



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIO DE LA ESTRICTOSAMIDA COMO  
INHIBIDOR DE CORROSIÓN INDUCIDA POR  
CLORUROS EN ACERO AL CARBONO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA  
MAURICIO GACHUZ ROJAS**



**Ciudad Universitaria, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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:** Profesor FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ

**Vocal:** Profesor CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA

**Secretario:** Profesora ARACELI ESPINOZA VÁZQUEZ

**1er. Suplente:** Profesora PAOLA RONCAGLIOLO BARRERA

**2do. Suplente:** Profesor JOSÉ FENANDO FLORES ÁLVAREZ

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Laboratorio de Corrosión y Protección, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Conjunto D. Facultad de Química, UNAM.

**ASESOR DEL TEMA:**

Profesora ARACELI ESPINOZA VÁZQUEZ

---

**FIRMA**

**SUSTENTANTE:**

MAURICIO GACHUZ ROJAS

---

**FIRMA**

“Be the beauty, the memory, the past, the present and the future, be infinite. Do something, say something, believe in something, but most of all, know you can change things. Yes, you.

What are you waiting for?..”

Paloma Faith, Samuel L. Jackson. (2017). Evolution. The Architect.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	i
HIPÓTESIS .....	ii
OBJETIVOS.....	ii

### CAPÍTULO 1

#### BASES TEÓRICAS

<b>1.1 ANTECEDENTES .....</b>	<b>4</b>
1.1.1 Corrosión.....	4
1.1.1.1 Tipos de corrosión.....	4
1.1.1.2 Corrosión en la industria petrolera .....	7
1.1.1.3 Corrosión en tuberías.....	7
1.1.2 Flujo en tuberías.....	8
1.1.2.1 Patrones de flujo en tuberías .....	10
1.1.3 Aceros al carbono.....	11
1.1.3.1 Acero AISI 1018.....	12
1.1.3.2 Aceros grado API.....	13
<b>1.2 INHIBIDORES DE CORROSIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.2.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión .....	14
1.2.1.1 Inhibidores orgánicos e inorgánicos .....	15
1.2.1.2 Inhibidores anódicos, catódicos y mixtos .....	15
1.2.2 Inhibidores de corrosión de origen natural .....	17
1.2.2.1 Estrictosamida .....	18

<b>1.3 TÉCNICA ELECTROQUÍMICAS .....</b>	<b>19</b>
1.3.1 Potencial de circuito abierto (OCP) vs.Tiempo.....	19
1.3.2 Resistencia a la polarización lineal (Rp) .....	19
1.3.3 Extrapolación de Tafel .....	21
1.3.4 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).....	22
1.3.4.1 Presentación de los datos .....	22
1.3.4.2 Circuitos equivalentes .....	24
<b>1.4 ISOTERMA DE ADSORCIÓN .....</b>	<b>25</b>

## **CAPÍTULO 2**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

<b>2.1 METODOLOGÍA.....</b>	<b>29</b>
2.1.1 Condiciones de flujo .....	29
2.1.2 Metodología de trabajo .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## **CAPÍTULO 3**

### **RESULTADOS**

<b>3.1 EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LA ESTRICTOSAMIDA COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN .....</b>	<b>34</b>
3.1.1 Efecto de inhibición de la estrictosamida en estado estático.....	34
3.1.2 Efecto de inhibición de la estrictosamida a 100 rpm. ....	39
3.1.3 Efecto de inhibición de la estrictosamida a 500 rpm .....	42
3.1.4 Eficiencia de inhibición de la estrictosamida bajo las condiciones de estudio .....	45
<b>3.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO .....</b>	<b>47</b>

**CAPÍTULO 4**  
**CONCLUSIONES**

**CONCLUSIONES..... 50**

**FUENTES DE CONSULTA ..... 51**

**ANEXOS**

**ANEXO A1 ..... 60**

**ANEXO A2 ..... 63**

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Clasificación de los tipos de corrosión de acuerdo con el daño generado.....	4
<b>Figura 1.2</b> Tipos de corrosión <sup>2</sup> .....	6
<b>Figura 1.3</b> Regímenes de flujo de un fluido.....	9
<b>Figura 1.4</b> Patrones de flujo en tuberías verticales: a) Flujo de burbujas; b) Flujo tipo tapón; c) Flujo espumoso; d) Flujo de transición anular; y e) Flujo anular .....	10
<b>Figura 1.5</b> Patrones de flujo en tuberías horizontales: a) Flujo de burbujas; b) Flujo estratificado; c) Flujo estratificado ondulatorio; d) Flujo slug; y e) Flujo anular .....	11
<b>Figura 1.6</b> Clasificación de los inhibidores de corrosión.....	14
<b>Figura 1.7</b> Efecto de los inhibidores de corrosión sobre las curvas de polarización .....	16
<b>Figura 1.8</b> Estructura molecular de la estrictosamida [C <sub>26</sub> H <sub>30</sub> N <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ].....	18
<b>Figura 1.9</b> Gráfica de potencial ( <i>E</i> ) vs. Densidad de corriente .....	20
<b>Figura 1.10</b> Extrapolación de Tafel en una curva de polarización .....	21
<b>Figura 1.11</b> a) Diagrama de Nyquist y b) Diagramas de Bode .....	23
<b>Figura 1.12</b> a) Circuito equivalente de Randles y b) Circuito equivalente con algún tipo de recubrimiento o película .....	24
<b>Figura 1.13</b> Ejemplificación de un circuito equivalente en presencia de una película protectora.	25
<b>Figura 2.1</b> Sistema de trabajo .....	31
<b>Figura 3.1</b> Diagrama de Nyquist para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), en condiciones estáticas y diferentes concentraciones de estrictosamida .....	35
<b>Figura 3.2</b> Diagrama de Bode para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), en condición estática y diferentes concentraciones de estrictosamida. a) Módulo de la impedancia y b) Ángulo de fase .....	37

<b>Figura 3.3</b> Diagrama de Nyquist para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 100 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida .....	39
<b>Figura 3.4</b> Diagrama de Bode para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 100 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida. a) Módulo de la impedancia y b) Ángulo de fase .....	41
<b>Figura 3.5</b> Diagrama de Nyquist para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 500 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida .....	42
<b>Figura 3.6</b> Diagrama de Bode para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 500 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida. a) Módulo de la impedancia y b) Ángulo de fase .....	44
<b>Figura 3.7</b> Eficiencia de inhibición de la estrictosamida a las diferentes velocidades de rotación y concentraciones de estrictosamida .....	46
<b>Figura 3.8</b> Isotherma de adsorción de Langmuir para la estrictosamida en estado estático, 100 y 500 rpm.....	47
<b>Figura 3.9</b> Posible mecanismo de adsorción de las moléculas de estrictosamida sobre la interfaz del acero AISI 1018, en una solución salina de NaCl al 3% (m/m).....	48
<b>Figura A2.0.1</b> Evolución del potencial en función del tiempo para un acero 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), en estado estático y diferentes concentraciones de estrictosamida .....	63
<b>Figura A2.0.2</b> Evolución del potencial en función del tiempo para un acero 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 100 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida .....	64
<b>Figura A2.0.3</b> Evolución del potencial en función del tiempo para un acero 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 500 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Régimen de flujo de acuerdo al número de Reynolds <sup>7</sup> .....	9
<b>Tabla 1.2</b> Propiedades mecánicas y composición química nominal para el acero AISI 1018 .....	12
<b>Tabla 1.3</b> Aceros cubiertos por la norma API 5L para los productos PSL 1 y PSL 2 <sup>9</sup> .....	13
<b>Tabla 1.4</b> Ejemplos de inhibidores de origen natural utilizados en aceros al carbono .....	18
<b>Tabla 1.5</b> Mecanismo de adsorción de acuerdo con el criterio de $\Delta G^{\circ}_{ads}$ <sup>19</sup> .....	26
<b>Tabla 2.1</b> Número de Reynolds para un electrodo de cilindro rotatorio modelo 12 mm OD marca PINE <sup>49</sup> .....	29
<b>Tabla 2.2</b> Equivalencias en revoluciones por minuto de un flujo en ducto <sup>7</sup> .....	30
<b>Tabla 2.3</b> Variables y pruebas electroquímicas utilizadas .....	32
<b>Tabla 3.1</b> Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de EIS en estado estático.....	36
<b>Tabla 3.2</b> Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de EIS a 100 rpm .....	40
<b>Tabla 3.3</b> Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de EIS a 500 rpm .....	42
<b>Tabla 3.4</b> Eficiencia de inhibición de la estrictosamida en estado estático, 100 y 500 rpm.....	45
<b>Tabla 3.5</b> Mecanismo de adsorción de la estrictosamida de acuerdo con los valores obtenidos de $\Delta G^{\circ}_{asd}$ .....	48
<b>Tabla A1.0.1</b> Composición química para los productos PSL 1 cubiertos por la norma API 5L <sup>9</sup> ..	60
<b>Tabla A1.0.2</b> Composición química para los productos PSL 2 cubiertos por la norma API 5L <sup>9</sup> ..	61

## RESUMEN

La corrosión en la industria representa uno de los principales problemas en el deterioro y falla de materiales, con un impacto económico mundial que alcanza el 3.4% del Producto Interno Bruto (PIB) global.

El fenómeno de corrosión no puede ser erradicado completamente, pero es posible disminuir o retardar sus efectos. Durante años se han utilizado inhibidores de corrosión que contribuyen a disminuir los procesos corrosivos; sin embargo, son costosos, tóxicos para el ambiente y no son biodegradables. Por esta razón, el uso de inhibidores de origen natural representa una alternativa potencial debido a su eficiencia, bajos costos y nulo o mínimo impacto ambiental.

Este trabajo muestra los resultados de la eficiencia de inhibición de la estrictosamida, en función de la concentración y de las condiciones hidrodinámicas, para proponer su uso en la industria del petróleo.

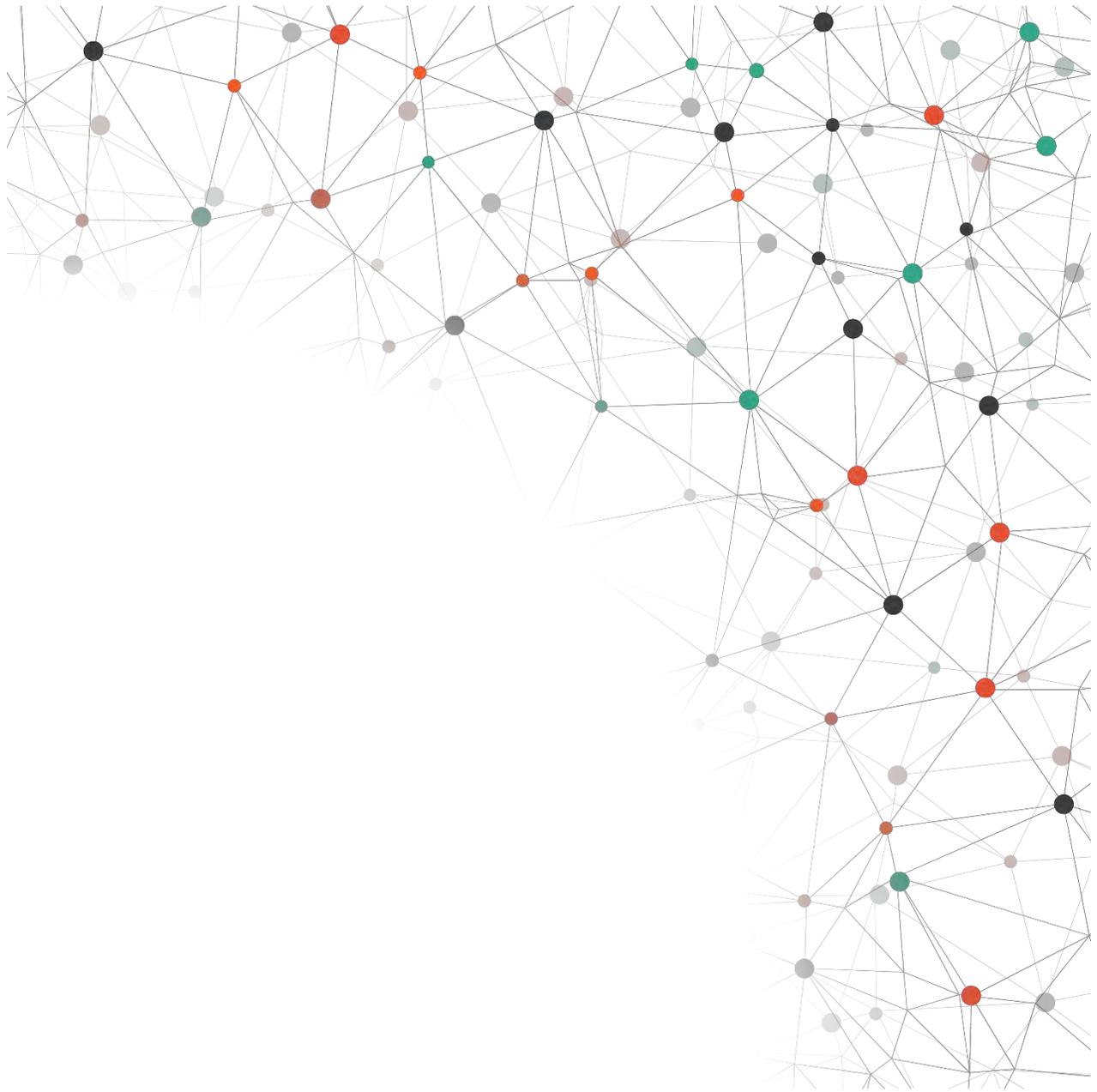
El trabajo experimental consta de dos etapas: la primera etapa corresponde a un análisis electroquímico para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de cloruro de sodio [NaCl] al 3% (m/m), bajo tres condiciones hidrodinámicas: estado estático, 100 y 500 revoluciones por minuto (rpm). Con base en la norma NRF-005-PEMEX-2009, las concentraciones de inhibidor utilizadas fueron 05, 10, 20 y 50 ppm y un blanco como referencia; la segunda etapa corresponde a un análisis termodinámico para determinar el mecanismo de adsorción de la estrictosamida en la interfaz del acero AISI 1018.

## **HIPÓTESIS**

La estrictosamida presenta actividad como inhibidor de corrosión, formando una película por adsorción en la interfaz metálica del acero AISI 1018, a diferentes concentraciones y condiciones hidrodinámicas.

## **OBJETIVOS**

- Determinar la eficiencia de inhibición de la estrictosamida, en función de la concentración de inhibidor y de las condiciones hidrodinámicas, para proponer su uso en la industria del petróleo.
- Determinar el mecanismo de adsorción mediante un análisis termodinámico.



# 1 BASES TEÓRICAS

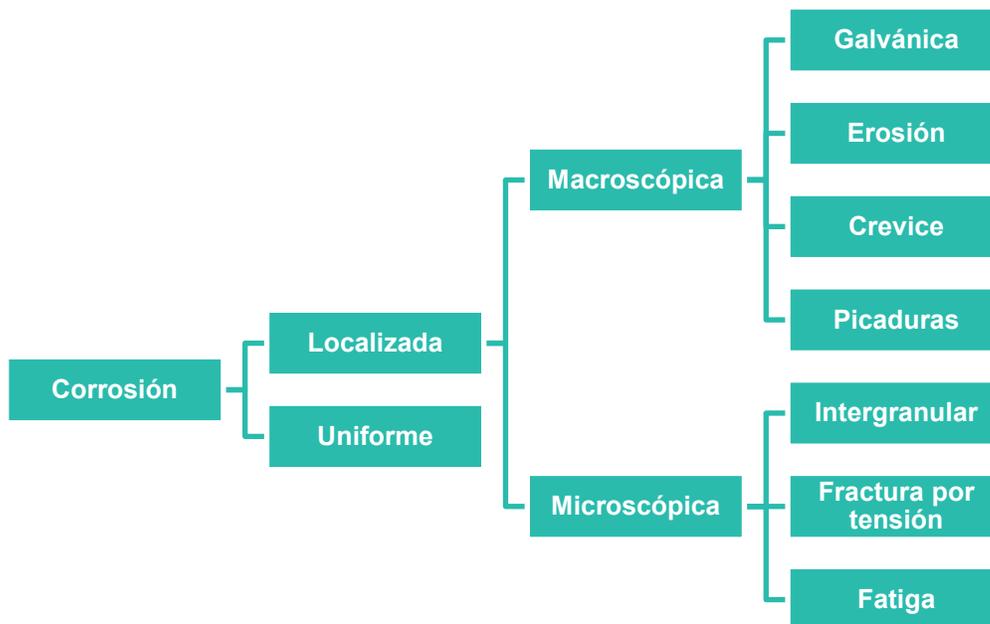
## 1.1 ANTECEDENTES

### 1.1.1 Corrosión

La corrosión suele confundirse con un simple proceso de oxidación, siendo en realidad un proceso más complejo. Con base en la norma ASTM G15-08 <sup>1</sup>, puede ser definida como: *“La reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal, y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades”*.

#### 1.1.1.1 Tipos de corrosión

La corrosión deja una rúbrica característica del agente y el mecanismo que la produjo, usualmente correspondiente a un ataque uniforme o localizado (Figura 1.1).



**Figura 1.1** Clasificación de los tipos de corrosión de acuerdo con el daño generado

- La *corrosión uniforme* se caracteriza por el ataque corrosivo sobre toda la superficie expuesta o gran parte de ella (Figura 1.2 a), lo que provoca que espesor del metal disminuya hasta que se produzca una falla.
- La *corrosión localizada* se presenta en determinados sitios y no en un área generalizada, es más peligrosa debido a su naturaleza impredecible y rápido desarrollo.
- La *corrosión galvánica* se presenta cuando dos metales (disímiles entre sí) entran en contacto a través de un electrolito, el metal que posee menor resistencia a la corrosión actúa como ánodo y el metal más resistente como cátodo (Figura 1.2 b).
- La *corrosión por erosión* es causada por la degradación de la superficie de un metal por acción mecánica, a menudo por el flujo de un fluido corrosivo a altas velocidades (Figura 1.2 c).
- La *corrosión por crevice* (también llamada por hendidura, grietas o fisuras) se produce por el estancamiento de una solución corrosiva en pequeñas cavidades o huecos formados en el metal (Figura 1.2 d).
- La *corrosión por picadura* se caracteriza por la formación de cavidades o agujeros en el material (Figura 1.2 e), al ser difíciles de predecir y detectar, las picaduras se consideran más peligrosas que el daño por corrosión uniforme. Además de la pérdida localizada de espesor, en las picaduras se puede presentar corrosión bajo tensión y corrosión por fatiga.
- La *corrosión intergranular*, como su nombre lo indica, se produce por grietas o fisuras en los límites de grano del metal (Figura 1.2 f).

La corrosión intergranular puede ser causada por impurezas en los límites de grano, el enriquecimiento de uno de los elementos de aleación o el agotamiento de uno de estos en las áreas de límite de grano.

- La *corrosión bajo tensión* se produce a partir de la influencia combinada de esfuerzos de tensión y un medio corrosivo (Figura 1.2 g), se caracteriza por la presencia de grietas de apariencia frágil con morfología intergranular o transgranular.
- La *corrosión por fatiga* se produce a partir de esfuerzos mecánicos alternos o cíclicos y un ambiente corrosivo (Figura 1.2 h). El proceso de fatiga provoca la rotura de la película protectora pasiva, dejando expuesto el metal ante un agente corrosivo.



Figura 1.2 Tipos de corrosión <sup>2</sup>

### **1.1.1.2 Corrosión en la industria petrolera**

En la industria del petróleo y gas, la corrosión ocasiona el deterioro de materiales, equipos e instalaciones en cada una de sus etapas asociadas: exploración, perforación, producción, transporte, almacenamiento, refinación y procesamiento de subproductos <sup>3</sup>.

La corrosión generará pérdidas económicas que llegan a cifras alarmantes cada año, de acuerdo con NACE (por sus siglas en inglés, *National Association of Corrosion Engineers*), en el año 2013, el costo mundial ocasionado en la industria se estimó en US\$2.5 billones, lo que equivale al 3.4% del Producto Interno Bruto (PIB) global <sup>4</sup>. En cuanto a la industria del petróleo y gas, el costo anual es estimado en US\$1.372 mil millones <sup>5</sup>.

Mediante el uso de prácticas de control preventivo, se estima que se podría ahorrar entre un 15 a un 35% del costo mundial generado <sup>4</sup>, sin embargo, gran parte de los esfuerzos de carácter técnico y económico para combatir este fenómeno, se concentran en actividades de carácter correctivo debido a la falta de programas preventivos.

### **1.1.1.3 Corrosión en tuberías**

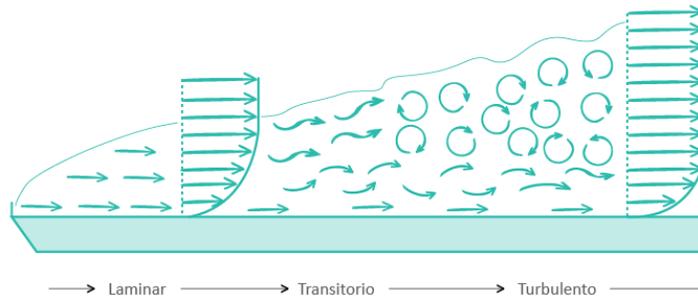
El proceso de extracción de petróleo y gas se inicia en los yacimientos petrolíferos, de los cuales se extrae una mezcla de agua, gas y petróleo, que es conducida desde los pozos productores hasta las estaciones de producción para la separación líquido-gas. Para el transporte de los fluidos se utilizan tuberías de acero al carbono, denominadas *líneas de recolección*.

El agua extraída de los yacimientos promueve la susceptibilidad de los materiales metálicos a presentar problemas de corrosión, debido a la presencia de gases disueltos (oxígeno [O<sub>2</sub>], dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] y sulfuro de hidrogeno [H<sub>2</sub>S]) y a las altas concentraciones de cloruros <sup>2</sup>. El contenido de cloruros en el agua es muy variable, con concentraciones inferiores a 10,000 ppm hasta concentraciones superiores a 350,000 ppm <sup>6</sup>, en comparación, el agua de mar contiene entre 30,000 y 35,000 ppm (de 3 a 3.5% en peso).

La velocidad de corrosión en las líneas de recolección se ve influenciada por los regímenes y patrones de flujo, a altos índices de flujo se puede presentar corrosión por erosión, mientras que a bajos índices de flujos se presenta corrosión por picaduras.

### **1.1.2 Flujo en tuberías**

Un fluido que circula a través de una tubería puede seguir tres regímenes de flujo (Figura 1.3): (I) el *régimen laminar* se caracteriza por un movimiento ordenado, suave y estratificado en el fluido, de manera que este se mueve en láminas paralelas sin entrecruzarse; (II) el *régimen turbulento* presenta un movimiento irregular, caótico e impredecible en el fluido. Las partículas se mueven desordenadamente y sus trayectorias forman pequeños remolinos; y (III) el *régimen transitorio* es una mezcla de flujo laminar y turbulento, ocurre en regiones donde existen fluctuaciones de velocidad en el flujo.



**Figura 1.3** Regímenes de flujo de un fluido

La transición del régimen laminar a turbulento depende de la rugosidad de la superficie, tipo de fluido, velocidad de flujo, fluctuaciones de velocidad, temperatura superficial, entre otros. En la década de 1880, Osborne Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el fluido (Ecuación 1.1).

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho D v}{\mu} \quad (1.1)$$

Donde:

$\rho$  = Densidad del fluido ( $kg\ m^{-3}$ )

$D$  = Diámetro de la tubería (m)

$v$  = Velocidad del fluido ( $m\ s^{-1}$ )

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido ( $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$ )

En la práctica, se considera régimen laminar para  $Re < 2100$ , turbulento para  $Re > 4000$  y transitorio para valores intermedios (Tabla 1.1).

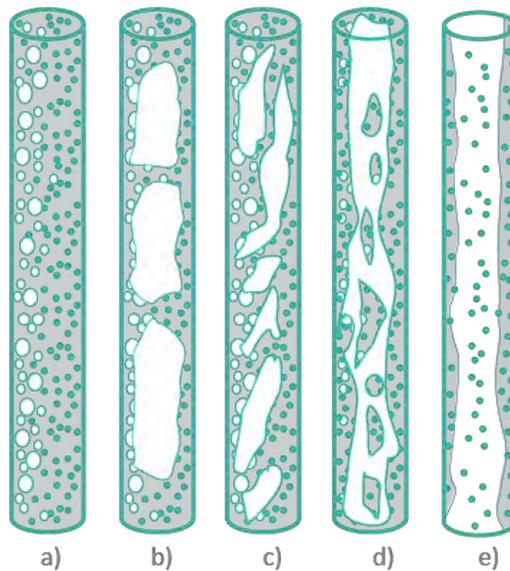
**Tabla 1.1** Régimen de flujo de acuerdo al número de Reynolds <sup>7</sup>

Número de Reynolds ( $Re$ )	Régimen de flujo
$Re < 2100$	Laminar
$2100 < Re < 4000$	Transitorio
$Re > 4000$	Turbulento

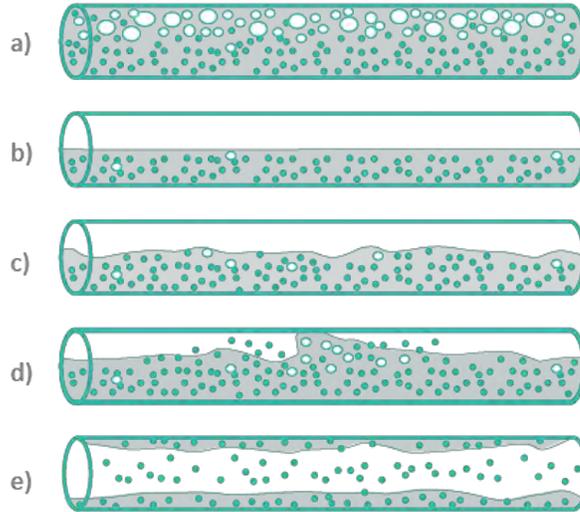
### 1.1.2.1 Patrones de flujo en tuberías

Para describir la distribución del movimiento de un fluido multifásico en tuberías horizontales y verticales (Figuras 1.4 y 1.5), se utilizan diversos patrones de flujo correlacionados empíricamente en función de la velocidad de flujo y las propiedades de este (viscosidad, densidad, tensión superficial, entre otras).

Los daños por corrosión se presentan en sitios donde los patrones de flujo son interrumpidos o modificados, ya que se rompe el equilibrio hidrodinámico del fluido, incrementando la velocidad de corrosión en zonas cercanas a la perturbación, como lo es en codos, uniones T, soldaduras, picaduras o cavidades.



**Figura 1.4** Patrones de flujo en tuberías verticales: a) Flujo de burbujas; b) Flujo tipo tapón; c) Flujo espumoso; d) Flujo de transición anular; y e) Flujo anular



**Figura 1.5** Patrones de flujo en tuberías horizontales: a) Flujo de burbujas; b) Flujo estratificado; c) Flujo estratificado ondulatorio; d) Flujo slug; y e) Flujo anular

### 1.1.3 Aceros al carbono

Los aceros al carbono son aceros cuyo porcentaje de carbono es inferior al 2%. De acuerdo a su porcentaje de carbono, se clasifican en: *aceros de bajo carbono*, con un porcentaje inferior al 0.3%; *aceros de medio carbono*, con un porcentaje entre 0.3 y 0.6%; y *aceros de alto carbono*, con un porcentaje superior al 0.6%.

A nivel mundial los aceros son la aleación más utilizado debido su bajo costo, buena resistencia mecánica y la posibilidad de ser trabajado mediante una gran variedad de métodos, lo que ofrece un amplio abanico de posibilidades para la manufactura de piezas. En función de requerimientos específicos, sus propiedades pueden ser modificadas mediante diversos procesos de conformado, tratamientos térmicos y/o modificaciones en la composición química.

Debido a las buenas propiedades mecánicas que presentan los aceros al carbono, se han utilizado durante décadas en diferentes campos como el automotriz, la aviación, la agricultura, la construcción, plantas eléctricas y en la industria del petróleo y gas. No obstante, la gran mayoría de los aceros al carbono sufren una degradación de sus propiedades debido a la corrosión, lo que se traduce en la necesidad de remplazar las piezas afectadas.

### 1.1.3.1 Acero AISI 1018

El acero AISI 1018 es un acero de bajo contenido de carbono y buen equilibrio entre sus propiedades mecánicas (Tabla 1.2), es empleado en la fabricación de partes para la industria metal-mecánica, automotriz, construcción, entre otras.

**Tabla 1.2** Propiedades mecánicas y composición química nominal para el acero AISI 1018 <sup>8</sup>

Propiedades mecánicas		Composición química nominal	
<b>Resistencia a la tracción</b>	440 MPa / 66800 PSI	<b>%C</b>	0.14 – 0.20
<b>Límite elástico</b>	370 MPa / 53700 PSI	<b>% Mn</b>	0.60 – 0.90
<b>Módulo de elasticidad</b>	205 GPa / 29700 KSI	<b>%P</b>	≤ 0.040
<b>Elongación máxima</b> (en 50 mm)	15%	<b>%S</b>	≤ 0.050
<b>Reducción de área</b>	40%		
<b>Maquinabilidad</b> (basado en un valor de 100% para el acero AISI 1212)	70%		
<b>Dureza Brinell</b>	126 HB		

### 1.1.3.2 Aceros grado API

Los aceros de los cuales están fabricados la mayor parte de los ductos de transporte de hidrocarburos, en territorio mexicano y a nivel mundial, son aceros de bajo contenido de carbono bajo requerimientos de la norma API 5L<sup>9</sup>. Esta norma tiene como objetivo, proporcionar estándares para tuberías utilizadas en el transporte de petróleo, gas y agua. La norma API 5L contempla las especificaciones de los productos PSL 1 y PSL 2 (por sus siglas en inglés, *Product Specification Levels*), los aceros cubiertos por la norma se muestran en la Tabla 1.3 (la composición química de cada uno se muestra en el ANEXO A1).

**Tabla 1.3** Aceros cubiertos por la norma API 5L para los productos PSL 1 y PSL 2<sup>9</sup>

PSL 1	PSL 2		
Tubos soldados y sin costura	Tubos soldados y sin costura	Tubos soldados	
L175 o A25	L245R o BR	L245Q o BQ	L245M o BM
L175P o A25P	L290R o X42R	L290Q o X42Q	L290M o X42M
L210 o A	L245N o BN	L320Q o X46Q	L320M o X46M
L245 o B	L290N o X42N	L360Q o X52Q	L360M o X52M
L290 o X42	L320N o X46N	L390Q o X56Q	L390M o X56M
L320 o X46	L360N o X52N	L415Q o X60Q	L415M o X60M
L360 o X52	L390N o X56N	L450Q o X65Q	L450M o X65M
L390 o X56	L415N o X60N	L485Q o X70Q	L485M o X70M
L415 o X60		L555Q o X80Q	L555M o X80M
L450 o X65		L625Q o X90Q	L625M o X90M
L485 o X70		L690Q o X100Q	L690M o X100M
			L830M o X120M

## 1.2 INHIBIDORES DE CORROSIÓN

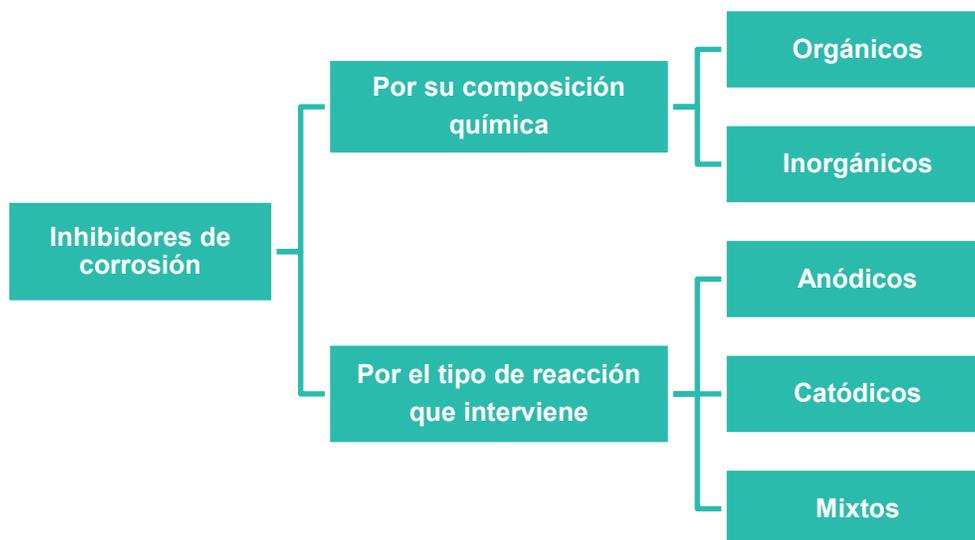
La corrosión es un proceso espontáneo que solo puede controlarse, una de las principales formas de mitigar este fenómeno en la industria, es mediante inhibidores de corrosión <sup>10</sup>.

Con base en la norma ISO 8044:2015 <sup>11</sup>, se define a los inhibidores de corrosión como:

*“Sustancias químicas que cuando están presentes en el sistema de corrosión a una concentración adecuada disminuyen la velocidad de corrosión, sin cambiar significativamente la concentración de cualquier agente corrosivo”.*

### 1.2.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión

Los inhibidores de corrosión se pueden clasificar de acuerdo a su composición química o al tipo de reacción que interviene (Figura 1.6).



**Figura 1.6** Clasificación de los inhibidores de corrosión

### 1.2.1.1 Inhibidores orgánicos e inorgánicos

- Orgánicos

Estos inhibidores se adsorben física o químicamente sobre la interfaz metálica. La adsorción física (*fisisorción*) se atribuye a fuerzas de van der Waals (atracción electrostática) entre los compuestos orgánicos inhibidores y los sitios activos de la superficie metálica. La adsorción química (*quimisorción*) involucra la transferencia de carga entre las moléculas orgánicas y el metal.

- Inorgánicos

Se pueden dividir en dos grupos: anódicos o pasivantes y los catódicos o no pasivantes. Usualmente son sales cristalinas que forman una película en el interior del ducto, neutralizando las sales disueltas en el agua e impidiendo su incrustación.

### 1.2.1.2 Inhibidores anódicos, catódicos y mixtos

- Anódicos

Los inhibidores anódicos se caracterizan por una polarización de la reacción parcial anódica con reducción en la corriente de corrosión y desplazamiento del potencial de corrosión hacia valores más positivos (Figura 1.7).

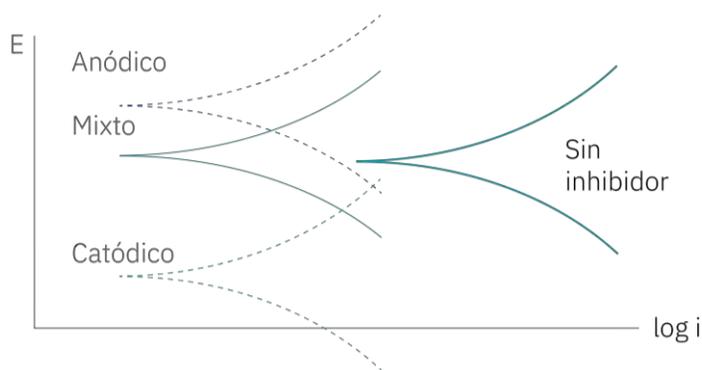
Existen dos tipos de inhibidores anódicos: (I) los *aniones oxidantes*, como el cromato  $[\text{CrO}_4^{2-}]$ , nitrito  $[\text{NO}_2^-]$  y nitrato  $[\text{NO}_3^-]$ , que pueden pasivar la superficie del metal en ausencia de oxígeno; y (II) los *aniones no oxidantes*, como el fosfato  $[\text{PO}_4^{3-}]$ , wolframato  $[\text{WO}_4^{2-}]$  y molibdato  $[\text{MoO}_4^{2-}]$ , que requieren la presencia de oxígeno para pasivar al metal.

- Catódicos

Estos inhibidores se caracterizan por una polarización en la reacción parcial catódica con disminución en la corriente de corrosión y disminución del potencial de corrosión a valores más negativos (Figura 1.7). El proceso de inhibición se puede dar mediante: (I) *venenos catódicos*, como sulfuros  $[S^{2-}]$  o seleniuros  $[Se^{2-}]$ , que bloquean la recombinación de hidrógeno atómico a molecular; (II) *precipitadores catódicos*, que son sustancias que aumentan la alcalinidad en los sitios catódicos y precipitan compuestos insolubles en la superficie del metal. Los precipitadores catódicos más utilizados son el carbonato de calcio  $[CaCO_3]$  y de magnesio  $[MgCO_3]$ ; y (III) *recolectores de oxígeno*, como el sulfito de sodio  $[Na_2SO_3]$  y la hidracina  $[N_2H_4]$ , que reaccionan con el oxígeno disuelto para reducir la corrosión.

- Mixtos

Los inhibidores mixtos actúan en la reacción catódica y anódica, con una variación en el potencial de corrosión nula o mínima (Figura 1.7). Por lo general, son compuestos que forman una película protectora sobre la superficie del metal que bloquea los sitios anódico y catódico.



**Figura 1.7** Efecto de los inhibidores de corrosión sobre las curvas de polarización

### 1.2.2 Inhibidores de corrosión de origen natural

Los inhibidores de corrosión de origen natural (*green corrosion inhibitors*) han demostrado reducir la velocidad de corrosión eficientemente (Tabla 1.4) y, en comparación con los inhibidores que se utilizan actualmente en la industria, no son tóxicos, son biodegradables y económicos<sup>12-15</sup>. Sin embargo, al ser una mezcla de compuestos orgánicos, no se sabe con certeza cuál de ellos es el que protege la superficie metálica.

Los extractos de plantas presentan en su estructura anillos aromáticos y/o heterocíclicos con enlaces  $\pi$  y heteroátomos (P, S, N y O) con pares de electrones libres, estas características estructurales son las que permiten que las moléculas orgánicas se adsorban en la interfaz metálica<sup>16-19</sup>. Las moléculas del inhibidor desplazan a las moléculas de agua adsorbidas en la interfaz metálica (Ecuación 1.2), de esta manera las moléculas del inhibidor se adsorben y crean una película protectora que bloquea los sitios activos y reduce la disolución del metal<sup>20, 23, 24</sup>.



La disponibilidad de pares libres en las moléculas del inhibidor facilita la transferencia de electrones de las moléculas al metal, formando un enlace covalente coordinado<sup>24-26</sup>. La adsorción se ve influenciada por la naturaleza y carga de la superficie metálica, el tipo de electrolito, la temperatura y la estructura molecular del inhibidor.

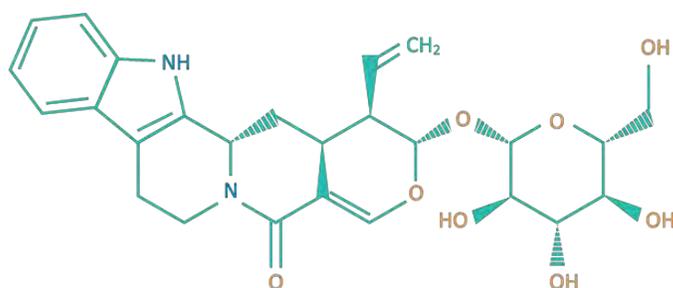
En general, los principales tipos de interacción entre las moléculas del inhibidor y la superficie del metal, son la *fisisorción* y la *quimisorción*; la primera corresponde a fuerzas electrostáticas y la segunda a la formación de enlaces covalentes coordinados<sup>25</sup>.

**Tabla 1.4** Ejemplos de inhibidores de origen natural utilizados en aceros al carbono

Extracto natural	Medio agresivo	Metal utilizado	Concentración de inhibidor (ppm)	Eficiencia (%)
Pimienta negra <i>Piper nigrum</i> <sup>27</sup>	HCl	Acero bajo carbono	120	98
Manzanilla <i>Chamomile</i> <sup>28</sup>	HCl	Acero C38	7000	88
Aguacate <i>Persea americana</i> <sup>29</sup>	HCl	Acero bajo carbono	2000	93
Chile jalapeño <i>Capsicum annuum</i> <sup>30</sup>	HCl	Acero bajo carbono	1400	82
Tomillo <i>Thymus vulgaris</i> <sup>31</sup>	NaCl	Acero bajo carbono	1000	79
Eucalipto <i>Eucalyptus globulus</i> <sup>32</sup>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Acero C38	6000	81

### 1.2.2.1 Estrictosamida

La estrictosamida es un glicoalcaloide encontrado en diversas plantas de la familia *Rubiaceae*, como la *Nauclea officinalis*, *Nauclea orientalis*, *Nauclea pobeguinii*, *Sarcocephalus latifolius*, *Psychotria bahiensis*<sup>33</sup>. Estas plantas contienen principalmente alcaloides, de los cuales la estrictosamida es el constituyente principal<sup>34</sup>.



**Figura 1.8** Estructura molecular de la estrictosamida [C<sub>26</sub>H<sub>30</sub>N<sub>2</sub>O<sub>8</sub>]

Las hojas y raíces de estas plantas se utilizan en medicina popular para el tratamiento de enfermedades como la malaria, trastornos de tracto gastrointestinal, hipertensión, gota, tuberculosis, úlcera, lepra, gonorrea, hemorroides y bronquitis<sup>35</sup>.

### 1.3 TÉCNICA ELECTROQUÍMICAS

Existen diversas técnicas electroquímicas que pueden ayudar a estudiar la eficiencia de un inhibidor de corrosión, cada una tiene diferentes alcances y proporciona información distinta. No existe una técnica universal que permita evaluar la eficiencia de un inhibidor, por lo que se debe recurrir a las técnicas electroquímicas que puedan complementar la evaluación de los parámetros de interés.

#### 1.3.1 Potencial de circuito abierto (OCP) vs. Tiempo

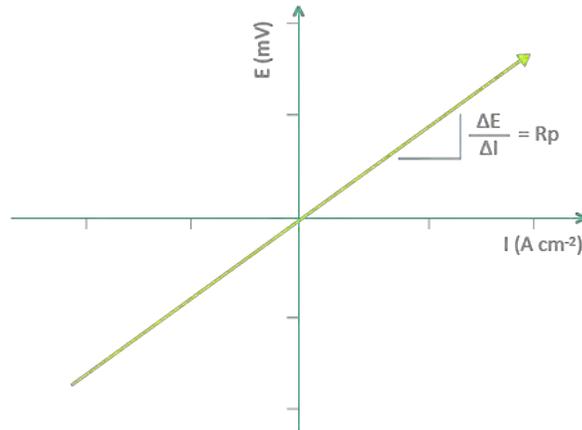
El potencial de circuito abierto OCP (por sus siglas en inglés, *Open Circuit Potential*) es el potencial en el que no hay corriente, también es conocido como potencial de equilibrio, potencial de reposo o potencial de corrosión.

Con esta técnica se monitorea la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo y un electrodo de referencia, durante un período de tiempo específico.

#### 1.3.2 Resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ )

La resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ) es una técnica electroquímica que puede ser utilizada para determinar la velocidad de corrosión. Esta técnica se basa en la polarización del material de estudio, en el orden de  $\pm 10$  mV (relativo a su OCP), y a medida que se modifica el potencial se mide la corriente resultante.

La resistencia a la polarización está representada por la pendiente del potencial aplicado y la densidad de corriente  $\Delta E/\Delta I$  (Figura 1.9).



**Figura 1.9** Gráfica de potencial ( $E$ ) vs. Densidad de corriente

Para calcular  $R_p$  se puede utilizar la ecuación de Stern-Geary (Ecuación 1.3):

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I_{\Delta E \rightarrow 0}} = \frac{B}{i_{corr}} \quad (1.3)$$

Donde:

$R_p$  = Resistencia a la polarización ( $ohm\ cm^2$ )

$\Delta E$  = Diferencia de potencial (mV)

$\Delta I$  = Densidad de corriente ( $A\ cm^{-2}$ )

$B$  = Constante de Stern – Geary ( $mV\ década^{-1}$ )

$i_{corr}$  = Densidad de corriente de corrosión ( $A\ cm^{-2}$ )

Donde  $B$  es una constante que relaciona la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), es decir, la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización. Puede ser determinada empíricamente a partir de las pendientes anódica ( $\beta_a$ ) y catódica ( $\beta_c$ ) de una gráfica de Tafel (Ecuación 1.4).

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 (\beta_a + \beta_c)} \quad (1.4)$$

Donde:

$\beta_a$  = Pendiente catódica

$\beta_c$  = Pendiente anódica

### 1.3.3 Extrapolación de Tafel

La técnica de extrapolación de Tafel proporciona otra forma de determinar la velocidad de corrosión de un metal (Figura 1.10). La curva de polarización anódica (dirección noble) está asociada a la oxidación del metal y la curva de polarización catódica (dirección activa) con la reducción.

Esta técnica se aplica en un intervalo de -250 mV a +250 mV, alrededor del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ). Se requiere determinar una sección lineal (de al menos una década de corriente) para que se pueda realizar una extrapolación razonablemente precisa al potencial de corrosión y poder leer directamente la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) desde la gráfica, sin necesidad de calcular las pendientes de Tafel o usar la ecuación de Stern-Geary.

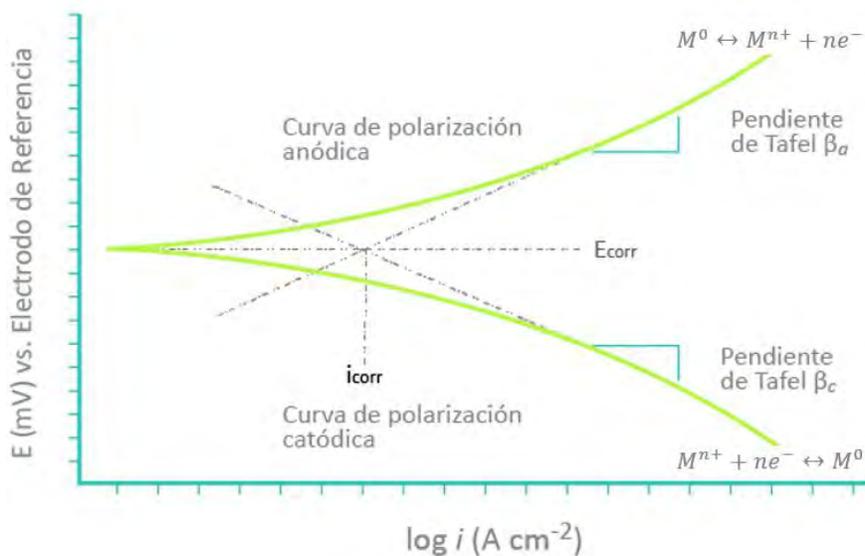


Figura 1.10 Extrapolación de Tafel en una curva de polarización

### 1.3.4 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

La espectroscopía de impedancia electroquímica o EIS (por sus siglas en inglés, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) es una técnica electroquímica basada en la aplicación de una pequeña señal de potencial ( $E$ ) a un electrodo, para medir su respuesta en corriente ( $I$ ) a diferentes frecuencias.

En corriente directa la relación de la resistencia, el potencial y la intensidad de corriente está dada por la Ley de Ohm (Ecuación 1.5):

$$E = I R \quad (1.5)$$

Donde:

$E =$  Potencial ( $V$ )

$I =$  Intensidad de corriente ( $A$ )

$R =$  Resistencia ( $\Omega$ )

En corriente alterna, esta relación está dada por la ecuación 1.6:

$$E = I Z \quad (1.6)$$

Donde:

$Z =$  Impedancia ( $\Omega$ )

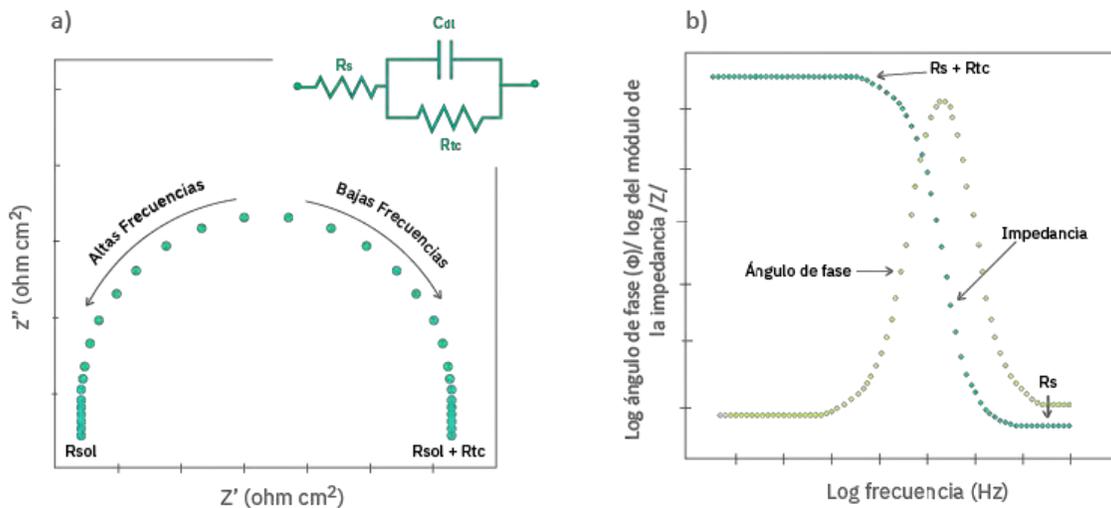
Teniendo en cuenta que el potencial y la corriente varían de forma sinusoidal en el tiempo,  $Z$  depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada.

#### 1.3.4.1 Presentación de los datos

La impedancia está compuesta por una parte real ( $Z'$ ) y otra imaginaria ( $Z''$ ), si se grafica la parte imaginaria contra la parte real se obtiene un diagrama de Nyquist (Figura 1.11 a). En este diagrama se reflejan los posibles mecanismos que gobiernan los fenómenos electroquímicos, a altas frecuencias se presenta una resistencia por parte de la solución ( $R_{sol}$ ) y a bajas frecuencias una resistencia a la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ).

La mayor desventaja del diagrama Nyquist es que no se puede observar la dependencia de la impedancia con respecto a la frecuencia, es posible mitigar este inconveniente añadiendo etiquetas de valores de frecuencia en los puntos más relevantes <sup>36</sup>. Otro inconveniente de estos diagramas, en ciertos sistemas, es la dificultad de distinguir los valores de impedancia bajos sobre los más altos, debido a la existencia de constantes de tiempo.

Como complemento a los diagramas de Nyquist, los diagramas de Bode reflejan el comportamiento de la señal de impedancia con respecto a la frecuencia (Figura 1.11 b). Los componentes de una señal de impedancia son el módulo  $|Z|$  y el ángulo de fase ( $\phi$ ). La frecuencia normalmente se representa en escala logarítmica para destacar mejor el comportamiento a bajas frecuencias.

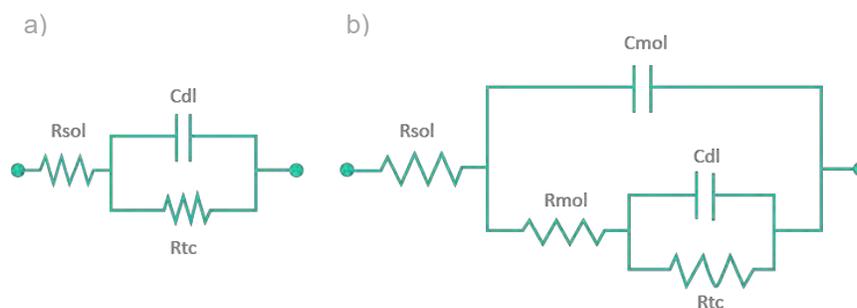


**Figura 1.11** a) Diagrama de Nyquist y b) Diagramas de Bode

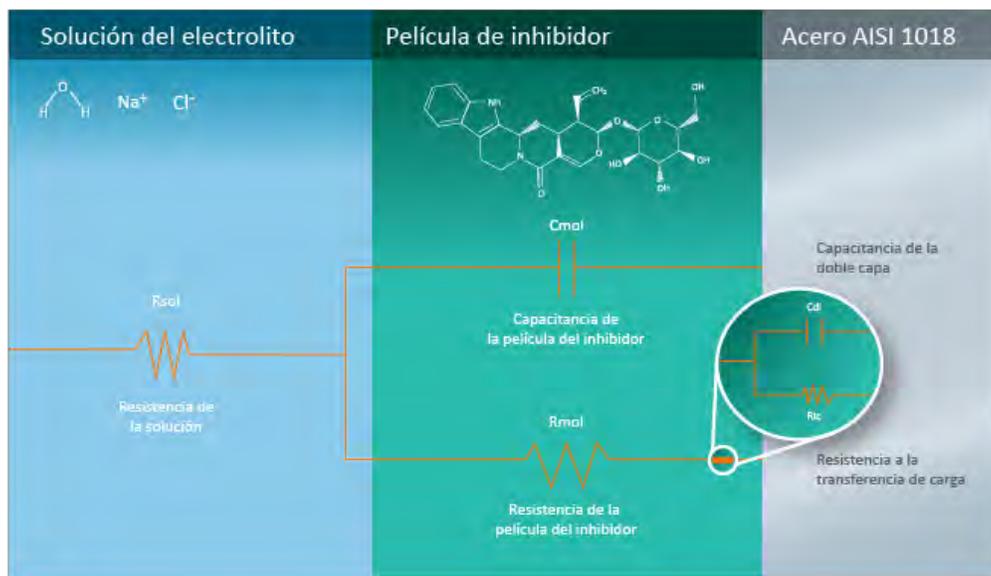
### 1.3.4.2 Circuitos equivalentes

Para el análisis del diagrama de Nyquist es necesario recurrir a circuitos equivalentes, los cuales están constituidos por una combinación de elementos eléctricos (resistencias, capacitancias, inductores, entre otros) que se ajustan a los datos experimentales obtenidos.

Cuando el diagrama de Nyquist presenta semicírculos perfectamente definidos el fenómeno de impedancia es completamente capacitivo y puede ser descrito por un circuito equivalente de Randles (Figura 1.12 a). Si los semicírculos presentan deformaciones, es necesario encontrar un circuito equivalente con una configuración que se ajuste al comportamiento obtenido, en la Figura 1.12 b y 1.13 se presenta un arreglo típico para metales con algún tipo de recubrimiento o película. Donde:  $R_{sol}$  es la resistencia de la solución;  $R_{tc}$  la resistencia a la transferencia de carga;  $R_{mol}$  la resistencia de la película;  $C_{dl}$  la capacitancia de la doble capa electroquímica; y  $C_{mol}$  la capacitancia de la película de moléculas adsorbidas <sup>16, 37, 38</sup>.



**Figura 1.12** a) Circuito equivalente de Randles y b) Circuito equivalente con algún tipo de recubrimiento o película



**Figura 1.13** Ejemplificación de un circuito equivalente en presencia de una película protectora.

## 1.4 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Las isothermas de adsorción proporcionan información sobre la naturaleza de las interacciones existentes entre la interfaz metálica y la solución donde están presentes las moléculas de agua y las del inhibidor <sup>39</sup>, la superficie del metal es cubierta por la adsorción de los dipolos de las moléculas de agua, que posteriormente son desplazadas por las moléculas del inhibidor <sup>40</sup>. Las isothermas de adsorción más utilizadas son la de Langmuir, Temkin, Frumkin y Freundlich.

La isoterma de Langmuir es válida para la adsorción de una monocapa sobre una superficie que contiene un número finito de sitios idénticos, Langmuir estableció tres postulados para describir la adsorción sobre la interfaz metálica <sup>41</sup>: (I) hay una formación de una monocapa de moléculas adsorbidas; (II) todos los sitios de la superficie tienen la misma probabilidad de ser ocupados; y (III) no hay interacción entre las moléculas adsorbidas.

La isoterma de Langmuir está dada por el grado de cobertura superficial  $\theta$  (Ecuación 1.7), el cual se puede obtener a partir de técnicas como EIS, polarización potenciodinámica y estudios de pérdida de peso. Para que este modelo sea confiable, el coeficiente de correlación lineal ( $R^2$ ) debe tener valores muy cercanos a 1.

$$\theta = \frac{k_{ads} C_{inh}}{1 + k_{ads} C_{inh}} \quad (1.7)$$

Donde:

$\theta$  = Grado de cobertura de la superficie  
 $k_{ads}$  = Constante de adsorción de equilibrio  
 $C_{inh}$  = Concentración del inhibidor

Linealizando e invirtiendo la ecuación 1.8:

$$\frac{C_{inh}}{\theta} = \frac{1}{k_{ads}} + C_{inh} \quad (1.8)$$

Si se grafica  $C_{inh}/\theta$  contra  $C_{inh}$ , se puede obtener la  $k_{ads}$  de la pendiente y con la ecuación 1.9<sup>19, 42, 43</sup> se puede determinar el mecanismo de adsorción de acuerdo con el  $\Delta G^\circ_{ads}$  de la Tabla 1.5.

$$\Delta G^\circ_{ads} = -RT \ln(55.5 k_{ads}) \quad (1.9)$$

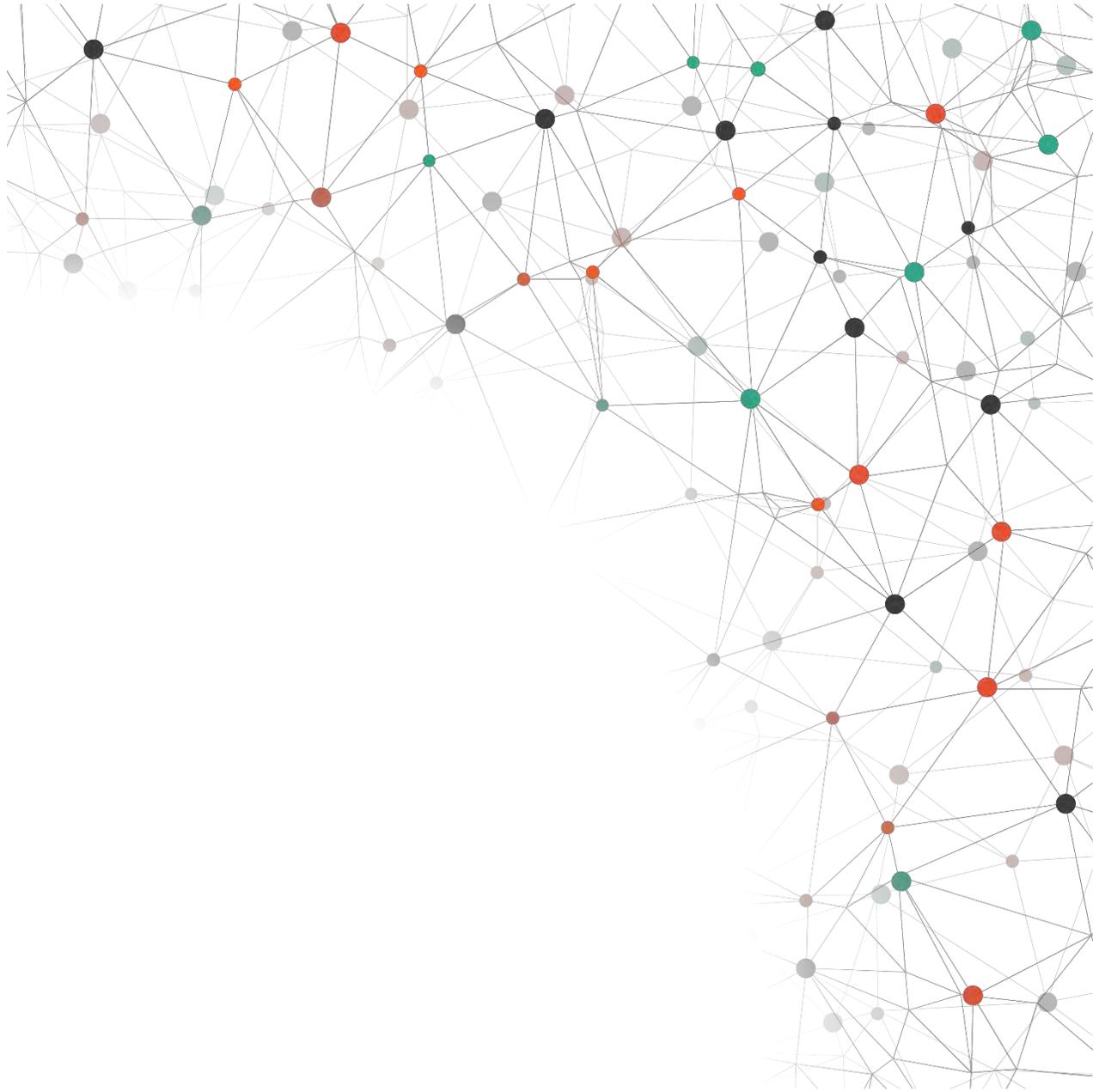
Donde:

$\Delta G^\circ_{ads}$  = Energía de Gibbs de adsorción ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )  
 $R$  = Constante universal de los gases ( $\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$ )  
 $T$  = Temperatura (K)  
 55.5 es la concentración del agua en solución ( $\text{mol L}^{-1}$ )

**Tabla 1.5** Mecanismo de adsorción de acuerdo con el criterio de  $\Delta G^\circ_{ads}$ <sup>19</sup>

Criterio de $\Delta G^\circ_{ads}$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )	Mecanismo de adsorción
$\Delta G^\circ_{ads} > -20$	Fisisorción
$-40 < \Delta G^\circ_{ads} < -20$	Combinado
$\Delta G^\circ_{ads} < -40$	Quimisorción

Los valores negativos de  $\Delta G^{\circ}_{ads}$  implican la adsorción de moléculas de inhibidor sobre la superficie del metal. En general, los valores de  $\Delta G^{\circ}_{ads}$  mayores a  $-20 \text{ kJ mol}^{-1}$  son asociados con interacciones electrostáticas entre las moléculas de inhibidor y la superficie metálica (*fisisorción*), valores de  $\Delta G^{\circ}_{ads}$  menores a  $-40 \text{ kJ mol}^{-1}$  involucran transferencia de carga de los electrones de las moléculas de inhibidor a la superficie del metal, para formar un enlace tipo covalente coordinado (*quimisorción*)<sup>44-46</sup>. Finalmente, los valores de  $\Delta G^{\circ}_{ads}$  entre  $-40$  y  $-20 \text{ kJ mol}^{-1}$  son un indicativo de que las moléculas de inhibidor son adsorbidas en la superficie del metal por adsorción mixta (*fisisorción y quimisorción*) siendo predominante en naturaleza la quimisorción<sup>47,48</sup>.



## 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

## 2.1 METODOLOGÍA

Para este trabajo se tomaron en cuenta tres premisas importantes:

- I. La estructura molecular de la estrictosamida presenta heteroátomos y enlaces  $\pi$  que le permiten adsorberse en la interfaz metálica.
- II. Electroquímicamente, el acero AISI 1018 presenta un comportamiento similar a los aceros utilizados en el transporte de petróleo, en especial con el acero API X52 <sup>16</sup>.
- III. Una solución de cloruro de sodio [NaCl] al 3% (m/m) simula un ambiente marino.

### 2.1.1 Condiciones de flujo

La secuencia de pruebas electroquímicas se trabajó en estado estático, 100 y 500 revoluciones por minuto (rpm). De acuerdo con el fabricante, el electrodo de cilindro rotatorio (modelo *12 mm OD* marca *PINE research*) cumple un régimen de flujo laminar a 100 rpm y un régimen turbulento a 500 rpm (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1** Número de Reynolds para un electrodo de cilindro rotatorio modelo *12 mm OD* marca *PINE* <sup>49</sup>

Revoluciones por minuto (rpm)	Número de Reynolds ( $Re$ )	Régimen de flujo
5	42	Laminar
10	84	Laminar
20	169	Laminar
50	422	Laminar
<b>100</b>	<b>844</b>	<b>Laminar</b>
200	1688	Laminar
<b>500</b>	<b>4219</b>	<b>Turbulento</b>

Con base en la norma NRF-005-PEMEX-2009 <sup>7</sup>, bajo estas condiciones de flujo se tiene una equivalente de 1775 Barriles/día a 100 rpm y 8785 Barriles/día a 500 rpm (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2** Equivalencias en revoluciones por minuto de un flujo en ducto <sup>7</sup>

Flujo en ducto			Revoluciones por minuto equivalentes para un electrodo de cilindro rotatorio
Barriles/día	L/min	cm/s	
176	19	1	9
<b>1757</b>	<b>194</b>	<b>10</b>	<b>94</b>
3514	388	20	193
5271	582	30	293
7028	776	40	394
<b>8785</b>	<b>970</b>	<b>50</b>	<b>507</b>

### 2.1.2 Metodología de trabajo

- I. Se preparó 1 L de solución de cloruro de sodio [NaCl] al 3% (m/m) y 5 mL de estrictosamida al 0.01 M.
- II. La secuencia de pruebas, para las tres condiciones trabajadas, consistió en la medición del potencial de circuito abierto (OCP) durante 30 minutos, para estabilizar el potencial. Posteriormente, la evaluación electroquímica mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), con una amplitud en la señal de 10 mV y un intervalo de frecuencias de 10 kHz a 10 mHz.
  - Para cada secuencia se utilizaron cuatro concentraciones de inhibidor (05, 10, 20 y 50 ppm) y un blanco, como se indica en la norma NRF-005-PEMEX-2009.
  - El sistema de trabajo utilizado fue un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata [Ag/AgCl], un contraelectrodo de grafito y una probeta de acero AISI 1018 como electrodo de trabajo (Figura 2.1), inmersos en una solución de cloruro de sodio [NaCl] al 3% (m/m).

- Para la secuencia de pruebas se utilizó un equipo *Gill AC* marca *ACM Instruments*, con sus respectivos softwares, *Sequencer* y *Core running*, para la manipulación de los datos obtenidos.

III. A los datos experimentales de los diagramas de Nyquist se les hizo un ajuste mediante el software *Zsimpwin*, para obtener los parámetros electroquímicos y poder determinar la eficiencia de inhibición de la estreptosamida (Ecuación 3.1).

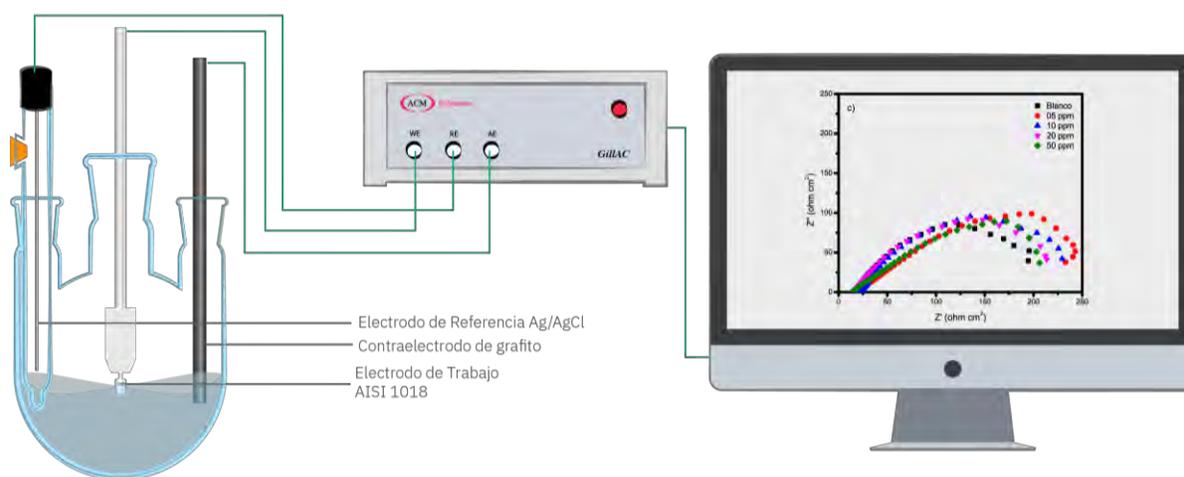
$$\% EI = \frac{\frac{1}{R_{p\ SI}} - \frac{1}{R_{p\ CI}}}{\frac{1}{R_{p\ SI}}} \times 100 \quad (3.1)$$

Donde:

$R_{p\ SI}$ : Resistencia a la polarización sin inhibidor ( $ohm\ cm^2$ )

$R_{p\ CI}$ : Resistencia a la polarización con inhibidor ( $ohm\ cm^2$ )

IV. Por último, se realizó un análisis termodinámico mediante la isoterma de adsorción de Langmuir, para determinar el mecanismo de adsorción de la estreptosamida.

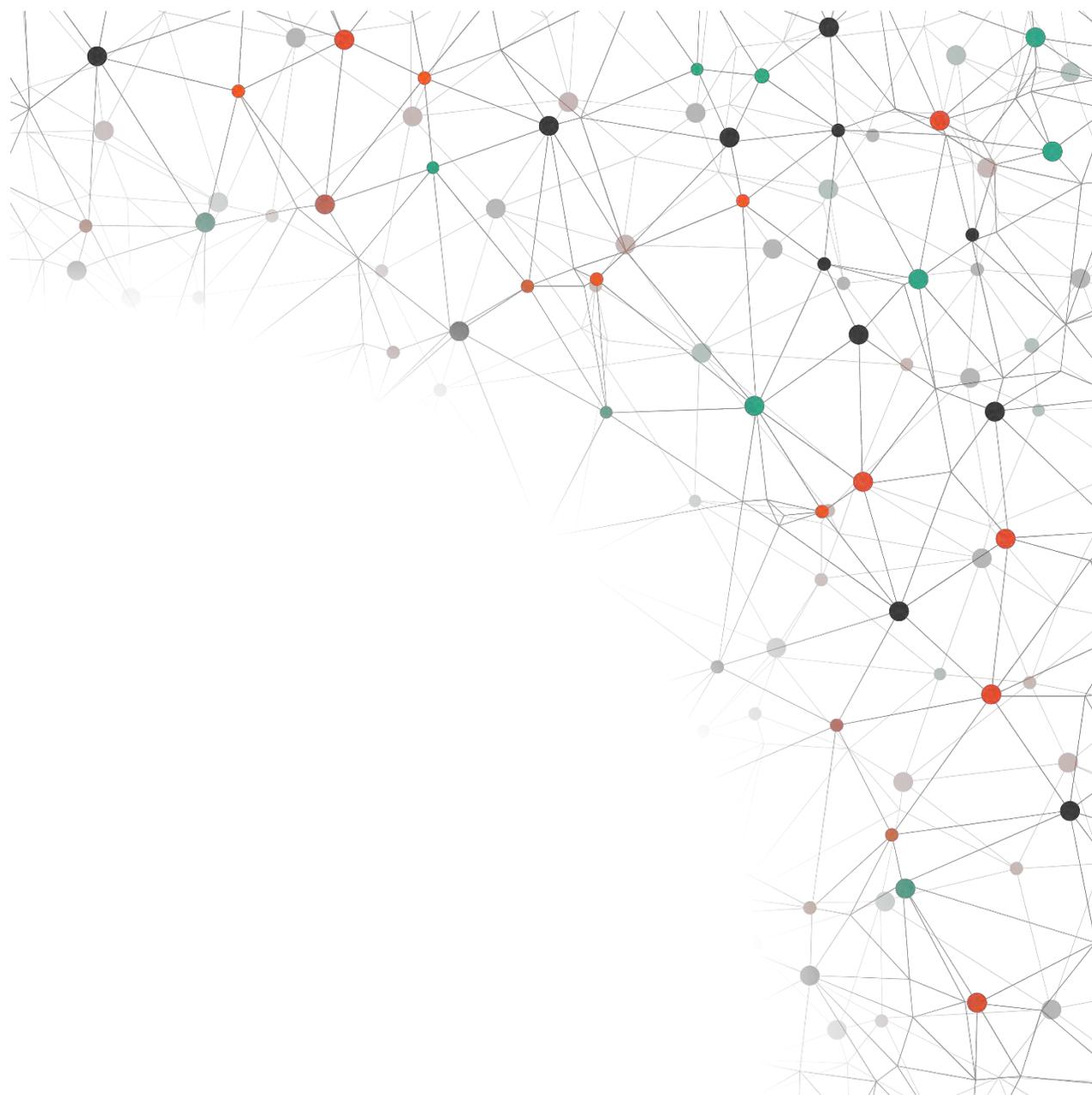


**Figura 2.1** Sistema de trabajo

En la Tabla 2.3 se observan de manera simplificada las condiciones de trabajo y técnicas electroquímicas utilizadas.

**Tabla 2.3** Variables y pruebas electroquímicas utilizadas

Acero utilizado	Inhibidor	Medio de prueba	Velocidad de rotación (rpm)	Concentración del inhibidor (ppm)	Técnicas electroquímicas	
AISI 1018	Estrictosamida [C <sub>26</sub> H <sub>30</sub> N <sub>2</sub> O <sub>8</sub> ] 0.01 M	Solución de cloruro de sodio [NaCl] al 3% (m/m)	0	0	Estabilización del OCP durante 30 min	
				05		
				10		
				20		
				50		
			100	0		Evaluación electroquímica por EIS
				05		
				10		
				20		
				50		
			500	0		
				05		
				10		
				20		
				50		



### 3 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación de la eficiencia de inhibición de la estrictosamida por espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y el análisis termodinámico mediante la isoterma de adsorción de Langmuir para determinar mecanismo de adsorción del inhibidor. La estabilización del potencial de circuito abierto (OCP) en función del tiempo se muestra en el ANEXO A2.

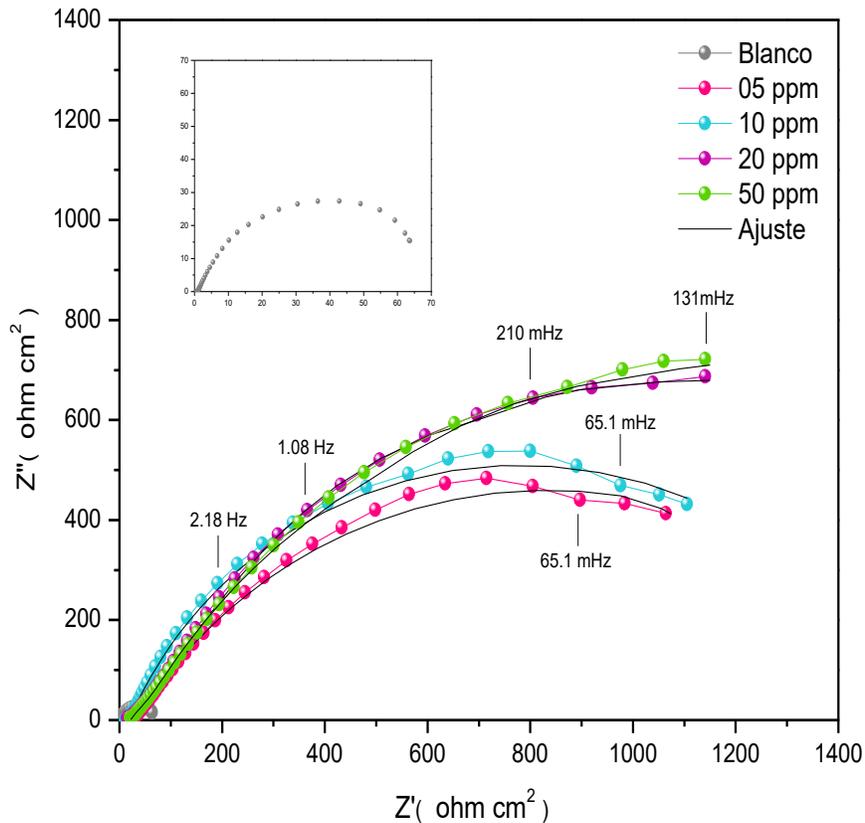
### **3.1 EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE LA ESTRICOSAMIDA COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN**

#### **3.1.1 Efecto de inhibición de la estrictosamida en estado estático**

El diagrama de Nyquist (Figura 3.1) consiste en semicírculos deformados cuyo diámetro aumenta en función de la concentración de estrictosamida. La deformación en los semicírculos se puede atribuir a que el aumento en la concentración, facilita un mayor número de moléculas que se pueden adsorber en la interfaz metálica; lo que resulta en la formación de una película protectora que disminuye la transferencia de electrones entre la interfaz metálica y el medio corrosivo<sup>21</sup>. De igual manera, la deformación en los semicírculos también puede ser causada por la dispersión en la frecuencia; ocasionada por la rugosidad y falta de homogeneidad en la interfaz metálica<sup>38, 42, 50, 51</sup>.

El aumento en el diámetro indica que hay una disminución en la velocidad de corrosión<sup>16</sup>.

El diámetro de los semicírculos corresponde a la suma de las resistencias que intervienen en el espectro de impedancias ( $R_{mol}$  y  $R_{ct}$ ), es decir, la resistencia a la polarización ( $R_p$ )<sup>38</sup>, la cual es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión.



**Figura 3.1** Diagrama de Nyquist para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), en condiciones estáticas y diferentes concentraciones de estrichosamida

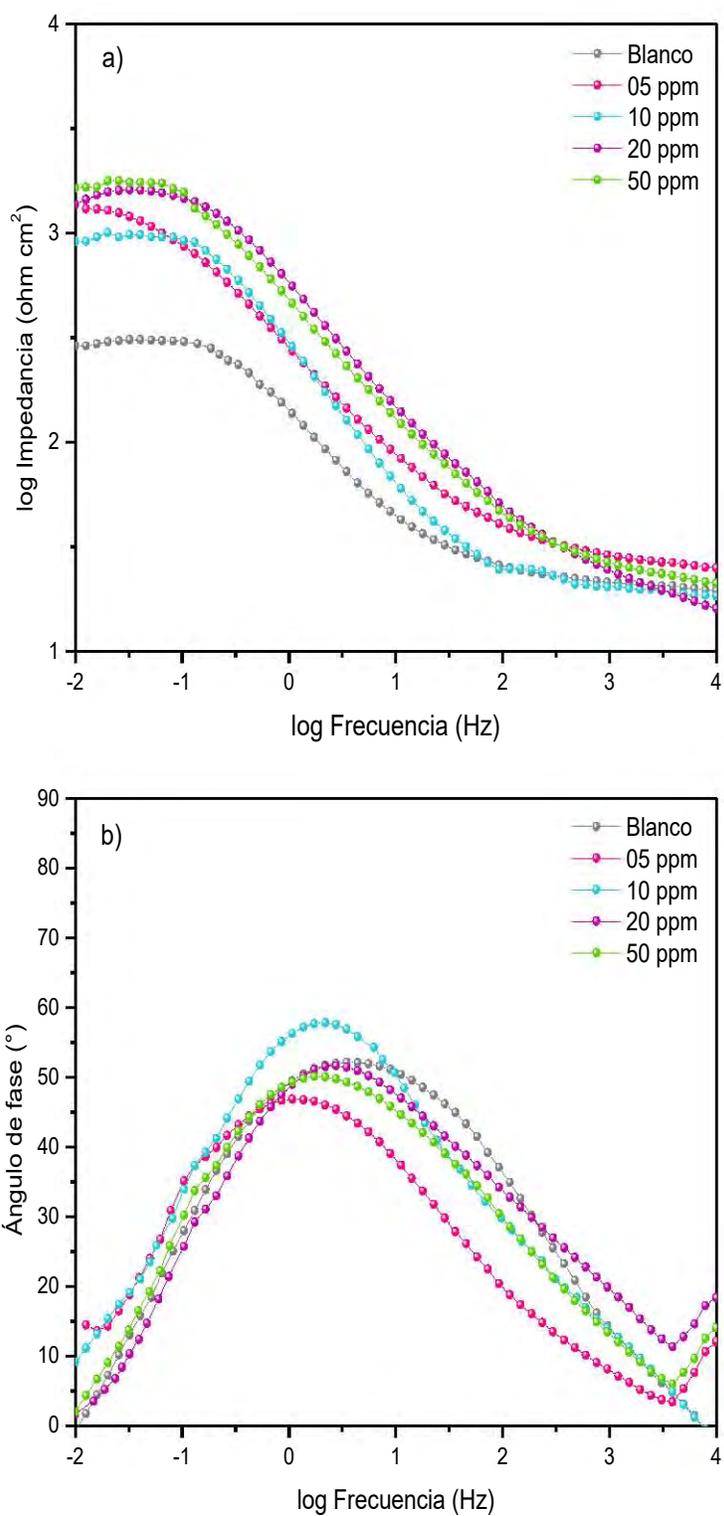
En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros electroquímicos obtenidos por EIS, se observa un incremento de la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ) y el decremento en la capacitancia de la doble capa electroquímica ( $C_{dl}$ ), lo que indica que la transferencia de carga es la que controla el proceso corrosivo <sup>21</sup>. La disminución en  $C_{dl}$  se puede relacionar a que las moléculas de estrichosamida desplazan gradualmente a las moléculas de agua e iones cloruro [Cl<sup>-</sup>] adsorbidos en la interfaz metálica, formando una película protectora por adsorción que evita la disolución metálica <sup>16, 19, 52, 53</sup>. La adsorción de las moléculas de estrichosamida en la interfaz metálica aumenta la resistencia a la transferencia de carga y disminuye la capacitancia de la doble capa electroquímica <sup>52</sup>.

**Tabla 3.1** Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de EIS en condiciones estáticas

<b>C</b> <b>(ppm)</b>	<b>R<sub>sol</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>n</b>	<b>C<sub>dl</sub></b> <b>(μF cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>R<sub>mol</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>tc</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>p</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>EI</b> <b>(%)</b>
<b>0</b>	9.9	0.7	628.3	-	80.8	80.8	-
<b>05</b>	24.9	0.6	428.1	14.08	1530.0	1544.1	<b>94.8</b>
<b>10</b>	11.9	0.7	218.0	32.74	1580.0	1612.7	<b>95.0</b>
<b>20</b>	15.1	0.9	82.9	53.11	2124.0	2177.1	<b>96.3</b>
<b>50</b>	21.3	0.9	81.0	144.20	2080.0	2224.2	<b>96.4</b>

La resistencia a la polarización aumenta gradualmente con la concentración de estrictosamida, lo que se traduce en una mayor eficiencia de inhibición, la eficiencia máxima alcanza un valor de 96.4% a 50 ppm.

En la tabla 3.1 también se observa que el parámetro  $n$  muestra un incremento a mayores concentraciones de estrictosamida. El valor de  $n$  proporciona información sobre la rugosidad y falta de homogeneidad en la interfaz metálica, usualmente oscila entre 0.5 y 1, valores bajos en  $n$  son relacionados a superficies más rugosas <sup>21, 42, 53</sup>. Los valores de  $n$  obtenidos pueden atribuirse a que la adsorción de las moléculas de estrictosamida reduce la rugosidad de la interfaz metálica en función de la concentración <sup>17, 54</sup>.



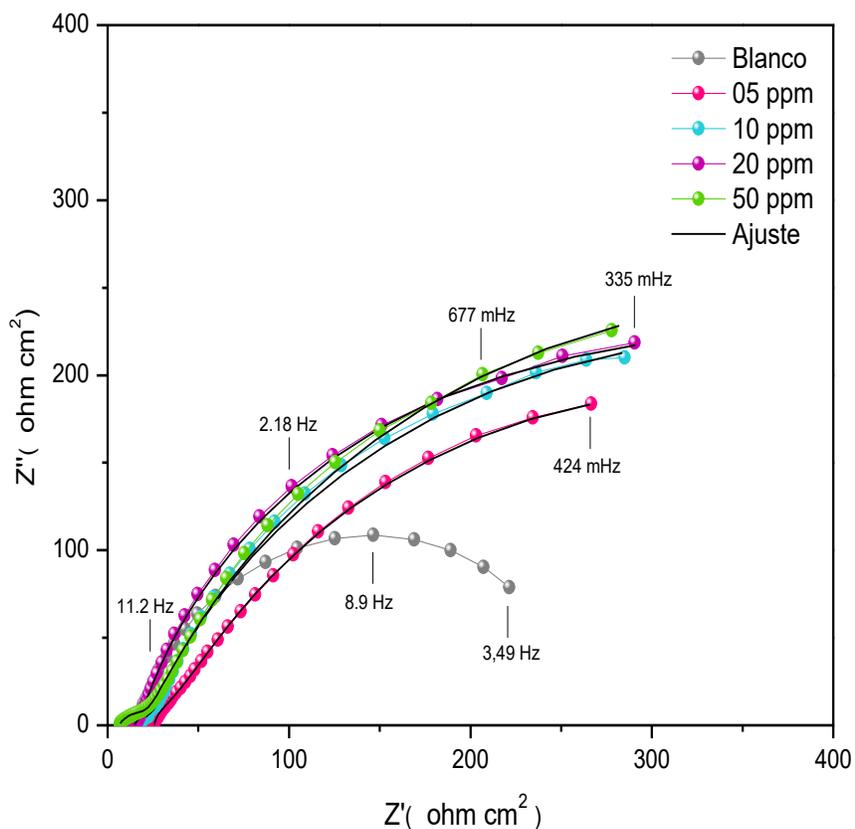
**Figura 3.2** Diagrama de Bode para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), en condición estática y diferentes concentraciones de strictosamida. a) Módulo de la impedancia y b) Ángulo de fase

En el diagrama de Bode del módulo de la impedancia (Figura 3.3 a) se observa que las pendientes se incrementan notoriamente, el aumento observado en las cuatro concentraciones de estrictosamida es muy similar (siendo ligeramente mayor a 50 ppm) lo que puede ser explicado por la cercanía en sus eficiencias de inhibición (94.8% a 05 ppm, 95.0% a 10 ppm, 96.3% a 20 ppm y 96.4% a 50 ppm). El incremento en las pendientes indica que la impedancia aumenta al formarse una película protectora en la superficie del metal, traducido a una mayor eficiencia de inhibición <sup>22</sup>.

En los ángulos de fase con inhibidor (Figura 3.3 b) se observan dos constantes de tiempo, una correspondiente a la resistencia a la transferencia de carga y la otra a la resistencia de las moléculas de estrictosamida adsorbidas <sup>37</sup>. De igual forma, se observa que los ángulos de fase se encuentran entre 45 y 60, lo que puede significar que sigue existiendo rugosidad en la interfaz metálica; ya que el ángulo de fase está relacionado a la rugosidad del material. En superficies metálicas con alta rugosidad se presentan escalones en la interfaz metálica, donde los grupos polares del inhibidor están menos ligados a la interfaz metálica que los que se encuentran en superficies lisas.

### 3.1.2 Efecto de inhibición de la estrictosamida a 100 rpm.

A una velocidad de rotación de 100 rpm, se observa que en el diagrama de Nyquist (Figura 3.3) el diámetro de los semicírculos aumenta en función de la concentración de estrictosamida, sin embargo, el diámetro es menor en comparación con los obtenidos en condiciones estáticas (resultado de la desorción de las moléculas orgánicas). Las condiciones de flujo pueden intervenir en la adsorción de las moléculas de estrictosamida en la interfaz metálica<sup>3, 24, 26</sup>. De igual manera, se observa que los semicírculos tienen la misma forma, independientemente de la concentración de estrictosamida. Formas similares en los semicírculos sugieren que el proceso de inhibición sigue el mismo mecanismo<sup>51</sup>, controlado por la resistencia a la transferencia de carga.



**Figura 3.3** Diagrama de Nyquist para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 100 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida

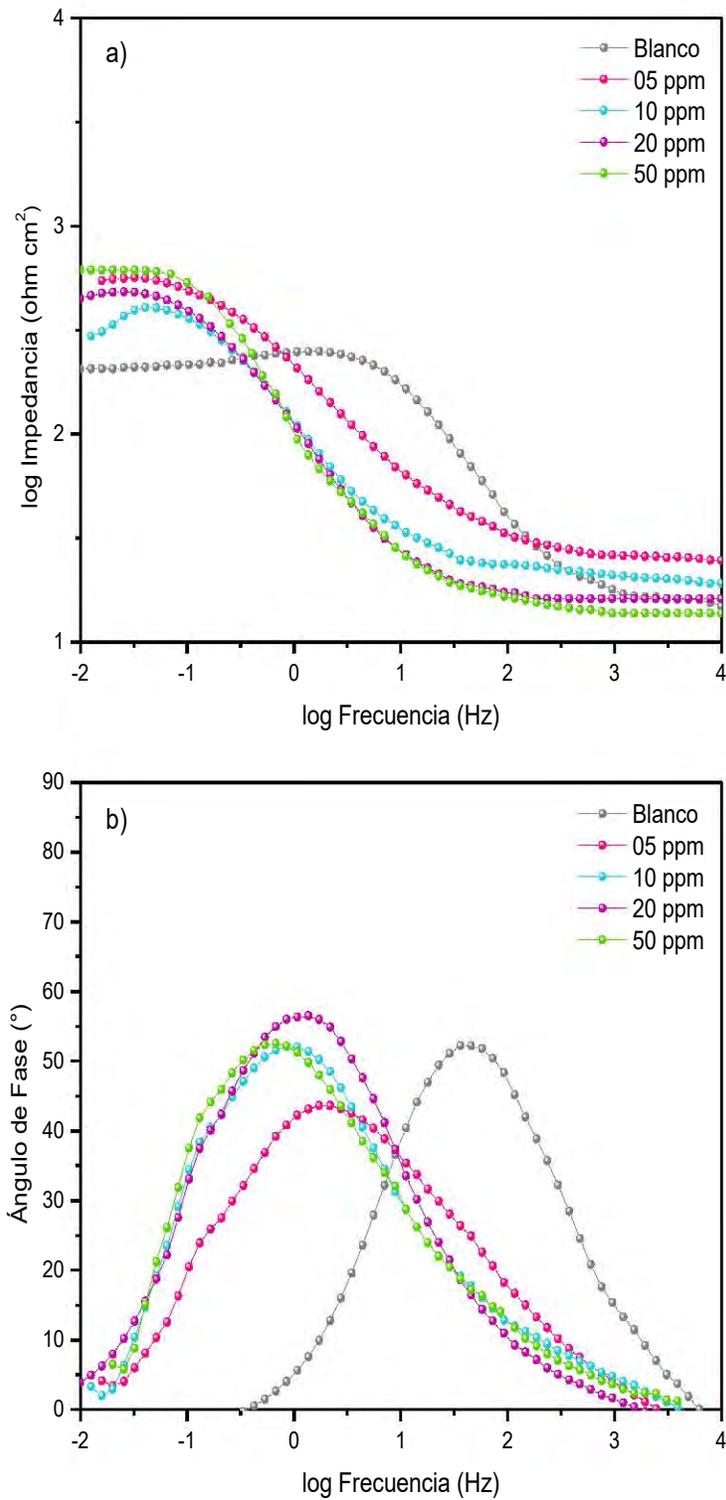
En la tabla 3.2 se observa un decremento en el valor de la capacitancia de la doble capa electroquímica, atribuido a una disminución en la constante dieléctrica y/o el aumento en el espesor de la película protectora <sup>3, 23, 55</sup>. Los valores en la resistencia a la polarización obtenidos muestran un incremento a concentración de estrictosamida más altas, por lo que a mayor concentración se tiene una mayor eficiencia de inhibición <sup>16</sup>.

Además, se observa un incremento en los valores de  $n$  a mayores concentraciones de estrictosamida, que se puede atribuir a la adsorción de moléculas de estrictosamida que bloquea los sitios activos en la interfaz metálica y a su vez reduce la rugosidad <sup>17, 54</sup>.

**Tabla 3.2** Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de EIS a 100 rpm

<b>C</b> <b>(ppm)</b>	<b>R<sub>s</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>n</b>	<b>C<sub>dl</sub></b> <b>(μF cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>R<sub>mol</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>tc</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>p</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>EI</b> <b>(%)</b>
<b>0</b>	16.0	0.7	840.5	-	192.7	192.7	-
<b>05</b>	16.8	0.7	748.5	19.8	553.2	573.0	<b>66.4</b>
<b>10</b>	15.1	0.8	358.8	19.3	568.6	587.9	<b>67.2</b>
<b>20</b>	25.8	0.9	325.1	22.7	611.7	634.4	<b>69.6</b>
<b>50</b>	6.0	0.9	90.8	27.0	681.8	708.8	<b>72.8</b>

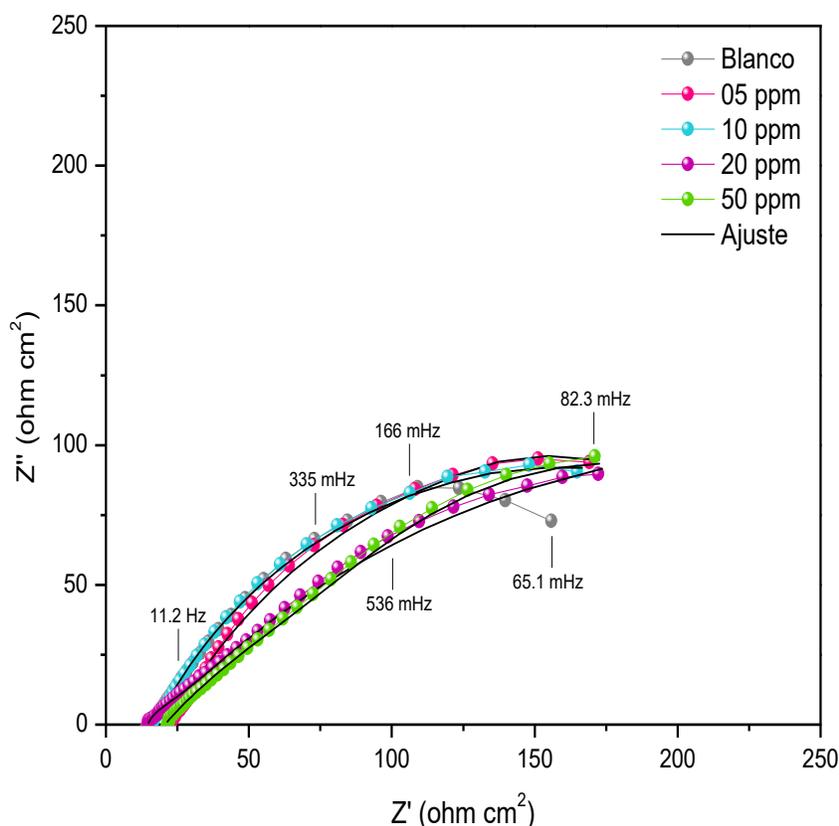
El diagrama de Bode del módulo de la impedancia (Figura 3.4 a) muestra un aumento progresivo en las pendientes en función de la concentración, lo que indica un incremento en la eficiencia de inhibición de la estrictosamida. Por otra parte, en los ángulos de fase con inhibidor (Figura 3.4 b) se presentan dos constantes de tiempo; correspondientes a la resistencia a la transferencia de carga y la resistencia de las moléculas de estrictosamida. Así mismo, se observa que los ángulos de fase con inhibidor están desplazados a frecuencias menores. El desplazamiento en los ángulos de fase a bajas frecuencias y la disminución en las pendientes del módulo de la impedancia, sugiere un desprendimiento o adelgazamiento en la película del inhibidor por efecto de las condiciones de flujo <sup>56, 57</sup>.



**Figura 3.4** Diagrama de Bode para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 100 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida. a) Módulo de la impedancia y b) Ángulo de fase

### 3.1.3 Efecto de inhibición de la estrictosamida a 500 rpm

A una velocidad de rotación de 500 rpm, en el diagrama de Nyquist (Figura 3.5) se observa que los semicírculos con inhibidor siguen la misma tendencia (aumento del diámetro cuando la concentración de estrictosamida aumenta). Sin embargo, el crecimiento es muy pobre, debido a que las condiciones de flujo ocasionan mayor desorción de las moléculas adsorbidas en la interfaz metálica <sup>24</sup>. De igual manera, se observa ligeramente que en el espectro de impedancias se presentan dos constantes de tiempo acopladas; una correspondiente a la resistencia a la transferencia de carga y la otra a la resistencia de las moléculas de estrictosamida adsorbidas <sup>51</sup>.



**Figura 3.5** Diagrama de Nyquist para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 500 rpm y diferentes concentraciones de estrictosamida

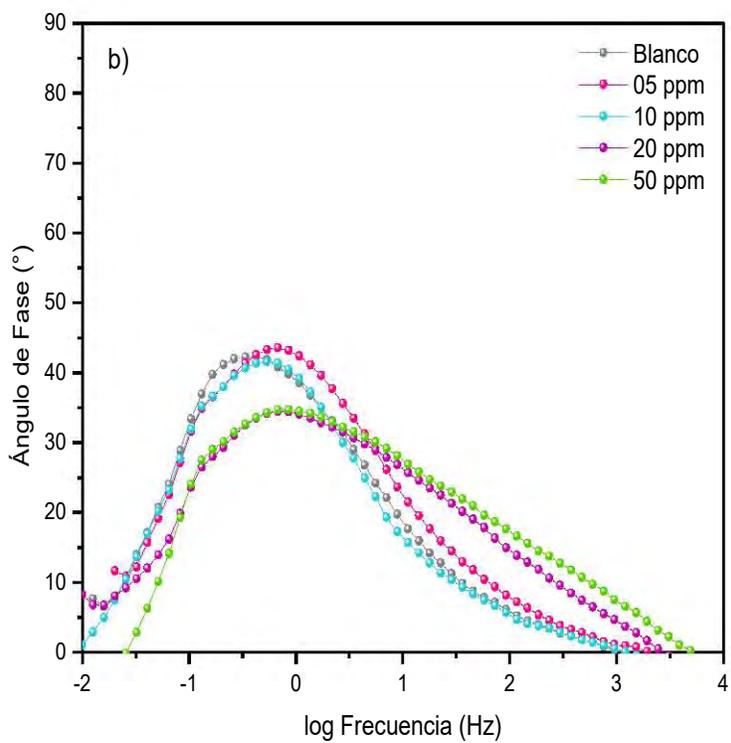
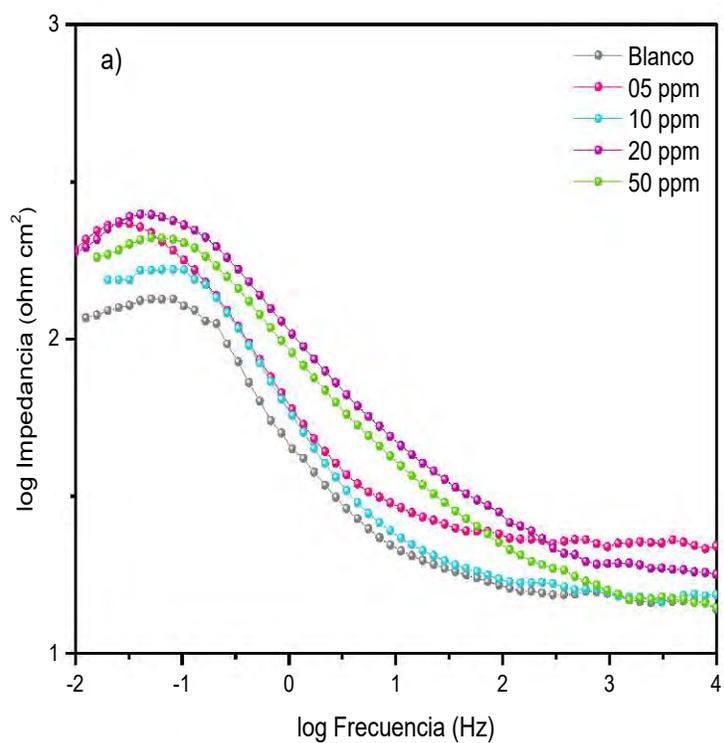
En la tabla 3.3 se observa nuevamente la tendencia en la disminución de la capacitancia de la doble capa electroquímica y un aumento en el valor de la resistencia a la transferencia de carga, relacionado con la formación de una película protectora en la interfaz metálica <sup>12</sup>. Los valores de  $R_p$  no muestran un aumento significativo, lo que se traduce directamente en eficiencias de inhibición bajas, alcanzando un porcentaje máximo de 37.2% a 50 ppm.

En la tabla 3.3 también se observa que los valores obtenidos de  $n$  son bajos, lo que corresponden a la falta de homogeneidad y rugosidad de la superficie del acero; debido al daño ocasionado por el medio corrosivo en zonas sin inhibidor <sup>53</sup>. A estas condiciones de flujo, es muy fácil que se desprenda parte de la película protectora y se creen irregularidades sobre la superficie <sup>3</sup>.

**Tabla 3.3** Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de EIS a 500 rpm

<b>C</b> <b>(ppm)</b>	<b>R<sub>s</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>n</b>	<b>C<sub>dl</sub></b> <b>(μF cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>R<sub>mol</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>tc</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R<sub>p</sub></b> <b>(Ω cm<sup>2</sup>)</b>	<b>EI</b> <b>(%)</b>
<b>0</b>	15.1	0.8	6509.0	-	220.0	220.0	-
<b>05</b>	22.3	0.6	1205.3	8.56	257.7	266.3	<b>17.4</b>
<b>10</b>	15.4	0.7	2442.4	30.32	269.9	300.2	<b>26.7</b>
<b>20</b>	14.0	0.7	747.8	75.40	255.1	330.5	<b>33.4</b>
<b>50</b>	21.4	0.7	114.2	24.15	326.1	350.3	<b>37.2</b>

En el diagrama de Bode del módulo de la impedancia (Figura 3.6 a) se observa que el crecimiento de las pendientes es casi imperceptible, debido a que el régimen de flujo no permite la adsorción de las moléculas de inhibidor o las desprende de la interfaz metálica. Los ángulos de fase con inhibidor (Figura 3.6 b) alcanzan valores entre 35 y 45° desplazados a bajas frecuencias, resultado de la desorción de las moléculas de estrictosamida y aumento en la rugosidad de la interfaz metálica <sup>56, 57</sup>.



**Figura 3.6** Diagrama de Bode para un acero AISI 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 500 rpm y diferentes concentraciones de strictosamida. a) Módulo de la impedancia y b) Ángulo de fase

### 3.1.4 Eficiencia de inhibición de la estrictosamida bajo las condiciones de estudio

Las eficiencias obtenidas muestran una relación directa con la concentración del inhibidor, a mayor concentración de estrictosamida, mayor eficiencia de inhibición (Tabla 3.4). También se observa que en condiciones estáticas la estrictosamida presenta eficiencias superiores al 90% desde 05 ppm, en comparación, cuando existen regímenes de flujo laminar y turbulento (100 y 500 rpm, respectivamente) las eficiencias decrecen drásticamente, debido a que las moléculas de estrictosamida se desorban rápidamente.

**Tabla 3.4** Eficiencia de inhibición de la estrictosamida en estado estático, 100 y 500 rpm

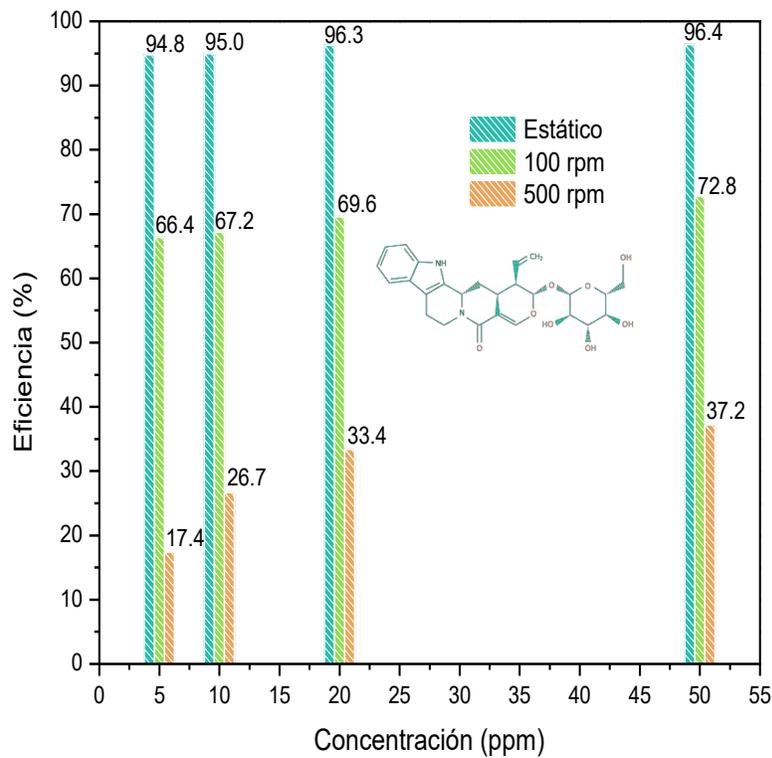
Concentración (ppm)	Estático	100 rpm	500 rpm
<b>05</b>	<b>94.8</b>	<b>63.4</b>	<b>17.4</b>
10	95.0	67.2	26.7
20	96.3	69.6	33.4
<b>50</b>	<b>96.4</b>	<b>72.8</b>	<b>37.2</b>

En la Figura 3.7 se muestra gráficamente el efecto de la concentración y el régimen de flujo sobre la eficiencia de inhibición, en condiciones estáticas las eficiencias alcanzan valores superiores al 90%, mientras que en condiciones de régimen turbulento (500 rpm) decrecen hasta valores inferiores al 50%. En general, las eficiencias en condiciones estáticas son mayores a las obtenidas a 100 y 500 rpm; esto puede ser atribuido a las siguientes razones<sup>3, 24, 26</sup>:

- I. El régimen de flujo puede incrementar el transporte de masa de las moléculas de estrictosamida, ocasionando mayor presencia de moléculas en la superficie del metal y una mayor eficiencia de inhibición.

- II. El régimen de flujo también pueden incrementar el transporte de masa de iones  $[Fe^{2+}]$ , producidos durante la disolución metálica.
- III. El régimen de flujo pueden separar las moléculas de estrictosamida adsorbidas en la interfaz metálica, causando mayor desorción de las moléculas y una menor eficiencia de inhibición.

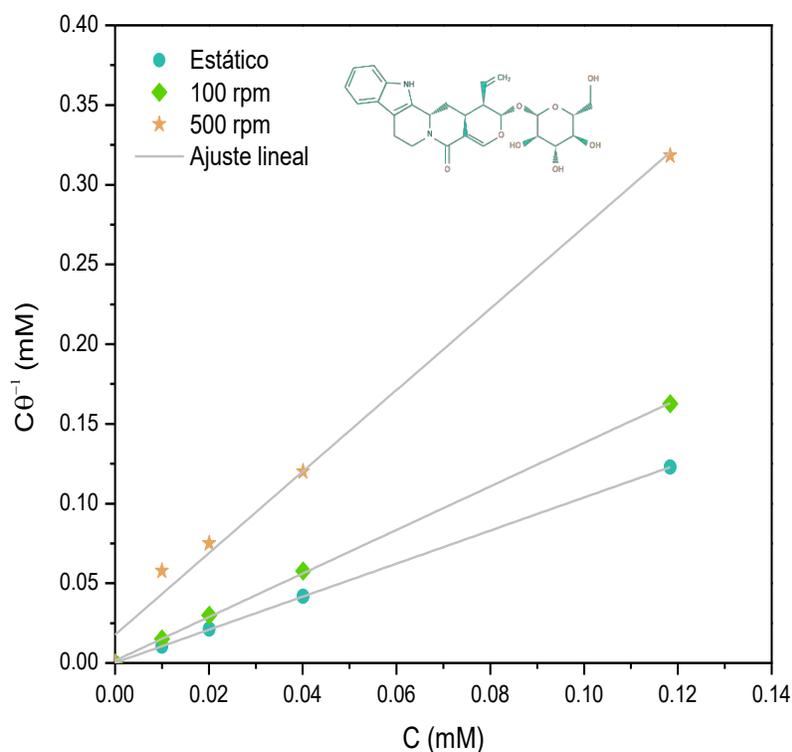
Con base en la norma NRF-005-PEMEX-2009<sup>7</sup>, la eficiencia de los inhibidores de corrosión para protección interna de ductos debe ser superior al 90%, las eficiencias evaluadas para la estrictosamida cumple con la norma únicamente en estado estático.



**Figura 3.7** Eficiencia de inhibición de la estrictosamida a las diferentes velocidades de rotación y concentraciones de estrictosamida

### 3.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

La estrictosamida presenta en su estructura enlaces  $\pi$  y heteroátomos de oxígeno y nitrógeno con pares de electrones libres, estas características permiten que la molécula se pueda adsorber sobre la superficie del acero AISI 1018 mediante: (I) la formación de compuestos complejos sobre la superficie metálica; (II) por interacciones de los enlaces  $\pi$  y los iones  $[\text{Fe}^{2+}]$ ; (III) por la adsorción de las moléculas de estrictosamida en forma de especies cargadas negativamente, que pueden interactuar electrostáticamente con los iones  $[\text{Fe}^{2+}]$ ; y/o (IV) la combinación de todos los efectos mencionados <sup>22, 23, 58 – 60</sup>.



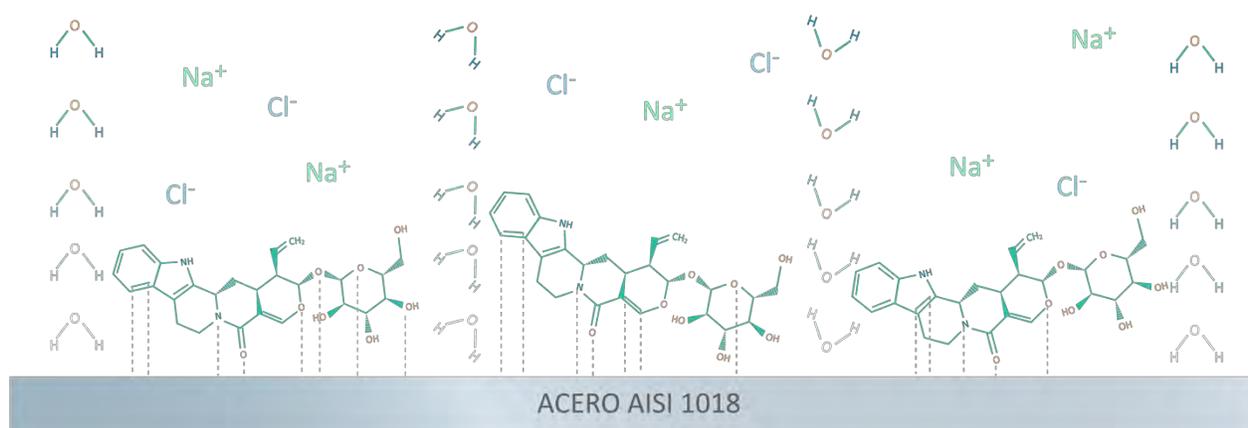
**Figura 3.8** Isotherma de adsorción de Langmuir para la estrictosamida en estado estático, 100 y 500 rpm

A partir de la isoterma de adsorción de Langmuir (Figura 3.8), se calcularon los  $\Delta G^{\circ}_{ads}$  para determinar el mecanismo de adsorción para las tres condiciones de estudio. Los resultados muestran que en estado estático y a 100 rpm se presenta una adsorción combinada (fisorción y quimisorción), mientras que a 500 rpm solo se presenta fisorción (Tabla 3.5).

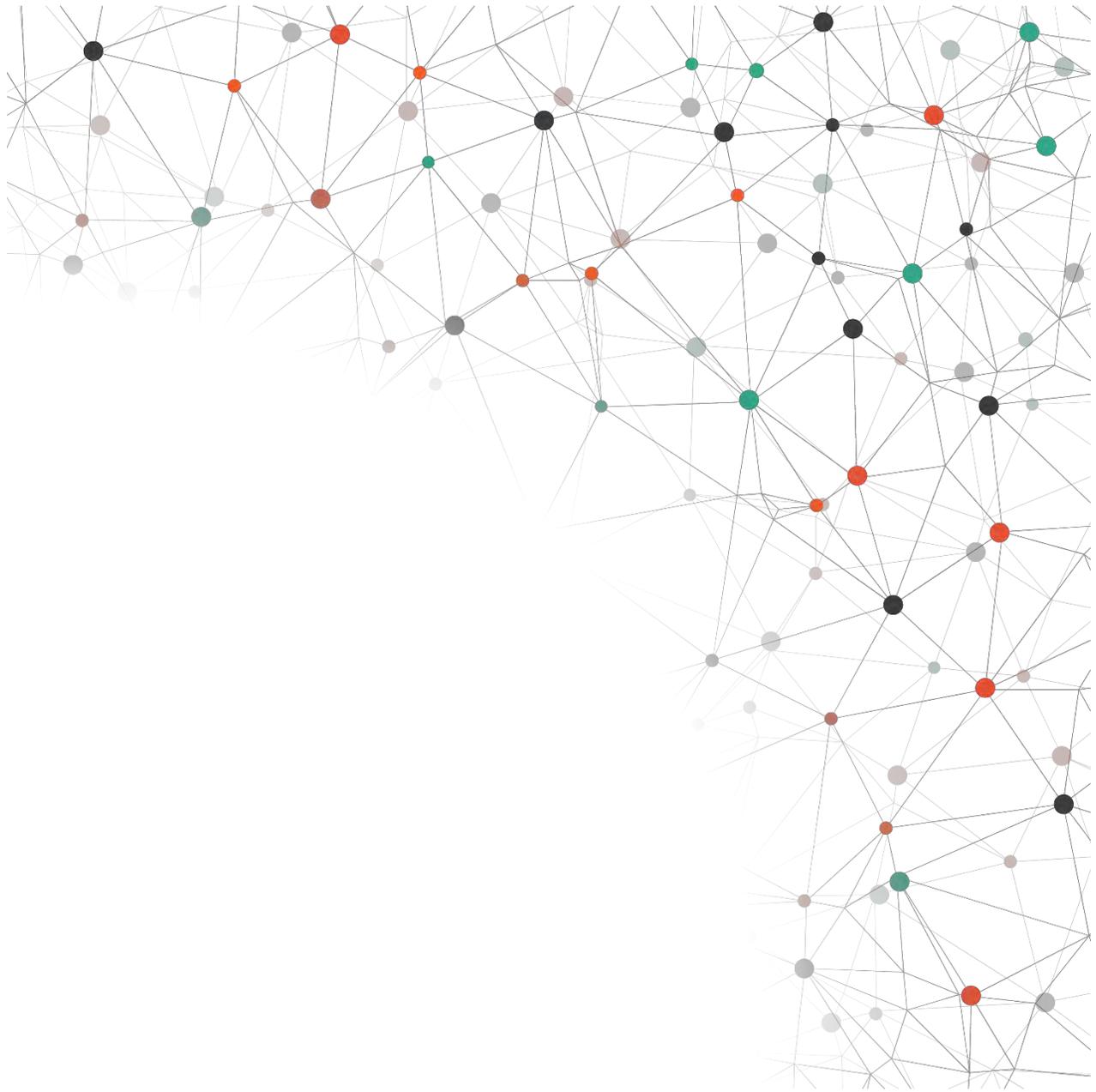
**Tabla 3.5** Mecanismo de adsorción de la estrictosamida de acuerdo con los valores obtenidos de  $\Delta G^{\circ}_{ads}$

Velocidad de rotación (rpm)	$\Delta G^{\circ}_{ads}$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	Mecanismo de adsorción	R <sup>2</sup>
0	-28.46	Fisorción/Quimisorción	0.9999
100	-22.63	Fisorción/Quimisorción	0.9998
500	-17.00	Fisorción	0.9952

En la Figura 3.9 se muestra un posible mecanismo de adsorción de la estrictosamida con el acero AISI 1018, donde principalmente los heteroátomos de oxígeno y nitrógeno, y el anillo de benceno se pueden enlazar con las cargas positivas del acero (iones [Fe<sup>2+</sup>]).



**Figura 3.9** Posible mecanismo de adsorción de las moléculas de estrictosamida sobre la interfaz del acero AISI 1018, en una solución salina de NaCl al 3% (m/m)



## 4 CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

1. Bajo las tres condiciones de estudio, la concentración de estrictosamida presenta una relación directa con la eficiencia de inhibición, a mayor concentración de inhibidor se incrementa la eficiencia.
2. En condiciones estáticas se obtienen eficiencias superiores al 90%, lo que sugiere que la estrictosamida puede ser utilizada en tanques de almacenamiento o en condiciones donde no exista regímenes de fluido.
3. En condiciones hidrodinámicas, la eficiencia de inhibición disminuye drásticamente, debido a que la velocidad de rotación incrementa la desorción de las moléculas de estrictosamida. Cuando la velocidad de rotación es de 500 rpm, las eficiencias alcanzadas son inferiores al 50%.
4. El análisis termodinámico indica que en estado estático las moléculas de estrictosamida se adsorben en la interfaz metálica por un proceso combinado de fisisorción y quimisorción. En presencia de regímenes de flujo, estos influyen en el mecanismo de adsorción, a una velocidad de rotación de 100 rpm (régimen laminar) aún se tiene un proceso de adsorción combinado, mientras que a una velocidad de rotación de 500 rpm (régimen turbulento) el proceso de adsorción es únicamente por fisisorción.

## FUENTES DE CONSULTA

1. ASTM G15-08, *Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing* (Withdrawn 2010), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, [www.astm.org](http://www.astm.org).
2. MacKay, N., Stipanicev, Ø., Jackson, J., Jenkins, A., Melot, D., Scheie, J. y Vittonato, J. (2016). La corrosión: La lucha más extensa. *Oilfield Review*, 28(2), 36 – 51.
3. Geethanjali, R., Subhashini, S. (2015). Investigation of Corrosion Inhibition Efficiency of Some Synthesized Water Soluble Terpolymers on N-80 Steel in HCl, NaCl and Simulated Oil Well Water. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 33(2), 85 – 104.
4. NACE INTERNATIONAL IMPACT. (2016). International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. Recuperado de <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>
5. Simons, M.R. (2008). Report of offshore technology conference (OTC) presentation, NACE International oil and gas production.
6. Peck, W.D., Bachu, S., KNUDSEN, D.J., Hauck, T., Crotty, C.M, Gerecki, C.D., Sorensen, J.A., Peterson, J. y Melnik, A. (2013). CO<sub>2</sub> storage resource potential of the Cambro-Ordovician Saline System in the western interior of North America. *Energy Procedia*, 37, 5230 – 5239.
7. NRF-005-PEMEX-2009 *PROTECCIÓN INTERIOR DE DUCTOS CON INHIBIDORES*, PEMEX, 2009.
8. Vazbros. (s.f.). ACERO AISI-SAE 1018 COLD ROLLED. Vazbros Metales y Plásticos. Recuperado de: <http://www.vazbros.com/materiales/acero-aisi-sae-1018-cold-rolled/>. [2018/03/12]
9. API 5L: *Specification for Line Pipe 45<sup>th</sup> edition*, American Petroleum Institute, Northwest Washington, D.C., 2012.

10. Finšgar, M. y Jackson, J. (2014). Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review. *Corrosion Science*, 86, 17-41.
11. ISO 8044:2015 *Corrosion of metals and alloys – Basic terms and definitions*, ISO, 2015, [www.iso.org/obp/ui/](http://www.iso.org/obp/ui/).
12. Karungemye, P.N. y Murthy, H.C.A. (2017). Methanolic Extracts of *Adansonia digitata* (Baobab) Fruit Pulp and Seeds as Potential Green Inhibitors for Mild Steel Corrosion in 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solution. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, 5(4), 295-305.
13. De Souza, F.S., Spinelli, A. (2009). Caffeic acid as a green corrosion inhibitor for mild steel. *Corrosion Science*, 51(3), 642 – 649.
14. Obot, I.B., Gasem, Z.M. y Umoren, S.A. (2014). Molecular Level Understanding of the Mechanism of Aloes Leaves Extract Inhibition of Low Carbon Steel Corrosion: A DFT Approach. *International Journal of Electrochemical Science*, 9, 510 – 522.
15. Eddy, N.O., Ekwumemgbo, P.A. y Mamza, P.A.P. (2009). Ethanol extract of *Terminalia catappa* as a green inhibitor for the corrosion of mild steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 2(4), 223 – 231.
16. Aldana-González, J., Espinoza-Vázquez, A., Romero-Romo, M., Uruchurtu-Chavarin, J. y Palomar-Pardavé, M. Electrochemical evaluation of cephalothin as corrosión inhibitor for API 5L X52 steel immersed in an acid medium. *Arabian Journal of Chemistry*, in press.
17. Itune, E.B., James, A.O. y Akaranta, O. (2017). Elephant grass biomass extract as corrosion inhibitor for mild Steel in acidic medium. *Journal of Materials Environmental Science*, 8(4), 1498 – 1507.
18. Mashuga, M.E., Olasunkanmi, L.O., Adekunle, A.S., Yesudass, S., Kabanda, M.M. y Ebenso, E.E. (2015). Adsorption, thermodynamics and quantum chemical studies of 1-

- hexyl-3-methylimidazolium based ionic liquids as corrosion inhibitors for mild steel in HCl. *Materials*, *8*, 3607 – 3632.
19. Kumari, P.P., Shetty, P., y Rao, S.A. (2017). Electrochemical measurements for the corrosion inhibition of mild steel in 1 M hydrochloric acid by using an aromatic hydrazide derivative. *Arabian Journal of Chemistry*, *10*(5), 653-663.
20. Singh, A., Singh, V.K., Qurashi, M.A. (2010). Effect of fruit extracts of some environmentally benign green corrosion inhibitors on corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution. *Journal of Materials and Environmental Science*, *1*(3), 162 – 174.
21. Vera, R., Figueredo, F., Díaz-Gómez, A. y Molinari, A. (2018). Evaluation of Fuji Apple Peel Extract as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in a Saline Medium. *International Journal of Electrochemical Science*, *13*, 1138 – 1159.
22. Singh, A., Lin, Y., Quraishi, M., Olasunkanmi, L., Fayemi, O., Sasikumar, Y., Ramaganthan, B., Bahadur, I., Obot, I., Adekunle, A., Kabanda, M. y Ebenso, E. (2015). Porphyrins as Corrosion Inhibitors for N80 Steel in 3.5% NaCl Solution: Electrochemical, Quantum Chemical, QSAR and Monte Carlo Simulations Studies. *Molecules*, *20*, 15122–15146.
23. De Mendonça Santos, A., Felix de Almeida, T., Cotting, F., Vieira Aoki, Idalina., Gomes de Melo, H. y Vera & Capelossi, R. (2017). Evaluation of Castor Bark Powder as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Acidic Media. *Materials Research*, *20*(2), 492 – 505.
24. Rodríguez-Clemente, E., González-Rodríguez, J.G., Valladares-Cisneros, M.G., Chacón-Nava, J.G. (2015). Evaluation of *Allium sativum* as corrosion inhibitor for carbon steel in sulphuric acid under hydrodynamic conditions. *Green Chemistry Letters and Reviews*, *8*(2), 49 – 58.

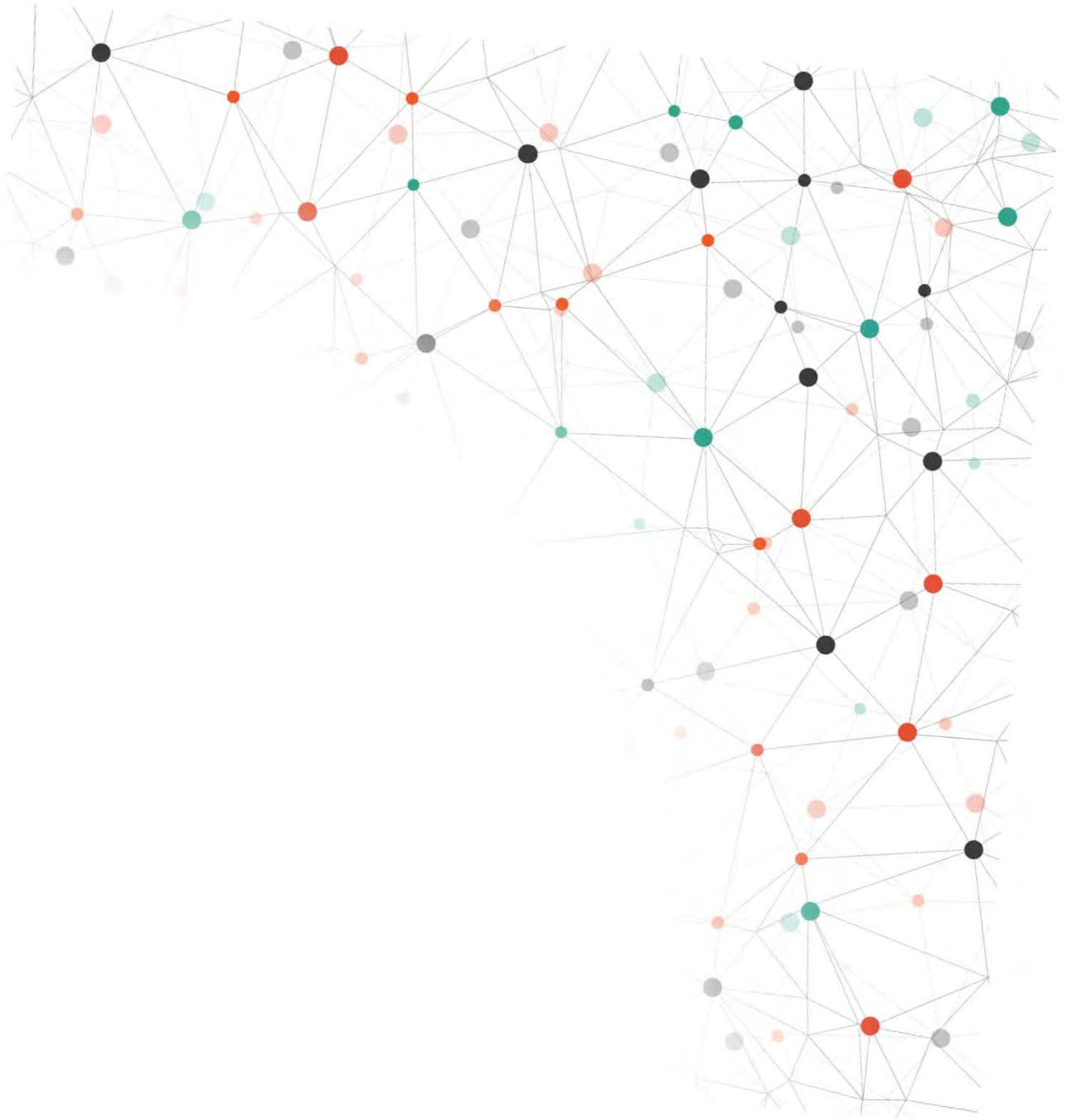
25. Tejada, L.P., Meza, P.J., Altamiranda, E.J. y Berrocal, M.J. (2014). Uso de extractos de plantas como inhibidor de corrosión. *Sana*, 78(2), 155 – 165.
26. Chauhan, L. y Gunasekaran, G. (2007). Corrosion inhibition of mild steel by plant extract in dilute HCl medium. *Corrosion Science*, 49(3), 1143 – 1161.
27. Quraishi, M.A., Yadav, D.K. y Ahamad, I. (2009). Green approach to corrosion inhibition by *Black pepper* extract in hydrochloric acid solution. *The Open Corrosion Journal*, 2, 56 – 60.
28. Hmamou, D.B., Salghi, R., Zarrouk, A., Messali, M., Zarrok, H., Errami, M., Hammouti, B., Bazzi, Lh. y Chakir A. (2012). Inhibition of steel corrosion in hydrochloric acid solutions by *Chamomile* extract. *Der Pharma Chemica*, 4(4), 1496 – 1505.
29. Belkhaouda, M., Bammou, L., Salghi, R., Zarrouk, A., Ebenso, E.E., Zarrok, H. y Hammouti, B. (2013). Inedible avocado extract: an efficient inhibitor of carbon steel corrosion in hydrochloric acid. *International Journal of Electrochemical Science*, 8(7), 10987 – 10999.
30. Ji, G., Shukla, S.K., Dwivedi, P., Sundaram, S., Ebenso, E.E. y Prakash, R. (2012). Green *Capsicum annuum* fruit extract for inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric acid solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(12), 12146 – 12158.
31. Premkumar, P., Kannan, K. y Natesan, M. (2008). Thyme extract of *Thymus vulgar* L. as volatile corrosion inhibitor for mild steel in NaCl environment. *Asian Journal of Chemistry*, 20(1), 445 – 451.
32. Rekkab, S., Zarrok, H., Salghi, R., Zarrouk, A., Bazzi, Lh., Hammouti, B., Kabouche, Z., Touzani, R. y Zougagh, M. (2012). Green corrosion inhibition from essential oil of *Eucalyptus globulus* (*Myrtaceae*) for C38 steel in sulfuric acid solution. *Journal Materials and Environmental Science*, 3(4), 613 – 627.

33. Li, N., Cao, L., Cheng, Y., Meng, Z.Q., Tang, Z.H., Liu, W.J., Wang, Z.Z., Ding, G. y Xiao, W. (2014). In vivo anti-inflammatory and analgesic activities of strictosamide from *Nauclea officinalis*. *Pharmaceutical Biology*, 52(11), 1445 – 1450.
34. Udoh, F. V. (1995), Effects of leaf and root extracts of *Nauclea latifolia* on purinergic neurotransmission in the rat bladder. *Phytother. Res.*, 9, 239 – 243.
35. Jasmeet, K.A., Sanjay, K. y Aparajita M. (2017). Ethnomedicinal, Phytochemical and Ethnopharmacological Aspects of Four Medicinal Plants of *Malvaceae* Used in Indian Traditional Medicines: A Review. *Medicines (Basel)*, 4(4): 75.
36. Yáñez Zamora, C. (2008). *Síntesis y Caracterización de Películas Delgadas del Sistema ZrO<sub>2</sub>:8%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Mediante la Técnica Sol-Gel* (Maestría). Instituto Politécnico Nacional, México.
37. Espinoza-Vázquez A., García-Galán, S. y Rodríguez-Gómez, F.J. (2015). Nicotine as Corrosion Inhibitor for 1018 Steel in 1M HCl under Turbulent Conditions. *Analytical & Bioanalytical Techniques*, 6(6).
38. Díaz-Cárdenas, M.Y., Vallardes-Cisneros, M.G., Lagunas-Rivera, S. y Salinas-Bravo, V.M. *Peumus boldus* extract as corrosion inhibitor for carbon steel in 0.5 M sulfuric acid. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 257 – 268.
39. Chevalier, M., Robert, F., Amusant, N., Traisnel M., Roos, C. y Lebrin, M. (2014). Enhanced corrosion resistance of mild steel in 1 M hydrochloric acid solution by alkaloids extract from *Aniba rosaeodora* plant: Electrochemical, phytochemical and XPS studies. *Electrochimica Acta*, 131, 96 – 105.
40. Kumar, S., Vashisht, H., Olasunkanmi, L.O., Bahadur, I., Verma, H., Singh, G., Obot, I.B. y Ebenso, E.E. (2016). Experimental and theoretical studies on inhibition of mild steel corrosion by some synthesized polyurethane tri-block co-polymers. *Scientific Reports*, 6.

41. Sandoval, F.D., López, J.L. y Gracia, Jesús. (2015). Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. *Educación química*, 26(4), 307 – 313.
42. Nwankwo, H.U., Olasunkanmi, L.O., & Ebenso, E.E. (2017). Experimental, quantum chemical and molecular dynamic simulations studies on the corrosion inhibition of mild steel by some carbazole derivatives. *Scientific Reports*, 7:2036.
43. Singh, A., Talha, M., Xu, X, Sun, Z. y Lin, Y. (2017). Heterocyclic Corrosion Inhibitors for J55 Steel in a Sweet Corrosive Medium. *ACS Omega*, 2(11), 8177 – 8186.
44. Yurt, A., Bereket, G., Kivrak, A., Balaban, A., y Erk, B. (2005). Effect of schiff bases containing pyridyl group as corrosion inhibitors for low carbon steel in 0.1 M HCl. *Journal of Applied Electrochemistry*, 35(10), 1025 – 1032.
45. Saliyan, V.R. y Adhikari, A.V. (2008). Quinolin-5-ylmethylene-3-[[8-(trifluoromethyl)quinolin-4-yl]thio]propanohydrazide as an effective inhibitor of mild steel corrosion in HCl solution. *Corrosion Science*, 50(1), 55 – 61.
46. Fekry, A.M. y Mohamed, R.R. (2010). Acetyl thiourea chitosan as an eco-friendly inhibitor for mild steel in sulphuric acid medium. *Electrochimica Acta*, 55(6), 1933–1939.
47. Wang, C., Lai, C., Xie, B., Guo, X., Fu, Li, B. y Zhu, S. (2018). Corrosion inhibition of mild steel in HCl medium by S-benzyl-O,O'-bis(2-naphthyl)dithiophosphate with ultra-long lifespan. *Results in Physics*, 10, 558 – 567.
48. Mobin, M. y Risvi, M. (2016). Inhibitory effect of xanthan gum and synergistic surfactant additives for mild steel corrosion in 1M HCl. *Carbohydrate Polymers*, 136, 384 – 393.
49. PINE research. (2016). Study of Mass Transport Limited Corrosion with Rotating Cylinder Electrodes [PDF]. PINE research. Durham, USA. Recuperado de: <https://www.pineresearch.com/shop/wp-content/uploads/sites/2/2016/07/DRA10011-Study-of-Mass-Transport-Limited-Corrosion-with-Rotating-Cylinder-Electrodes-REV003.pdf>. [2018/03/16]

50. Ji, G., Anjum, S., Sundaram, S., Prakash, R. (2015). *Musa paradisiaca* peel extract as green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. *Corrosion Science*, 90, 107-117.
51. Nazari, M.H., Shihab, M.S., Cao, L., Havens, E.A. y Shi, X. (2017). A peony-leaves-derived liquid corrosion inhibitor: protecting carbon steel from NaCl. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 10(4), 359 – 379.
52. Bhawsar, J., Jain P.K., Jain, P. (2015). Experimental and computational studies of *Nicotiana tabacum* leaves extract as green corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium. *Alexandria Engineering Journal*, 54(8), 769 – 775.
53. Stago, S.A.X y Vijayalakshmi, U. (2018). Studies on corrosion inhibitory effect and adsorption behavior of waste material son mild Steel in acidic medium. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 6(1), 20 – 29.
54. Bammou, L., Belkhaouada, M, Salgui, R., Benali, O., Zarrouk, A., Zarrok, H. y Hammouti. (2014). Corrosion inhibition of steel in sulfuric acidic solution by the *Chenopodium Ambrosioides* Extracts. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 16, 83 – 90.
55. López-Sesenes, R., Domínguez-Patiño, G.F., González-Rodríguez, J.G. y Uruchurtu-Chavarín. J. (2013). Effect of Flowing Conditions on the Corrosion Inhibition of Carbon Steel by Extrac of *Buddleia Perfoliata*. *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 477 – 489.
56. Rivera-Grau, L.M., Casales, M., Regla, I., Ortega-Toledo, D.M., Ascencio-Gutiérrez, J.A., Pocayo-Calderón, J. y Martínez-Gómez, L. (2013). Effect of Organic Corrosion Inhibitors on the Corrosion Performance of 1018 Carbon Steel in 3% NaCl Solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 8(2), 2491 – 2503.
57. Pocayo-Calderón, J., Rivera-Muñoz, M.E., Peza-Ledesma, C., Casales-Díaz, M., Martínez de la Escalera, L.M., Canto, J. y Martínez-Gómez, L. (2017). Sustainable

- Development of Palm Oil: Synthesis and Electrochemical Performance of Corrosion Inhibitors. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 8(2), 133 – 145.
58. Fouda, A.S., Emam, A., Refat, R. y Negeeb, M. (2017). Cascabela Thevetia Plant Extract as Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Polluted Sodium Chloride Solution. *Journal of Analytical & Pharmaceutical Research*, 6(1).
59. Amin, M. A., Abd El-Rehim, S. S., El-Sherbini, E. E. F. y Bayoumi, R. S. (2007). The inhibition of low carbon steel corrosion in hydrochloric acid solutions by succinic acid. Part I. Weight loss, polarization, EIS, PZC, EDX and SEM studies. *Electrochimica Acta*, 52(11), 3588 – 3600.
60. Shukla, S.K., Quraishi, M.A. y Ebenso, E.E. (2011). Adsorption and Corrosion Inhibition Properties of Cefadroxil on Mild Steel in Hydrochloric Acid. *International Journal of Electrochemical Science*, 6, 2912 – 2931.



# ANEXOS

## ANEXO A1

**Tabla A1.0.1** Composición química para los productos PSL 1 cubiertos por la norma API 5 L <sup>9</sup>

<b>Grado y clase</b>	<b>%C Máx.</b>	<b>%Mn Máx.</b>	<b>%P Mín. - Máx.</b>	<b>%S Máx.</b>	<b>%V Máx.</b>	<b>%Nb Máx.</b>	<b>%Ti Máx</b>
<b>Sin costura</b>							
L175 o A25	0.21	0.60	– 0.030	0.030	–	–	–
L175P o A25P	0.21	0.60	0.045 0.080	0.030	–	–	–
L210 o A	0.22	0.90	– 0.030	0.030	–	–	–
L245 o B	0.28	1.20	– 0.030	0.030	a, b	a, b	b
L290 o X42	0.28	1.30	– 0.030	0.030	b	b	b
L320 o X46	0.28	1.40	– 0.030	0.030	b	b	b
L360 o X52	0.28	1.40	– 0.030	0.030	b	b	b
L390 o X56	0.28	1.40	– 0.030	0.030	b	b	b
L415 o X60	0.28	1.40	– 0.030	0.030	c	c	c
L450 o X65	0.28	1.40	– 0.030	0.030	c	c	c
L485 o X70	0.28	1.40	– 0.030	0.030	c	c	c
<b>Soldado</b>							
L175 o A25	0.21	0.60	– 0.030	0.030	–	–	–
L175P o A25P	0.21	0.60	0.045 0.080	0.030	–	–	–
L210 o A	0.22	0.90	– 0.030	0.030	–	–	–
L245 o B	0.26	1.20	– 0.030	0.030	a, b	a, b	b
L290 o X42	0.26	1.30	– 0.030	0.030	b	b	b
L320 o X46	0.26	1.40	– 0.030	0.030	b	b	b
L360 o X52	0.26	1.40	– 0.030	0.030	b	b	b
L390 o X56	0.26	1.45	– 0.030	0.030	b	b	b
L415 o X60	0.26	1.65	– 0.030	0.030	c	c	c
L450 o X65	0.26	1.45	– 0.030	0.030	c	c	c
L485 o X70	0.26	1.65	– 0.030	0.030	c	c	c

**Tabla A1.0.2** Composición química para los productos PSL 2 cubiertos por la norma API 5L <sup>9</sup>

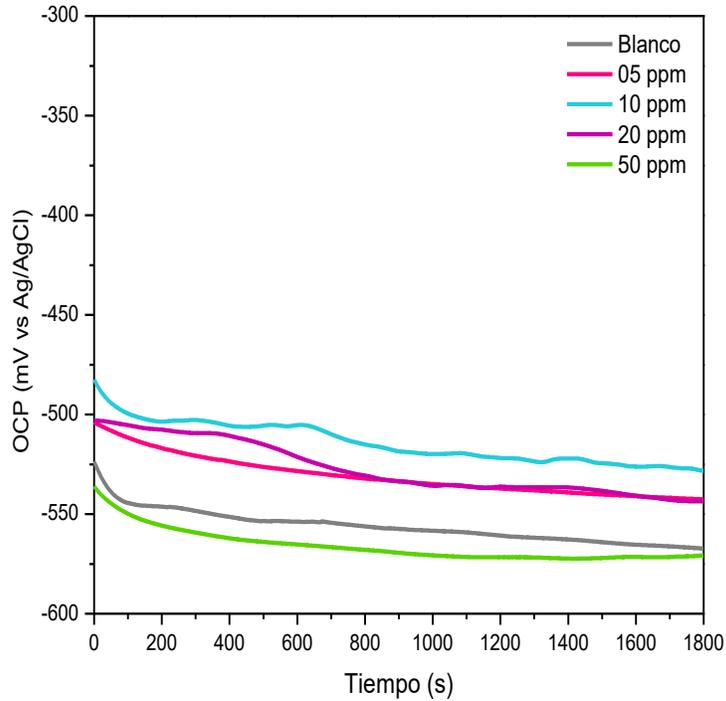
<b>Grado y clase</b>	<b>%C Máx.</b>	<b>%Si Máx.</b>	<b>%Mn Máx.</b>	<b>%P Máx.</b>	<b>%S Máx.</b>	<b>%V Máx.</b>	<b>%Nb Máx.</b>	<b>%Ti Máx.</b>
<b>Soldado y sin costura</b>								
L245R o BR	0.24	0.40	1.20	0.025	0.015	a	a	0.04
L290R o X42R	0.24	0.40	1.20	0.025	0.015	0.06	0.05	0.04
L245N o BN	0.24	0.40	1.20	0.025	0.015	a	a	0.04
L290N o X42N	0.24	0.40	1.20	0.025	0.015	0.06	0.05	0.04
L320N o X46N	0.24	0.40	1.40	0.025	0.015	0.07	0.05	0.04
L360N o X52N	0.24	0.45	1.40	0.025	0.015	0.10	0.05	0.04
L390N o X56N	0.24	0.45	1.40	0.025	0.015	0.10	0.05	0.04
L415N o X60N	0.24	0.45	1.40	0.025	0.015	0.10	0.05	0.04
L245Q o BQ	0.18	0.45	1.40	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04
L290Q o X42Q	0.18	0.45	1.40	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04
L320Q o X46Q	0.18	0.45	1.40	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04
L360Q o X52Q	0.18	0.45	1.50	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04
L390Q o X56Q	0.18	0.45	1.50	0.025	0.015	0.07	0.05	0.04
L415Q o X60Q	0.18	0.45	1.70	0.025	0.015	c	c	c
L450Q o X65Q	0.18	0.45	1.70	0.025	0.015	c	c	c
L485Q o X70Q	0.18	0.45	1.80	0.025	0.015	c	c	c
L555Q o X80Q	0.18	0.45	1.90	0.025	0.015	c	c	c
L625Q o X90Q	0.16	0.45	1.90	0.020	0.010	c	c	c
L690Q o X100Q	0.16	0.45	1.90	0.020	0.010	c	c	c
<b>Soldado</b>								
L245M o BM	0.22	0.45	1.20	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04
L290M o X42M	0.22	0.45	1.30	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04
L320M o X46M	0.22	0.45	1.30	0.025	0.015	0.05	0.05	0.04
L360M o X52M	0.22	0.45	1.40	0.025	0.015	b	b	b

L390M o X56M	0.22	0.45	1.40	0.025	0.015	b	b	b
L415M o X60M	0.22	0.45	1.60	0.025	0.015	c	c	c
L450M o X65M	0.12	0.45	1.60	0.025	0.015	c	c	c
L485M o X70M	0.12	0.45	1.70	0.025	0.015	c	c	c
L555M o X80M	0.12	0.45	1.85	0.025	0.015	c	c	c
L625M o X90M	0.10	0.55	2.10	0.020	0.010	c	c	c
L690M o X100M	0.10	0.55	2.10	0.020	0.010	c	c	c
L830M o X120M	0.10	0.55	2.10	0.020	0.010	c	c	c

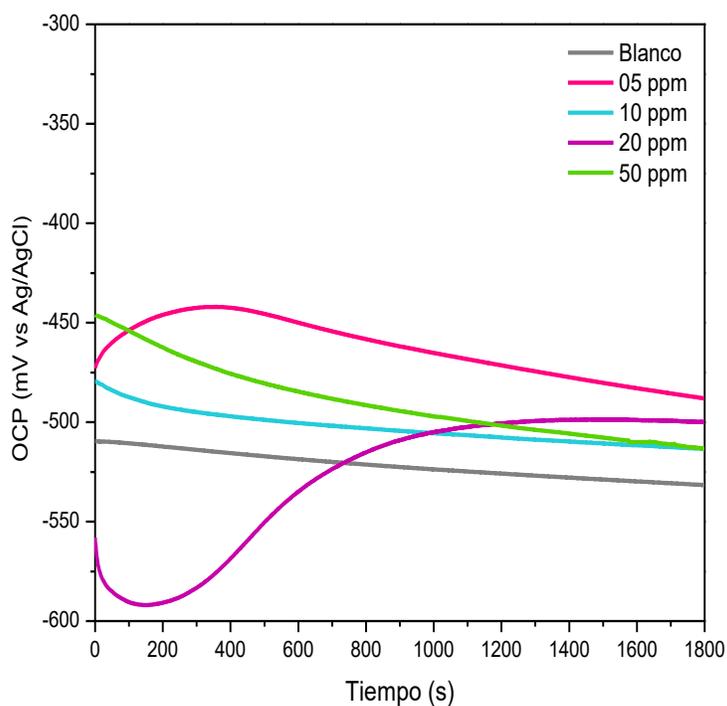
- a. A menos de que se acuerde algo diferente,  $Nb + V \leq 0.06\%$
- b.  $Nb + V + Ti \leq 0.15\%$
- c. A menos de que se acuerde algo diferente,  $Nb + V + Ti \leq 0.15\%$

## ANEXO A2

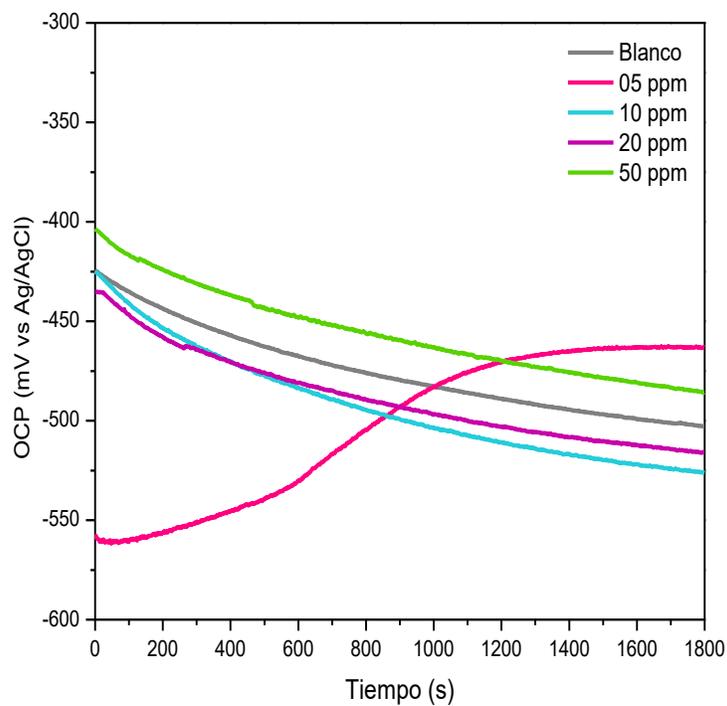
En las Figuras A2.1, A2.2 y A2.3 se muestra la evaluación del OCP en función del tiempo, para un acero 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a diferentes velocidades de rotación y concentraciones de estrictosamida.



**Figura A2.0.1** Evolución del potencial en función del tiempo para un acero 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), en estado estático y diferentes concentraciones de estrictosamida



**Figura A2.0.2** Evolución del potencial en función del tiempo para un acero 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 100 rpm y diferentes concentraciones de estrichosamida



**Figura A2.0.3** Evolución del potencial en función del tiempo para un acero 1018 inmerso en una solución salina de NaCl al 3% (m/m), a 500 rpm y diferentes concentraciones de estrichosamida