



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

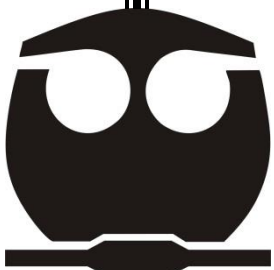
**“EVALUACIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN DE  
ORIGEN NATURAL EN SISTEMAS SALINOS EN  
FUNCIÓN DE LAS CONDICIONES  
HIDRODINÁMICAS”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERÍA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA:**

**YOLOXOCHITL MARÍA ELENA MORALES MARTÍNEZ**



México, D.F

2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO**

Presidente: DR. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ

Vocal: M. EN C. CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA

Secretario: M. EN I. PAOLA RONCAGLIOLO BARRERA

1<sup>er</sup> Suplente: M. EN I. JOSÉ FERNANDO FLORES ÁLVAREZ

2<sup>do</sup> Suplente: DR. DAVID TURCIO ORTEGA

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** LABORATORIO DE CORROSIÓN Y PROTECCIÓN, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

---

DR. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ

**ASESOR DEL TEMA**

---

M. EN C. CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA

**SUPERVISOR TÉCNICO**

---

YOLOXOCHITL MARÍA ELENA MORALES MARTÍNEZ

**SUSTENTANTE**

## INDICE

AGRADECIMIENTOS .....	5
DEDICATORIAS .....	6
RESUMEN .....	7
OBJETIVOS .....	8
HIPÓTESIS .....	8
CAPITULO 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS .....	9
1.1 Corrosión por CO <sub>2</sub> .....	9
1.2 Inhibidores de corrosión .....	10
1.2.1 Clasificación de inhibidores .....	11
1.2.2 Mecanismos de inhibición .....	14
1.2.2.1 Acondicionadores ambientales .....	14
1.2.2.2 Inhibidores anódicos (pasivadores).....	14
1.2.2.3 Inhibidores catódicos.....	15
1.2.2.4 Inhibidores mixtos .....	15
1.2.2.5 Inhibidores fase vapor .....	16
1.2.3 Selección y evaluación de inhibidor. ....	16
1.2.4 Inhibidores de corrosión naturales .....	18
1.3 Números adimensionales.....	19
1.4 Tipos de flujo.....	20
1.4.1Flujo laminar.....	20
1.4.2 Flujo turbulento.....	20
1.5 Electrodo de cilindro rotatorio .....	21
1.6 Técnicas electroquímicas.....	22
1.6.1 Resistencia a la polarización linear .....	22
1.6.2 Curvas de polarización (extrapolación de Tafel) .....	23
1.6.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica .....	23
1.7 Técnicas de caracterización de materiales (Microscopía electrónica de barrido).....	25
CAPITULO 2. MÉTODO EXPERIMENTAL .....	27
2.1 Procedimiento experimental.....	27
2.1.1 Caracterización metalográfica de la probeta .....	28
2.1.2 Caracterización química de la probeta.....	28
2.1.3 Caracterización química de la probeta.....	28
2.1.3.1 Extracción de <i>Dysphania ambrosioides</i> .....	28
2.1.3.2 Extracción de <i>Nicotiana tabacum</i> .....	28
2.1.4 Preparación de las soluciones .....	28
2.1.4.1 Preparación solución NaCl 3% .....	28
2.1.4.2 Preparación de solución NaCl 3% con <i>Dysphania ambrosioides</i> .....	29
2.1.4.3 Preparación solución NaCl 3% con <i>Nicotiana tabacum</i> .....	29
2.1.5 Experimentación, técnicas electroquímicas.....	29
2.1.2 Análisis químico por MEB .....	30
CAPITULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	31
3.1 Caracterización metalográfica de la probeta .....	31
3.2 Caracterización química de la probeta .....	32

3.3 Técnicas electroquímicas.....	31
3.3.1 Potencial contra tiempo.....	33
3.3.2 Curvas de polarización.....	36
3.3.3 Espectroscopía de impedancia electroquímica .....	41
3.3.4 Resistencia a la porlarización .....	45
3.4 Análisis químico por MEB.....	47
3.4.1 Análisis de probeta sin inhibidor.....	48
3.4.2 Análisis de probeta con <i>Dysphania ambrosioides</i> como inhibidor .....	50
3.4.3 Análisis de probeta con <i>Nicotiana tabacum</i> como inhibidor ....	51
<b>CAPITULO 4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>55</b>

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y hermanas, son las personas más importantes en mi vida, han apoyado muchas de las decisiones que he tomado aunque algunas veces no estuviesen completamente de acuerdo.

A mis abuelos y tíos que estuvieron presentes en casi todos los pasos que he dado en la vida.

Al Doctor Francisco Javier Rodríguez Gómez por aceptar ser mi asesor y siempre intentar ser tolerante conmigo, me parece una gran persona y lo aprecio.

Al Maestro David Moisés Sortibrán Serrano, siempre estuvo pendiente de mis avances en la carrera, gracias por escucharme y alentarme.

Agradezco a mis profesores.

A mis amigos, aquellos quienes me hicieron llevadero todo este tiempo.

Al M. en C. Carlos Rodríguez Rivera por su apoyo en el laboratorio de corrosión. Al M. en C. Adrián Manuel Amaro Villeda por su apoyo en el análisis químico de la aleación. Al Ingeniero Iván Puente por su apoyo en el análisis por MEB. También quiero agradecer al personal del taller mecánico y a Don Fermín pues desde que llegué a metalurgia siempre me brindaron su ayuda.

Al programa de apoyo a proyectos de investigación e innovación tecnológica (PAPIIT) con clave IN-116414-3 “Evaluación de inhibidores de corrosión de bajo impacto ambiental”.

## **DEDICATORIAS**

A mis padres.

Padre, por tu culpa estudié.

Madre, siempre estás ahí cuando lo necesito.

A los dos los quiero mucho, y a pesar de todo no me arrepiento ni en lo más mínimo de haber sido educada así, los amo padres.

A mis hermanas, las quiero y las adoro, Del Mal también lo hace.

## RESUMEN

El transporte de hidrocarburos dentro de nuestro país está basado en el empleo de ductos o auto-tanques. El sistema de transporte de hidrocarburos por ducto es 10 veces más barato que el transporte por auto-tanque, sin embargo muchas veces tiene una antigüedad de 30 años.

Si la corrosión presente no es controlada de manera adecuada generará gastos innecesarios asociados con daños a la propiedad y/o riesgo de seguridad. En México el número de accidentes relacionados con ductos petroleros aumentó del primer trimestre de 2013 respecto al mismo periodo de 2012 al registrarse 55 incidentes laborales, en fugas y derrames también se tuvo un incremento donde la principal causa está vinculada a la corrosión en un 66 por ciento. Las principales causas de estos eventos en el periodo evaluado están relacionadas con la corrosión interior en un 49 por ciento; 17 por ciento a corrosión exterior; terceras partes en 4 por ciento y falla en el material en 6 por ciento. Por razones como éstas es tan importante el estudio y prevención de la corrosión interior para la integridad de los ductos.

Existen diversas técnicas para la prevención y control de la corrosión en ductos, las más empleadas son el uso de protección catódica e inhibidores. Sin embargo la protección catódica sólo protege la parte exterior del tubo y ya se dijo que la corrosión interior es la principal causante de accidentes, es por esto que se recurre al uso de inhibidores de corrosión, el problema con su uso es que muchos de ellos pueden ser agresivos con el ambiente, por ello se propone el estudio de inhibidores naturales para la protección de sistemas de ductos petroleros.

Antes de emplear un inhibidor es importante conocer su comportamiento en el medio al que se le someterá, se simula el mayor número de condiciones posibles. Un buen inhibidor de corrosión debe tener más del 90% de eficiencia de inhibición de corrosión; para el cálculo de la eficiencia es importante obtener las velocidades de corrosión en presencia y ausencia del inhibidor en el medio.

Para poder obtener las velocidades de corrosión en presencia de los inhibidores se realizará la extracción alcohólica de los principios activos de la *Dysphania ambrosioides* y de la *Nicotiana tabacum* (epazote y tabaco, respectivamente), a continuación se preparará una solución de salmuera 3% en peso saturada con CO<sub>2</sub> y finalmente se harán pruebas electroquímicas a las velocidades de rotación de 0, 100, 1000 y 5000 rpm para simular las condiciones hidrodinámicas de un ducto.



## OBJETIVOS

- Conocer si los extractos de *Nicotiana tabacum*, y *Dysphania ambrosioides* son capaces de fungir como inhibidores de corrosión para un acero al carbono en un medio que simule las condiciones de un ducto de transporte de hidrocarburos.
- Proponer los mecanismos de inhibición de la corrosión que ejercen sobre el metal los extractos de *Nicotiana tabacum*, y *Dysphania ambrosioides*.
- Obtener la velocidad de corrosión del acero con tres técnicas electroquímicas distintas, ( $R_p$ , curvas de polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica) a las velocidades de rotación de 0, 100, 1000 y 5000 rpm, usando como electrolito una solución de NaCl 3% saturada con  $CO_2$  sin inhibidor y con *Nicotiana tabacum* y *Dysphania ambrosioides* como inhibidores.
- Determinar la eficiencia de inhibición de corrosión para ver si los extractos son buenos inhibidores en las distintas condiciones hidrodinámicas.
- Analizar los productos de corrosión por medio de la microscopia electrónica de barrido con el fin de saber si el principio activo de los supuestos inhibidores es adsorbido en la superficie metálica.

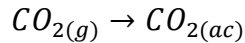
## HIPÓTESIS

La adición de cierta cantidad de los extractos de *Nicotiana tabacum* y *Dysphania ambrosioides* permite tener una eficiencia de inhibición igual o mayor a 90% en un medio salino saturado con  $CO_2$  a distintas condiciones hidrodinámicas.

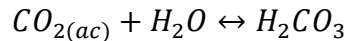
## CAPITULO 1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

### 1.1 Corrosión por CO<sub>2</sub>

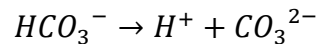
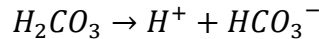
La corrosión provocada por la presencia de CO<sub>2</sub> es denominada “corrosión dulce”, en éste caso el CO<sub>2</sub> se disuelve en el agua formando H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dentro de los ductos de transporte de hidrocarburos. El gas se disuelve en el agua conforme a la siguiente reacción:



Una parte del CO<sub>2(ac)</sub> se hidrata para formar el siguiente equilibrio químico.

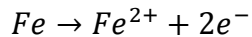


Únicamente el 0.2% del CO<sub>2</sub> disuelto es hidratado para formar H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, otras reacciones ocurridas son la de la disociación del ácido carbónico, la disociación del anión bicarbonato:

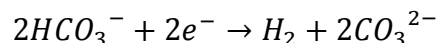
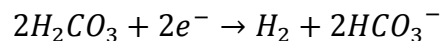
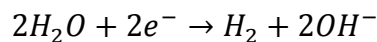
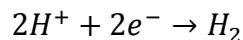


La disociación del ácido carbónico es muy rápida comparada en comparación con otros procesos simultáneos, reacciones como la disolución del CO<sub>2</sub> en el agua y la hidratación del CO<sub>2</sub> disuelto son mucho más lentas y pueden controlar la rapidez del proceso.

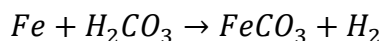
Antes de que ocurra la corrosión dulce hay reacciones heterogéneas tanto de reducción como de oxidación. La disolución del acero es la principal reacción heterogénea antes de que ocurra la corrosión por CO<sub>2</sub>, se describe como:



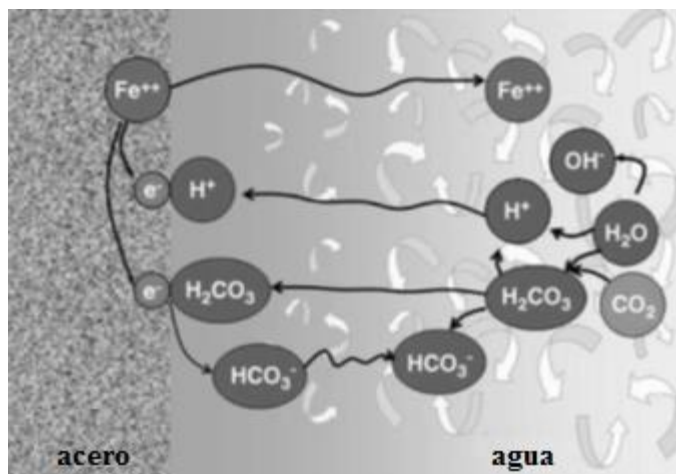
Las reacciones catódicas llevadas a cabo son las de reducción del ion hidrógeno, la reducción del agua, la reducción del ácido carbónico y la reducción del ion bicarbonato, todas las mencionadas involucran la evolución del hidrógeno:



El H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> generado en la solución es un ácido débil capaz de provocar la disminución del pH en el medio y por ende incrementar su corrosividad. Al encontrarse dicho ácido con Fe se lleva a cabo la siguiente reacción de oxidación:



En la Figura 1.1 se muestra un esquema simplificado de la corrosión por CO<sub>2</sub> resumiendo muchas de las reacciones ya mencionadas anteriormente.



**Figura 1.1 Esquema de corrosión por CO<sub>2</sub> [1]**

Un factor capaz de alterar la corrosión por CO<sub>2</sub> es el flujo del fluido, puede afectar de dos formas a la corrosión dulce, una de ellas es por transferencia de masa y otro por medios mecánicos. El flujo turbulento promueve el transporte de masa de las especies hacia la superficie del acero, alterando el transporte a través de la capa límite, también puede provocar daño mecánico en la capa protectora de FeCO<sub>3</sub> o en las películas inhibitoras.

## 1.2 Inhibidores de corrosión

Un inhibidor de corrosión es una sustancia química que al ser agregada en pequeñas concentraciones a un medio es capaz de minimizar o prevenir la corrosión; la causa de lo anterior puede ser la interacción entre el inhibidor y la superficie del metal, dando como resultado una película superficial inhibitora, pero en otros casos el efecto de inhibición es dado por las modificaciones en la química del medio como la variación del pH para la formación de la pasivación, la eliminación del oxígeno disuelto y la neutralización de las especies ácidas.

Una ventaja importante del uso de inhibidores es que pueden ser implementados o cambiados “in-situ” sin detener el proceso. Las industrias que le da mayor uso a los inhibidores de corrosión son: exploración y producción de petróleo, fabricación de químicos, tratamiento de aguas e industrias de producción de aditivos.

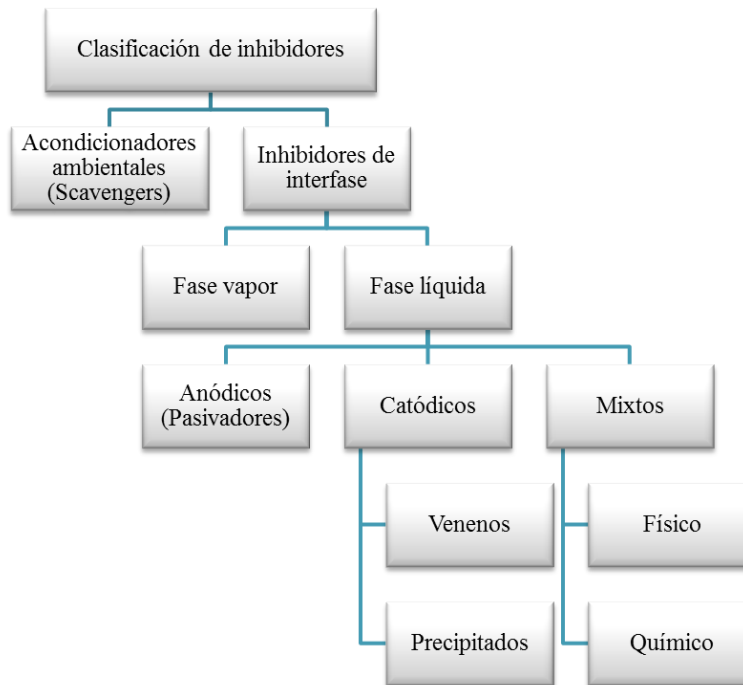
**Tabla 1.1 Consumo de inhibidor de corrosión en varias industrias, reportado por la Society of Plastic Industry 1998[6]**

Uso	Consumo en 1998		
	Kg*millón	Lb*millón	\$*millón
Refinación de petróleo	248.1	547	246
Producción y perforación de petróleo	63.0	139	153
Almacenamiento y transporte de petróleo	15.4	34	31
Pulpa y papel	182.8	403	198
Manufactura de químicos	272.2	600	180
Hierro y acero	57.2	126	50
Manejo de varios materiales (incluye el procesamiento de alimentos, servicios públicos e instituciones)	132.9	293	88
Aditivos para productos de petróleo	54.4	120	108
Aditivos automotrices y de combustible, otros	4.5	10	12
<b>TOTAL</b>	<b>1,030.5</b>	<b>2,272</b>	<b>\$1,066</b>

En la tabla 1.1 se muestra que la industria que invirtió más en el uso de inhibidores de corrosión es la producción y refinación de petróleo, además el consumo total fue de \$1.1 billones de dólares en 1998 en EUA mientras que en 1982 apenas alcanzaba los \$600 millones de dólares, lo cual habla de un incremento en la preocupación del mantenimiento óptimo del material metálico.

### 1.2.1 Clasificación de inhibidores

Los inhibidores de corrosión se pueden clasificar en dos tipos: inhibidores de interface y acondicionadores del medio (“scavengers”). En la Figura 1.2 se muestra un diagrama general de la clasificación de los inhibidores.



**Figura 1.2 Clasificación de inhibidores [1]**

Acondicionadores del medio (“scavengers”): al añadir este tipo de inhibidor, la corrosión puede ser controlada mediante la remoción de las especies corrosivas del medio.

Inhibidores de interfase: controlan la corrosión formando películas en la interfase metal-medio, estos pueden clasificarse en líquidos y de fase vapor.

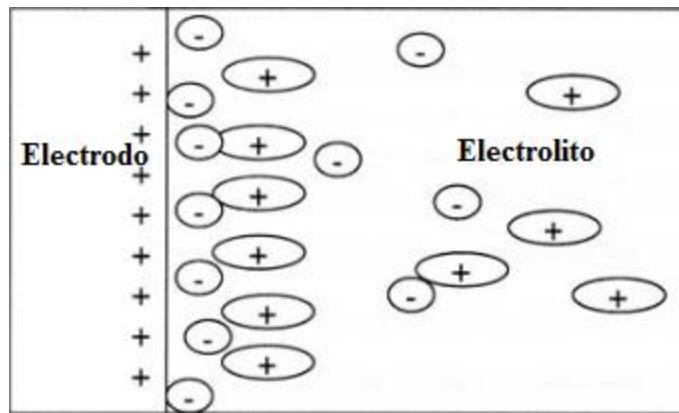
- Fase líquida. A su vez se clasifica en anódicos, catódicos o mixtos, dependiendo de qué reacción alteran.

-Anódicos. Facilitan la formación de películas pasivas y se emplean para medios donde se forman productos poco solubles como óxidos, hidróxidos o sales.

-Catódicos. Controlan la corrosión mediante la disminución de la velocidad de reducción (“venenos catódicos”) o por la precipitación selectiva en las zonas catódicas (precipitados catódicos). Algunos venenos catódicos son sulfuros y selenuros, estos se adsorben en la superficie del metal, otros también pueden causar ampollas de hidrógeno y fragilización por hidrógeno. En soluciones casi neutras y alcalinas, aniones inorgánicos, como lo son los fosfatos, silicatos y boratos, forman películas protectoras que disminuyen la velocidad de la reacción catódica mediante la limitación de la difusión del oxígeno a la superficie del metal.

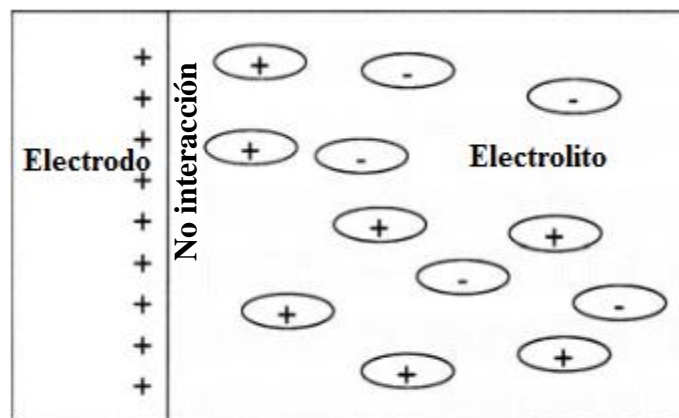
-Mixtos. Muchos de los compuestos orgánicos no se comportan específicamente como inhibidores anódicos ni catódicos, por ello se les denomina inhibidores mixtos, su eficiencia se relaciona con el grado en que se adsorben y cubren la superficie metálica pero ello depende de la estructura del inhibidor, la carga de la superficie del metal y el tipo de electrolito. Pueden proteger el metal de tres maneras: adsorción física, adsorción química y formación de películas.

La adsorción física es un resultado de la atracción electrostática entre el inhibidor y la superficie del metal, ejemplo se ello se muestra en la Figura 1.3.

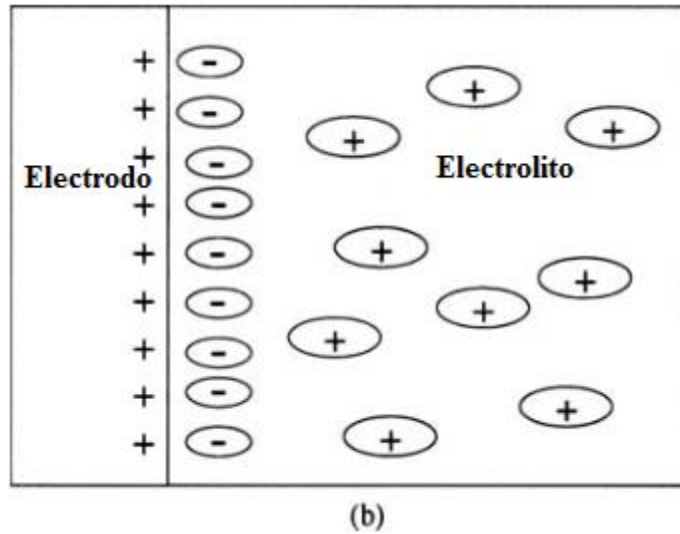


**Figura 1.3 Adsorción de la carga electronegativa del inhibidor en la superficie positiva del metal [1]**

En la adsorción química el proceso implica intercambio de carga o de transferencia de carga entre moléculas inhibitoras y la superficie del metal, es más lenta que la física, la manera en que se lleva a cabo se ilustra en la Figura 1.4.



(a)



**Figura 1.4 (a) Moléculas del inhibidor con carga positiva no interactúa con la superficie del metal que se encuentra cargado positivamente. (b) adsorción sinérgica del inhibidor cargado positivamente y aniones en una carga positiva de la superficie del metal. [1]**

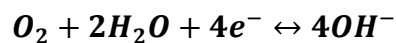
Las moléculas adsorbidas pueden ser sometidas a reacciones en la superficie y formar películas poliméricas, estas no deben ser solubles en el medio y también pueden ser o no conductoras.

- Fase vapor. Se emplea sobretodo en ambientes cerrados, se usan bajas presiones de vapor generalmente son más eficientes para metales ferrosos que para metales no ferrosos.

## 1.2.2 Mecanismos de inhibición

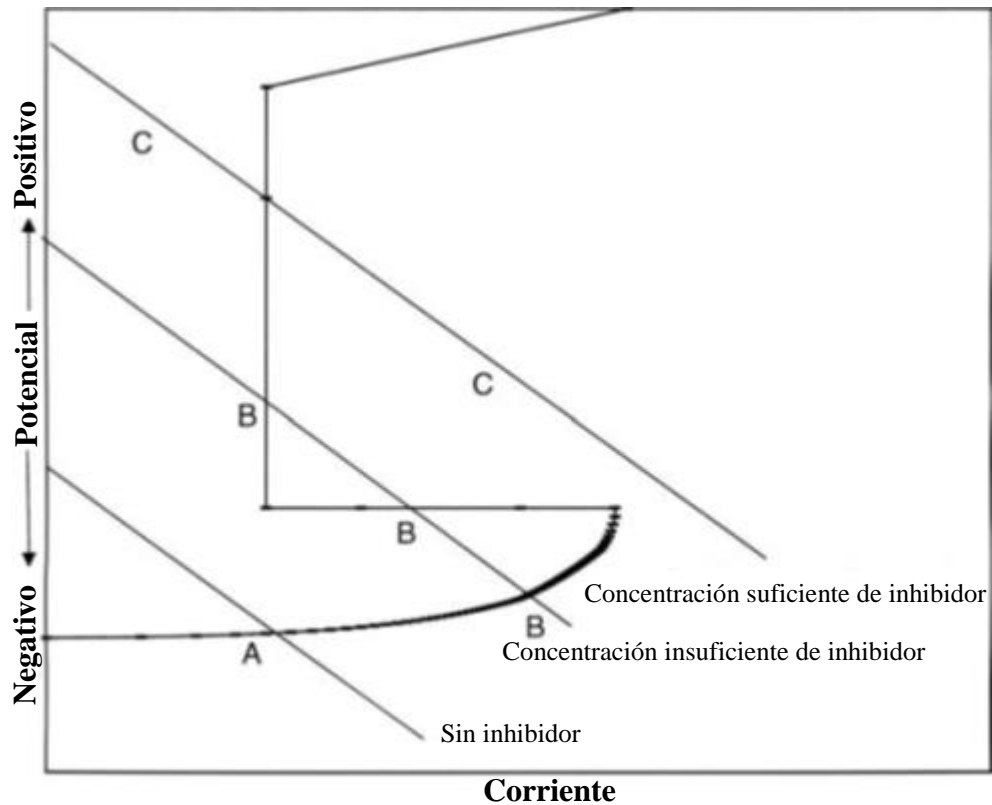
### 1.2.2.1 Acondicionadores ambientales

En soluciones casi neutras la reacción catódica común es la reducción del oxígeno:



### 1.2.2.2 Inhibidores anódicos (pasivadores)

Su mecanismo puede ser explicado al usar un diagrama de polarización que muestre las zonas activas y pasivas de un metal como se muestra en la Figura 1.5.

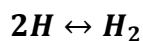
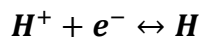


**Figura 1.5 Diagrama de polarización [1]**

El punto A de la Figura 1.5 corresponde al estado activo de un metal en ausencia de inhibidor, conforme la concentración del inhibidor incrementa la velocidad de corrosión también lo hace hasta alcanzar una concentración crítica y una velocidad de corrosión crítica en el punto B. Posterior al punto crítico hay una rápida transición de metal al estado pasivo y disminuye la velocidad de corrosión en el punto C.

### 1.2.2.3 Inhibidores catódicos

Los inhibidores catódicos son los que actúan sobre la reacción catódica. En una solución ácida la reacción catódica es comúnmente la reducción de hidrógeno a la formación de moléculas de hidrógeno:



### 1.2.2.4 Inhibidores mixtos

La adsorción que presentan estos inhibidores en contacto con el material metálico, es el resultado de fuerzas electrostáticas entre la cara eléctrica en el metal y las cargas iónicas o de dipolos en las moléculas del inhibidor. El potencial de carga cero es el potencial de un



metal, mientras que el potencial de corrosión es dado por el metal sumergido en un medio específico, cuando la diferencia entre ambos es negativa, el metal está negativamente cargado y favorece la adsorción de cationes, mientras que si la diferencia es positiva, se facilita la adsorción de aniones.

El metal fácilmente adsorbe las moléculas de agua, sin embargo las moléculas orgánicas reemplazan las del agua.

#### **1.2.2.5 Inhibidores fase vapor**

Su mecanismo implica dos pasos: el del transporte del inhibidor a la superficie metálica y el de la interacción del inhibidor en la superficie. Estos inhibidores pueden vaporizarse en su forma molecular o pueden disociarse primero para luego vaporizarse.

#### **1.2.3 Selección y evaluación de inhibidor.**

En general el proceso de evaluación y selección de un inhibidor de corrosión involucra la evaluación en laboratorio, la evaluación de compatibilidad incluyendo el costo y la evaluación de campo.

- Metodologías de laboratorio. Deben simular condiciones de campo considerando principalmente las variables directas (composición, temperatura y presión) y su posible las indirectas (hidrodinámica). Se puede hacer las siguientes pruebas:
  1. prueba de la rueda,
  2. prueba de la burbuja,
  3. prueba estática,
  4. electrodo de disco rotatorio,
  5. electrodo de cilindro rotatorio,
  6. jaula rotatoria,
  7. chorro de pinzamiento y
  8. cámara de humedad.
- Técnicas de medición. Se usan para determinar la velocidad de corrosión, pueden ser destructivas (altera el proceso de corrosión durante el proceso de medición o si el material es físicamente removido del medio) o no destructivas (incluyen resistencia a la polarización ( $R_p$ ), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y ruido electroquímico). Algunos ensayos son.
  1. Pérdida de peso
  2. Métodos electroquímicos
  3. Análisis de solución
- Evaluación de compatibilidad. Comprende el costo, cuestiones ambientales, control de calidad y la facilidad que tiene el inhibidor de formar emulsiones
- Evaluación en campo. Las técnicas en campo deben ser de alta confiabilidad, sin mantenimiento regular y de tiempo de respuesta corto.

Para determinar la eficiencia de inhibición (P) ésta se calcula de la siguiente forma:

$$P = \left( \frac{w_0 - w}{w_0} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 1.1}$$

donde  $w_0$  es la velocidad de corrosión en ausencia del inhibidor y  $w$  es la velocidad de corrosión en el mismo medio pero con el inhibidor agregado.

La norma NRF-005-PEMEX-2009: “PROTECCIÓN INTERIOR DE DUCTOS CON INHIBIDORES” marca únicamente dos ensayos para la evaluación de inhibidores, estos son pérdida de peso y electroquímicos, dentro de los últimos únicamente implica el ensayo de Resistencia a la polarización ( $R_p$ ) a diferentes tipos de flujos obtenidos a partir de su simulación usando el electrodo de cilindro rotatorio. En la tabla 1.2 obtenida de la norma NRF-005-PEMEX-2009, se indica la velocidad para la evaluación del inhibidor según el flujo del ducto para el cual será destinado. Sin embargo en este proyecto se propone realizar las curvas de polarización anódicas y catódicas para encontrar el mecanismo de protección, los efectos hidrodinámicos y en caso de que el inhibidor de corrosión forme películas, el tipo de adsorción que presenta.

**Tabla 1.2 Revoluciones por minuto para la obtención de simulación de fluido [8]**

Flujo en ducto			r/min equivalentes para electrodo rotatorio
Barriles/día	L/min	cm/s	
176	19	1	9
1 757	194	10	94
3 514	388	20	193
5 271	582	30	293
7 028	776	40	394
8 785	970	50	507
10 542	1 164	60	615
12 299	1 358	70	724
14 056	1 552	80	834
15 813	1 746	90	945
17 570	1 940	100	1 057
35 141	3 880	200	2 202
52 711	5 820	300	3 382
70 282	7 760	400	4 586
87 852	9 700	500	5 809
105 423	11 640	600	7 046
122 993	13 579	700	8 295
140 564	15 519	800	9 555
158 134	17 459	900	10 824
175 705	19 399	1 000	12 101

#### **1.2.4 Inhibidores de corrosión naturales**

Los extractos de plantas son vistos como una rica fuente de compuestos químicos sintetizados naturalmente que se pueden extraer mediante procedimientos simples con un bajo costo. La principal causa para recurrir al uso de inhibidores orgánicos son los efectos riesgosos de la mayoría de los inhibidores de corrosión sintéticos. Recientemente los extractos de plantas han vuelto a ser importantes como una fuente ambientalmente aceptable, alta disponibilidad, son renovables y biodegradables.

El uso de compuestos orgánicos que contienen oxígeno, azufre y nitrógeno en su estructura para reducir el ataque de la corrosión en el acero han sido estudiados, se ha visto que el sulfuro y el nitrógeno son más eficientes como inhibidores de corrosión en medios como ácido sulfúrico y ácido clorhídrico.

Estos inhibidores son adsorbidos a la superficie del metal, desplazando las moléculas de agua y formando una película, la disponibilidad de pares de electrones libres en las

moléculas del inhibidor facilitan la transferencia de electrones del inhibidor al metal, formando un enlace covalente coordinado, la fuerza del enlace de quimisorción depende de la densidad de electrones en el átomo donador del grupo y también la polarizabilidad del grupo.

### 1.3 Números adimensionales

Los números adimensionales son variables relacionadas con el comportamiento de un fluido, para el estudio de la corrosión en condiciones hidrodinámicas se deben de tomar en cuenta algunos números como son el número de Reynolds (Re), el número de Schmidt (Sc) y el número de Sherwood (Sh).

El número adimensional más importante a considerar es el número de Reynolds (Re), es empleado para definir el tipo de fluido en que se estudia, si es menor a 200 se trata de un flujo laminar, pero si es mayor a 200 se habla de un flujo turbulento. Es obtenido a partir de la relación de fuerzas inerciales entre las fuerzas viscosas; es decir:

$$Re = \frac{u\rho l}{\mu} = \frac{\text{fuerza inercial}}{\text{fuerza viscosa}} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Donde u=velocidad; ρ=densidad; μ=viscosidad; l= longitud característica. La longitud característica de un cilindro es su diámetro.

El número de Schmidt (Sc) está asociado con las propiedades de transferencia de masa del fluido y se describe con la siguiente ecuación donde  $D_i$  es el coeficiente de difusión de la especie en el fluido:

$$Sc_i = \frac{\mu}{\rho D_i} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

El número de Sherwood (Sh) se asocia con el coeficiente de transferencia de masa ( $k_i$ ) de una especie en el fluido:

$$Sh_i = \frac{k_i l}{D_i} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Los tres números adimensionales mencionados anteriormente pueden correlacionarse con la siguiente expresión:

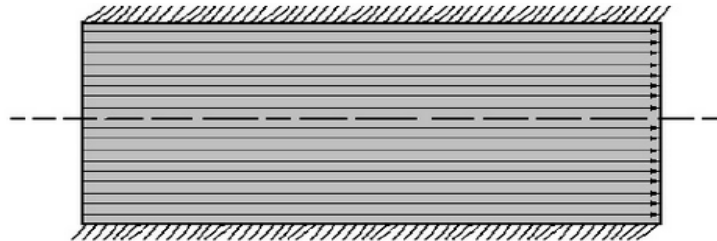
$$Sh_i = C Re^x Sc_i^y \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Donde  $C$ ,  $x$  y  $y$  son constantes que dependen del sistema hidrodinámico que se estudia.

## 1.4 Tipos de flujo

### 1.4.1 Flujo laminar

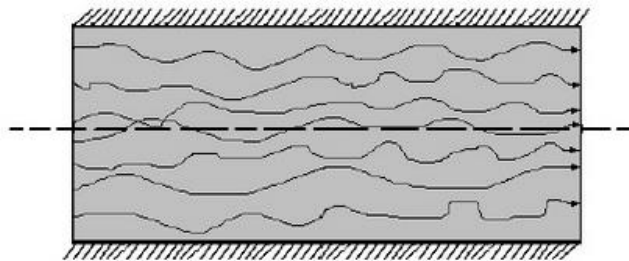
Es un movimiento en trayectorias separadas bien definidas, es limitado y comprende números de Reynolds menores a 200. En la Figura 1.6 se observa la forma gráfica de éste flujo



**Figura 1.6 Flujo laminar [9]**

### 1.4.2 Flujo turbulento

Las moléculas que lo forman sufren desplazamiento, suceden fenómenos de transferencia de masa, calor y movimiento. En la Figura 1.7 se simula el comportamiento de dicho fluido.



**Figura 1.7 Flujo laminar [9]**

“Cuando un fluido en movimiento se encuentra en un contenedor sólido, como sucede en la mayoría de los casos, las moléculas en movimiento también interactúan con las paredes del contenedor. Esta interacción ocasiona que el fluido se adhiera a las paredes sólidas y la generación de un esfuerzo de corte, tangencial al movimiento del fluido. Por lo tanto, la velocidad del fluido disminuye en la vecindad de la pared de la del contenedor”. [16]

## 1.5 Electrodo de cilindro rotatorio

Para simular las condiciones hidrodinámicas se han usado distintos sistemas, entre ellos el electrodo de cilindro rotatorio, éste permite proporcionar un flujo estable y con resultados reproducibles a volúmenes pequeños de electrolito, también da un transporte de masa uniforme y continuo, por ello es muy usado en el estudio de transporte de masa, efectos en la superficie de películas, fenómenos de inhibición, etc; además, a bajas velocidades permite trabajar en un flujo turbulento ( $Re > 200$ ).

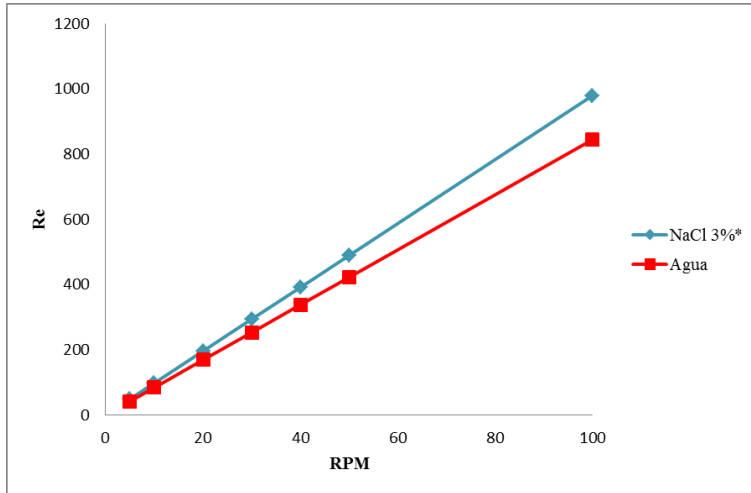
La viscosidad de los fluidos Newtonianos se modifica por la temperatura y la presión, pero en el caso de las mezclas también se ve afectada por la composición, los datos de NaCl 3% asumiendo una pieza cuyo diámetro es 1.3cm son:

- Viscosidad =  $928.6 \mu Pa \cdot s = 928.6 \times [10]^{(-6)} Kg/(m \cdot s)$
- Densidad =  $1026.8 Kg/m^3$

Para el agua y con un diámetro de 1.2 cm son:

- Viscosidad =  $0.00891 g/(cm \cdot s)$
- Densidad =  $0.997 g/[cm]^3$

En la Figura 1.8 se muestra los números de Reynolds a distintas revoluciones por minuto para agua y NaCl 3%, a 20 rpm ya se obtiene un Re igual a 200 lo que implica el cambio de un flujo laminar a uno turbulento a una baja velocidad del cilindro rotatorio. Además las dos sustancias se comportan de formas completamente similares. Los valores encontrados en la Figura 1.8 fueron determinados a través de un cálculo teórico del número de Re en relación con la velocidad de rotación mostrado en la referencia bibliográfica No.11.



**Figura 1.8 Comparación de números de Reynolds en diferentes medios**

Para asegurar la misma interacción entre el material y el fluido ya sea nivel industrial (tubería) como a laboratorio se debe operar en el intervalo de esfuerzo de corte producido por el fluido. El esfuerzo cortante  $\tau$  producido por el fluido sobre la superficie del cilindro al rotar se define como:

$$\tau_{(cilindro)} = \frac{f}{2} \rho V^2 \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Y el esfuerzo cortante  $\tau$  producido por un fluido sobre la superficie de un tubo al fluir en su interior se rige por la siguiente ecuación:

$$\tau_{(tubo)} = \frac{f}{8} \rho V^2 \quad \text{Ecuación 1.7}$$

donde  $f$  es el factor de fricción,  $\rho$  es la densidad del fluido y  $V$  es la velocidad periférica del cilindro o del interior del tubo según sea el caso.

## 1.6 Técnicas electroquímicas

### 1.6.1 Resistencia a la polarización lineal

El método de resistencia a la polarización ( $R_p$ ) fue propuesto por Stern y Geary en el año de 1957, parte de la suposición de que las curvas de polarización son prácticamente rectas cerca del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ). El método gira en torno a la siguiente ecuación:

$$i_{corr} = B/R_p \quad \text{Ecuación 1.8}$$

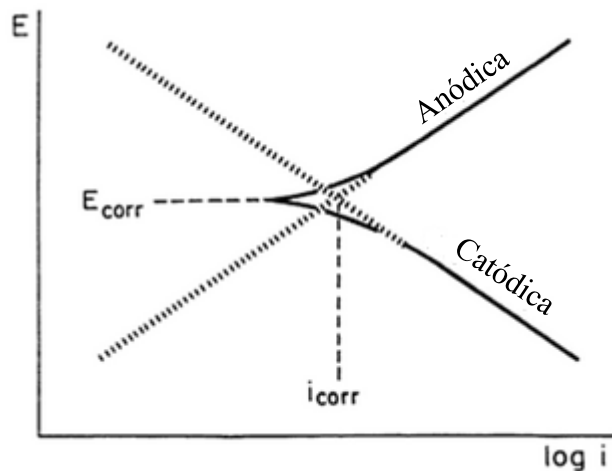
la cual es parecida en su estructura a la ley de Ohm; la constante B relaciona entre si las pendientes de Tafel, es decir,  $b_a$ (pendiente anódica) y  $b_c$ (pendiente catódica) (Ecuación 1.9). A partir de la densidad de corriente ( $i_{corr}$ ) se puede obtener la velocidad de corrosión

$$B = (b_a b_c) / [2.303(b_a + b_c)] \quad \text{Ecuación 1.9}$$

El valor común de las pendientes de Tafel es de 120 mV /década, asumiendo esta consideración B tendría un valor de 26 mV, pero sólo se puede usar en ciertos casos pues las pendientes no siempre se comportan así.

### 1.6.2 Curvas de polarización (extrapolación de Tafel)

Se trata de una técnica electroquímica en la cual es aplicado un sobrepotencial tanto en sentido anódico como en catódico a alto campo para generar curvas de polarización, tiende a ser destructiva por el potencial manejado. El cálculo de la velocidad de corrosión por medio de la extrapolación de Tafel (método de intersección) se hace a partir de la extrapolación de la zona lineal de las curvas catódica y anódica en un diagrama E (potencial) vs log i (corriente) y su intersección como se muestra en la Figura 1.9, sin embargo no siempre se presenta en ambas curvas una región lineal lo suficientemente extensa para realizar la extrapolación.



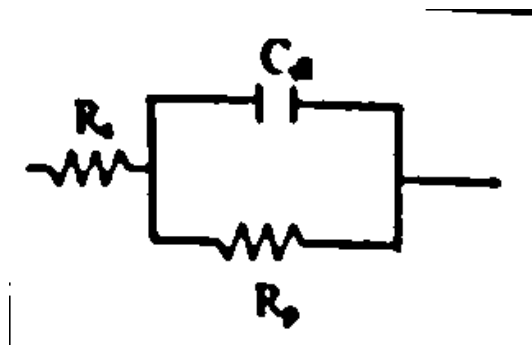
**Figura 1.9 Representación esquemática de extrapolación de Tafel [16]**

### 1.6.3 Espectroscopía de impedancia electroquímica

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica que emplea corriente alterna, donde la explicación del proceso de corrosión se basa en un circuito eléctrico



equivalente entre la superficie del electrodo de trabajo y la interfase de la solución (Figura 1.10).



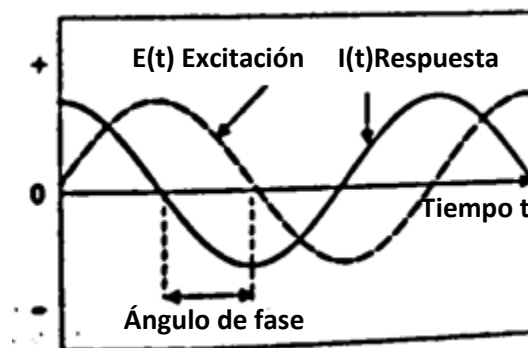
**Figura 1.10 Circuito equivalente [21]**

La impedancia ( $Z$ ) no es más que el nombre con el que se le conoce a la resistencia en el caso de corriente alterna, considerando la ley de Ohm para corriente directa y sustituyendo la resistencia  $R$  por  $Z$  la expresión sería la siguiente:

$$E = IZ$$

**Ecuación 1.10**

Lo que realmente leen los equipos de EIS es la admitancia ( $Y$ ). La diferencia entre impedancia y resistencia reside en que en la primera depende de la frecuencia de señal aplicada, cada frecuencia se define por la relación entre la amplitud de corriente alterna y la amplitud de la señal de potencial alterno y el ángulo de fase. La corriente y el potencial en la corriente alterna son respuestas sinusoidales con partes imaginarias y reales, el tiempo entre una y otra da el ángulo de fase como se muestra en la Figura 1.11



**Figura 1.11 Fasores de potencia (E) y corriente (I) respecto al tiempo [21]**

Teniendo en cuenta las partes reales e imaginarias las siguientes ecuaciones describen la impedancia y la admitancia:

$$Z = Z' + jZ'' \quad \text{Ecuación 1.11}$$

$$Y = Y' + jY'' \quad \text{Ecuación 1.12}$$

El ángulo de fase definido en términos de impedancia:

$$\theta = \tan^{-1}[Z''/Z'] \quad \text{Ecuación 1.13}$$

Los resultados obtenidos pueden ser visualizados por diagramas de Nyquist, de Bode Theta o Bode Impedancia. En los diagramas de Nyquist se grafica la parte imaginaria de la impedancia contra la parte real, da información sobre el valor de la resistencia del electrolito ( $R_s$ ), la resistencia de polarización ( $R_p$ ) y puede describir algunos fenómenos que ocurren en la zona de estudio, en la Figura 1.12 se muestra un diagrama de Nyquist ideal y la información que brindan algunos de sus puntos.

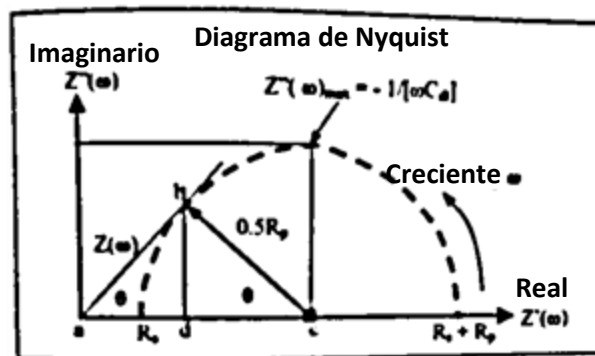


Figura 1.12 Diagrama de Nyquist[21]

### 1.7 Técnicas de caracterización de materiales (Microscopía electrónica de barrido)

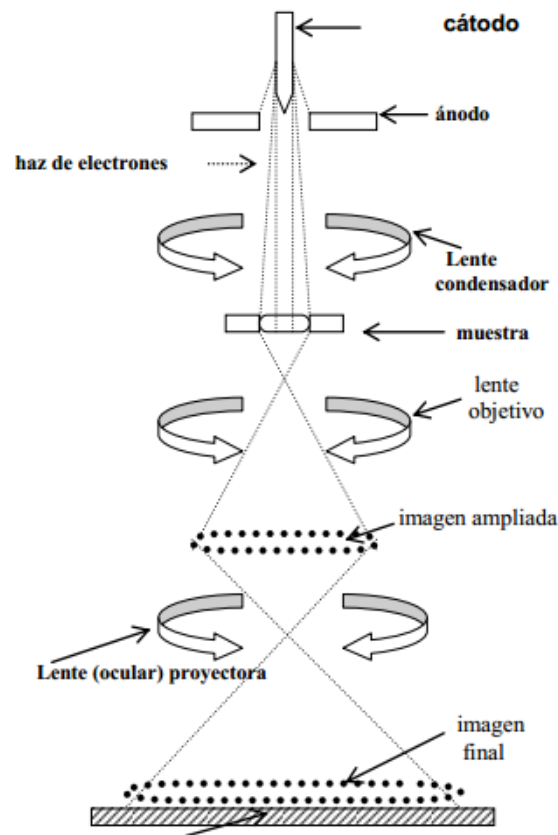
El microscopio electrónico de barrido (MEB) funciona a partir de electrones generados por la concentración puntual de un haz proveniente de un cátodo de tungsteno, la concentración es obtenida con la ayuda de campos magnéticos que ejercen como lentes.

Los electrones pueden solo ser reflejados por la muestra o interaccionar con la superficie y formar electrones secundarios. “En ambos casos los electrones se envían e inciden en la superficie de un detector localizado en las cercanías de la muestra. Este aditamento está

conectado a un amplificador que envía señales en forma de rayos catódicos a la pantalla de un monitor de televisión. Para registrar la imagen formada se utiliza una cámara fotográfica.

El M.E de barrido, ofrece imágenes con una resolución que alcanzan de 10 a 20 nm. El aumento efectivo es de 15,000 a 50,000 diámetros. Otra ventaja de este microscopio es que forma imágenes con una gran profundidad de foco; de aproximadamente 500 veces que la del microscopio fotónico. Esta propiedad le confiere a la imagen su aspecto tridimensional” (2-microscopia)

En la Figura 1.13 se muestra un diagrama representativo de los principales componentes el MEB y el camino que debe seguir el haz de electrones hasta llegar a la muestra a analizar.



**Figura 1.13 Representación de componentes principales del MEB [22]**

## CAPITULO 2. MÉTODO EXPERIMENTAL

### 2.1 Procedimiento experimental

Se trabajó con probetas de acero 1018 en forma de cilindro con medidas de 1.3 cm de diámetro y 1.5 cm de altura, primeramente se hizo una caracterización metalográfica para verificar que su microestructura correspondiera a la de un acero 1018, también se verificó a través de un análisis químico de chispa (espectrofotómetro de emisión) que su composición estuviese dentro de lo esperado.

Se efectuaron extracciones alcohólicas de los principios activos a partir de epazote y tabaco. Se prepararon las siguientes soluciones: NaCl 3%, NaCl 3% con extracto de *Dysphania ambrosioides* y NaCl 3% con *Nicotiana Tabacum*, todas ellas fueron saturadas con CO<sub>2</sub> antes de la realización de las técnicas electroquímicas.

Las técnicas electroquímicas se efectuaron en un orden menor sobrepotencial aplicado a mayor, se usó la velocidad de rotación como variable, las velocidades usadas fueron 0, 100, 1000 y 5000 rpm. En la Tabla 2.1 se muestra en número de Reynolds correspondiente a cada velocidad de rotación, el tipo de ducto trabajado y los rangos aproximados de flujo de ducto según lo reportado en la norma NRF-005-PEMEX-2009.

**Tabla 2.1 Velocidades de rotación**

Velocidad de rotación (rpm)	Reynolds	Tipo de flujo	Velocidades aproximadas dadas por la norma NRF-005-PEMEX-2009			
			Flujo en ducto			r/min equivalentes para electrodo rotatorio
			Barriles /Día	L/min	cm/s	
0	0	Estático	----	---	---	---
100	979	Turbulento	1757	194	10	94
1000	9785	Turbulento	15813	1746	90	945
			17576	1940	100	1057
5000	48923	Turbulento	70282	7760	400	4586
			87852	9700	500	5809

Finalmente algunas probetas fueron sometidas a un análisis químico mediante el MEB para conocer los productos de corrosión formados.

### **2.1.1 Caracterización metalográfica de la probeta**

Se realizó un desbaste en la cara inferior de una probeta con lijas de SiC No. 240 hasta la No. 600, posteriormente fue pulida en paño grueso y después en paño fino, usando en ambos casos alúmina como abrasivo.

La cara pulida fue atacada con Nital 2 para revelar la microestructura del acero, la pieza fue observada en un microscopio óptico y se tomaron imágenes a 50x, 100x y 500x

### **2.1.2 Caracterización química de la probeta**

Una probeta fue comprimida hasta alcanzar el diámetro mínimo para ser analizado en el espectrómetro de emisión óptica, ambas caras tuvieron que ser desbastadas para obtener superficies planas, en este caso se usaron lijas de SiC No. 80 al No. 600.

### **2.1.3 Extracciones alcohólicas**

Se hicieron dos extracciones alcohólicas ya que sólo se emplearon dos inhibidores, la *Dysphania ambrosioides* fue obtenida a partir del epazote, mientras que la *Nicotiana tabacum* fue obtenida del tabaco de puros marca COHIBA.

#### **2.1.3.1 Extracción de *Dysphania ambrosioides***

El epazote tuvo que ser secado previamente, se pesaron 80 gramos de hoja de epazote y se le adicionaron 200mL de alcohol etílico. Se asumió una eficiencia de extracción del 80 %.

#### **2.1.3.2 Extracción de *Nicotiana tabacum***

Se usó tabaco de puros marca COHIBA, se pesaron 50 gramos de tabaco y se le adicionaron 400mL de alcohol etílico. Se asumió una eficiencia de extracción del 37 %.

### **2.1.4 Preparación de las soluciones**

#### **2.1.4.1 Preparación solución NaCl 3%**

Se pesaron 30 gramos de NaCl en una balanza analítica y se llevó al aforo en un matraz de 1000mL con agua destilada, la solución fue vertida en el matraz de bola donde posteriormente se hicieron las pruebas electroquímicas y ahí fue saturada con CO<sub>2</sub>.

#### 2.1.4.2 Preparación solución NaCl 3% con *Dysphania ambrosioides*

Se pesaron 30 gramos de NaCl en una balanza analítica, se adicionó 1 mL del extracto de *Dysphania ambrosioides* y se llevó al aforo en un matraz de 1000mL con agua destilada, la solución fue vertida en un matraz de bola y fue saturada con CO<sub>2</sub>.

#### 2.1.4.3 Preparación solución NaCl 3% con *Nicotiana tabacum*

Se pesaron 30 gramos de NaCl en una balanza analítica, se agregó 0.27 mL del extracto de *Nicotiana tabacum* y se llevó al aforo en un matraz de 1000mL con agua destilada, después de verter una solución en un matraz de bola se le saturó con CO<sub>2</sub>.

#### 2.1.5 Experimentación, técnicas electroquímicas

Se usó un electrodo de Ag/AgCl (sat) como electrodo de referencia y grafito como electrodo auxiliar, el software con el que se extrajeron los datos del equipo GillAC fue el Parallel 4- Sequencer y el equipo de electrodo rotatorio con el cual se alcanzó las velocidades trabajadas fue Pine (Figura 2.1). Las pruebas se realizaron por duplicado, en la Tabla 2.2 se muestra las variables usadas en las pruebas.

**Tabla 2.2 Variables en pruebas realizadas**

Velocidad (rpm)	Medio
0	NaCl 3% (blanco)
	NaCl 3%+Dysphania ambrosioides
	NaCl 3%+Nicotiana tabacum
100	NaCl 3% (blanco)
	NaCl 3%+Dysphania ambrosioides
	NaCl 3%+Nicotiana tabacum
1000	NaCl 3% (blanco)
	NaCl 3%+Dysphania ambrosioides
	NaCl 3%+Nicotiana tabacum
5000	NaCl 3% (blanco)
	NaCl 3%+Dysphania ambrosioides
	NaCl 3%+Nicotiana tabacum



a)



b)



c)

**Figura 2.1 Equipos empleados a) y c) conforman el electrodo rotatorio Pine b) equipo GillAC**

Primeramente se tomaron 1800 segundos para la estabilización de potencial de cada probeta en cada medio con el fin de encontrar el potencial de reposo a partir del cual se realizaron las siguientes pruebas electroquímicas. Después se empleó espectroscopía de impedancia electroquímica con una amplitud de 10 mV y un intervalo de frecuencias desde 10 kHz hasta 10 mHz. Posteriormente se realizó resistencia a la polarización, sólo se aplicaron sobrepotenciales de -30mV a +30mV respecto al potencial de reposo. Luego se efectuó una curva catódica con sobrepotenciales de 0 mV hasta -500 mV respecto al potencial de corrosión, y finalmente se hizo una curva de polarización anódica con sobrepotenciales desde 0 mV hasta +500 mV respecto al potencial de corrosión. Entre cada técnica se tomaron 10 minutos de reposo.

### **2.1.6 Análisis químico por MEB**

Este procedimiento sólo fue aplicado para las probetas correspondientes a 5000 rpm en medios de NaCl 3%, NaCl 3% + *Dysphania ambrosioides* y NaCl 3%+ *Nicotiana tabacum*. Se recurrió a un microscopio JEOL JSM-5900LV y sólo se hicieron dos mapeos cualitativos por cada probeta.

## CAPITULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Caracterización metalográfica de la probeta

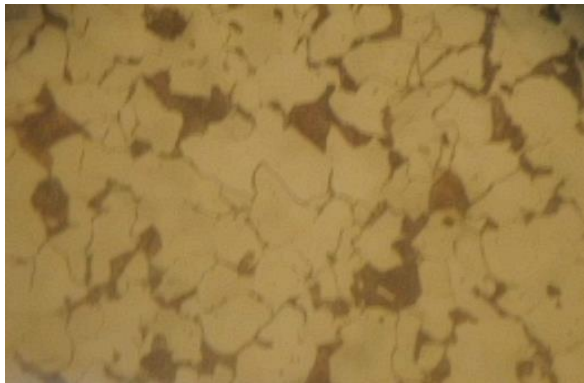
Tanto la caracterización metalográfica como la caracterización química se efectuaron para confirmar que se trabajaba con un acero 1018, ambas se realizaron sólo en una probeta cada una y en el orden presentado, para la caracterización química fue necesario deformar por completo la probeta y por ende su microestructura cambió, sin embargo su composición química no lo hizo.



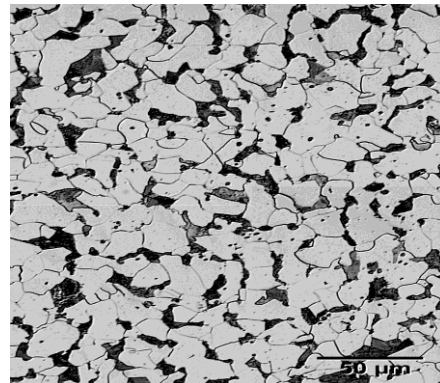
**Figura 3.1 Acero 1018 atacado con nital 2 a 50x**



**Figura 3.2 Acero 1018 atacado con nital 2 a 100x**



**Figura 3.32 Acero 1018 atacado con nital 2 a 500x**



**Figura 3.4 Microestructura de un acero 1018 [23]**



En las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3 son de la microestructura revelada a distintos aumentos por la probeta luego de prepararla y atacarla con Nital 2, en la figura 3.4 se encuentra una microestructura característica de un acero 1018. Comparando las tres Figuras con la cuarta se ve mucha similitud tanto en el tamaño de los granos de ferrita y como en la distribución del carbón a lo largo de la microestructura, con esto se confirma que se está trabajando con un acero 1018.

### 3.2 Caracterización química de la probeta

Por medio de un espectrofotómetro de emisión óptica se hizo el análisis químico de una probeta, en resultado se encuentra en la parte de abajo de la Tabla 3.1, también se cuenta con la tolerancia de composición química teórica para el acero 1018 en la parte superior de la tabla. Con tal información se hacen las siguientes observaciones:

- los porcentajes de carbono y manganeso se encuentra dentro de los rangos marcados, y
- los porcentajes de fósforo y azufre está muy por debajo del máximo señalado para el acero

**Tabla 3.1 Comparación de composición teórica con real**

<b>Composición química teórica [24]</b>			
<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>
0.15-0.20	0.60-0.90	0.04 (Max)	0.04 (Max)
<b>Composición química real</b>			
<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>
0.1507	0.734	0.0061	0.0045

Con las dos formas de caracterización de la probeta no cabe duda de que se maneja un acero 1018 para este trabajo, con la caracterización metalográfica se vio que cumple con la microestructura típica y por medio de la caracterización química se demostró el cumplimiento de los rangos porcentuales de composición de C, Mn, P y S.

3.3 Técnicas electroquímicas  
3.3.1 Potencial contra tiempo

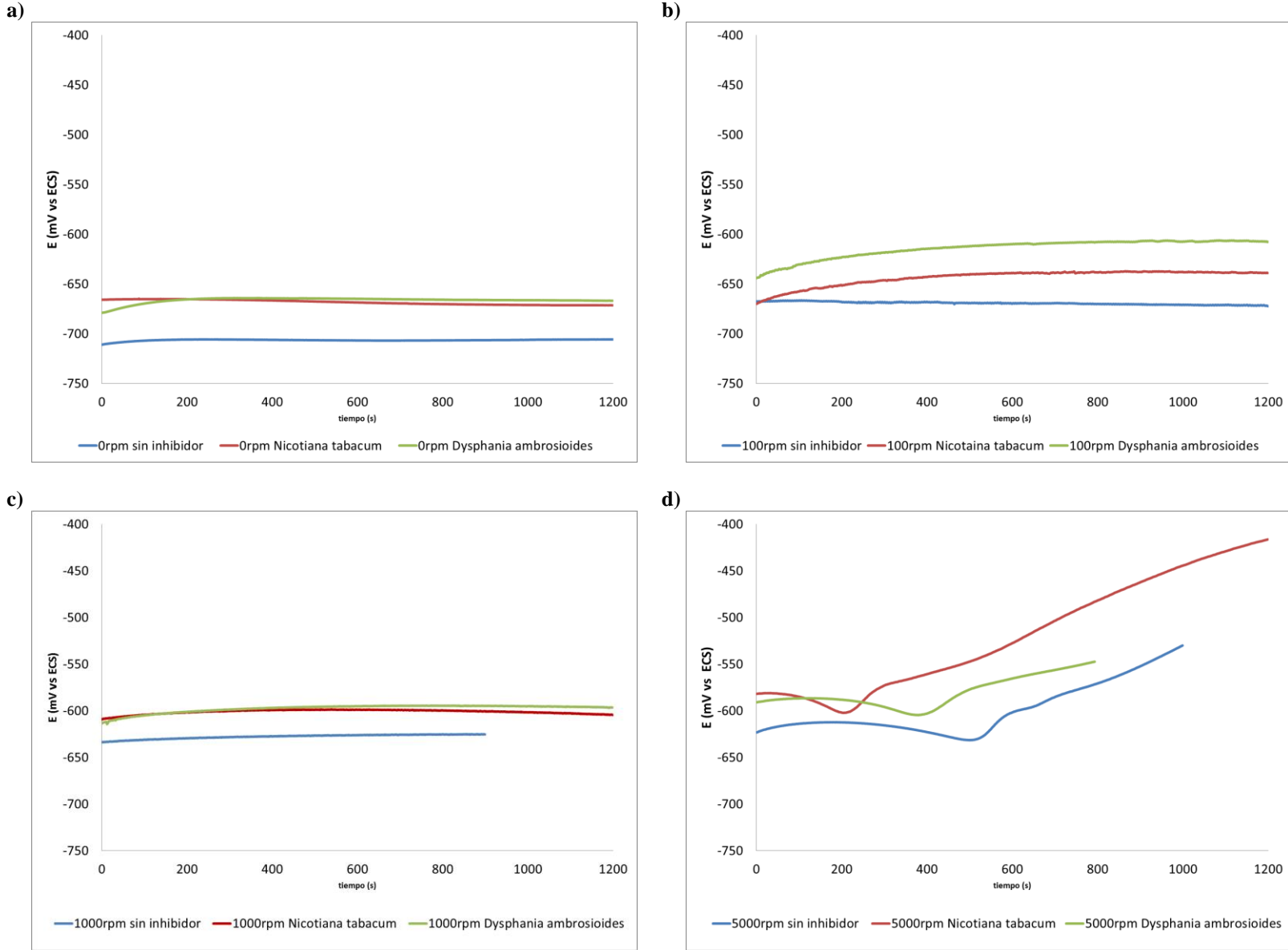
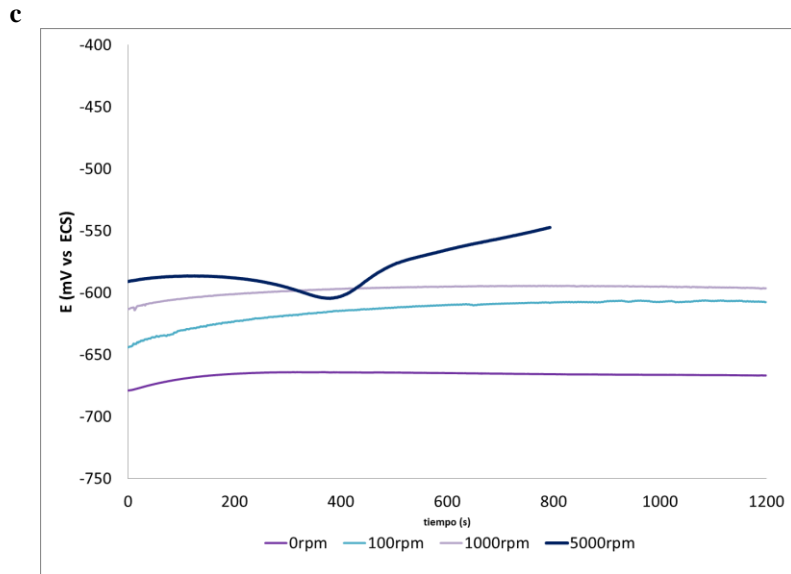
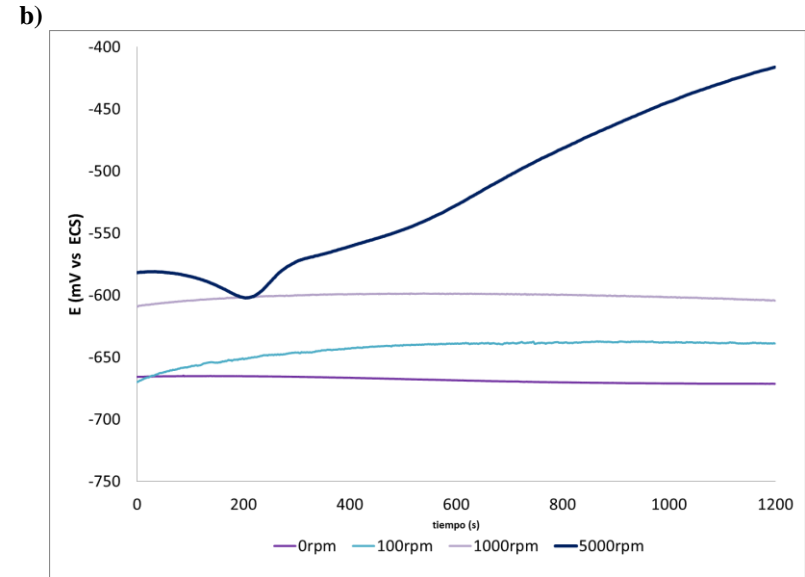
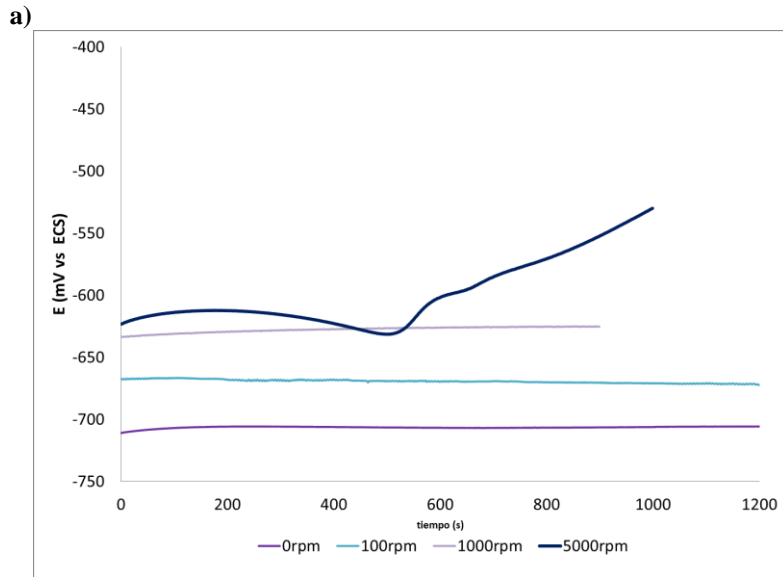


Figura 3.5 Curvas de potencial contra tiempo a distintas velocidades de rotación: a)0rpm, b)100rpm, c)1000rpm y d)5000rpm



**Figura 3.6** Curvas de potencial contra tiempo a distintas velocidades de rotación con las condiciones de: a) Sin inhibidor, b) Con adición de extracto de *Nicotiana tabacum* c) Con adición de extracto de *Dysphania ambrosioides*

En la Figura 3.5 se observan las curvas de potencial contra tiempo a las velocidades de rotación de 0, 100, 1000 y 5000 rpm, las curvas azules representan los resultados al no emplear ningún inhibidor, las rojas se refieren al uso de *Nicotiana tabacum* como inhibidor y las verdes al uso de *Dysphania ambrosioides*. En los tres casos es visible el mismo comportamiento frente al cambio en las velocidades de rotación, con un flujo estático fácilmente se estabiliza el potencial del sistema, pero conforme la velocidad de rotación se incrementa, sobre todo a 5000 rpm, el potencial tarda en estabilizarse más debido a la formación de una capa de productos de corrosión en la superficie del metal, que es removida debido a la turbulencia del flujo y nuevamente vuelve a formarse. Resumiendo, conforme la velocidad de rotación se incrementa, el potencial del sistema va siendo más activo por la formación y remoción de los productos de corrosión que genera la turbulencia del fluido.

También es notorio que los potenciales más bajos son los del metal en un medio sin extracto adicionado y que el potencial tarda más en estabilizarse cuando se tiene presencia de inhibidor, ello es muy notorio en la parte b de la Figura 3.5.

En la figura 3.6 se presentan nuevamente las curvas de potencial contra tiempo pero en el caso de la parte a) se trata solamente de las curvas obtenidas al no adicionar ningún extracto, la parte b) al adicionar extracto de *Nicotiana tabacum* y la c) con *Dysphania ambrosioides*.

Generalizando se puede decir que conforme la velocidad de rotación el potencial también lo hace, como ya se había dicho, a 5000 rpm el potencial tarda mucho en estabilizarse por la remoción de productos en la superficie.

### 3.3.2 Curvas de polarización

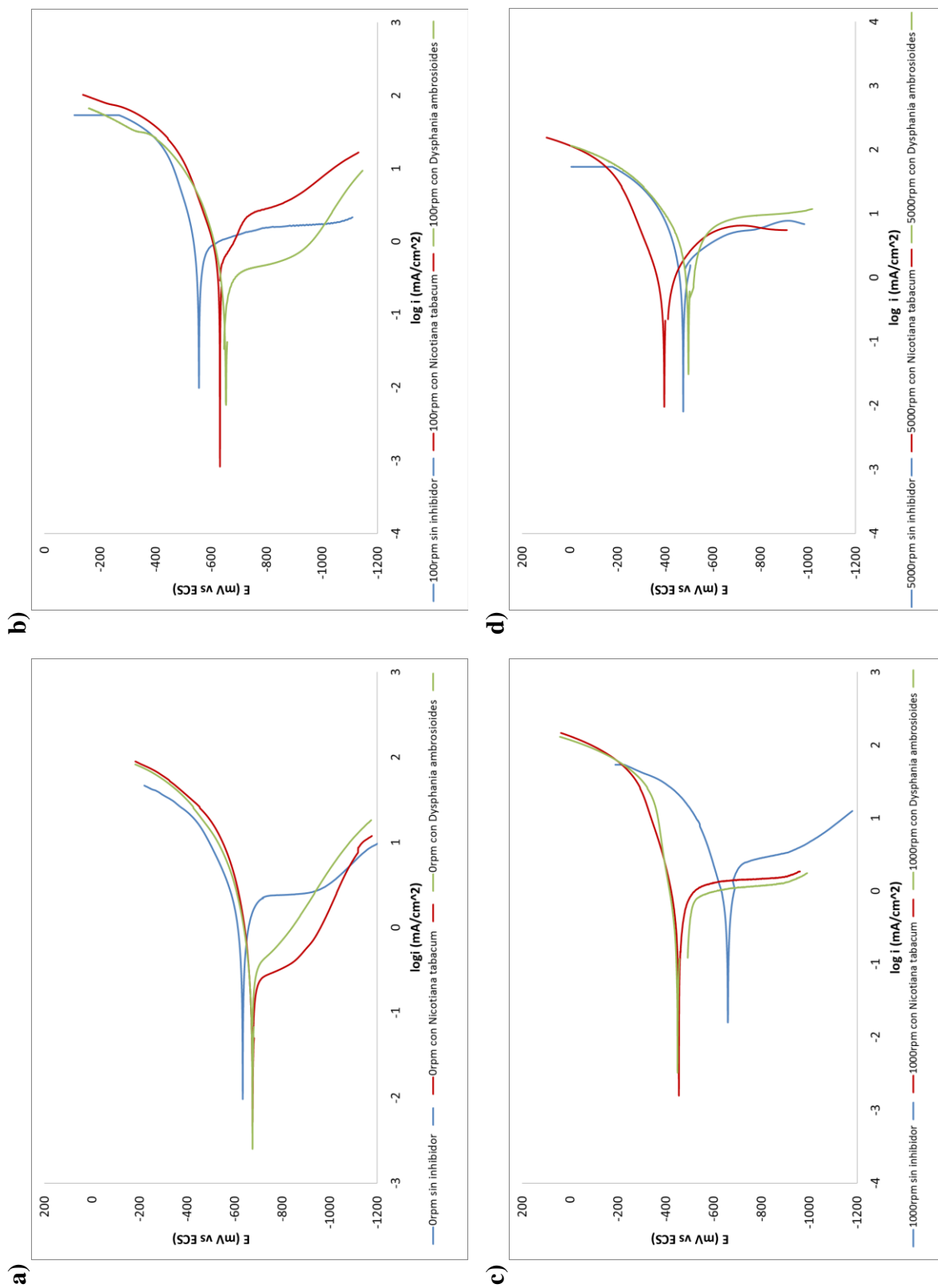


Figura 3.7 Curvas de polarización a distintas velocidades de rotación: a)0rpm, b)100rpm, c)1000rpm y d)5000rpm

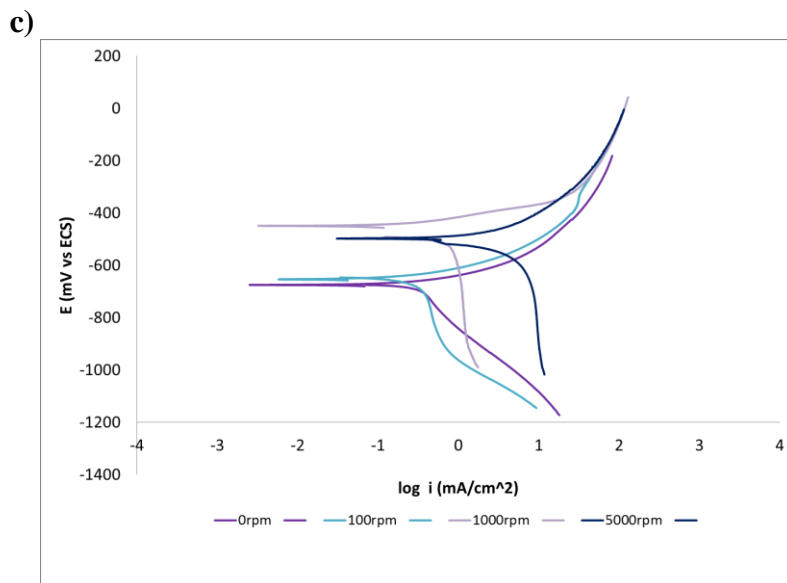
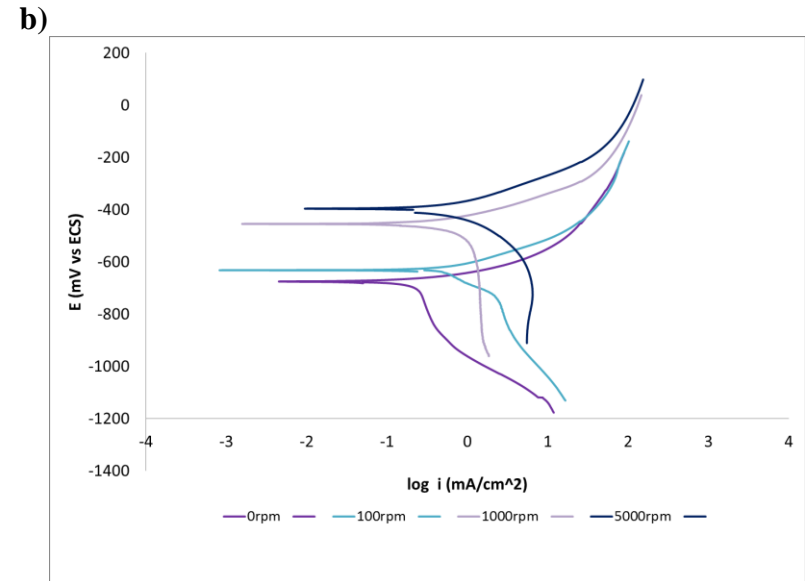
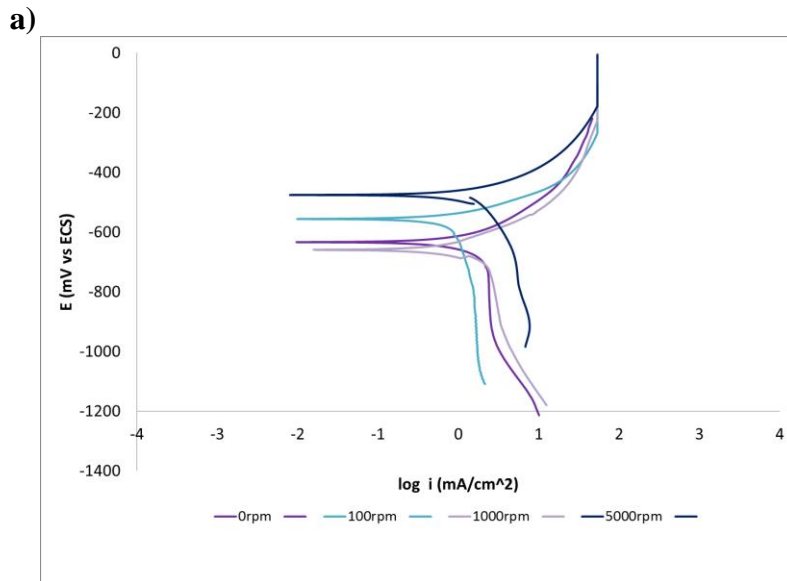


Figura 3.8 Curvas de polarización a distintas velocidades de rotación a las condiciones de: a) Sin inhibidor, b) Con adición de extracto de *Nicotiana tabacum*, c) Con adición de extracto de *Dysphania ambrosioides*

**Tabla 3.2 Datos de eficiencia de inhibición obtenidos con curvas de polarización**

Velocidad (rpm)	Inhibidor	Velocidad de corrosión (mma)	b <sub>a</sub> (mV/mA)	Eficiencia de inhibición
0	Sin inhibidor	95.25	587.2	NA
	Nicotiana tabacum	65.29	335.6	31.45
	Dysphania ambrosioides	84.11	433.9	11.69
100	Sin inhibidor	101.12	341.2	NA
	Nicotiana tabacum	29.015	137.8	71.31
	Dysphania ambrosioides	37.57	259.7	62.85
1000	Sin inhibidor	44.14	261.4	NA
	Nicotiana tabacum	101.12	394.9	-129.09
	Dysphania ambrosioides	110.87	273.5	-151.19
5000	Sin inhibidor	65.29	273.3	NA
	Nicotiana tabacum	78.49	254.9	-20.23
	Dysphania ambrosioides	63.80	283.9	2.28

En la Figura 3.7 se cuenta con los resultados de las curvas de polarización a diferentes velocidades y medios, se efectuó una polarización de +- 500 mV respecto al potencial de reposo, todas presentaron en la rama catódica una zona controlada por la difusividad, por ello la velocidad de corrosión tuvo que ser calculada a partir de la rama anódica puesto que la zona activacional de la catódica comprendía potenciales por debajo de los 120 mV respecto al potencial de reposo. Las curvas azules corresponden a las sometidas a un medio sin inhibidor, en las rojas se empleó *Nicotiana tabacum* como inhibidor y en las verdes se usó *Dysphania ambrosioides*.

El potencial de corrosión en un medio sin inhibidor crece con el incremento de velocidad de corrosión, el potencial al usar *Nicotiana tabacum* también se comporta de forma similar e incluso con *Dysphania ambrosioides* sólo que este último decrece un poco al llegar a la

velocidad máxima usada. A 0 rpm el potencial de corrosión de las curvas correspondientes al uso de inhibidores se desplazan en sentido catódico, mientras que a 100 rpm las curvas en medio con inhibidor se mueven en sentido catódico. A 1000 rpm ambas curvas en medios con inhibidores se desplazan en sentido anódico y a 5000 rpm las curvas siguen el mismo comportamiento que a 100 rpm. Sin embargo se trata de inhibidores mixtos pues conforme la velocidad de rotación se incrementa, la zona difusional de las curvas de polarización para el material en los tres distintos medios va siendo más marcada, comparando las curvas a y d de la Figura 3.7 se ve una pendiente muy pronunciada en la rama catódica a potenciales no muy lejanos de los de reposo. No obstante, al incrementarse la velocidad de rotación es de esperar un aumento en la corriente límite y efectivamente se encuentra aunque no es importante.

Si sólo se considerara el cambio en el potencial de corrosión para determinar el comportamiento del inhibidor se podría decir lo siguiente: A 0 rpm ambos inhibidores son inhibidores catódicos, a 100 rpm nuevamente tanto *Nicotiana tabacum* como *Dysphania ambrosioides* son inhibidores catódicos, a 1000 rpm ambos inhibidores son catódicos y a 5000 rpm *Nicotiana tabacum* es un inhibidor anódico y *Dysphania ambrosioides* es un inhibidor catódico.

Las eficiencias de inhibición fueron calculadas de acuerdo a la Ecuación 1.1, en la tabla 3.2, se puede ver que el inhibidor con mayor eficiencia fue la *Nicotiana tabacum* a 100 rpm con 71.31%, seguida por la *Dysphania ambrosioides* con 62.84 % a 100 rpm pero eso no es suficiente para ser considerados buenos inhibidores, otros dos porcentajes de eficiencia positivos fueron de 31.45 % para la *Nicotiana tabacum* a 0 rpm y de 11.69 % para el *Dysphania ambrosioides* a 0 rpm.

Las peores eficiencias presentadas fueron con el uso *Dysphania ambrosioides* como inhibidor, pues se tuvo una eficiencia de hasta -151.19% a 1000 rpm lo cual pudo ser ocasionado por una falta o sobra de concentración de inhibidor en el medio y ello en lugar de ser benéfico para el material pasó a ser nocivo ya que seguramente la adherencia no es la debida sobre todo a altas velocidades, sin embargo a 5000 rpm con este mismo inhibidor la eficiencia no fue tan baja.

También en la Tabla 3.2 se muestran las pendientes de la rama anódica, a 0 rpm las pendientes difieren, pero conforme incrementa la velocidad, los valores de estas son muy similares, por lo anterior se puede deducir que conforme la velocidad de rotación es mayor, la interacción con el principio activo es menos importante pues no afecta mucho el comportamiento de las curvas.



La Figura 3.8 contiene las curvas de polarización de los tres medios usados, ocurre algo similar con lo que se había visto en las curvas de potencial contra tiempo, el potencial de corrosión es mayor a altas velocidad de rotación, las zonas catódicas son las que más se ven afectadas por la presencia de extractos alcohólicos pues ya se vio a que a altas velocidades la rama anódica no muestra cambios notorios.

### 3.3.3 Espectroscopía de impedancia electroquímica

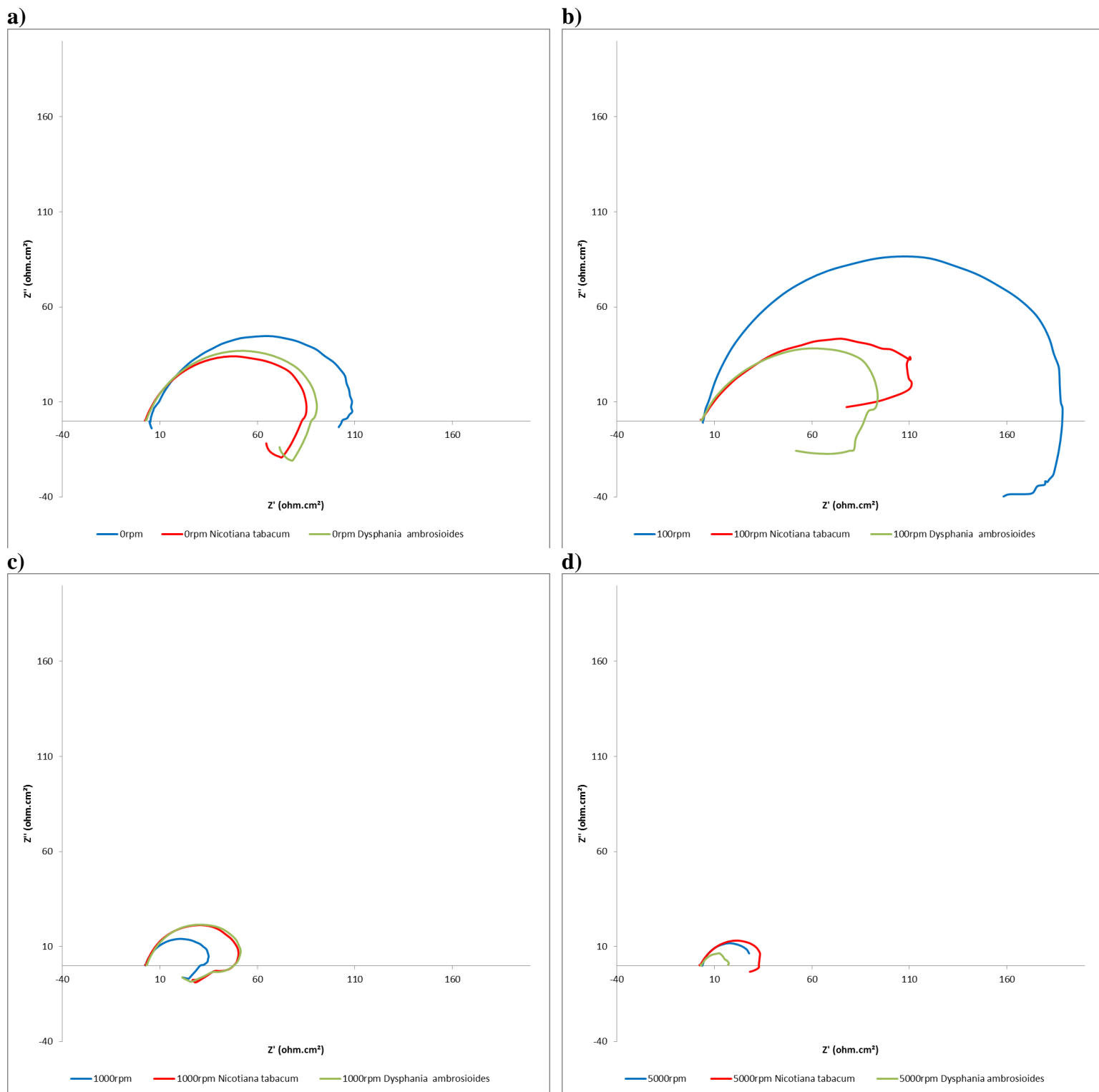
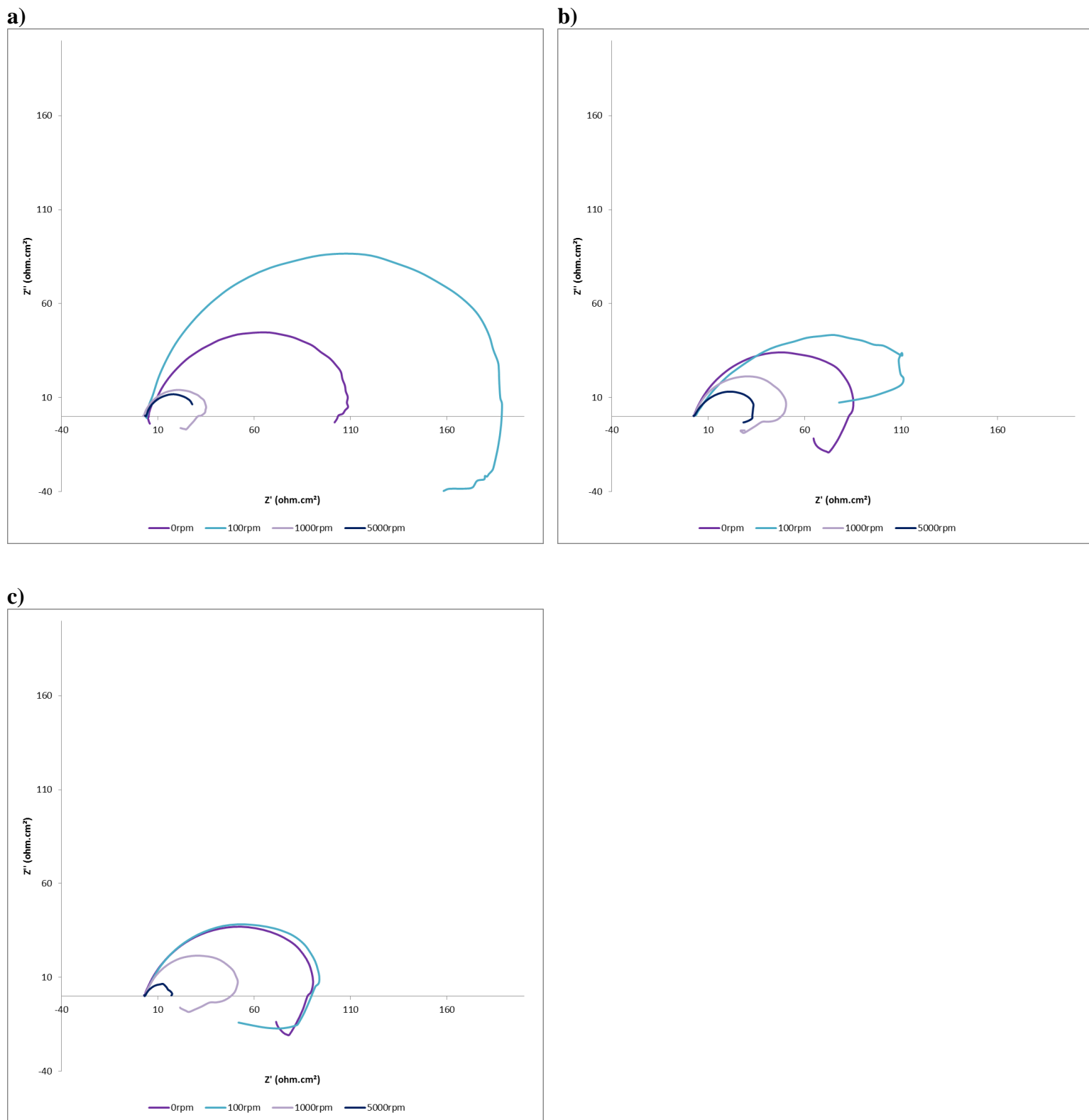


Figura 3.9 Diagramas de Nyquist a distintas velocidades de rotación: a)0rpm, b)100rpm, c)1000rpm y d)5000rpm



**Figura 3.10** Diagramas de Nyquist a distintas velocidades de rotación a las condiciones de: a) Sin inhibidor, b) Con adición de extracto de *Nicotiana tabacum*, c) Con adición de extracto de *Dysphania ambrosioides*

**Tabla 3.3 Datos de eficiencia de inhibición obtenidos con los diagramas de Nyquist**

<b>Velocidad (rpm)</b>	<b>Inhibidor</b>	<b>Velocidad de corrosión (mma)</b>	<b>Eficiencia de inhibición</b>
<b>0</b>	Sin inhibidor	154.33	NA
	Nicotiana tabacum	405.99	-163.06
	Dysphania ambrosioides	346.51	-124.52
<b>100</b>	Sin inhibidor	163.56	NA
	Nicotiana tabacum	258.78	-58.21
	Dysphania ambrosioides	330.05	-101.79
<b>1000</b>	Sin inhibidor	958.75	NA
	Nicotiana tabacum	638.89	33.36
	Dysphania ambrosioides	572.46	40.29
<b>5000</b>	Sin inhibidor	1180.69086	NA
	Nicotiana tabacum	924.90	21.66
	Dysphania ambrosioides	2289.82	-93.94

En los diagramas de Nyquist de la Figura 3.9, cada inhibidor muestra una señal de impedancia con valores negativos en el eje de  $Z''$ , este fenómeno es característico del efecto de adsorción de una película en la superficie del metal.

A 0rpm los dos inhibidores se comportan de manera muy similar pero no son lo suficientemente resistivos como para disminuir la corrosión gracias a que la película no es adsorbida lo suficiente al grado que el metal por si solo es más resistivo, en la Tabla 3.3 se ve que incluso las eficiencias de inhibición son muy negativas, los inhibidores sólo promueven aún más la corrosión del metal.

A 100 rpm las películas formadas por la presencia de los inhibidores no son capaces de superar la resistividad del metal con inhibidores, nuevamente las eficiencias de inhibición son negativas.

A 1000 rpm los resultados con inhibidores son más resistivos que sin presencia de estos, quiere decir que los inhibidores están reduciendo la velocidad de corrosión a esa velocidad de rotación, los diámetros de los diagramas en medios con inhibidores son muy similares, por ende la velocidad de corrosión será muy similar. Las eficiencias de inhibición encontradas en la Tabla 3.3 son de 33.36% y 40.29% *Nicotiana tabacum* y *Dysphania ambrosioides* correspondientemente, ambas eficiencias son positivas pero no cumplen el requisito principal de la norma, ser mayor a 90%.

A 5000 rpm la *Nicotiana tabacum* forma una película más resistiva que el material por sí mismo, pero al igual que a 1000 rpm la eficiencia es demasiado baja para cumplir los requerimientos pues simplemente cuenta con un 21.66% de eficiencia y la *Dysphania ambrosioides* vuelve a promover la corrosión en el metal.

Las mejores eficiencias de inhibición con esta técnica electroquímica se obtuvieron a 1000 rpm, la más alta de ellas fue de *Dysphania ambrosioides* con 40.29% pero ninguna cumple con la eficiencia requerida por la norma. En casi todos los diagramas aparece la zona característica de adsorción aunque no se use inhibidor en el medio, esto por la presencia de cloruros en el electrolito.

Las eficiencias de inhibición fueron calculadas a partir de la velocidad de corrosión, a su vez, para calcular la velocidad se midió el diámetro de los semicírculos cuyo valor corresponde al de  $R_p$  y se usó la Ecuación 1.8, asumiendo un valor para B de 0.26 para tener la  $i_{corr}$ .

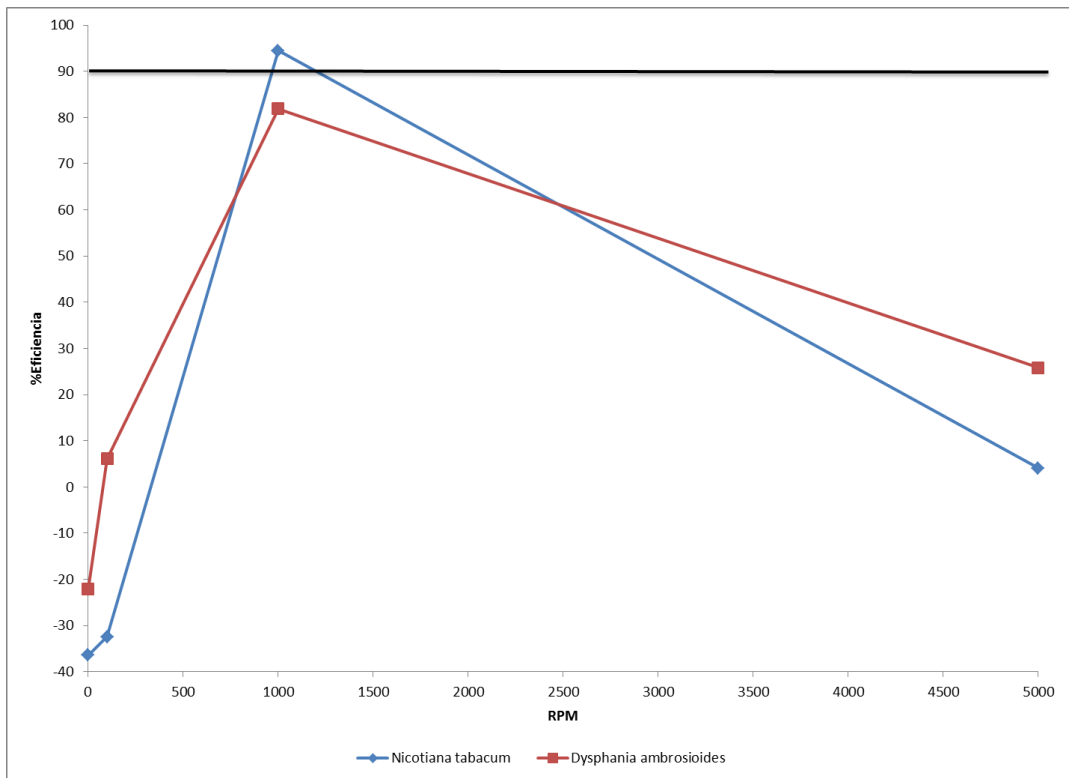
Con lo señalado en la Figura 3.10 es notorio que la condición más resistiva es a 100 rpm, y se ve una clara adsorción de cloruros al igual que a 1000 rpm, pero a 0 y 5000 ésta es muy pequeña e incluso nula, la resistividad en los tres medios decrece mucho a 5000 rpm y la velocidad más resistiva es a 100 rpm en los tres casos.

El comportamiento por la adición del extracto se ve modificado notoriamente a una velocidad de 100 rpm, mientras que a 0 rpm solo podría decirse que los extractos tienden adsorberse más rápido que los cloruros pues viendo las 3 secciones de la Figura, en la primera la adsorción es realmente poca a comparación de las otras dos.

### 3.3.4 Resistencia a la polarización

**Tabla 3.4 Datos de eficiencia obtenidos a partir de Rp**

<b>Velocidad (rpm)</b>	<b>Inhibidor</b>	<b>Velocidad de corrosión (mma)</b>	<b>Eficiencia de inhibición</b>
<b>0</b>	Sin inhibidor	311.13	NA
	Nicotiana tabacum	424.44	-36.42
	Dysphania ambrosioides	379.66	-22.02
<b>100</b>	Sin inhibidor	278.22	NA
	Nicotiana tabacum	368.47	-32.43
	Dysphania ambrosioides	261.20	6.12
<b>1000</b>	Sin inhibidor	1441.58	NA
	Nicotiana tabacum	80.196	94.44
	Dysphania ambrosioides	261.20	81.88
<b>5000</b>	Sin inhibidor	3782.94	NA
	Nicotiana tabacum	3627.36	4.11
	Dysphania ambrosioides	2805.95	25.83



**Figura 3.11 Eficiencias de inhibición respecto a la velocidad de rotación**

En la Tabla 3.4 se muestran las velocidades de corrosión y eficiencias de inhibición obtenidas por medio de la técnica de resistencia a la polarización, es notorio que el único medio y velocidad que cumple con el requerimiento de tener más del 90 % de eficiencia es la *Nicotiana tabacum* a 1000 rpm con un 94%, también estas condiciones son favorables para la inhibición con *Dysphania ambrosioides* en comparación con el resto de condiciones, sin embargo sólo muestra un 81.88% de eficiencia. Otro medio con una eficiencia inhibidora es a la velocidad de 100 rpm con *Dysphania ambrosioides*, empero es insuficiente para los requerimientos. A bajas velocidades los dos medios propician un incremento en la velocidad de corrosión y en menor medida a una velocidad de 5000 rpm. Se trata de sistemas que están controlados por el acceso de especie oxidante, de modo que la velocidad de rotación modifica el sistema en corrosión de manera importante. Parece ser que la velocidad de corrosión aumentaría al aumentar la velocidad de rotación, pues el acceso de oxidante a la intercara aumentaría notablemente; si el efecto inhibidor es poco, en condiciones de agitación no es capaz de contener el aumento en la corrosión.

En la figura 3.10 se presentan las eficiencias de inhibición obtenidas con las velocidades de corrosión resultantes de la resistencia a la polarización, con ella se logra visualizar fácilmente que solo una condición fue capaz de cumplir el requerimiento de tener una eficiencia mayor a 90%, a 1000 rpm con *Nicotiana tabacum* como inhibidor, el resto de

eficiencias a distintas condiciones hidrodinámicas quedó muy por debajo, teniendo valores negativos a las velocidades de rotación de 0 y 100 rpm.

Con los datos de dos de las pruebas ( $R_p$  e impedancia) se podría decir que a una velocidad de 0 rpm el inhibidor más que ayudar perjudica, pues las eficiencias presentadas son realmente bajas, esto por el tiempo que tarda el inhibidor en llegar del seno de la solución a la superficie del material y la buena adsorción de la película formada. Tampoco se presentan muy altas eficiencias con las tres pruebas cuando se habla de 5000 rpm pues su fuerza de adsorción no es la suficiente como para resistir dicha velocidad. La velocidad a la cual estas concentraciones de inhibidores son capaces de formar películas más estables y lo suficientemente bien adsorbidas al material es a 1000 rpm ya que esta condición promueve una buena difusión sin remover por completo los productos que están inhibiendo. Sin embargo las eficiencias de inhibición calculadas a partir de las velocidades de corrosión obtenidas por las curvas de polarización que las condiciones favorables para la inhibición son a bajas velocidades (0 y 100 rpm) y coincide en tener baja eficiencia a 5000 rpm con los datos aportados por el resto de las técnicas electroquímicas.

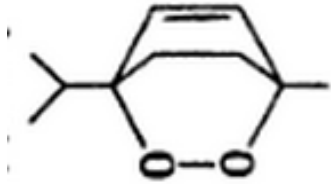
### 3.4 Análisis químico por MEB



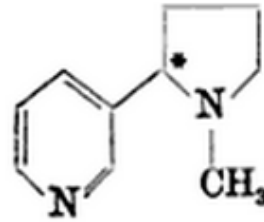
**Figura 3.12 Probetas sometidas al análisis químico por MEB.**

En la Figura 3.12 se presentan las probetas sometidas al análisis químico por microscopía electrónica de barrido, se efectuó después de realizar las pruebas de corrosión para visualizar los productos adheridos al metal durante la prueba. Las condiciones hidrodinámicas fueron las mismas para las tres, una velocidad de 5000 rpm, lo que difirió fue el medio, la primer probeta de izquierda a derecha se sumergió en una solución de NaCl 3% saturada con  $\text{CO}_2$ , en cambio a la solución de la segunda se le adicionó extracto de *Dysphania ambrosioides* como inhibidor y a la tercera extracto de *Nicotiana tabacum*.





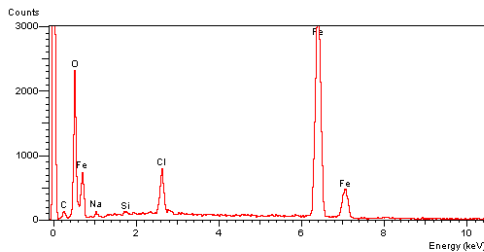
**Figura 3.13** Fórmula esquelal del Ascaridol (*Dysphania ambrosioides*) [25]



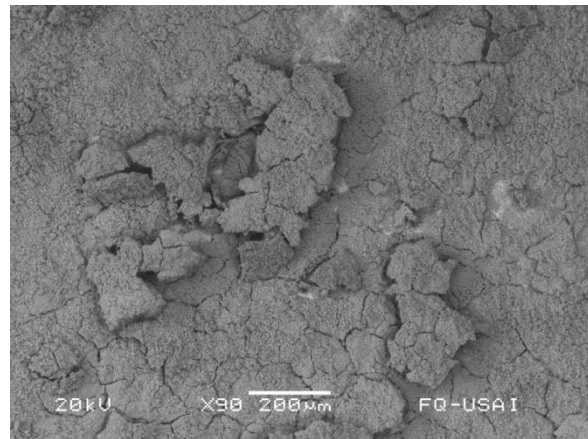
**Figura 3.14** Fórmula esquelal de la Nicotina (*Nicotiana tabacum*) [25]

En la Figura 3.13 se muestra la fórmula esquelal del Ascaridol, principal compuesto presente en la *Dysphania ambrosioides*, en la Figura 3.14 se encuentra la de la Nicotina, principal compuesto en la *Nicotiana tabacum*, ambas fórmulas se muestran para dar razón de los elementos buscados en el análisis cualitativo y cuantitativo realizado mediante la microscopia electrónica de barrido. Al ser compuestos orgánicos constan principalmente de carbono, oxígeno y en el caso del segundo compuesto, también contiene nitrógeno en su estructura. En el análisis también se tomó en cuenta el medio de NaCl y los principales elementos aleantes del metal.

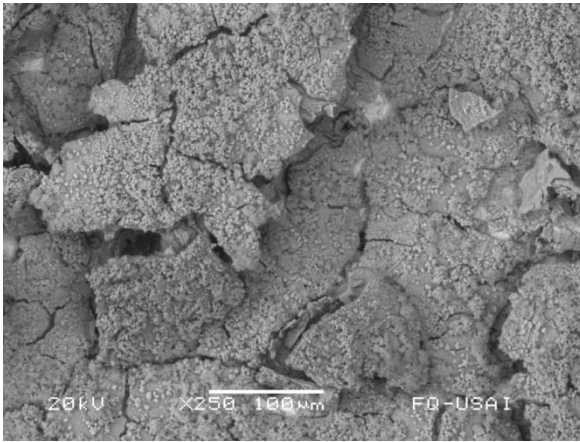
### 3.4.1 Análisis de probeta sin inhibidor



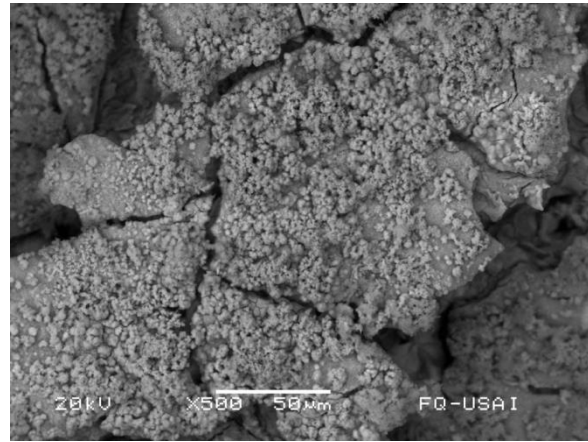
**Figura 3.15** Espectro correspondiente a la probeta sometida a un medio sin inhibidor



**Figura 3.16** Imagen de la superficie corroída de la probeta sin inhibidor obtenida a través de MEB a x90.



**Figura 3.17 Imagen de la superficie corroída de la probeta sin inhibidor obtenida a través de MEB a x250.**



**Figura 3.18 Imagen de la superficie corroída de la probeta sin inhibidor obtenida a través de MEB a x500.**

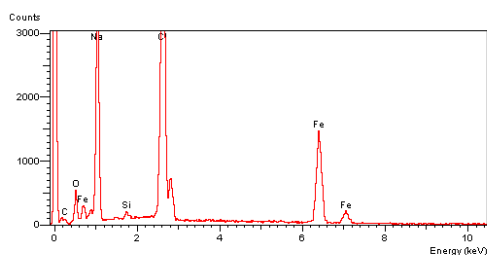
La Figura 3.15 muestra el espectro del análisis químico cualitativo de la probeta sometida a un medio sin inhibidor, el principal elemento presente es el Fe ya que se trata de una aleación base Fe, también se cuenta con la presencia de oxígeno y cloro, uno producto de las reacciones de corrosión y otro proveniente del medio. En las Figuras 3.16, 3.17 y 3.18 se encuentran imágenes de la superficie corroída donde se nota una estructura amorfa de los productos formados.

En la Tabla 3.5 están los resultados del análisis cualitativo donde se confirma la abundancia de Fe, O, C y Cl en ese orden.

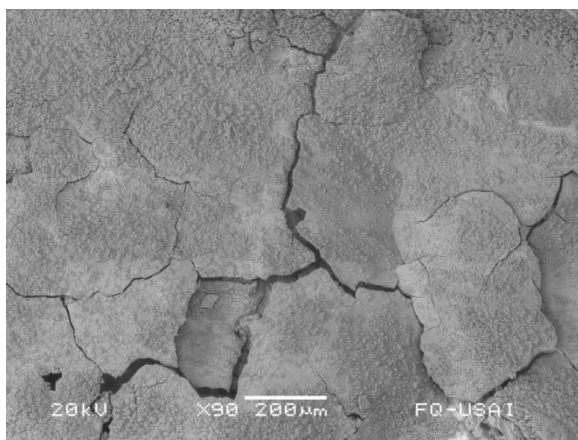
**Tabla 3.5 Resultados análisis cuantitativo**

<b>Elemento</b>	<b>%Elemento</b>	<b>%Atómico</b>
<b>C</b>	4.63	11.57
<b>O</b>	26.33	49.35
<b>Na</b>	0.97	1.27
<b>Si</b>	0.22	0.24
<b>Cl</b>	3.76	3.18
<b>Fe</b>	64.08	34.40

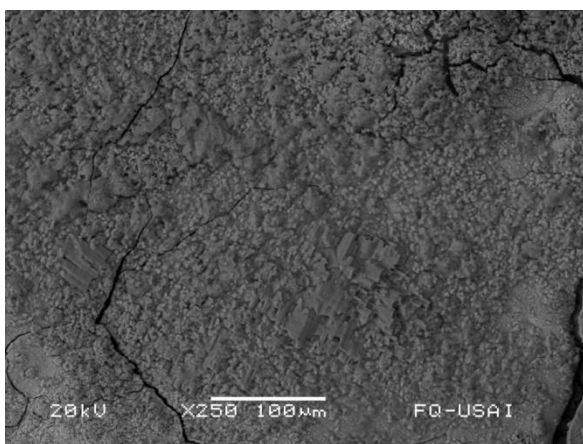
### 3.4.2 Análisis de probeta con *Dysphania ambrosioides* como inhibidor



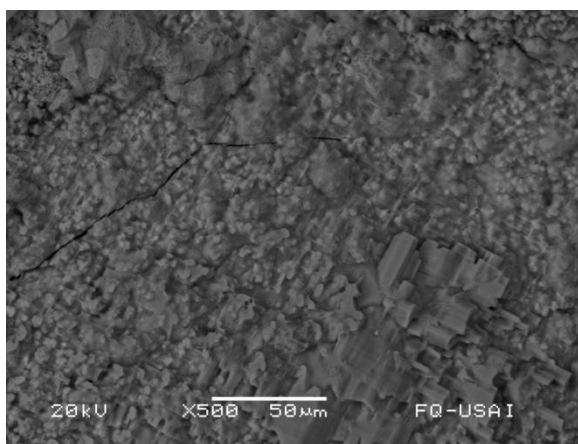
**Figura 3.19** Espectro correspondiente a la probeta sometida a un medio con *Dysphania ambrosioides* como inhibidor.



**Figura 3.20** Imagen de la superficie corroída de la probeta con *Dysphania ambrosioides* como inhibidor, obtenida a través de MEB a x90.



**Figura 3.21** Imagen de la superficie corroída de la probeta con *Dysphania ambrosioides* como inhibidor, obtenida a través de MEB a x250.



**Figura 3.22** Imagen de la superficie corroída de la probeta con *Dysphania ambrosioides* como inhibidor, obtenida a través de MEB a x500.

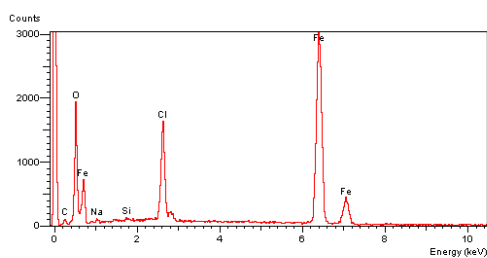
La Figura 3.19 presenta el espectro del análisis químico cualitativo de la probeta sometida a un medio con *Dysphania ambrosioides* como inhibidor, hay una notoria abundancia de oxígeno y sodio, cosa que no pasa en la Figura 3.15. En las Figuras 3.20, 3.21 y 3.22 se puede ver que la superficie está cubierta de forma casi homogénea por productos de corrosión más compactos que los presentados en un medio sin inhibidor, incluso presentan geometría.

En la Tabla 3.6 los resultados del análisis cualitativo confirman la abundancia del sodio, cloro y oxígeno. Posiblemente este fenómeno se deba a la mala adsorción del inhibidor, sólo incrementa la corrosión y por lo tanto hay más presencia de productos de corrosión en la superficie, se debe recordar que las técnicas electroquímicas indicaron que el inhibidor de extracto de *Dysphania ambrosioides* generaba eficiencias de inhibición negativas. La geometría presentada en los productos se debe a la sal del medio.

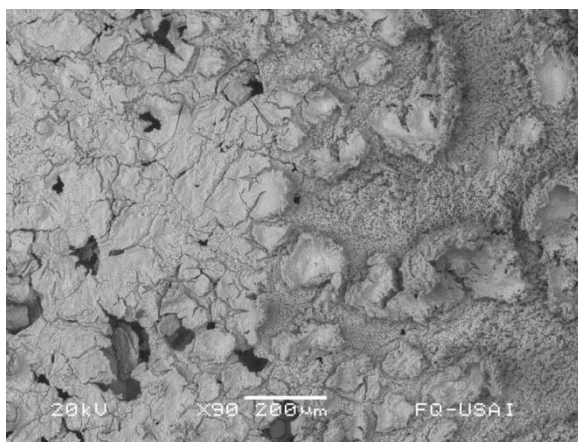
**Tabla 3.6 Resultados análisis cuantitativo**

Elemento	%Elemento	%Atómico
C	6.69	14.95
O	10.55	17.72
Na	26.70	31.20
Si	0.35	0.34
Cl	32.50	24.62
Fe	23.21	11.17

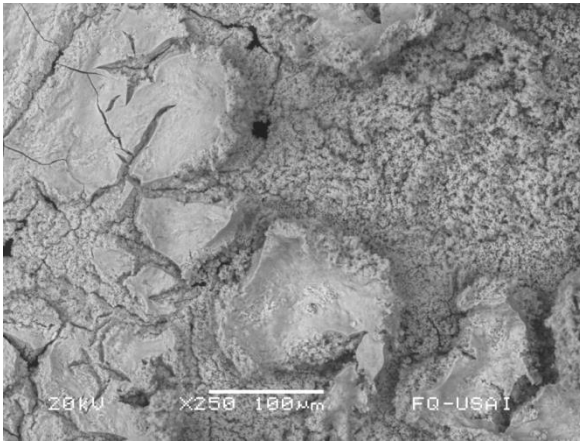
### 3.4.3 Análisis de probeta con *Nicotiana tabacum* como inhibidor



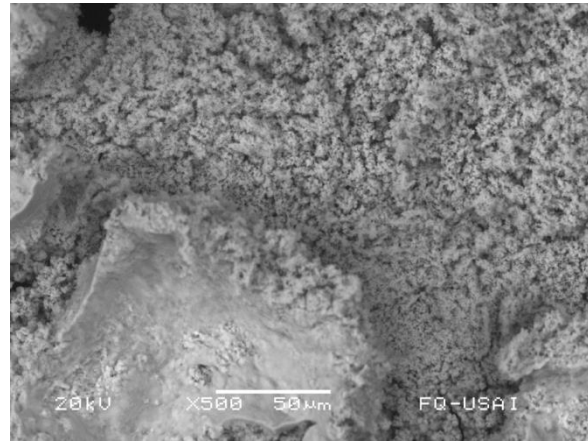
**Figura 3.23 Espectro correspondiente a la probeta sometida a un medio con *Nicotiana tabacum* como inhibidor.**



**Figura 3.24 Imagen de la superficie corroída de la probeta con *Nicotiana tabacum* como inhibidor, obtenida a través de MEB a x90..**



**Figura 3.25** Imagen de la superficie corroída de la probeta con *Nicotiana tabacum* como inhibidor, obtenida a través de MEB a x250.



**Figura 3.26** Imagen de la superficie corroída de la probeta con *Nicotiana tabacum* como inhibidor, obtenida a través de MEB a x500.

La Figura 3.23 muestra el espectro del análisis químico cualitativo de la probeta sometida a un medio con *Nicotiana tabacum* como inhibidor, el elemento más abundante es el hierro seguido por el oxígeno y el cloro. Según las Figuras 3.24, 3.25 y 3.26 la superficie es amorfa y escamosa.

En la Tabla 3.7 los resultados del análisis cualitativo indican la alta presencia de hierro y oxígeno, se esperaría que para confirmar la presencia del inhibidor se contara con nitrógeno en el espectro, pero al ser un elemento tan ligero, no se logró apreciar.

**Tabla 3.7 Resultados análisis cuantitativo**

Elemento	%Elemento	%Atómico
<b>C</b>	4.54	11.31
<b>O</b>	25.71	48.03
<b>Na</b>	0.63	0.82
<b>Si</b>	0.18	0.19
<b>Cl</b>	8.95	7.55
<b>Fe</b>	59.98	32.10

Al observar las tablas 3.5, 3.6 y 3.7 que, como ya se dijo, son los resultados cualitativos de los análisis, es notorio que sus valores no son constantes. Respecto a la cantidad de cloro, la cantidad de elemento presente al usar el extracto de *Dysphania ambrosioides* como inhibidor es mucho mayor que en los otros dos casos, lo anterior pudo ser por la mejor adsorción de los cloruros frente al ascaridol, sin embargo al comparar la capa de óxido que recubre el material, su capa es mucho más compacta que en los otros dos casos y acorde a

la Figura 3.11, tiene una eficiencia mayor que al usar extracto de *Nicotiana tabacum*, además en la Figura 3.24 se ve que el material tiende a sufrir de una corrosión de tipo localizada, se propone que sea un ataque de tipo *crevice* pues se sabe que el acero de bajo carbono no forma una película pasiva y por ello no se formarían picaduras propiamente. El oxígeno indica que el material sufre una oxidación en su superficie.

## CAPITULO 4. CONCLUSIONES

Ninguno de los supuestos inhibidores presenta eficiencia mayor al 90% bajo ninguna de las condiciones hidrodinámicas a la concentración usada por falta de una buena adsorción al material metálico.

Ambos inhibidores actúan sobre el metal al ser adsorbidos en la superficie de éste. La velocidad que permite la mejor adsorción del inhibidor al material es a 1000 rpm sobre todo con *Nicotiana tabacum*. A 5000 rpm la velocidad es demasiada para la fuerza con la que se encuentra adherida la película y a 0 rpm la difusión del principio activo es muy lenta. Con las curvas de polarización se dedujo que ambos son inhibidores mixtos.

Por medio de la microscopía electrónica de barrido no se logró apreciar certeramente la presencia de los inhibidores empleados debido a que son elementos orgánicos, uno de ellos, *Nicotiana tabacum*, contiene nitrógeno en su fórmula y al ser un elemento muy ligero no fue apreciable su presencia a pesar de que se sabe que la técnica usada tiene la capacidad de hacerlo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. R. Winston Revie, Uhlig's Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, Inglaterra, 2011. 1021-1032.
2. [http://agendapoliticanacional.infp.prd.org.mx/resumen.php?articulo\\_id=263857](http://agendapoliticanacional.infp.prd.org.mx/resumen.php?articulo_id=263857) (Consultado el 4 de Julio 2013)
3. [http://www.pemex.com/files/content/di\\_tranpyalmacenamiento\\_mng\\_080617.pdf](http://www.pemex.com/files/content/di_tranpyalmacenamiento_mng_080617.pdf) (Consultado el 22 de Julio 2013)
4. <http://events.nace.org/library/corrosion/Inhibitors/Introduction.asp> (Consultado el 31 de Octubre de 2013).
5. <http://www.cortecvci.com/Publications/Papers/Nacereviewed/09573.pdf> (Consultado el 31 de Octubre de 2013).
6. <http://corrosionda.com/pdf/methods.pdf> (Consultado el 14 de Noviembre de 2013).
7. <http://corrosionda.com/methods/inhibitors/index.htm> (Consultado el 14 de Noviembre de 2013).
8. NRF-005-PEMEX-2009: "PROTECCIÓN INTERIOR DE DUCTOS CON INHIBIDORES"
9. <http://es.scribd.com/doc/27327179/Tesis-Final> (Consultado el 22 de Septiembre de 2013)
10. V.S. Sastri, Corrosion inhibitors: principles and applications, John Wiley & Sons, Inglaterra, 1998.
11. <http://www.pineinst.com/echem/files/LMECN200601.pdf> (Consultado el 22 de Septiembre de 2013)
12. R. Galvan-Martinez, R. Orozco-Cruz, G. Galicia-Aguilar, A. Contreras, J. Mendoza-Flores, J. Genesca-Llongueras, "Corrosion study of pipeline carbon Steel in sour brine under turbulent flow conditions at 60°C", *Afinidad*, Vol. 70., No 562, pág. 124-129, 2013.
13. R. Galvan-Martinez, R. Orozco-Cruz, R. Torres-Sánchez, "Study of x52 steel in seawater with biocides under turbulent flow conditions", *Afinidad*, Vol. 67, No. 550, pág. 442-448, 2010.
14. Ricardo Galván-Martínez, Juan Mendoza-Flores, Rubén Durán-Romero, Juan Genescá-Llongueras, "Rotating Cylinder Electrode Study on the Influence of Turbulent flow, on the Anodic and Cathodic Kinetics of x52 Steel Corrosion, in H<sub>2</sub>S Coating Solutions", *Afinidad*, Vol. 62, No. 519, pág. 448-454, 2005.
15. [http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/9313/1/CC-011\\_art\\_5.pdf](http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/9313/1/CC-011_art_5.pdf) (Consultado el 9 de Abril de 2014)
16. Valdéz Salas, Benjamín, Corrosión y preservación de la infraestructura industrial, OmniaScience, España, 2013.



17. González Fernández, J.A., Control de la corrosión, Centro Nacional de investigaciones metalúrgicas consejo superior de investigaciones científicas, España, 1989.
18. <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/LPR.PDF> (Consultado el 28 de Abril de 2014)
19. <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Tafel2.pdf> (Consultado el 28 de Abril de 2014)
20. <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF> (Consultado el 28 de Abril de 2014)
21. Perez, Nestor, Electrochemistry and corrosion science, Kluwer Academic Publishers, EUA, 2004.
22. [http://www.facmed.unam.mx/deptos/biocetis/PDF/Portal%20de%20Recursos%20en%20Linea/Apuntes/2\\_microscopia.pdf](http://www.facmed.unam.mx/deptos/biocetis/PDF/Portal%20de%20Recursos%20en%20Linea/Apuntes/2_microscopia.pdf) (Consultado el 15 de Abril de 2014)
23. <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/cmI/8-Aleaciones-hc.pdf> (Consultado el 14 de Noviembre de 2013)
24. [http://www.efunda.com/Materials/alloys/carbon\\_steels/show\\_carbon.cfm?ID=AISI\\_1018&prop=all&Page\\_Title=AISI%201018](http://www.efunda.com/Materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_1018&prop=all&Page_Title=AISI%201018) (Consultado el 15 de Abril de 2014)
25. Klages, F., Tratado de química orgánica, Editorial Reverté, España, 1968.
26. A.M. Abdel-Gaber, B.A. Abd-El-Nabey, I.M. Sidahmed, A.M. El-Zayady, M. Saadaw “Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media”, Corrosion Science, 48, pág. 2765-2779, 2006.
27. L.R. Chauhan, G. Gunasekaran, “Corrosion inhibition of mild steel by plant extract in dilute HCl medium”, Corrosion Science, 49, pág. 1143-1161, 2007.