró	No se registró	No se registró	No se registró	No
17-7 PH	-343	2,4E-03	-56	2,9E-03	903	No
304	-263	1,0E-03	-140	6,5E-03	812	No
410	-293	1,3E-03	-190	7,7E-04	806	No
800	-288	1,1E-03	-143	5,4E-03	889	No

3.7 Micrografías electrónicas en el microscopio de barrido de electrones.

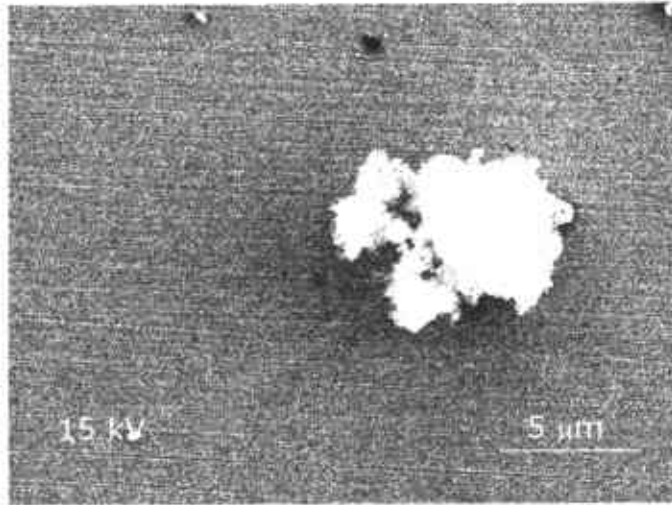
Las fotografías de la 9 a la 13 muestran las micrografías en vista superficial obtenidas por microscopía electrónica de barrido de los aceros estudiados, después de 90 días de exposición en agua residual sintética sin inóculo para corroborar la información obtenida por RE y CPC.



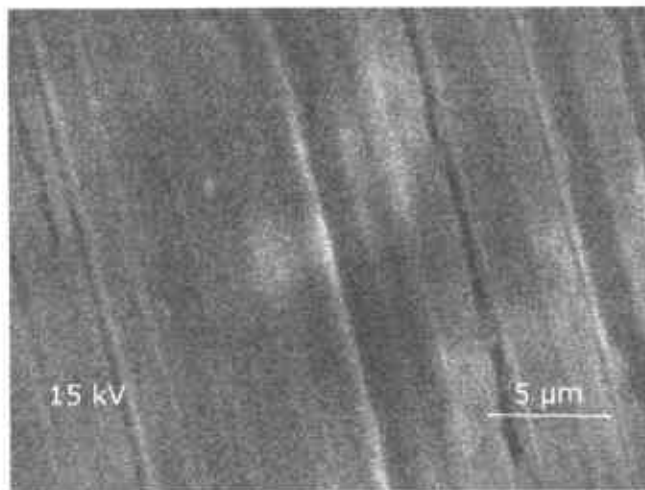
Fotografía 9. Micrografía del acero 1018 mostrando la formación de productos de corrosión. 1000X



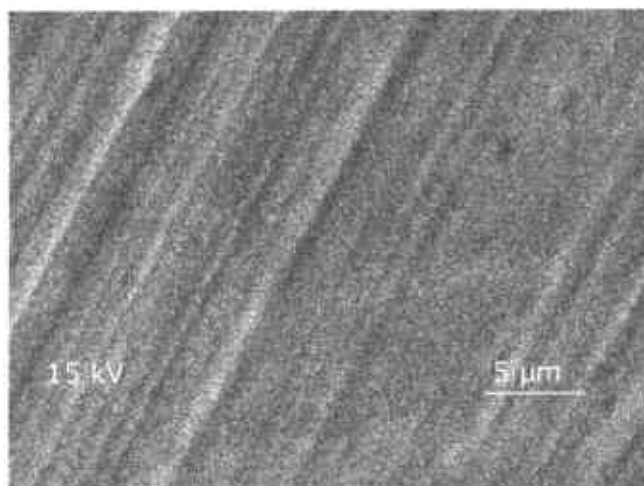
Fotografía 10. Micrografía del acero 17-7PH sin evidencia de corrosión, mostrando presencia de materia orgánica. 1000X



Fotografía 11. Micrografía del acero 304 mostrando solo la presencia de materia orgánica. 1000X



Fotografía 12. Micrografía del acero 410 que muestra una superficie sin daño y marcas de desbaste inicial. 1000X



Fotografía 13. Micrografía del acero 800 mostrando una superficie sin daño y marcas de desbaste inicial. 1000X

Las micrografías obtenidas confirmaron que efectivamente se formó una capa de productos de corrosión en la superficie del acero 1018 (fotografía 9), corroborando los resultados de corrosión uniforme obtenidos por las técnicas electroquímicas. Además, no hay presencia de tubérculos, cuya morfología es quizá la forma más común de ataque debido a la presencia constante de microorganismos.

El acero 17-7PH (fotografía 10) no presentó daño alguno (solo se observaron residuos de material orgánica) y esto sugiere que efectivamente hubo formación de una película muy delgada de óxido protector en su superficie corroborando los resultados obtenidos por las técnicas electroquímicas. El acero 304 (fotografía 11) muestra una superficie sin daño del acero, solo se observaron depósitos de materia orgánica que, bajo las condiciones de la presente investigación, no mostraron alguna influencia o lograron inducir un posible proceso de corrosión. Para el acero 410 (fotografía 12), no se observó daño superficial indicativo de algún tipo de proceso de corrosión. La superficie de las muestras solo presentan las marcas de desbaste de la preparación inicial. El acero 800 (fotografía 13), mostró una morfología muy similar al acero anterior, observando solo las marcas de desbaste inicial.

Las micrografías de los aceros no mostraron indicios de corrosión localizada, confirmando los resultados de RE y CPC.

4. Conclusiones

Bajo las condiciones experimentales realizadas en esta investigación, se concluye lo siguiente:

- Los aceros presentaron aumento en la resistencia a la polarización debido a que pudieron formar una capa de pasivación en la superficie expuesta al medio de agua residual sintética. El acero 304 demostró tener la mayor estabilidad de la pasivación en el transcurso de la experimentación debido a esto su velocidad fue la menor en comparación con los otros materiales. Se comprobó que el acero 800, siendo una aleación específica para condiciones de alta temperatura, también puede ser empleado en medios acuosos, ya que fue el siguiente material en tener una velocidad de corrosión promedio baja. El acero 410 fue el material siguiente en tener la menor velocidad de corrosión seguida por el 17-7PH y finalmente el 1018.
- El acero 1018 presentó un comportamiento de corrosión uniforme, mientras que los demás aceros presentaron repasivación conforme a lo encontrado mediante curvas de polarización cíclica. No se presentó propagación de picadura. El hecho de que el acero al carbono formara una capa de protección productos de corrosión no fue significativo en que lograra su pasivación, ya que esta capa fue formada con el mayor elemento constituyente (Fe) y eso permitió que se fuera generando la corrosión uniforme.
- De acuerdo a los resultados de ruido electroquímico, no se presentaron señales características para determinar corrosión localizada. La descripción del tipo de proceso electroquímico que se obtuvo fue de corrosión uniforme y una tendencia de corrosión mixta para el acero 410 en base a lo obtenido por IL.
- Las bacterias oxidadoras de hierro, registraron un desarrollo constante. Sin embargo, su presencia no fue significativa ya que las condiciones del medio permanecieron constantes y sus productos de metabolismo no cambiaron el medio ambiente de forma que éstos pudieran deteriorar los aceros. Si en determinado momento se hubiera presentado algún proceso de corrosión, con una alta probabilidad se habría debido a estas bacterias.

- Se demostró que en el medio empleado (electrolito) hubo desarrollo de microorganismos. Sin embargo, estos no jugaron un papel importante para el deterioro de los aceros empleados, sino por el contrario, pudieron haber formado una capa protectora en la superficie del sustrato metálico.

5. Recomendaciones para trabajos posteriores

Determinar el género y especie de bacterias, tanto sulfatorreductoras como ferrobacterias cuando se presenten en la corrosión por agua residual.

Realizar la medición del oxígeno disuelto presente en el agua residual con la finalidad de determinar su posible efecto en el proceso de corrosión por agua residual.

Determinar si la presencia de consorcios microbianos interviene en la formación de películas de pasivación que evitan la corrosión en los metales expuestos a este tipo de medio.

Realizar experimentación con un electrolito conteniendo H_2S en varias concentraciones.

Ya que la experimentación en el presente trabajo se realizó a temperatura de $30^{\circ}C$, sería de interés estudiar el efecto de la temperatura del medio de exposición (ejemplo $40^{\circ}C - 50^{\circ}C$); variando el tipo de microorganismos, por ejemplo, utilizando termófilos.

Emplear técnicas de análisis superficial avanzadas tales como AES, SIMMS y AFM con el fin de obtener espesores, composición y morfologías de óxidos o productos de corrosión que proporcionen información sobre posibles procesos de deterioro o protección.

En lo posible, trabajar con agua residual proveniente de alguna planta tratadora o mejor aún, buscar la posibilidad de realizar evaluación de materiales y monitoreos *in situ*.

6. Referencias

- Alexander, M. 1965. Most-Probable Number Method for Microbial Population. C.A. Black (Eds.). Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy. Madison, WI. USA. pp. 1467-1472.
- Alonso-Falleiros, N., Magri, M. y Falleiros, I.G.S. 1999. Corrosion Science **55**: 769.
- Angell, P. y Urbanic, K. 2000. Corrosion Science **42**: 897.
- Arenas, M.F. y Reddy, R.G. 2003. Journal of Mining and Metallurgy **30**: 81.
- Ashby, M.F. y Jones, D.R.H. 1980. An Introduction to Their Properties and Applications, Pergamon Press, Inc., Engineering Materials. Elmsford, N.Y. pp. 270-310.
- ASTM Standard G102-89. 1999. Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. Annual Book of Standards. PA: ASTM. USA.
- ASTM Standard G59-97. 1998. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurement. Annual Book of Standards. PA: ASTM. USA.
- Atlas, R. 1997. Iron Bacteria Isolation Medium. Handbook of Microbiological Media. CRC Press. New York, USA. p 698.
- Atlas, R.M. y Bartha, R. 2002. Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental. Addison Wesley Logman Inc. USA. pp. 248-249.
- Barret, L.H. 2003. Materials Performance **42**: 50.
- Basu, S., McAuley, J., White, N., Lamb, S. y Pitt, P. 2001. Material Performance **40**: 52.
- Borenstein, S.W. 1994. Introduction to Microbiologically Influenced Corrosion. Woodhead Publishing Ltd. (Eds.). Microbiologically Influenced Corrosion Handbook. Industrial Press Inc. New York, USA. pp. 1-6.

Bradford, S.A. 1998. The Effects and Economic Impact of Corrosion. J.R. Davis and Associates (Eds.). Corrosion Understanding the Basics. ASM International. Ohio, IL. USA. pp. 4-5.

Bronger, M. 2004. Drinking Waters and Sewers Systems-Final Report. CC Technologies Laboratories, Inc., Dublin, Ohio. USA.

Brossia, C.S. y Cragolino, G.A. 2000. Corrosion **56**: 505.

Chamristki, I.G. y Burns, G.R. 2001. The Influence of Iron Oxidizing Bacteria on Corrosion of Stainless Steel. NACE Corrosion 2001. Houston, TX. USA. Paper No. 01254.

Colwell, R.R. 1979. Enumeration of Specific Populations by the Most Probable Number (MPN) Method. J.W. Costerton y R.R Colwell (Eds.). Native Aquatic Bacteria: Enumeration, Activity and Ecology. American Society for Testing Materials. Philadelphia, USA. pp. 56-64.

Corbertt, R.A. 1998. Material Performance **42**: 63.

Corbertt, R.A. 2001. Material Performance **35**: 64.

Cottis, R. y Turgoose, S. 1999. Introduction. B.C. Syrett. Electrochemical Impedance and Noise. Corrosion Testing Made Easy. NACE International (Eds.). Houston, TX. pp. 1-7.

Davis, J.R. 1996. ASM Specialty Handbook: Carbon and Alloy Steels. Ed. ASM International, USA. p 391.

Da Silva, S., Basséguy, R. y Bergel, A. 2002. Bioelectrochemistry **56**: 77.

Davison, R.M. y Redmond, J.D. 1990. Materials Performance **29**: 57.

Dawson, J.L. y Hladky, K. 1981. Corrosion Science **21**: 317.

De Vito, T. 2002. Materials Performance **41** : 42

Dexter, S.C. y Maruthamuthu, S. 2001. Response of Passive Alloys with N- and P- Type Passive Films to Manganese in Biofilms. NACE Corrosion 2001. Houston, TX. USA. Paper No. 01256.

Dubiel, M., Hsu, C.H., Chien, C.C., Mansfeld, F. y Newman, D.K. 2002. Applied and Environmental Microbiology **68**: 1440.

Eashwar, M., Chandrasekaran, P., Subramanian, G. y Balakrishnan, K. 1993. Corrosion **49**: 108.

Eden, D.A., John, D.G. y Dawson, J.L. 1987. Corrosion Monitoring. Patent. International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT), Publication No. WO 87/0722. USA.

Eden, D.A. y Rothwell, A.N. 1992. Electrochemical Noise Data: Analysis, Interpretation and Presentation. NACE Corrosion 1992. Houston, TX. USA. Paper No. 0292.

Elfström, A.B, Berghult, B. y Hedberg, T. 2001. Water Science and Technology **1**: 47.

Elshawesh, F., Abusowa, K., Mahfud, H. y Elagdel, E. 2003. Materials Performance **42**: 54.

Flinn, R.A. y Trojan, P.K. 1990. Mild Steels. Houghton Mifflin Company 4th Ed. Engineering Materials and Their Applications. Boston, USA. pp. 410-425.

Fontana, M.G. y Green, N.D. 1986 a. Introduction. Michael Bever, M. Shank y C. Wert (Eds.). Corrosion Engineering. McGraw-Hill Company. New York, USA. pp. 1-5.

Fontana, M.G. y Green, N.D. 1986 b. Eight Forms of Corrosion. Michael Bever, M. Shank y C. Wert (Eds.), Corrosion Engineering. McGraw-Hill Company. New York, USA. pp. 28-113.

Gaona-Tiburcio, C. 1999. Evaluación de la Susceptibilidad al Agrietamiento de Aceros Endurecidos por Precipitación. Tesis Doctoral. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Chihuahua, Chih. México.

Gaylarde, C.C., Kelley, J., Houghton, D.R. Flanigan, B. y Rossmore, H.W. 1991. Special Issue Int. Biodeterioration **27**: 23.

George, R.P., Marshall, D. y Newman, R.C. 2003. Corrosion Science **45**: 1999.

Ghaheri, M. 1999. The Corrosion Caused by Microbial Activities and the Methods of Inhibition. EuroCorr 1999. pp. 1-4.

Gusmano, G., Montesperelli, G., Pacetti, S., Petitti, A. y D'Amico, A. 1997. *Corrosion Science* **53**: 860.

Heiderbach, R. 2005. Comunicación Personal.

Hernández Gayosso, M.J., Zavala Olivares, G., Ruiz Ordaz, N., Juárez Ramírez, C., García Esquivel R. y Padilla Viveros, A. 2004. *Electrochimica Acta* **49**: 4295.

Herro, H.M. y Port, R.D. 1995. *Corrosión en Hendiduras*. Eduardo Mendoza Tello (Eds.). Guía Nalco para el Análisis de Fallas en los Sistemas de Enfriamiento por Agua. McGraw-Hill. New York, USA. pp. 13-15.

Iversen, A. 2002. MIC on Stainless Steels in Wastewater Treatment Plants Field Test and Risk Assessment. NACE Corrosion 2002, Denver, CO. USA. Paper No. 02451.

Jack, T.R. 1988. *Biorecovery* **1**: 59.

Jeffrey, R. y Melchers, R.E. 2003. *Corrosion Science* **45**: 693.

Jones, D.A. 1996. *Introduction to Corrosion*. Neil Patterson (Eds.). Principles and Prevention of Corrosion. Prentice-Hall. New Jersey, USA. pp. 58-80.

Kaneko, M. e Isaacs, H.S. 2000. *Corrosion Science* **42**: 67.

Kearns, J.R. 1996. EASTM Standardization of Electrochemical Noise Measurement. J.R. Kearns (Eds.). *Electrochemical Noise Measurements for Corrosion Applications*. ASTM STP 1277. pp. 446-470.

Kielemoes, J., Bultinck, I., Storms, H., Boon, N. y Verstraete, W. 2002. *FEMS Microbiology Ecology* **39**: 41.

Legat, A. y Zevnik, C. 1993. *Corrosion Science* **35**: 1661.

Lian, T. y Jones, D.A. 1999. *Corrosion* **55**: 1012.

MacDougall, B. y Graham, MJ. 1995. *Introduction to Corrosion*. Marcus P. Oudar (Eds.). Corrosion Mechanisms in Theory and Practice. Marcel Dekker. New York. USA. pp. 143-173.

Macdonald, D.D., Lvov, S.N., Zhou, X.Y., Wei, X., Ulyanov, S.M. y Kriskunov, L. 2000. Development of Advance *In situ* Techniques for Chemistry Monitoring and Corrosion Mitigation in SCWO Environments. U.S. Department of Energy. Project Number: 55171. Grant No. DE-FG07-96ER62303.

Madigan, M.T., Martinko, J.M y Parker, J. 1998. Brock Biología de los Microorganismos. Prentice-Hall International, UK. pp. 149-155.

Mangonon, P.T. 2001. Selección de Materiales Ferrosos. Prentice-Hall, Inc. Ciencia de Materiales- Selección de Materiales. Melbourne, FL. USA. pp. 502-512.

Mansfeld, F. 1976. Corrosion Science and Technology **4**: 163.

Marcus, P. y Maurice, V. 2000. Passivity of Metals and Alloys. Michael Schütze (Eds.). Corrosion and Environmental Degradation. Wiley-VCH. Frankfurt, Alemania. pp. 131-141.

Marcus, P. y Oudar, J. 1995. Corrosion in the Industry. Marcel Dekker (Eds.). Corrosion Mechanisms in Theory and Practice. Marcel Dekker Inc. p. 77.

Melchiorri-Santolini, U. 1972. Enumeration of Microbial Concentration of Dilution Series (MPN). Y.I. Sorokin y H. Kadota (Eds.). Techniques for the Assessment of Microbial Production and Decomposition in Fresh Water. IBP Handbook No. 23. Oxford, Inglaterra. pp. 64-70.

Morales, J., Esparza, P., González, S., Salvarezza, R. y Arévalo, M.P. 1993. Corrosion Science **34**: 1531.

Nagayama, M. y Cohen, M. 1963. J. Electrochemistry Society **110**: 670.

Nagiub, A. y Mansfeld, F. 2001. Materials and Corrosion **52**: 817.

NOM-112-SSA1-1994. 1995. NORMA OFICIAL MEXICANA. Bienes y Servicios. Determinación de Bacterias Coliformes. Técnica del Número Más Probable. México, D.F.

Parkins, R.M. 1995. Materials Performance **24**: 9.

Pearson, B.R. y Brook, P.A. 1991. Corrosion Science **32**: 387.

Pesic, B. 2001. Biocorrosion of Iron with *Thiobacillus ferrooxidans*-Linear Polarisation Study. NACE Corrosion 2001. Houston, TX. USA. Paper No. 01255.

Piron, D.L. 1991. Electrochemistry. NACE International. The Electrochemistry of Corrosion. USA. pp. 60-65.

Pistorius, P.C. 1996. The Effect of Some Fundamental Aspects of the Pitting Corrosion of Stainless Steel on Electrochemical Noise Measurements. J.R. Kearns (Eds.). Electrochemical Noise Measurements for Corrosion Applications. ASTM STP 1277. pp. 343-358.

Pope, D.H. 2000. Microbiologically Influenced Corrosion in the Twentieth Century and Where do we go from here. NACE Corrosion 2000. Denver, CO. USA. Paper No. 0402.

Porter, P.C. y Quick, E. 2001. Materials Performance **40**: 42.

Postgate, J.R. 1979. The Sulphate Reducing Bacteria. Cambridge University Press. p. 26.

Pourbaix, M. 1963. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. Pergamon. Oxford. USA.

Rahrig, P.G. 2003. Materials Performance **42**: 58.

Ramírez, R., Torres, V., García-Ochoa, E., Rodríguez, F., Hernández, M. y Genescá, J. 2001. Application of Electrochemical Noise Technique in Simulated Marine Atmospheres. NACE Corrosion 2001. Houston, TX. USA. Paper No. 01481.

Reynolds, P.J., Sharma, P., Jenneman, G.E. y McInerney, J.J. 1989. Apply Environmental Microbiology **55**: 2280.

Roberge, P.R. 2000. Aqueous Corrosion. David E. Fogarty (Eds.). Handbook of Corrosion Engineering. McGraw - Hill Co. New York, USA. pp. 13-20.

Roberge, P.R., Beaudoin, R. y Sastri, V.S. 1989. Corrosion Science **29**: 1231.

Romero, J.M. 2003. Corrosión Microbiana Aerobia en el Interior de Acueductos de la Industria Petrolera. Tesis Doctoral. Facultad de Química. UNAM. México.

Sand, W. y Bock, E. 1991. *Int. Biodeterioration* **27**: 175.

Schweitzer, P.A. 1996. *Corrosion of Nickel and High-Nickel Alloys*. Philip A. Schweitzer (Ed.). *Corrosion Engineering Handbook*. Marcel Dekker, Inc. USA. p. 85.

Sedriks, A.J. 1996. *Electrochemistry*. The Electrochemical Society Inc. (Eds.). *Corrosion of Stainless Steels*. John Wiley and Sons Inc. USA. pp. 79-80.

Sfaira, M., Srhiri, A., Takenouti, H., Marie de Ficquelmont-Loizos, M., Ben Bachir, A. y Khalakhil, M. 2001. *Journal of Applied Electrochemistry* **31**: 537.

Shi, X., Avci, R., Geiser, M. y Lewandowski, Z. 2003. *Corrosion Science* **45**: 2577.

Smith, W.F. 1993. *Aleaciones en Ingeniería. Fundamentos de la Ingeniería de Materiales*, McGraw-Hill, 2a Ed. pp. 498-583.

Sridhar, N. y Cragolino, G.A. 1993. *Corrosion Science* **49**: 885.

Stern, M. y Geary, A.L. 1957. *Journal Electrochemical Society* **104**: 56.

Stern, M. y Roth, R. M. 1957. *Journal Electrochemical Society* **104**: 390.

Stott, J.F.D. 1993. *Corrosion Science* **35**: 667.

Strehlow, H.H. 2000. *Phenomenological and Electrochemical Fundamentals of Corrosion*. Wiley-VCH. *Corrosion and Environmental Degradation Volume I*. Weinheim, Germany.

Tan, Y.J., Bailey, S. y Kinsella, B. 1996. *Corrosion Science* **38**: 1681.

Tator K. B. 2003. *Materials Performance*. **42**: 32

Taylor, S.W., Mily, P.C.D. y Jaffé, P.R. 1990. *Water Resources Res.* **26**: 2171.

Their, H., Baumel, A. y Schmidtman, E. 1969. *Archiv fuer das Eisenhuettenwesen* **40**: 333.

Thompson, N.G. y Payer, J.H. 1998. Applications of Electrochemical Methods. C. Wynne (Eds.). DC Electrochemical Test Methods. Corrosion Testing Made Easy. Vol. 6. NACE. Houston, TX. USA. pp. 55-73.

Torres, R. 2002. Corrosión Microbiológica del Acero AISI 304 en una Central Geotermoeléctrica. Tesis Doctoral. Facultad de Química. UNAM. México.

Tuthill, A.H. 1995. Guidelines for the Use of Stainless Steels in Municipal Waste Water Treatment Plants, NiDI No 10076.

Towley, D.W., Duranceau, S.J., Wilson, D.F. 2002. Online Electrochemical Noise Corrosion Monitoring in Potable Water Distribution Systems. NACE Corrosion 2002, Denver, CO. USA. Paper 02380.

Turnbull, A., Ryan M., Willets A., and Zhou S., 2003. Corrosion Science **45**: 1051.

Van Delinder, L.S. 1984. Localized Corrosion, corrosion the basics: An Introduction. NACE Corrosion 1984. Houston, TX. USA. pp. 97-98.

Van Dijck, G., Wevers, M. and Van Hulle, M. 2004. International Journal of Computational Intelligence **1**: 1

Venugopalan, R. y Trépanier, C. 2000. Min Invas Ther & Allied Technol **9**: 67.

Videla, H.A. 1996. Microbiological Aspects. Lewis Publisher (Eds.). Manual of Biocorrosion. CRC Press Inc. Boca Raton, FL. USA. pp. 13 - 20.

Werner, S.E., Johnson, C.A., Laycock, N.J., Wilson, P.T. y Webster, B.J. 1997. Corrosion Science **40**: 465.

Wharton, J.A, Mellor, B.G., Wood, R.J. y Smith, C.J. 2000. Crevice Corrosion Studies Using Electrochemical Potential Noise Measurements. NACE Corrosion 2000. Denver, CO. USA. Paper No. 0417.

APÉNDICES

A1. Preparación de los medios de cultivo

Medio Postgate B

Solución 1

KH_2PO_4	0.5 g
NH_4Cl	1.0 g
CaSO_4	1.0 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.0 g
Lactato de sodio	3.5 ml
Extracto de levadura	1.0 g

Adicionar estos reactivos a 960 ml de agua destilada; el pH deberá ser de 7.2 - 7.8.

Solución 2

Ácido ascórbico	0.1 g
Ácido tioglicólico	0.3 ml

Adicionar estos reactivos a 20 ml de agua destilada, ajustar a un pH de 7.4 - 7.8 con NaOH 4N.

Solución 3

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.5 g
---	-------

Adicionar a 20 ml de agua destilada. Acidificar a un pH de 1.8 - 2.0 con HCl, agregándolo gota por gota hasta que se disuelva.

Esterilizar las 3 soluciones por separado a 121°C/15 min. A 15 psi. Después de 5 minutos de enfriamiento, combine las soluciones (si se utilizará de forma inmediata). Dejar enfriar. Las soluciones deben ser almacenadas por separado en refrigeración y calentadas y combinadas cuando se utilicen.

Medio Iron-Oxidizing

Solución 1

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	3.0 g
K_2HPO_4	0.5 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.5 g
KCl	0.1 g
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.01 g
H_2SO_4 10N	1.0 ml
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	300 ml

Solución 2

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 44.22 g

Preparación de la solución 2

Adicionar el $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en 300 ml de agua destilada, mezclar. Esterilizar por 15 min. a 15 psi/121 °C. Enfriar a 25 °C.

Preparación del Medio

Adicionar todos los reactivos, excepto la solución 2, en un volumen de 700 ml de agua destilada y agitar. Calentar ligeramente y luego llevar a ebullición. Esterilizar a 15 psi/121 °C durante 15 min. Enfriar a 25 °C. De forma aséptica adicionar la solución 2 estéril. Agitar y distribuir dentro de los tubos o matraces.

Medio de Cetrimide®

El medio Cetrimide® es comercial y no tiene mayor problema en su preparación.

El contenido del medio es el siguiente:

Peptona de Gelatina	20.0 g
Cloruro de Magnesio	1.4 g
Sulfato de Potasio	10.0 g
Agar	13.6 g
Cetrimida	0.3 g

Preparación del medio

Se disuelven 45.3 g del medio en 1000 ml de agua destilada, se adicionan 10 ml de glicerol. Se calienta con agitación frecuente hasta que se disuelva todo el medio. Se deja a ebullición por 1 min. Finalmente se esterilizar a 15 psi/121 °C durante 15 min.

A2. Curvas de polarización cíclica

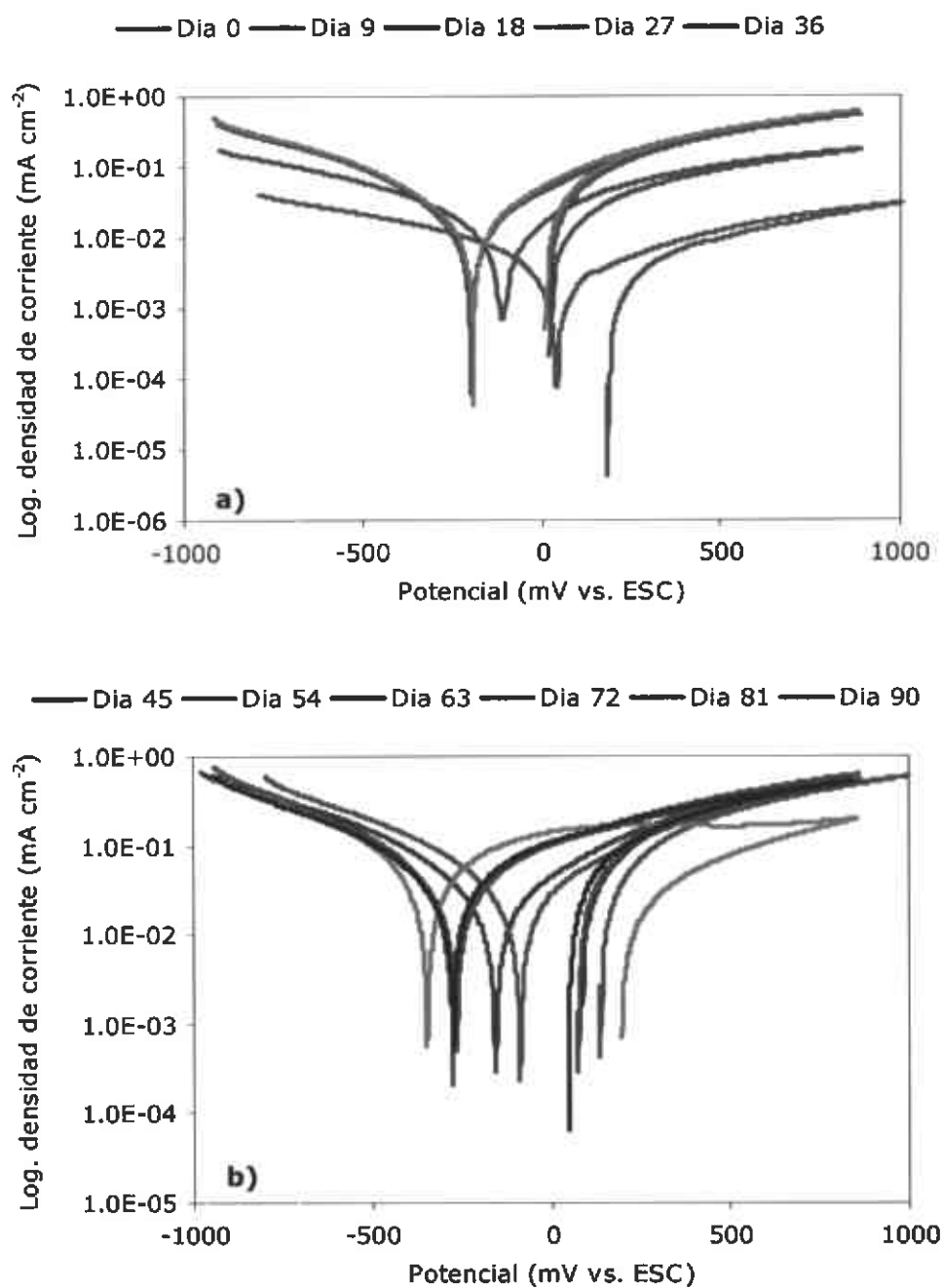


Figura A2.1. Curvas de polarización cíclica del acero 1018.
a) días 0 al 36 y b) días 45 al 90.

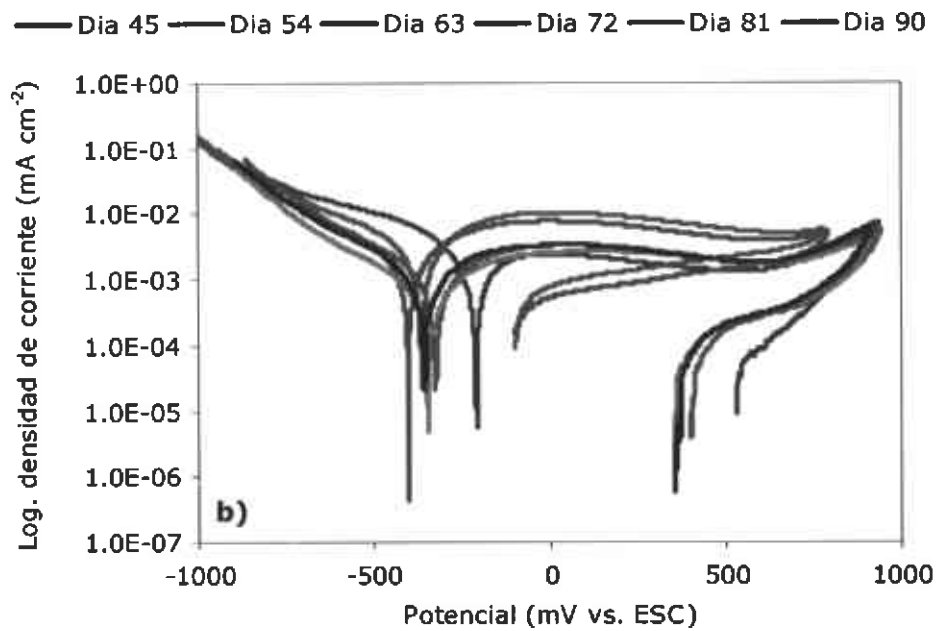
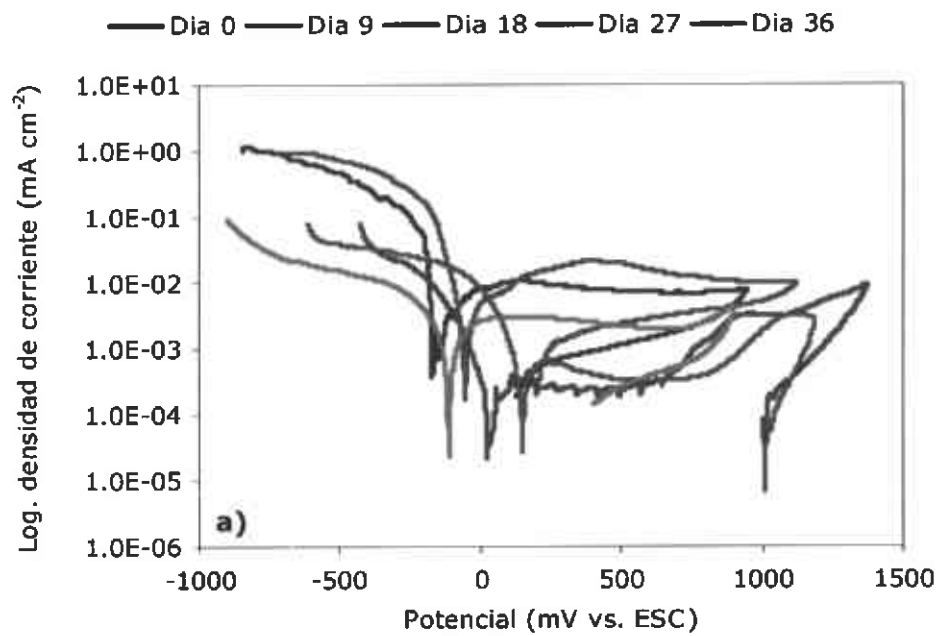


Figura A2.2. Curvas de polarización del acero 17-7PH.
a) días 0 al 36 y b) días 45 al 90.

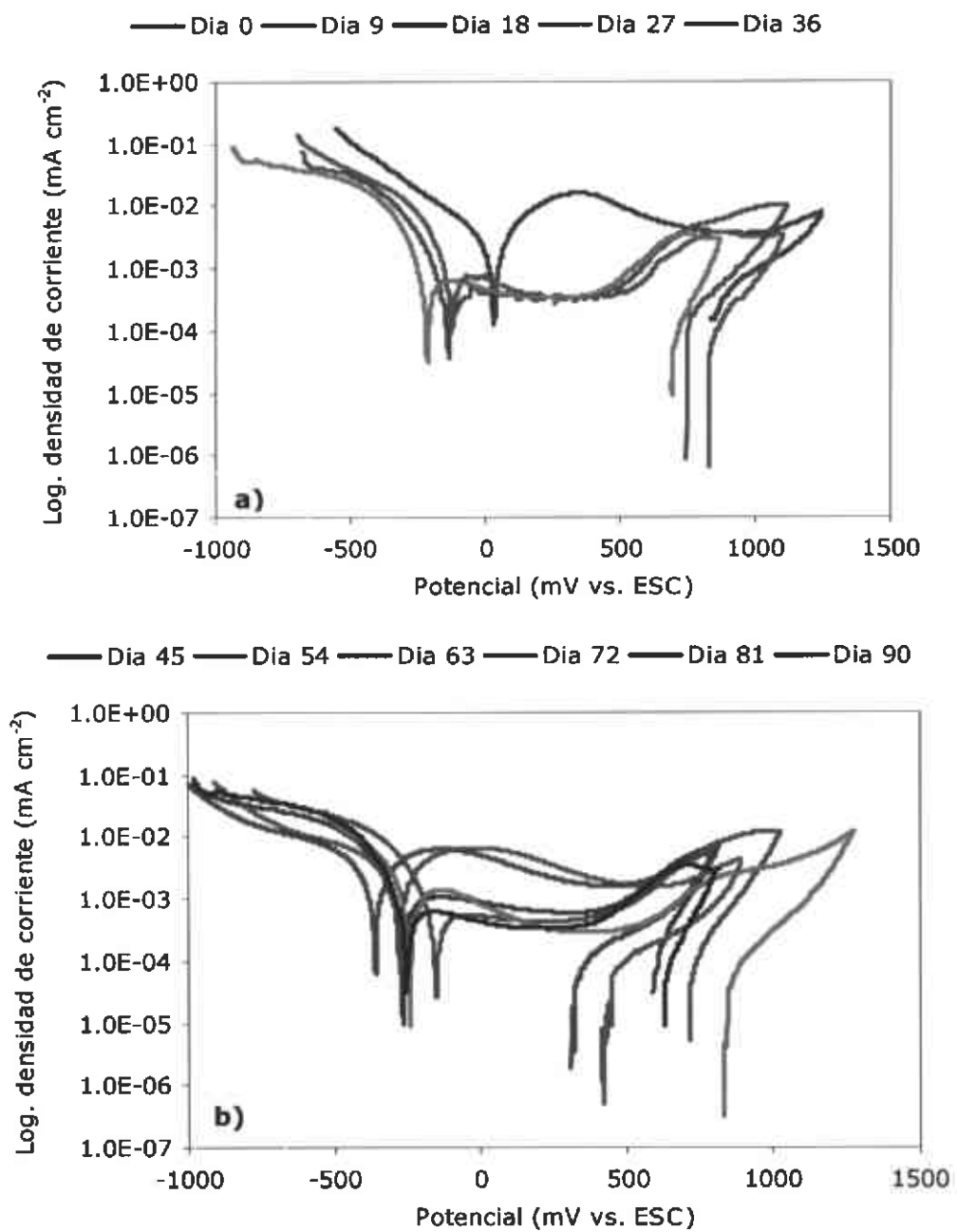


Figura A2.3. Curvas de polarización del acero 304.
 a) días 0 al 35 y b) días 45 al 90.

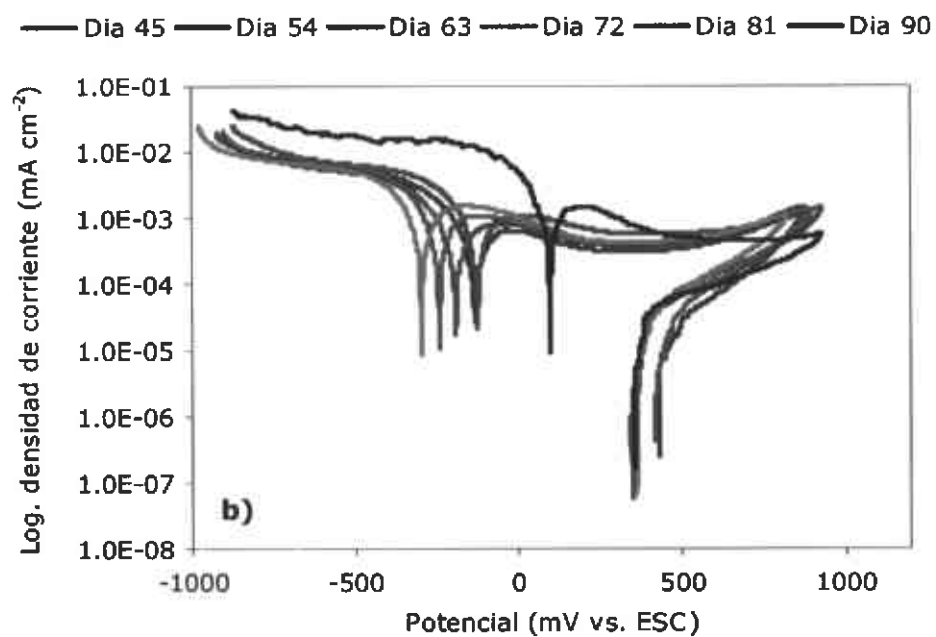
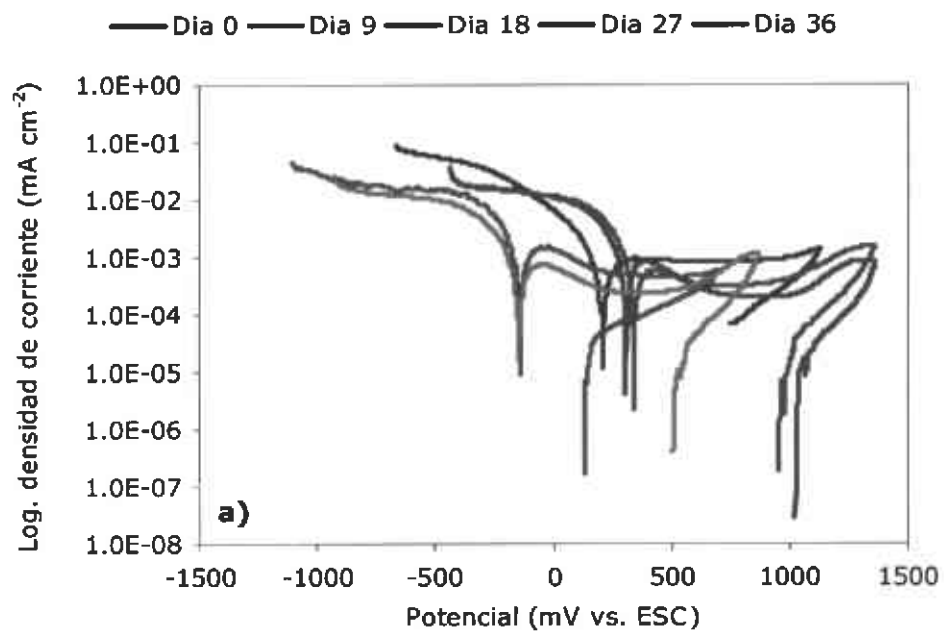


Figura A2.4. Curvas de polarización cíclica del acero 410.
a) días 0 al 36 y b) días 45 al 90.

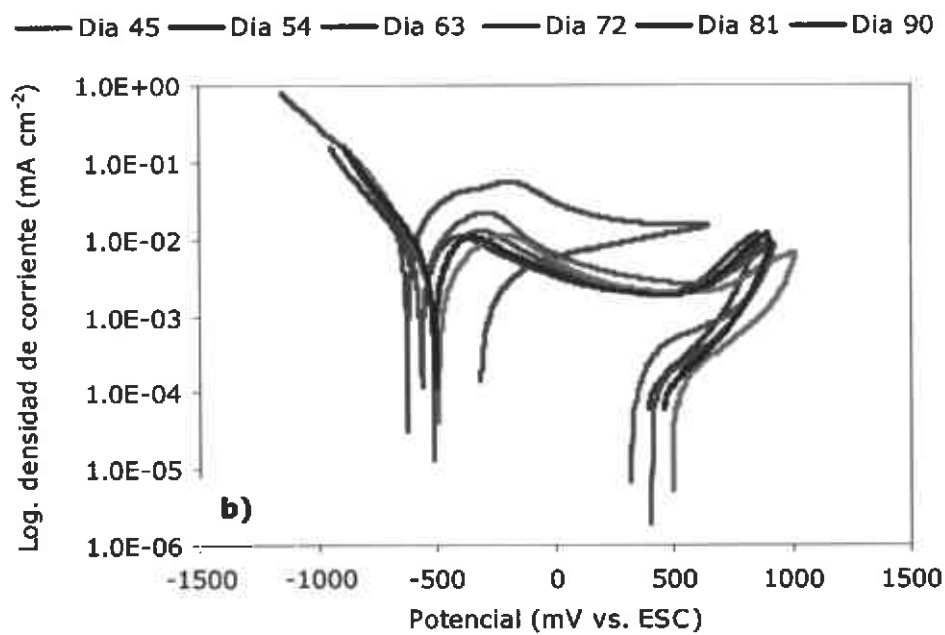
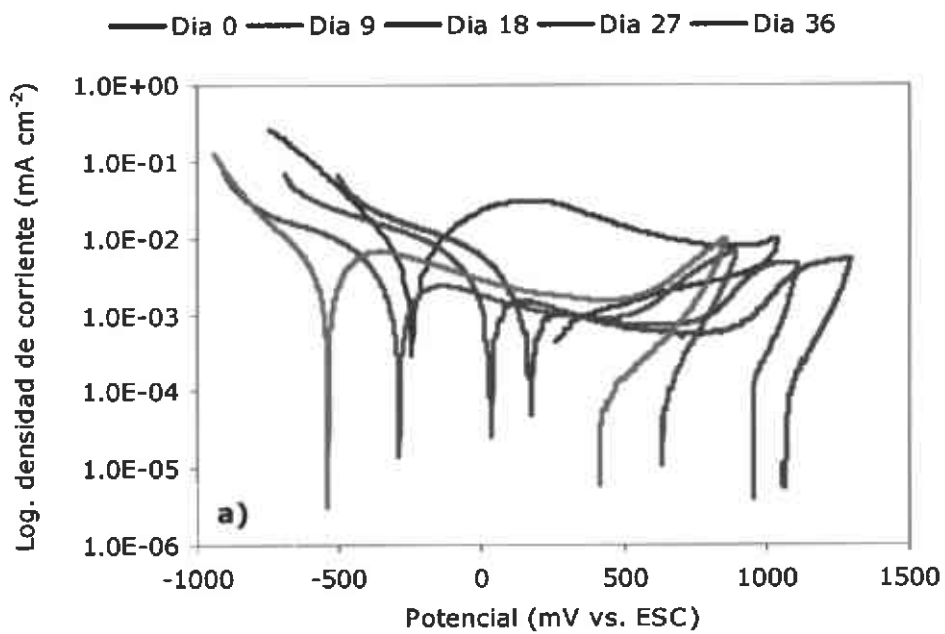


Figura A2.5. Curvas de polarización cíclica del acero 800.
a) días 0 al 36 y b) días 45 al 90.