

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN UN ACERO AL  
CARBONO EMPLEANDO EL LÍQUIDO EXTRAÍDO DE LA CASCARA DE LA  
NUEZ DEL MEREY (LCM) COMO INHIBIDOR EN PRESENCIA DE CO<sub>2</sub>**

**Presentado por:**

**SIMÓN JESÚS MATA BRAVO**

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como  
requisito parcial para optar al título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**Barcelona, Octubre de 2011**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN UN ACERO AL  
CARBONO EMPLEANDO EL LÍQUIDO EXTRAÍDO DE LA CASCARA DE LA  
NUEZ DEL MEREY (LCM) COMO INHIBIDOR EN PRESENCIA DE CO<sub>2</sub>**

**ASESOR**

---

**Ing. Químico Fidelina Moncada. (M. Sc)  
Asesor Académico**

**Barcelona, Octubre de 2011**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN UN ACERO AL  
CARBONO EMPLEANDO EL LÍQUIDO EXTRAÍDO DE LA CASCARA DE LA  
NUEZ DEL MEREY (LCM) COMO INHIBIDOR EN PRESENCIA DE CO<sub>2</sub>**

**JURADOS**

---

**Ing. Químico Fidelina Moncada. (M. Sc.)  
Asesor Académico**

---

**Ing. Químico Frank Parra  
Jurado Principal**

---

**Ing. Químico Ana Colmenares (PhD)  
Jurado Principal**

**Barcelona, Octubre de 2011**

## RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado:

**“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.**

## **DEDICATORIA**

**A DIOS TODOPODEROSO y a la VIRGEN DEL VALLE, por iluminar mi vida y darme la oportunidad de alcanzar esta meta.**

**A mis padres Amadeo y Yudith, por su paciencia y sacrificio, por guiarme y darme los mejores consejos, toda su ayuda y apoyo durante este largo camino.**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a Dios por iluminar mi vida, brindarme las oportunidades y ponerme en el camino a las personas que contribuyeron a la realización de este trabajo y alcanzar esta meta, y a todas aquellas personas que de alguno u otra forma han contribuido en mi formación personal y académica.

A mis padres Amadeo José Mata Armas y Hortencia Yudith Bravo de Mata, gracias por darme la vida, su cariño y comprensión, por todos sus consejos y enseñanzas, los quiero mucho.

A toda mi familia, que aunque no estuvieron presentes, siempre estuvieron pendientes para que lograra esta grandiosa meta que solo viene siendo el comienzo para una vida profesional.

A mi asesora académica Ing. Fidelina Moncada, por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación, por estar siempre al pendiente de la investigación y por todos sus esfuerzos para la culminación de este proyecto.

A todo el personal que labora en las áreas de investigación de la UDO por su colaboración y ayuda en este proyecto, en especial a la Ing. Glorys López del departamento de Ing. Mecánica, y a los técnicos encargados de los Laboratorios de Propiedades de los Hidrocarburos y Análisis Químico.

A mis colegas de la universidad, quienes se convirtieron en más que compañeros de clases sino en mis amigos, Ángela, Francilda, Karline, Barbara, Thamara, José, Héctor, Carlos, Goyo, Roselin y a todos los demás compañeros que no nombro pero formaron parte de esta vida universitaria, tanto a nivel de estudios como personal.

Y gracias a todas aquellas personas que aunque he olvidado mencionar, formaron parte de este trabajo y contribuyeron a que se llevara a cabo y se logaran los resultados esperados.

MUCHAS GRACIAS A TODOS USTEDES...

## RESUMEN

La corrosión es un fenómeno común en todos los procesos y plantas industriales, que causa pérdidas por el deterioro de los metales, existen varias formas de controlarla, una en específico es la aplicación de inhibidores, que disminuyen o neutralizan la velocidad a la que ocurre este fenómeno. En esta investigación se determinó la velocidad de corrosión de un acero AISI 1045 en una solución salina al 3,5% y saturada con CO<sub>2</sub>, empleando como inhibidor el líquido extraído de la cascara de la nuez del merey (LCM) a diferentes concentraciones, mediante pruebas electroquímicas de potencial a circuito abierto, resistencia a la polarización y polarización potenciodinámica, utilizando el LCM puro y diluido con kerosene desde 20 hasta 80%. Se encontró que para la muestra de acero sin inhibidor la velocidad de corrosión fue de 14,16mpy (milésimas de pulgadas por año) y con adición de 300ppm de LCM puro fue de 7,04mpy, se determinó que la menor velocidad de corrosión para el acero fue de 0,524mpy para LCM al 20% y la eficiencia del inhibidor de 95%. Al realizar análisis morfológico a las superficies expuestas al medio corrosivo, se observa que la muestra sin inhibidor presenta depósitos de herrumbre, y el tipo de corrosión es por picadura, característico de altas concentraciones de CO<sub>2</sub> en el medio, el estudio morfológico para la muestra de concentración 20% LCM, no mostró depósito de herrumbre, como tampoco picaduras o algún otro tipo de ataque corrosivo en la superficie.

## CONTENIDO

### Contenido

RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN .....	viii
CONTENIDO .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. LABORATORIO DE CORROSIÓN .....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3. OBJETIVOS .....	3
CAPITULO II.....	4
MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. ANTECEDENTES .....	4
2.2. CORROSIÓN .....	5
2.3. TIPOS DE CORROSIÓN .....	6
2.4. CORROSIÓN POR DIÓXIDO DE CARBONO (CO <sub>2</sub> ).....	10
2.5. VELOCIDAD DE CORROSIÓN .....	13
2.6. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DESARROLLO DE LA CORROSIÓN .....	14
2.7. MÉTODOS DE PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN .....	22

2.8. EL MEREY (ANACARDIUM OCCIDENTALE).....	29
2.9. ACERO.....	30
2.10. ELECTROQUÍMICA .....	31
2.11. SOLVENTE .....	42
2.12. SOLUBILIDAD.....	43
2.13. MEZCLA.....	44
CAPÍTULO III.....	46
DESARROLLO DEL PROYECTO .....	46
3.1. Selección del solvente y estabilidad de la mezcla .....	46
3.2. Caracterización del acero y preparación de la muestra.....	47
3.3. Realización de las pruebas electroquímicas para la obtención de las curvas de resistencia a la polarización y polarización potenciodinámica .....	49
CCK Corrosion Cell Kit .....	49
3.4. Estudio de la morfología superficial de las probetas luego de realizadas las pruebas electroquímicas.....	55
CAPITULO IV .....	57
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	57
4.1. Determinación de la solubilidad y estabilidad de la mezcla LCM - Kerosene.....	57
4.2. Caracterización de la probeta de acero .....	59
4.3. Determinación de la velocidad de corrosión a partir de las gráficas de resistencia a la polarización y polarización potenciodinámica .....	61
4.4. Morfología superficial después de las pruebas electroquímicas..	71
4.5. CONCLUSIONES .....	76

4.6. RECOMENDACIONES .....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	80
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	81
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	82
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	83
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Corrosión uniforme, de una tapa de acero al carbono.....	7
Figura 2.2. Corrosión galvánica, entre dos placas metálicas diferentes.....	7
Figura 2.3. Corrosión por picaduras, de una placa de acero aleado. ....	8
Figura 2.4. Corrosión intergranular en un componente que fallo de un avión. ....	9
Figura 2.5. Corrosión bajo tensión de una abrazadera.....	10
Figura 2.6. Reacción anódica y catódica básica durante un proceso corrosivo.	34
Figura 2.7. Tipos de celdas electroquímicas.....	36
Figura 2.8. Grafica de resistencia a la polarización. ....	39
Figura 2.9. Grafica de tafel.....	40
Figura 3.1. Esquema de una celda de corrosión.....	50
Figura 3.2. Programación del potencióstato, prueba de potencial a circuito abierto.....	51
Figura 3.3. Captura pantalla Gamry Framework, prueba potencial a circuito abierto.....	52
Figura 3.4. Programación del potencióstato, prueba de resistencia a la polarización.....	52
Figura 3.5. Captura pantalla Gamry Framework, ensayo de resistencia a la polarización.....	53
Figura 3.6. Programación del potencióstato, prueba polarización potenciodinámica.....	53
Figura 3.7. Captura pantalla Gamry Framework, ensayo polarización potenciodinámica.....	54
Figura 3.8. Grafica de tafel para determinar $\beta_a$ y $\beta_c$ .....	54
Figura 3.9. Grafica de Resistencia a la Polarización, para determinar $E_{cor}$ , $i_{cor}$ . ....	55
Figura 4.1. Mezcla LCM – Kerosene, concentraciones de LCM de izquierda a derecha, 100%, 80%, 60%, 50%, 40%, 20%. ....	57

Figura 4.2. Mezcla LCM – Kerosene, transcurridas 72 horas de reposo, concentraciones de LCM de izquierda a derecha, 100%, 80%, 60%, 50%, 40%, 20%.....	58
Figura 4.3. Microestructura de la probeta de acero, magnificación de 300X.....	60
Figura 4.4. Microestructura de la probeta de acero usada, magnificación de 750X. ....	60
Figura 4.5. Potenciales a circuito abierto para diferentes concentraciones de LCM. ....	62
Figura 4.6. Graficas de tafel para diferentes relaciones de LCM – Kerosene. ...	64
Figura 4.7. Graficas de resistencia a la polarización para diferentes concentraciones LCM.....	66
Figura 4.8. Potenciales a circuito abierto para 20% LCM en kerosene. ....	69
Figura 4.9. Graficas de tafel para 20% LCM en kerosene. ....	70
Figura 4.10. Graficas de resistencia a la polarización para 20% LCM en kerosene. ....	70
Figura 4.11. Blanco después del ensayo electroquímico, lupa estereoscópica a 5X. ....	71
Figura 4.12. Blanco después del ensayo electroquímico, magnificación 150X. .	72
Figura 4.12. Blanco después del ensayo electroquímico, magnificación 300X. .	73
Figura 4.13. Mezcla 20% LCM – kerosene después del ensayo electroquímico, lupa estereoscópica a 5X. ....	73
Figura 4.14. Mezcla 20% LCM – kerosene después del ensayo electroquímico, magnificación 150X. ....	74
Figura 4.15. Mezcla 20% LCM – kerosene después del ensayo electroquímico, magnificación 300X. ....	75
Figura A-1. Hoja de datos del potencióstato galvanostato Gamry® PCI4/300 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura A-2. Hoja de datos del potencióstato galvanostato Gamry® PCI4/300 .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

Figura B-1. Grafica de potencial a circuito abierto para tres pruebas patrón.  
..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura B-2. Grafica de potencial a circuito abierto para tres pruebas de  
concentración 100%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura B-3. Grafica de potencial a circuito abierto para tres pruebas de  
concentración 80%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura B-4. Grafica de potencial a circuito abierto para tres pruebas de  
concentración 60%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura B-5. Grafica de potencial a circuito abierto para tres pruebas de  
concentración 50%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura B-6. Grafica de potencial a circuito abierto para tres pruebas de  
concentración 40%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura C-1. Grafica de resistencia a la polarización para tres pruebas patrón.  
..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura C-2. Grafica de resistencia a la polarización para tres pruebas de  
concentración 100%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura C-3. Grafica de resistencia a la polarización para tres pruebas de  
concentración 80%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura C-4. Grafica de resistencia a la polarización para tres pruebas de  
concentración 60%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura C-5. Grafica de resistencia a la polarización para tres pruebas de  
concentración 50%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura C-6. Grafica de resistencia a la polarización para tres pruebas de  
concentración 40%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura D-1. Grafica de polarización potenciodinámica para tres muestras patrón.  
..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura D-2. Grafica de polarización potenciodinámica para tres muestras,  
concentración 100%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura D-3. Grafica de polarización potenciodinámica para tres muestras,  
concentración 80%. ..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura D-4. Grafica de polarización potenciodinámica para tres muestras, concentración 60%. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura D-5. Grafica de polarización potenciodinámica para tres muestras, concentración 50%. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura D-6. Grafica de polarización potenciodinámica para tres muestras, concentración 40%. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Expresiones para la velocidad de corrosión.....	13
Tabla 3.1. Características de algunos solventes comunes .....	47
Tabla 3.2. Proporciones mezcla LCM – Kerosene.....	47
Tabla 3.3. Características de la celda electroquímica.....	49
Tabla 4.1. Propiedades químicas para el acero AISI 1045.....	59
Tabla 4.2. Valores de $\beta_a$ y $\beta_c$ para diferentes concentraciones de LCM.....	65
Tabla 4.3. Resultados de $R_p$ , $E_{cor}$ , $i_{cor}$ y velocidad de corrosión.....	67
Tabla 4.4. Eficiencia del LCM como inhibidor a diferentes concentraciones.....	68



## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1. LABORATORIO DE CORROSIÓN

El laboratorio se encuentra ubicado en la segunda planta del edificio de Ingeniería de Petróleo de la UDO Anzoátegui, en el área del Post-Grado de Ingeniería Química, consta de una amplia gama de equipos para el estudio de los fenómenos electroquímicos y de corrosión que se pueden dar o simular para condiciones específicas, además de contar con los software para la interpretación de los resultados generados por los equipos en las pruebas realizadas.

#### 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La corrosión se define como el ataque destructivo e involuntario de un metal, este ataque es electroquímico y generalmente empieza en la superficie. El problema de la corrosión metálica es de grandes dimensiones; en términos económicos, se estima que aproximadamente el 5% del producto interno bruto de un país industrializado se gasta para prevenir la corrosión y para mantener o reemplazar los productos afectados por las reacciones de corrosión. **(Callister, 2004)**

Las consecuencias de la corrosión son bien conocidas, ejemplo de algunos de los problemas generados son: daño en los equipos, tuberías, accesorios, calentadores de agua, tubos de escape de los carros, incluso el derrumbe de puentes. La solución o minimización de este fenómeno redundaría en beneficios porque ayuda a disminuir la reposición de equipos y previene fallas que muchas veces pueden ser catastróficas.

Entre los diversos procedimientos utilizados para evitar este deterioro, los inhibidores de corrosión constituyen uno de los métodos más empleados y eficaces para la protección interna de los metales del ataque del medio agresivo.



Los inhibidores de corrosión, son aditivos que protegen la superficie metálica contra el ataque químico por agua u otros contaminantes, hay varios tipos de inhibidores de corrosión, como compuestos polares que cubren las superficies de metal preferencialmente, otros compuestos pueden absorber el agua incorporándose a ella como una emulsión del tipo agua en aceite, para que solo el aceite toque las superficies del metal, otros tipos de inhibidores de corrosión se combinan químicamente con el metal, para formar una superficie no reactiva, entre otros.

Tomando como punto de partida investigaciones realizadas en el campo de la corrosión utilizando inhibidores, surgió la incógnita de la posibilidad de aplicar estos principios de investigación empleando los recursos naturales propios del país para conseguir nuevas opciones para la prevención de la corrosión en aceros al carbono utilizados en la industria.

El líquido extraído de la cascara de la nuez del merey (LCM), ha sido poco estudiado como un inhibidor de corrosión para aceros al carbono en ambientes en presencia de  $\text{CO}_2$ . En la presente investigación se realizó una evaluación del efecto inhibidor de la corrosión del LCM, sobre un acero al carbono comercial, para ello se seleccionará el solvente para diluir el LCM, la concentración adecuada de LCM en dicho solvente y se determinará la velocidad de corrosión del acero al carbono seleccionado mediante técnicas de corriente directa, utilizando ensayos potencio dinámicos.

Este estudio se fundamentó en verificar si el LCM disminuye la velocidad de corrosión del acero y funciona como un posible inhibidor de la corrosión en presencia de  $\text{CO}_2$ , esto le abrirá las puertas en el campo a futuras investigaciones que se encargaran de establecer cuáles son los componentes presentes en el LCM responsables de su efecto inhibidor si existe uno, y las concentraciones que ofrezcan mejores resultados en la prevención y disminución de la velocidad de corrosión de aceros comunes en ciertas atmosferas.



### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Calcular la velocidad de corrosión en un acero al carbono, empleando el líquido extraído de la cascara de la nuez del merey (LCM) como inhibidor en presencia de CO<sub>2</sub>.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Determinar la estabilidad y solubilidad de la mezcla kerosene y LCM.
2. Preparar las muestras de acero al carbono y el análisis químico y metalográfico de dicho acero.
3. Realizar las curvas de resistencia a la polarización del acero al carbono con y sin LCM en una solución salina en presencia de CO<sub>2</sub>.
4. Realizar las curvas de polarización potenciodinámica del acero al carbono con y sin LCM.
5. Estudiar la morfología superficial de las muestras de acero al carbono sometidas a pruebas electroquímicas.



## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES

Algunos de los trabajos de investigación desarrollados anteriormente y que guardan cierta similitud con el trabajo a desarrollar son:

Cedeño (2006), realizó un estudio con la finalidad de comprobar la existencia y cantidad de bacterias reductoras de sulfato (SRB) en las tuberías de producción del campo JOBO, área JOBO 2, investigó los componentes de la sarta de producción (tubería, cabilla, bomba) que eran los más afectados y encontró que la falla predominante era por hueco en tubería, las muestras de cálculo de las presiones parciales de los gases demostró que el mecanismo de corrosión era por  $\text{CO}_2$ , la velocidad de corrosión no es severa, infiriendo que la actividad bacteriana podría estar acelerando el proceso corrosivo, evaluó la efectividad biocida y anticorrosiva de 2 inhibidores y determinó que la dosis mínima en campo está entre 100 y 150 ppm en función de 0,28 ppm de magnesio y 10 ppm de residual de amina como parámetros de control de la efectividad inhibidora y 2 UFC/ml de SRB como función biocida.

Rondón (2005), realizó una evaluación del potencial de corrosividad interna en los gasoductos principales y líneas de recolección de gas del Área Mayor Anaco. Este trabajo de grado se realizó tomando en cuenta los parámetros hidrodinámicos operacionales y realizando cálculos de las velocidades de corrosión mediante modelos establecidos, con lo cual se determinó que el tipo de corrosión predominante en el área estudiada es por  $\text{CO}_2$  y puede disminuirse en gran medida con la aplicación de inhibidores con una eficiencia igual o mayor de 78%.

García (2004), realizó un diseño conceptual de una planta para la obtención del líquido de la cáscara de la nuez del merey, también conocido como LCM, en este proyecto se estudió la extracción de este aceite a nivel de



laboratorio, obteniéndose un LCM refinado (descarbolixado y filtrado) que cumplió con las especificaciones internacionales para su venta.

Alvarado (2004), realizó ensayos experimentales en autoclaves, simulando las condiciones corrosivas de presión y temperatura del sistema de compresión de gas del campo Dación, donde evaluó la influencia de cuatro inhibidores sobre la disminución del proceso corrosivo a las condiciones más críticas del sistema, con el fin de escoger los más eficientes así como sus mejores concentraciones a ser empleadas, de los cuatro inhibidores dos fueron seleccionados como los más adecuados, y fueron más eficientes a las condiciones más críticas del sistema, con eficiencias definidas entre 91 y 92 % a una concentración de 45 ppm.

## 2.2. CORROSIÓN

Se define como una reacción química o electroquímica entre un material, normalmente un metal, y su entorno que produce un deterioro del material y sus propiedades. **(Fontana, 1986)**

La mayoría de los metales (excepto los nobles) en contacto con el medio ambiente son termodinámicamente inestables. Todos debieran reaccionar y convertirse en óxidos. De todas maneras si la velocidad de deterioro es baja aún pueden utilizarse.

El proceso de corrosión de metales puede originarse al entrar en contacto el metal con una solución electrolítica, por lo tanto los mecanismos de protección tratan de evitar ese contacto, ya sea mediante modificaciones del metal, del electrolito o bien actuando como una barrera aislante. El fenómeno de corrosión implica un costo importante del producto bruto nacional y se presenta en un amplio campo de ejemplos que van desde la corrosión de una gran estructura metálica puesta en contacto con un medio agresivo ambiental, a la corrosión de implantes metálicos en el interior del cuerpo humano.



### 2.2.1. Corrosión metálica

Consiste básicamente en dos procesos de transferencia de electrones en lugares físicamente diferentes de la estructura metálica (procesos anódicos y catódicos) El proceso de corrosión implica:

- a. Generación y transferencia del catión metálico a la solución.
- b. Transferencia del oxígeno al cátodo metálico.
- c. Transferencia electrónica del metal al oxígeno.
- d. Paso de los electrones del ánodo al cátodo (electro neutralidad metálica).
- e. Difusión de los iones  $Fe^{++}$  y  $OH^{-}$  en el electrolito (electro neutralidad iónica).

En general puede concluirse que la protección tiene que enfocarse en anular o al menos disminuir estos pasos.

## 2.3. TIPOS DE CORROSIÓN

Existen varios criterios para distinguir los tipos de corrosión más frecuentes, por ejemplo:

### 2.3.1. Según el Medio:

**2.3.1.1. Química:** el metal reacciona con un medio no iónico, por ejemplo la oxidación de un metal en aire a altas temperaturas.

**2.3.1.2. Electroquímica:** ocurre transporte simultáneo de electricidad a través de un electrolito. Ejemplos: corrosión en soluciones salinas, agua de mar, atmósfera, suelos, etc.

### 2.3.2. Según la Forma

Conviene clasificar la corrosión según el modo en que esta se manifiesta. A veces la corrosión metálica se clasifica en ocho formas: uniforme, galvánica, por aireación diferencial, picaduras, intergranular, selectiva, erosión y corrosión bajo tensiones. **(Callister, 2004)**



### 2.3.2.1. Ataque uniforme

El ataque uniforme es una forma de corrosión electroquímica que ocurre con igual intensidad en toda la superficie expuesta y suele producir herrumbre o depósito, ver figura 2.1. A nivel microscópico, las reacciones de oxidación y de reducción tienen lugar al azar sobre la superficie metálica. Esta es probablemente la forma más común de corrosión y también la menos molesta porque se puede predecir y paliar con relativa facilidad.



Figura 2.1. Corrosión uniforme, de una tapa de hierro.

### 2.3.2.2. Corrosión galvánica

La corrosión galvánica ocurre al unir eléctricamente dos metales o aleaciones, que tienen distinta composición, mientras están expuestos en un electrolito. El metal menos noble o el más activo experimenta corrosión en un ambiente particular; el metal inerte, el cátodo, queda protegido de la corrosión, ver la figura 2.2.



Figura 2.2. Corrosión galvánica, entre dos placas metálicas diferentes.



### 2.3.2.3. Corrosión por aireación diferencial

La corrosión electroquímica también tiene lugar cuando la concentración de iones o de gases disueltos en la disolución electrolítica es diferente de la concentración que se da entre dos regiones de la misma pieza metálica. Así se forma una pila de concentración y la corrosión ocurre en los sitios de menor concentración.

### 2.3.2.4. Picaduras

La picadura es otra forma de ataque corrosivo muy localizado, que forma agujeros o pequeños hoyos, ver en la figura 2.3. Corrientemente las picaduras penetran desde la superficie horizontal hacia el interior en dirección casi perpendicular. Es un tipo de corrosión extremadamente insidioso ya que muchas veces es indetectable, con muy poca pérdida de material, hasta que ocurre un fallo. La picadura se inicia en un defecto superficial localizado, como una pequeña grieta o una ligera modificación de la composición.

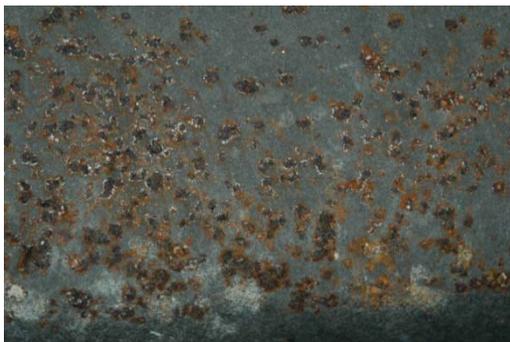


Figura 2.3. Corrosión por picaduras, de una placa de acero aleado.

### 2.3.2.5. Corrosión intergranular

Como su nombre indica, la corrosión intergranular ocurre preferentemente a lo largo de los límites de grano de algunas aleaciones en ambientes específicos y, como consecuencia, la muestra se desintegra a lo largo de los límites de grano, ver la figura 2.4.

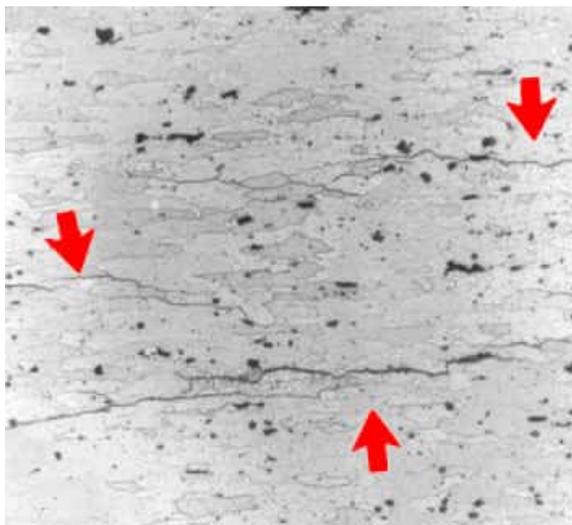


Figura 2.4. Corrosión intergranular en un componente que fallo de un avión.

#### **2.3.2.6. Eliminación selectiva**

La eliminación selectiva ocurre al eliminar preferentemente un elemento de una aleación sólida monofásica por un proceso corrosivo.

#### **2.3.2.7. Corrosión por erosión**

Al combinar la acción del ataque químico y la abrasión mecánica o desgaste, como consecuencia del movimiento de un fluido, se origina la corrosión por erosión. La naturaleza del fluido influye decisivamente en el comportamiento corrosivo. Normalmente un aumento de la velocidad del fluido se traduce en un aumento en la velocidad de corrosión. La corrosión por erosión se suele presentar en tuberías, especialmente en codos, ángulos y cambios bruscos de diámetro: posiciones donde el fluido cambia de dirección y suele convertirse en turbulento.

#### **2.3.2.8. Corrosión bajo tensión**

La acción combinada de un esfuerzo de tracción aplicado y de un ambiente corrosivo produce corrosión bajo tensiones; ambos factores son necesarios.



Algunos materiales potencialmente inertes en un medio corrosivo particular son susceptibles a este tipo de corrosión al aplicarles un esfuerzo. Se forman pequeñas grietas que luego se propagan en dirección perpendicular al esfuerzo y, como consecuencia puede aparecer un fallo. **(Callister, 2004)**

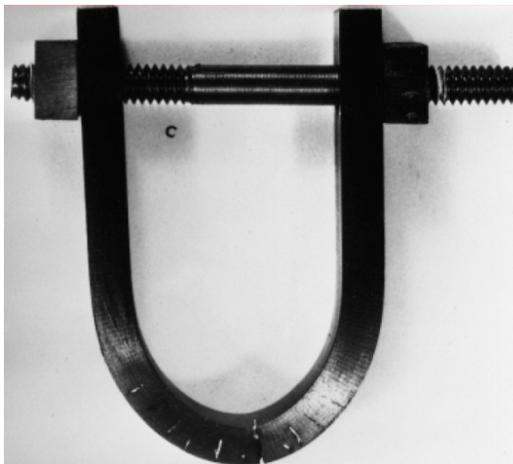


Figura 2.5. Corrosión bajo tensión de una abrazadera.

#### **2.4. CORROSIÓN POR DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)**

La corrosión dulce o corrosión por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es considerada como uno de los principales problemas al cual se enfrenta la industria petrolera, produciéndose en forma frecuente deterioros severos en los equipos e instalaciones pertenecientes a las áreas de producción, almacenaje y transporte. Este tipo de corrosión es frecuentemente asociada a pozos de gas condensado y pozos de petróleo.

El acero al carbono, debido a su bajo costo, es el material con mayor utilización en los sistemas de producción, pero a su vez es el más susceptible a ser corroído en ambientes con alto contenido de CO<sub>2</sub>.

Un mejor entendimiento del proceso de corrosión por CO<sub>2</sub>, permite predecir, prevenir y atacar sus efectos de una manera más efectiva. El



mecanismo de corrosión por CO<sub>2</sub>, envuelve una serie de reacciones químicas, las cuales pueden ser divididas en cuatro grandes etapas:

**Etapas I:** disolución de CO<sub>2</sub> en agua para la formación de las especies químicas que van a tomar parte en la reacción. El CO<sub>2</sub> se disuelve en presencia de agua formando un ácido débil (ácido carbónico), creándose un ambiente corrosivo en líneas de flujo de petróleo y gas.



El H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> obtenido sufre una doble disociación formando en primer lugar iones de bicarbonato y en segundo lugar, iones carbonato.



**Etapas II:** transporte de los reactantes desde la solución hasta la adsorción en la superficie del metal. En esta etapa, la transferencia de masa desde la solución hacia la superficie del metal, juega un papel muy importante.





**Etapa III:** reacciones electroquímicas (anódicas y catódicas) en la superficie del metal. El hierro de la tubería se oxida (reacción anódica).



Los iones  $H^{+}$  disociados se reducen al ganar dos electrones (reacción catódica):



**Etapa IV:** transporte de los productos del proceso de corrosión desde la superficie del metal hasta el fluido.



Las especies disueltas se combinan formando una sal, carbonato de hierro ( $FeCO_3$ ).





El carbonato de hierro obtenido como producto de corrosión precipita, depositándose sobre la superficie del metal, donde forma una capa de  $\text{FeCO}_3$ , proporcionando cierto grado de protección al acero contra una mayor corrosión, dependiendo también de las condiciones ambientales del fluido. Esta capa disminuye la velocidad de corrosión hasta el punto de que puede llegar a pasivarla, siempre y cuando no sea removida (debido a la acción del flujo) de la superficie del metal.

## 2.5. VELOCIDAD DE CORROSIÓN

La velocidad de corrosión de un material debe ser expresada cuantitativamente, entre las cuales se encuentran:

Tabla 2.1. Expresiones para la velocidad de corrosión

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida en peso: gramos o miligramos.</li> <li>• Cambio de peso en porcentaje.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pobre: la forma del ejemplo y el tiempo influyen en el resultado.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd).</li> <li>• Gramos por decímetro cuadrado por día.</li> <li>• Gramos por decímetro cuadrado por hora.</li> <li>• Gramos por metro cuadrado por hora.</li> <li>• Gramos por pulgada cuadrada por hora.</li> <li>• Moles por centímetro cuadrado por hora.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena: pero las expresiones no dan la velocidad de penetración.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulgadas por día.</li> <li>• Pulgadas por mes.</li> <li>• Milímetros por año (mm/y).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejor: esta expresión da la velocidad de penetración.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Milésimas de pulgadas por año</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejor: expresa penetración sin</li> </ul>



(mpy).	gran número de decimales.
--------	---------------------------

## 2.6. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DESARROLLO DE LA CORROSIÓN

La resistencia que ofrece un material ante el fenómeno de corrosión es afectada por elementos de diversas naturalezas, depende de factores de tipo electroquímico, ambiental, metalúrgico y termodinámico. **(Fontana, 1986)**

### 2.6.1. Factores electroquímicos

Estos factores son considerados fundamentalmente en el desarrollo del proceso de corrosión, ya que al ser definido como un proceso electroquímico, involucra de manera esencial, la producción continua de flujo de electrones, siendo este gobernado por factores del tipo electroquímico como son:

**2.6.1.1. Reacciones electroquímicas:** todo proceso electroquímico involucra la producción de electrones combinado con las reacciones químicas envueltas en el proceso; por ejemplo, cuando en el ánodo se liberan los electrones, y estos reaccionan en el cátodo con las especies químicas para formar productos secundarios, como  $H_2$ ,  $H_2O$ , etc.

**2.6.1.2. Polarización:** es el proceso mediante el cual dos materiales con potenciales diferentes, al estar conectados, comienzan un proceso de corrosión hasta alcanzar un equilibrio. El potencial del metal anódico alcanza al potencial del metal más catódico y viceversa. Las principales formas de polarización son las siguientes:

- **Polarización por concentración o difusión:** este proceso se encuentra sujeto a las leyes de transferencia de masa; uno de los casos es cuando el proceso corrosivo es controlado por la difusión de iones  $H^+$  desde la



solución hacia el cátodo y la adsorción del mismo para formar la burbuja de hidrogeno, restándole superficie de reacción. Este proceso es afectado directamente por la velocidad del fluido, debido a que, a mayor velocidad existe mayor transferencia de  $H_2$  desde la superficie del medio.

- **Polarización por activación:** se presenta cuando el proceso es controlado por la secuencia de las reacciones que suceden en la interface entre la superficie del metal y el electrolito, y la velocidad a la cual ocurren. Este proceso es independiente de la velocidad del fluido.

**2.6.1.3. Pasividad:** se define como la pérdida de actividad química que experimentan algunos metales y aleaciones bajo ciertas condiciones particulares del medio. Esta propiedad favorece la disminución de las reacciones de corrosión, y es considerado un caso particular de polarización por activación. Cuando se alcanza este estado de pasividad, sobre la superficie del metal se forma una película protectora, la cual es estable por encima de ciertas condiciones de oxidación y es destruida eventualmente al ser expuesta a ambientes corrosivos severos. La mayoría de los metales utilizados en ingeniería poseen esta propiedad, por lo que ha sido objeto de estudio y utilizada en el desarrollo de métodos de prevención y control de la corrosión.

## 2.6.2. Factores ambientales

Estos factores tienen relación directa con las condiciones predominantes en el medio ambiente al que se encuentra expuesto el material. Entre estos factores podemos mencionar:

**2.6.2.1. Presencia de oxígeno y oxidantes:** el efecto de la presencia de oxígeno y oxidantes durante este proceso depende del medio y del metal envuelto en la reacción. En general, la presencia de estos elementos aumenta la velocidad de la reacción de corrosión, con excepción de aquellos metales que se



encuentren en estado de pasivación. Durante el proceso de corrosión las reacciones de oxidación se encuentran controladas por las reacciones de reducción; es decir se producen y se consumen la misma cantidad de electrones. En ausencia de oxígeno la reacción catódica es la siguiente:



En presencia de oxígeno la reacción catódica se expresa de la siguiente manera:



Se puede observar que en presencia de oxígeno, el ánodo tiene que reaccionar dos veces más para producir los electrones necesarios para la reacción de reducción, esto quiere decir que se incrementan las reacciones en el ánodo, el cual se deteriora más rápidamente aumentando las tasas de corrosión. Este mismo efecto se puede observar en presencia de oxidantes.

**2.6.2.2. Temperatura:** en la mayoría de los procesos de corrosión al igual que en casi todas las reacciones químicas, un aumento de la temperatura produce un incremento en las velocidades de reacción. Esto es debido a que toda reacción química sigue el comportamiento de la ley de Arrhenius. El proceso de corrosión, por tener este comportamiento, también se rige por esta ley.



**2.6.2.3. Velocidad de flujo:** los efectos de la velocidad en la corrosión son complejos y dependen de las características del metal y del medio expuesto; sin embargo, de acuerdo al tipo de proceso de polarización de la corrosión, se pueden definir dos tipos de comportamiento:

- Si la corrosión es controlada por polarización por activación, la velocidad del fluido no tiene ningún efecto en la velocidad de corrosión.
- Si la corrosión es controlada por polarización por concentración, a medida que la velocidad del fluido aumenta, aumenta la velocidad de corrosión, debido a la transferencia de masa de las especies que intervienen en las reacciones.

**2.6.2.4. Concentración de agentes corrosivos:** el efecto que produce la concentración de agentes corrosivos sobre el proceso de corrosión es muy variado y depende de las características del medio y del metal envuelto en la reacción. Existen materiales que alcanzan un estado de pasivación y no son afectados por la concentración de iones corrosivos, debido a la formación de una capa uniforme, continua, compacta y adherente que protege la superficie del metal. Otros materiales demuestran un comportamiento similar, excepto a muy altas concentraciones de iones corrosivos, donde se incrementan rápidamente las velocidades de corrosión. Por otra parte, existen ácidos que son completamente solubles en agua y a medida que la concentración de iones aumenta, se incrementa la velocidad de corrosión, hasta alcanzar un punto máximo donde comienza a disminuir.

### **2.6.3. Factores metalúrgicos**

Tienen una gran influencia sobre la resistencia a la corrosión. En muchos casos la estructura metalográfica de las aleaciones, puede ser controlada para reducir el ataque corrosivo. Este factor ha alcanzado una mayor importancia en los últimos años debido al desarrollo de nuevas aleaciones cada vez más



resistentes a los diferentes ambientes corrosivos. Entre los factores metalúrgicos que afectan la resistencia a la corrosión tenemos:

**2.6.3.1. Microestructura:** depende de su composición química y del tratamiento térmico recibido, y es la que determina las propiedades mecánicas de un metal, e influye en las propiedades de resistencia a la corrosión. En el estudio de la corrosión por  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  se ha dado mucha importancia a este aspecto, observándose que varias muestras de un mismo material con diferentes microestructuras poseen diversos grados de resistencia a la corrosión, determinándose que un metal con una estructura perlítica-ferrítica presenta características favorables para la formación de capas protectoras; mientras que el mismo material con una microestructura de martensita revenida, no posee características favorables para la formación de estas capas protectoras.

**2.6.3.2. Aleaciones:** son mezclas de dos a más metales que se utilizan para cambiar las propiedades mecánicas, físicas y de resistencia a la corrosión de un material. Se pueden distinguir dos tipos de aleaciones:

Homogéneas: son soluciones sólidas de componentes que se encuentran en una sola fase, y son totalmente solubles. Este tipo de aleaciones son más resistentes a la corrosión, ya que no existen acoples galvánicos entre los granos de material.

Heterogéneas: son soluciones sólidas de componentes que se encuentran en una o más fases separadas y sus componentes no son solubles completamente, pudiéndose generar acoples galvánicos entre ellos, induciendo de esta manera el desarrollo del proceso corrosivo.

**2.6.3.3. Zonas de imperfección:** estas zonas manifiestan como interrupciones en las cadenas de átomos que forman el cristal. Aparecen por la presencia de



un átomo impuro, por la ausencia de una matriz de átomos o por su presencia en un lugar equivocado. Estas zonas y los bordes de grano del metal son los puntos más susceptibles a la corrosión.

#### **2.6.4. Factores termodinámicos**

La termodinámica es la ciencia que estudia los cambios y balances de energía en los procesos de transformación. Sus estudios y cálculos indican si una reacción puede ocurrir en forma espontánea o no. En el caso de corrosión, puede determinar si teóricamente es posible que ocurra el fenómeno de corrosión. Es importante destacar que en el proceso de corrosión, aquellas reacciones que termodinámicamente no pueden ocurrir, no quiere decir que no ocurran. Lo que sucede es que ocurren a velocidades de reacción tan lentas que la termodinámica no las puede predecir. Sin embargo, las velocidades de reacción son tan lentas, que desde el punto de vista de ingeniería, se consideran despreciables. Para el estudio de los factores termodinámicos, son utilizados los siguientes conceptos:

**2.6.4.1. Energía libre:** el cambio de energía de un sistema es una medida directa de su capacidad de producir trabajo. El cambio de energía libre permite determinar si es factible que el fenómeno de corrosión tenga lugar en un sistema determinado.

Si el cambio de energía libre de un estado a otro de un sistema es negativo, indica pérdida de energía libre en la dirección del sistema. Si no existen fuerzas externas actuando en un sistema, el sistema siempre tratará de transformarse a un estado donde su energía sea mínima. Si el cambio de energía libre es positivo, entonces implica que la reacción ocurre si se le añade energía al sistema.

**2.6.4.2. Potencial de celda:** el potencial de celda se define como la diferencia de potencial entre el potencial de media celda en el cátodo y el del ánodo. Para



que una reacción sea posible, la energía libre de Gibbs tiene que ser negativa y el potencial de celda tiene que ser positivo.

### 2.6.5. Composición del medio

Algunas de las características del agua (electrolito) que inducen la corrosión de los metales son:

**2.6.5.1. Conductividad:** la corrosividad de un electrolito aumenta cuando su conductividad incrementa. El agua destilada es poco conductora, y por lo tanto no es muy corrosiva, mientras que el agua salada es muy conductora y por lo tanto bastante corrosiva, debido a la presencia de iones en la solución. El agua asociada al crudo generalmente posee un valor alto de conductividad.

**2.6.5.2. pH del electrolito:** la corrosividad de un electrolito generalmente aumenta cuando el pH decrece (se hace más ácido). A altos valores de pH, capas protectoras pueden formarse sobre la superficie y disminuyen la velocidad de corrosión. Las aguas asociadas al crudo generalmente tienen un valor de pH ligeramente alcalino.

**2.6.5.3. Gases disueltos:** el oxígeno, el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno disueltos en agua aumentan drásticamente su corrosividad. En efecto, los gases disueltos son la causa primaria de muchos de los problemas de corrosión en el campo petrolero. Si ellos pudieran ser excluidos, y el electrolito mantenido a un pH neutro o alto, la mayoría de los sistemas tendrían pocos problemas de corrosión. A continuación se describe el efecto de estos gases en la corrosión de las tuberías de acero.

Sulfuro de hidrógeno disuelto: el sulfuro de hidrogeno es muy soluble en agua y cuando esta disuelto actúa como un ácido débil. Causa lentamente picadura. La combinación de  $H_2S$  y  $CO_2$  es más agresiva que el  $H_2S$  solo y esta



mezcla es comúnmente encontrada en campos petroleros. Otro problema con el  $H_2S$  es que algunos de los iones de hidrogeno en las áreas catódicas puede entrar al acero como hidrogeno atómico y esta es la causa de la fragilización y el amollamiento por hidrogeno en los aceros de alta resistencia.

Dióxido de carbono: como ya se dijo antes, este compuesto en combinación con el sulfuro de hidrogeno, causa corrosión, debido a que acelera la degradación por pérdida de peso de un material metálico. En general, un aumento de la temperatura o de la presión parcial de  $CO_2$ , aumentara la velocidad de corrosión esperada y por tanto la severidad del ataque.

Oxígeno disuelto: el oxígeno disuelto es un elemento con un alto potencial para corroer ya que este ataca usualmente en forma de picaduras. El oxígeno disuelto a muy pequeños valores puede causar corrosión. La combinación con cualquiera de los compuestos ( $H_2S$  o  $CO_2$ ), drásticamente incrementa sus potenciales corrosivos.

El oxígeno acelera la corrosión en dos formas:

Como un despolarizador: el oxígeno se combina con electrones en el cátodo impidiendo la formación del manto protector de hidrogeno. La energía tomada para que el gas hidrogeno evolucione en el cátodo es un gran cuello de botella en la reacción de corrosión, causando que la formación de hidrogeno disminuya o se detenga totalmente. Cuando el oxígeno está presente, la tasa de corrosión es limitada principalmente por la tasa a la cual el oxígeno puede difundirse al cátodo.

Como un oxidante: la oxidación de los iones ferrosos ( $Fe^{++}$ ) e iones férricos ( $Fe^{+++}$ ) incrementa la tasa de corrosión a un pH por encima de 4, porque el hidróxido férrico es insoluble en agua y precipita. La tasa de corrosión se incrementa tanto, como iones ferrosos sean suministrados desde el metal, para mantener el equilibrio en la solución. Si los iones ferrosos son rápidamente



oxidados a férricos fuera de la superficie del metal, entonces la reacción de corrosión procede rápidamente. Si por otro lado, la oxidación ocurre tan rápidamente que los iones ferrosos no pueden difundirse fuera de la superficie del metal, entonces el hidróxido puede formarse sobre el ánodo y convertirse en una protección.

## **2.7. MÉTODOS DE PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN**

Si bien el proceso de corrosión es termodinámicamente favorable, dadas las implicancias que tiene, se trabaja en distintos planos para evitar o al menos disminuir al máximo este proceso. En definitiva se trata de evitar el contacto entre el metal y un medio agresivo. Esto se puede conseguir mediante distintas acciones.

### **2.7.1. Sobre el metal**

- Diseño de materiales con películas pasivantes.
- Metales estables termodinámicamente.
- Aleaciones de gran estabilidad.
- Modificaciones del diseño (recodos, facilidad de drenaje, disminución de turbulencias).

### **2.7.2. Sobre el medio agresivo**

- Eliminación de oxígeno disuelto.
- Disminución de la acidez.
- Eliminación de sales disueltas.
- Eliminación de partículas sólidas (incrustaciones).
- Disminución sobre la humedad relativa.



### 2.7.3. Recubrimientos metálicos

#### 2.7.3.1. Mecanismo de acción

- Pueden actuar evitando el contacto entre el medio agresivo y el material base.
- Pueden actuar produciendo una corriente eléctrica protectora

#### 2.7.3.2. Clasificación:

- Recubrimientos catódicos o nobles: Se deposita Ni, Ag, Cu, Pb, Cr sobre acero. En este caso la corrosión se produce a través de poros, por tal motivo se debe preparar el material con un mínimo número de poros para evitar que el agua llegue al metal base.
- Recubrimientos anódicos o de sacrificio: Se deposita Zn y Cd quienes son más activos que el metal base. La corriente galvánica va del recubrimiento al metal base. En este caso la porosidad del recubrimiento carece de importancia.

### 2.7.4. Protección catódica

Dado que durante el proceso de corrosión el material se actúa como ánodo, los métodos de protección catódica están dirigidos a convertir al metal en cátodo. Esto se consigue de dos maneras:

- Ánodo de sacrificio: el material más utilizado es el Zn. Sir Humphry Davy en 1824 propuso la utilización de bloques de Zn para proteger la cobertura de cobre de los barcos.
- Corriente impresa: de esta manera se mantiene el material a un potencial lo suficientemente catódico para evitar su corrosión. Se emplea una fuente de corriente y un electrodo que actúa como ánodo. Estos ánodos pueden ser:
  - Consumibles (Hierro, acero, chatarra, etc.).
  - Inertes (grafito, plomo, etc.).



Para este método de protección se debe tener en cuenta entonces, la geometría de la estructura metálica, el electrodo auxiliar, asegurar un medio conductor, y una fuente de corriente continua.

### **2.7.5. Inhibidor**

La corrosión de superficies metálicas se puede reducir o controlar mediante la adición de compuestos químicos al ambiente corrosivo. Esta forma de control de la corrosión es llamada inhibición y los compuestos añadidos son conocidos como inhibidores de la corrosión. **(Schweitzer, 2007)**

El uso de inhibidores químicos para disminuir la velocidad de corrosión en los procesos es muy variado. En la extracción de petróleo y las industrias de transformación, los inhibidores han sido siempre considerados como la primera línea de defensa contra la corrosión. Por definición, un inhibidor de la corrosión es una sustancia química que, al añadirlo en pequeña concentración a un medio ambiente, reduce eficazmente la velocidad de corrosión. **(Roberge, 2000)**

#### **2.7.5.1. Tipos de inhibidores**

##### **2.7.5.1.1. Aniónicos**

Causan un gran cambio anódico del potencial de corrosión, obligando a la superficie metálica a entrar en el rango de pasivación. Hay dos tipos de inhibidores de pasivación: aniones oxidantes, tales como cromatos, nitrito y nitrato, que pueden funcionar en ausencia de oxígeno y los iones no oxidantes, como el fosfato, tungsteno, y molibdato, que requieren la presencia de oxígeno en la superficie del acero. Estos inhibidores son los más eficaces por lo que son los más ampliamente utilizados.

##### **2.7.5.1.2. Catódicos**

Los inhibidores catódicos hacen que sea lenta la reacción catódica en sí o de manera selectiva precipitando en áreas catódicas para aumentar la impedancia de la superficie y el límite a la difusión de especies reducibles a estas áreas.



Pueden proporcionar la inhibición por tres mecanismos diferentes: (1) venenos catódicos, (2) precipitados catódicos, y (3) como eliminadores de oxígeno.

#### **2.7.5.1.3. Orgánicos**

Ambos efectos anódicos y catódicos se observa a veces en presencia de los inhibidores orgánicos, pero como regla general, los inhibidores orgánicos afectan a toda la superficie de un metal que se corroe cuando está presente en suficiente concentración. Los inhibidores orgánicos, generalmente designado como formador de película, protegen el metal formando una película hidrofóbica en la superficie metálica.

#### **2.7.5.1.4. Inhibidores de precipitación**

Los inhibidores que inducen precipitaciones son los compuestos que forman películas que tienen una acción de carácter general sobre la superficie de metal, bloqueando tanto anódica y catódica sitios indirectamente. Los inhibidores de precipitación son compuestos que causan la formación de precipitados en la superficie del metal, con lo que proporcionan una película protectora. El agua dura que sea alta en calcio y el magnesio es menos corrosiva que el agua blanda debido a la tendencia de las sales en el agua dura para precipitar en la superficie del metal y formar una película protectora.

#### **2.7.5.1.5. Inhibidores de corrosión volátiles**

Los inhibidores de corrosión volátiles (ICV), también llamados inhibidores de fase vapor (IFV), son compuestos transportados en un entorno cerrado, hasta el sitio de la corrosión por volatilización de la fuente. Es deseable, para que sea eficaz ICV, proporcionar la inhibición rápida y durar por largos periodos. Ambas cualidades dependerá de la volatilidad de estos compuestos, de acción rápida que desean alta volatilidad, mientras que la protección duradera requiere baja volatilidad. **(Roberge, 2000)**



## **2.7.5.2. Aplicaciones industriales**

### **2.7.5.2.1. Producción de petróleo**

La corrosión en las industrias de hidrocarburos pueden dividirse en dos tipos, "corrosión húmeda" y "corrosión seca", a baja temperatura (es decir, por debajo del punto de ebullición o punto de rocío del agua), el material se corroe debido a la presencia de una fase acuosa (corrosión húmeda), a mayor temperatura (por encima del punto de ebullición del agua), la corrosión se produce en ausencia de una fase acuosa (corrosión seca). La corrosión húmeda se ve influenciada por la presión, temperatura y composición del humor acuoso, gaseosos, y fases del petróleo. En las refinerías y plantas petroquímicas, la cantidad de agua suele ser pequeña, pero la agresividad es alta y se localiza en regiones en las que la fase acuosa tiene contacto con el metal. El agua puede contener disuelto sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), y los iones cloruro ( $Cl^-$ ). La corrosión puede ocurrir aun cuando el contenido de agua de producción es tan bajo como 0,1%. Las refinerías y petroquímica emplean una variedad de inhibidores de formación de película para controlar la corrosión húmeda, la mayoría de los inhibidores de larga cadena son materiales orgánicos nitrogenados, como aminas y amidas.

Los inhibidores tipo soluble en agua y soluble en agua-aceite se dispersan continuamente inyectado, o los inhibidores tipo soluble en aceite y aceite soluble en el agua se dispersan (inhibidores por lotes) de forma intermitente.

Los inhibidores forman una película de anclaje al metal a través de su grupo polar. La cola no polar sobresale verticalmente. La adsorción física de hidrocarburos (aceites) en las colas no polares aumenta el espesor de la película y la eficacia de la barrera hidrofóbica para la inhibición de la corrosión.

### **2.7.5.2.2. Corrosión interna de tuberías de acero**

Las tuberías de recolección, que operan entre los pozos de petróleo y gas de las plantas de procesamiento, presentan problemas de corrosión similares a los de las refinerías y plantas petroquímicas. El flujo de los regímenes de fluidos multi



fase en las tuberías influye en la velocidad de corrosión. A altas velocidades de flujo, se induce la corrosión y la erosión-corrosión puede ocurrir, mientras que en las tasas de flujo bajo, la corrosión por picadura es más común. La corrosión está relacionada con la cantidad y la naturaleza de los sedimentos. Flujo de alta velocidad tiende a barrer los sedimentos de la tubería, mientras que el de baja velocidad permite a los sedimentos que se depositan en el fondo, proporcionando sitios para la corrosión por picadura. La corrosión interna de las tuberías es controlada mediante la limpieza de la tubería (raspado) y añadiendo inhibidores de forma continua o por lotes.

#### **2.7.5.2.3. Agua**

El agua potable es frecuentemente saturada de oxígeno disuelto y es corrosiva a menos que se forme una película protectora o depósito. Los inhibidores catódicos, tales como el carbonato de calcio, silicatos, polifosfatos, y sales de zinc, se utilizan para el control de la corrosión por agua potable. El agua se utiliza en el sistema de refrigeración en muchas industrias, en un sistema de recirculación, la evaporación es la principal fuente de refrigeración, a medida que avanza la evaporación, la disolución de minerales aumenta el contenido de sal. El sistema de refrigeración puede consistir de varios metales diferentes y no metales. Los metales recogidos de una parte del sistema pueden ser depositados en otro lugar, produciendo la corrosión galvánica. La corrosión es controlada anódicamente (apaciguamiento) usando inhibidores de nitrato y cromato, así como catódicamente inhibidores de sales de zinc. Los inhibidores orgánicos (por ejemplo, benzotriazol) a veces se utilizan como inhibidores secundarios, especialmente cuando es excesiva la corrosión del cobre.

#### **2.7.5.2.4. Ácidos**

Los ácidos son ampliamente utilizados, en la limpieza de equipos de refinerías de petróleo e intercambiadores de calor, y en acidificación de pozos de petróleo. Inhibidores mixtos son ampliamente utilizados para controlar la corrosión ácida.



#### **2.7.5.2.5. Automotriz**

Los inhibidores son utilizados en un automóvil por dos razones: primero reducir la corrosividad de los sistemas de fluidos (corrosión interna), y segundo para proteger las superficies metálicas expuestas a la atmósfera (corrosión externa). La corrosión interna está influenciada por los refrigerantes, el flujo, la aireación, temperatura, presión, las impurezas del agua y los productos de corrosión, las condiciones de funcionamiento y mantenimiento del sistema. Algunos inhibidores comúnmente disueltos en anticongelantes son los nitritos, nitratos, fosfatos, silicatos, arseniatos, cromatos (inhibidores anódicos), aminas, benzoatos, mercaptanos, fosfatos orgánicos (mezcla de inhibidores), y aceites emulsionables (formadores de película). Para controlar la corrosión externa, las formulaciones contra la oxidación que se utilizan contienen grasa, resina, cera, junto con resinas metálicas y compuestos asfálticos. Los inhibidores típicos usados en las aplicaciones contra la oxidación son ácidos grasos, fosfonatos, sulfonatos y carboxilatos.

#### **2.7.5.2.6. Pinturas**

Pigmentos (revestimientos orgánicos) finamente divididos son frecuentemente incorporadas en las cartillas. Estos compuestos polares desplazan el agua y se orientan de tal manera que los extremos hidrofóbicos quedan frente al medio ambiente, aumentando así la unión de las capas en la superficie. El plomo rojo es de uso general en las pinturas de hierro, esto disuade a la formación de las células locales y ayuda a preservar las propiedades físicas de las pinturas.

#### **2.7.5.2.7. Otros inhibidores**

Se utilizan para controlar la corrosión en aguas de calderas, tanques de combustible líquido, baños calientes de tinción de cloruro, salmueras de refrigeración, como refuerzo del acero en el hormigón y para proteger todo tipo de artefactos.



## **2.8. EL MEREY (ANACARDIUM OCCIDENTALE)**

Es una especie nativa de América tropical, posiblemente originaria del noreste brasileño; en la cuenca amazónica está distribuida en Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador y Venezuela. Su nombre común es, acaya, acayu, cajú, marañón (Bolivia); cajú, cajueiro (Brasil); anacardo cauji, marañón, merey (Colombia); marañón (Ecuador); merey (Venezuela); cashew (ingles).

Pertenece a la familia de las anacardiáceas, que comprenden 60 géneros y 400 especies, entre las cuales se destacan, entre otras, el mango, el pistacho y la ciruela. El árbol puede llegar a medir hasta 15 metros, también existen arboles de tamaño mediano de 4 a 6 metros, con un tronco irregular, y otra variedad conocida como árbol enano que mide cerca de 3 metros.

El fruto consta de dos partes: el pseudofruto y la nuez, el pseudofruto es el resultado del desarrollo del pedúnculo en una estructura carnosa característica de esta planta que se desarrolla y madura posteriormente a la nuez, su uso está relacionado con la fabricación de mermeladas, conservas dulces, jaleas, gelatinas, merey pasado, merey seco, vino, vinagre, jugos, etc., también puede consumirse como fruta fresca. El fruto real es la nuez, localizada en la parte externa del pseudofruto y adyacente a este. Es de color gris con forma de riñón, duro y seco de unos 3 a 5 centímetros, en donde se aloja la semilla, la cual es consumida en forma tostada y salada, pero también son utilizadas en pastelería y en confitería.

### **2.8.1. Líquido de la cáscara de la nuez del merey (LCM)**

Es un derivado de la industrialización del merey, la semilla del merey tiene una cáscara de aproximadamente 1/8 pulgada de espesor, dentro de la cual y con una estructura similar a la de un panal de miel, se encuentra un líquido viscoso de color castaño oscuro, este líquido es conocido según sus siglas en inglés como CNSL (Caustic Nut Shell Liquid), que traducido al español significa líquido



cáustico de la cáscara de nuez del merey, LCM, el cual es obtenido durante el tostado de la misma.

#### **2.8.1.1. Aplicaciones y usos del LCM**

Las investigaciones recientes han demostrado que los constituyentes del LCM poseen características estructurales esenciales para la transformación en químicos especiales y polímeros de alto valor. Suministra productos 100% puros químicamente. De esta forma el LCM ofrece un vasto alcance y oportunidades para la producción de químicos especiales, productos y polímeros de alto valor. **(Alvarado, 2004)**

### **2.9. ACERO**

Los aceros son aleaciones hierro - carbono con concentraciones apreciables de otros elementos aleantes. Existen miles de aceros que tienen distintas composiciones y/o tratamientos térmicos. Las propiedades mecánicas dependen del contenido en carbono, que suele ser inferior al 1% en peso. Los aceros más comunes se clasifican según el contenido en carbono: bajo, medio y alto en carbono. Los aceros al carbono solo contienen concentraciones residuales de impurezas distintas al carbono. **(Callister, 1994)**

#### **2.9.1. Tipos de acero**

##### **2.9.1.1 Acero bajo en carbono**

La mayor parte de todo el acero fabricado es bajo en carbono. Este tipo de acero contiene menos del 0,25% en peso de carbono, no responde al tratamiento térmico para formar martensita y es endurecible por acritud. La microestructura consiste en ferrita y perlita. Como consecuencia, estos aceros son relativamente blandos y poco resistentes, pero con extraordinaria ductilidad y tenacidad; además, son de fácil mecanizado, soldables y baratos.



### 2.9.1.2 Aceros medios en carbono

Los aceros medios en carbono tienen porcentajes en carbono comprendidos entre 0,25 y 0,6% en peso. Estos aceros pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido para mejorar sus propiedades mecánicas. Se suelen utilizar en la condición de revenidos, con microestructura de martensita revenida. Se trata de aceros de baja templabilidad, solo tratables en piezas de delgada sección y velocidades de temple muy rápidas. Las adiciones de cromo, níquel y molibdeno mejoran la capacidad de estas aleaciones para ser tratados térmicamente, generando así gran variedad de combinaciones resistencia - ductilidad. Estos aceros tratados térmicamente son más resistentes que los aceros bajos en carbono, pero menos dúctiles y tenaces.

### 2.9.1.3. Aceros altos en carbono

Los aceros altos en carbono normalmente contienen entre 0,60 y 1,4% en peso de carbono y son más duros, resistentes y aún menos dúctiles que los otros aceros al carbono. Casi siempre se utilizan en la condición templada y revenida, en la cual son especialmente resistentes al desgaste y capaces de adquirir la forma de herramienta de corte. Las herramientas y las matrices se fabrican con aceros aleados altos en carbono que contienen, generalmente, cromo, vanadio, tungsteno y molibdeno. **(Callister, 1994)**

## 2.10. ELECTROQUÍMICA

La electroquímica es la rama de la química que estudia la transferencia de cargas eléctricas en las reacciones químicas. Una parte de la electroquímica estudia las reacciones en semiconductores, como transistores y diodos. La corrosión y la protección catódica pertenecen a la rama de la electroquímica que se ocupa de la transferencia de cargas en medios líquidos o acuosos.

En general, la electroquímica se ocupa de medir la respuesta química de un electrodo/electrolito en un sistema ante estimulación eléctrica y el



comportamiento electroquímico de las especies (iones), se puede evaluar, la concentración, la cinética y mecanismos de reacción.

### 2.10.1. Oxidación

Se llama oxidación a la pérdida de uno o más electrones en un átomo o en una molécula, que pasa a ser un ion positivo. Toda vez que un átomo o una molécula ceden electrones, ocurre una reacción de oxidación. El átomo o molécula reducen entonces su carga negativa.

Por ejemplo, cuando un átomo neutro de hierro (Fe) se oxida, puede perder dos o tres electrones, produciendo iones de hierro con carga positiva ( $\text{Fe}^{++}$  o  $\text{Fe}^{+++}$ ).



El electrodo o el sitio sobre el metal donde se verifica la oxidación, se llama ánodo.

Nota: El término oxidación no está necesariamente relacionado con el oxígeno.

### 2.10.2. Reducción

Se llama reducción a la ganancia de uno o más electrones por parte de un átomo o molécula, que pasa a ser un ion con carga negativa o un elemento neutro. Toda vez que un átomo o molécula gana electrones, ocurre una reacción de reducción. El átomo o molécula aumenta su carga negativa.

Por ejemplo, cuando se reduce un ion hidrógeno ( $\text{H}^+$ ), gana un electrón, produciendo un átomo de hidrógeno neutro.



El electrodo o el sitio sobre el metal donde se verifica la reducción se llama cátodo.



### 2.10.3. Celdas electroquímicas

En primer lugar, la corrosión es básicamente un proceso electroquímico que implica interacciones iónicas que conducen a la disolución del metal o deterioro de la superficie. La pérdida de metal (corrosión) ocurre en el ánodo. En el cátodo no se pierde metal (el cátodo está protegido). La corrosión electroquímica se relaciona con la transferencia de electrones a través de las interfaces metal / electrolito. La corrosión que tiene lugar dentro de una celda (o pila) de corrosión, consiste en cuatro partes:

- Ánodo, es un metal en contacto con el electrolito que permite reacciones anódicas a tener lugar.
- Cátodo, es un metal en contacto con el electrolito que permite la reducción de las reacciones que se producen en la superficie.
- Electrolito, es un fluido conductor eléctrico o tierra húmeda.
- Paso (o Camino) Metálico, que está conectado a los electrodos, ánodo y cátodo, el potencial de proporcionar al sistema electroquímico de las reacciones de reducción (electrólisis) o la corriente a través del ánodo al cátodo para proteger de la corrosión.

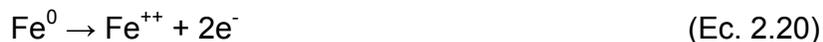
### 2.10.4. Reacciones anódicas

La reacción química en el ánodo, la reacción anódica, es una reacción de oxidación. La corrosión es el resultado de la reacción de oxidación en la celda de corrosión. La oxidación es la pérdida de electrones como se muestra en la siguiente reacción:



Donde n es el número de electrones.

Ejemplos de reacciones anódicas:





### 2.10.5. Reacciones catódicas

La reacción química que tiene lugar en el cátodo, la reacción catódica, es una reacción de reducción. La reducción es la ganancia de electrones. La reacción catódica que efectivamente tiene lugar depende del electrolito. Las que se describen a continuación son dos de las reacciones de reducción más comunes que ocurren sobre la superficie del cátodo, en la figura 2.6 se puede observar las reacciones básicas.

Reducción de Oxígeno - más común en medios neutros.



Reducción de Ion Hidrógeno - más común en medios ácidos.



En el cátodo de una pila de corrosión, nunca hay corrosión.

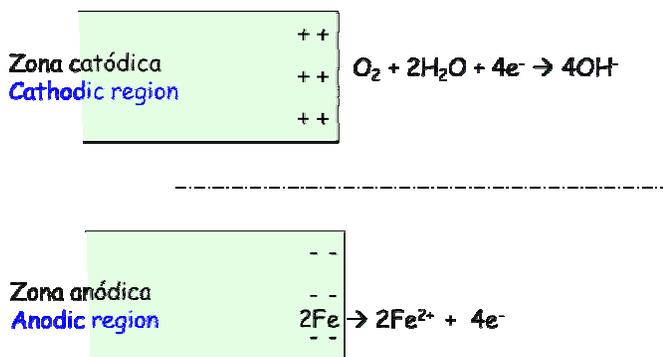


Figura 2.6. Reacción anódica y catódica básica durante un proceso corrosivo.

### 2.10.6. Pila galvánica

Es una celda galvánica, ya que tiene diferentes electrodos metálicos, este evento electroquímico produce energía eléctrica a partir de la energía química almacenada en el ánodo metálico. En consecuencia, la corriente fluye desde el cátodo al ánodo a través del circuito metálico y la energía eléctrica,  $P = E \cdot I$ , son las reacciones de la reacción bajo los principios de la estequiometría



electroquímica, que para la reacción redox se produce de forma espontánea sin la ayuda de una fuente de alimentación externa.

#### **2.10.7. Celda electrolítica**

La corriente fluye hacia la derecha como se muestra en la figura 2.7., pero la fuente de alimentación es externa. La celda tiene electrodos bimetálicos o mono-metálico. La energía que consume esta celda,  $P = I \cdot E$ , y las reacciones que ocurren en esta celda son en la dirección contraria a la galvánica, es decir, las reacciones espontáneas galvánica son impulsadas hacia atrás. Esto es posible si el potencial aplicado es mayor que el potencial galvánico. Este tipo de celdas es muy útil en el campo de la electrometalurgia para la recuperación de metales a partir del óxido de minerales mediante galvanoplastia. Los datos de la estequiometría electroquímica se utilizan para la producción de reacciones electroquímicas en el proceso de electrólisis y los iones del metal se depositan en la superficie del cátodo. La electrólisis es sinónimo de un proceso electroquímico en el que se obliga a la reacción redox (no espontánea) que se produzca pasando corriente directa (DC) a través del electrolito.

#### **2.10.8. Celda de concentración**

Tiene electrodos mono-metálico, pero el ánodo se sumerge en una región de concentración de los electrolitos, como se muestra en la figura. Esta celda tiene los electrodos hechos del mismo metal, y es similar a una galvánica con respecto a la polaridad del electrodo y la dirección del flujo de corriente.

Los electrodos se sumergen en un electrolito no homogéneo, pero el ánodo se coloca dentro de la porción concentrada de los electrolitos para lograr la concentración de las especies.

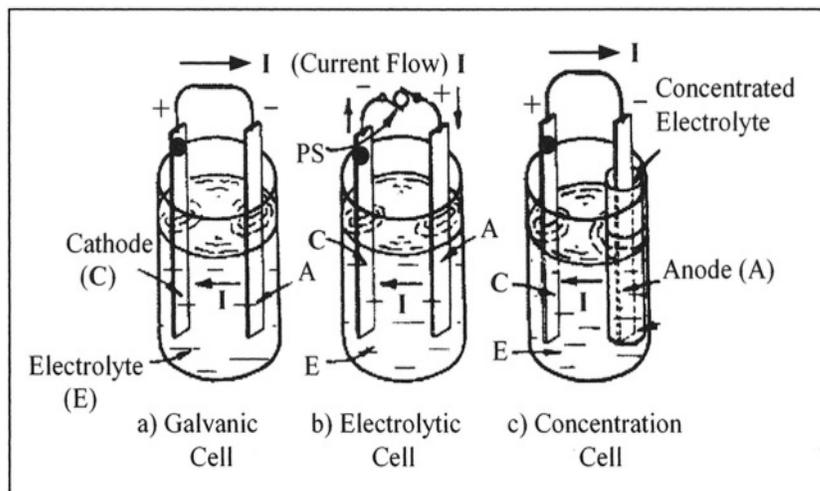


Figura 2.7. Tipos de celdas electroquímicas.

### 2.10.9. Técnicas electroquímicas

Es importante para el ingeniero al estudiar la corrosión, establecer la velocidad a la cual se desarrollan las reacciones catódicas y anódicas, la cual puede ser determinada mediante técnicas electroquímicas como las siguientes:

#### 2.10.9.1. Polarización potenciodinámica

Este proceso es llamado también cinética electroquímica se basa en la ruptura del equilibrio en las reacciones de oxidación – reducción, favoreciendo alguna de las reacciones y dando paso al flujo de electrones. Cuando un electrodo esta en equilibrio con una solución que posee los mismo iones (si no hay reacción que interfiera) su potencial de corrosión se obtiene por la ecuación de Nerst. Al aplicar una corriente a este electrodo el potencial variara en función de la corriente. La diferencia entre estos valores se define como sobre potencial y genera la polarización de la celda electroquímica.

Se pueden encontrar dos tipos de polarización: de activación y por concentración. La polarización de activación está compuesta por varios factores que influyen en la velocidad de transporte del electrón al ion hidrogeno en la superficie metálica y dependen fundamentalmente de la concentración de iones hidrogeno y la temperatura del sistema; esto hace que la velocidad de



desprendimiento del hidrogeno sea característica para cada metal. Por otro lado, la polarización por concentración se refiere al control de las reacciones electroquímicas mediante la difusión de los iones y no por su velocidad de descarga. Depende principalmente de los procesos que se producen en el electrolito en vez de los que se generan en la superficie metálica, el efecto que se observa se debe a que los iones se producen o consumen desde la superficie del electrodo más rápido de lo que se pueden difundir desde o hacia la solución. Generalmente, en la reacción anódica la concentración de iones en torno al electrodo se incrementa mientras que en la reacción catódica la concentración de electrones disminuye lo que produce la polarización del sistema.

La información que proporciona la polarización es importante para predecir las características del sistema corrosivo en cuanto a variables como velocidad de difusión de especies activas, velocidad de corrosión del metal y el efecto que sobre ésta tiene el aumento del flujo de líquido en las tuberías.

#### **2.10.9.2. Potencial de corrosión**

Es una variable muy útil en los estudios de corrosión que se puede obtener fácilmente en el laboratorio y en condiciones de campo, se determina midiendo la diferencia de potencial existente entre el metal sumergido en un medio corrosivo y un electrodo de referencia apropiado. Los electrodos de referencia más usados son el electrodo saturado de calomel, el electrodo de cobre – sulfato de cobre y el electrodo de platino – hidrogeno. Se obtiene la diferencia de potencial entre el metal que se corroe y el electrodo de referencia con la ayuda de un equipo llamado potenciómetro.

La medida del potencial de corrosión debe ser indicada colocando la magnitud y el signo del voltaje obtenido, este valor varía en función del metal, composición del electrolito, temperatura y velocidad de agitación.



### 2.10.9.3. Resistencia a la polarización

Esta técnica mide la resistencia a la polarización ( $R_p$ ) definida como la resistencia del espécimen a la oxidación durante la aplicación de un potencial externo. Se relaciona directamente a la tasa de corrosión y se obtiene una curva de potencial aplicado vs. la corriente medida. El  $R_p$  se determina calculando la pendiente de la región lineal de esta curva.

A través de la aplicación de un barrido de potencial alrededor del potencial de corrosión (una vez que ya está establecido) se registran las corrientes resultantes y se obtiene una gráfica de la curva de potencial vs. densidad de corriente, este resultado se evalúa en corriente cero para obtener el valor de la resistencia a la polarización.

La ecuación 2.25, muestra la relación entre el valor de  $R_p$ , las constantes de tafel y la corriente de corrosión.

$$\Delta E / \Delta i = R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3 \cdot i_{cor} (\beta_a + \beta_c)} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Dónde:

$\Delta E / \Delta i$  = la pendiente de la región lineal =  $R_p$

$\Delta E$  está expresado en voltios (V)

$\Delta i$  está expresado en microamperes ( $\mu A$ )

$\beta_a$  = Constante anódica de tafel expresada en voltios por década de corriente

$\beta_c$  = Constante catódica de tafel expresada en voltios por década de corriente

2,3 = logaritmo natural de 10

$i_{cor}$  = corriente de corrosión ( $\mu A$ )



Evidentemente, para obtener el valor de  $R_p$  se debe conocer el comportamiento de la curva de polarización potencio dinámica para visualizar las ramas anódicas y catódicas del sistema en estudio.

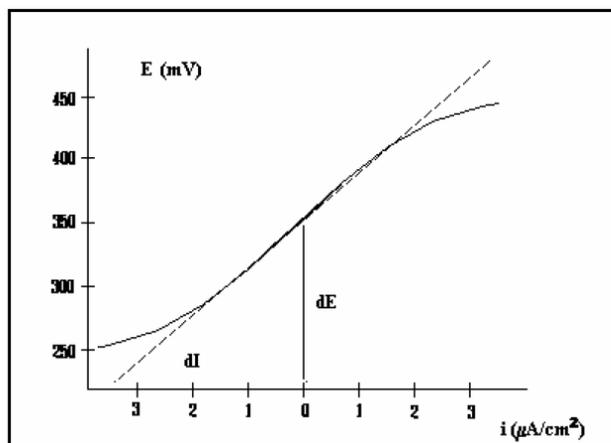


Figura 2.8. Grafica de resistencia a la polarización.

El valor de  $R_p$  puede ayudar a evaluar la capacidad relativa de un material a resistir la corrosión. Como la resistencia a la polarización es inversamente proporcional a la corriente de corrosión, resulta fácil clasificar varios materiales según su valor de  $R_p$ . Asumiendo que todas las muestras tienen la misma área de superficie, los materiales con alto  $R_p$  (y con baja corriente de corrosión) tiene una alta resistencia a la corrosión (relativa para otros materiales).

#### 2.10.9.4. Grafica de tafel

Es una técnica utilizada para determinar la corriente de corrosión ( $i_{cor}$ ) de forma que la tasa de corrosión puede ser calculada. Utilizando la curva de polarización potenciodinámica se obtienen las ramas catódicas y anódicas del sistema en estudio. La grafica de tafel (potencial aplicado vs. el logaritmo de la corriente medida) puede conducir a la corriente de corrosión directamente o puede producir las constantes de tafel ( $\beta_a$  y  $\beta_c$ ). Las constantes de tafel anódica ( $\beta_a$ ) de la región anódica y catódica ( $\beta_c$ ) de la región catódica, pueden ser usadas



con el valor de  $R_p$  (resistencia a la polarización) para calcular corriente de corrosión.

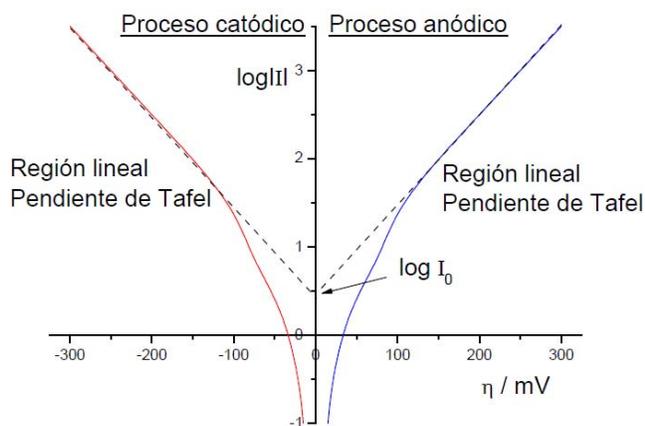


Figura 2.9. Grafica de tafel.

Una vez obtenidas las constantes de tafel con la utilización de las gráficas se puede calcular la corriente y la tasa de corrosión utilizando las ecuaciones 2.26 y 2.27.

$$i_{COR} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 \cdot R_p \cdot (\beta_a + \beta_c)} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$\text{Tasa de Corrosión (mm/año)} = \frac{3.27 \times 10^{-3} \cdot i_{COR} \cdot (E.W.)}{A \cdot d} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Dónde:

$\beta_a$  = Constante anódica de tafel (voltios por década de corriente)

$\beta_c$  = Constante catódica de tafel (voltios por década de corriente)

2,3 = logaritmo natural de 10

$i_{COR}$  = Corriente de corrosión ( $\mu\text{A}$ )

E.W. = Peso equivalente (g/eq)

A = Área ( $\text{cm}^2$ )

d = Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )



#### **2.10.10. Potenciostato**

El potenciostato es un instrumento electrónico que permite imponer a una muestra metálica colocada en un medio líquido y conductor, un potencial constante o variable, positivo o negativo, con respecto a un electrodo de referencia. Este electrodo de referencia no forma parte del circuito de electrolisis y, por el mismo, no circula corriente alguna; es utilizado entonces como referencia para poner a prueba el potencial de la probeta metálica que se está evaluando. Para completar el circuito de electrolisis se utiliza un tercer electrodo, por lo general de un material inerte al medio en el que se realiza el ensayo (por ejemplo, platino o grafito).

Para entender el funcionamiento de este equipo se puede citar un ejemplo, si se toma el hierro como material de prueba y una solución de ácido mineral (muy agresiva con el hierro), el ataque del metal producirá un paso importante de electrones, en forma de iones de hierro con carga positiva hacia la solución. La producción de electrones generara un alto potencial negativo de disolución del hierro en un medio agresivo. Con la ayuda de una fuente externa de corriente será posible acelerar o frenar la emisión de electrones y en consecuencia, aumentar o detener la corrosión del hierro por la modificación de su potencial.

Con el valor del potencial de corrosión y mediante la fuente externa de potencial, se puede aumentar el valor de éste en la dirección positiva (anódica) y obtener el diagrama o curva de polarización potenciostática que resulta de mucha utilidad para predecir el comportamiento de los materiales metálicos en ciertas condiciones dadas.

#### **2.10.11. Electrodo de referencia**

- Electrodo de plata-cloruro de plata: Los electrodos de plata-cloruro de plata (Ag-AgCl) se utilizan para efectuar mediciones en agua de mar, y también en estructuras de hormigón.



- Electrodo de referencia de calomelanos: El electrodo de referencia de calomelanos saturados consiste en mercurio cloruro mercurioso en una solución saturada de cloruro de potasio. Es básicamente un electrodo de laboratorio.
- Electrodo de referencia de zinc: A veces se utiliza el zinc como electrodo de referencia, ya que el potencial de este elemento es relativamente estable. En realidad, el zinc es un pseudoelectrodo de referencia, ya que su potencial puede cambiar según cambia el medio. Para el uso bajo tierra, el electrodo de zinc viene empaquetado en una bolsa de tela que contiene el mismo backfill que se usa en ánodos de zinc. En agua, estos electrodos se utilizan desnudos.
- Dióxido de manganeso: El electrodo de dióxido de manganeso se usa en estructuras de hormigón reforzado.
- Electrodo de grafito: Es un pseudoelectrodo de referencia que a veces se utiliza en estructuras de hormigón reforzado.

### 2.11. SOLVENTE

Es una sustancia que permite la dispersión de otra en su seno. Es el medio dispersante de la disolución. Normalmente, el disolvente establece el estado físico de la disolución, por lo que se dice que el disolvente es el componente de una disolución que está en el mismo estado físico que la disolución. También es el componente de la mezcla que se encuentra en mayor proporción.

Los solventes son compuestos orgánicos basados en el elemento químico carbono. Producen efectos similares a los del alcohol o los anestésicos. Con la introducción del uso del petróleo y sus derivados durante el siglo XX, cada vez son más los productos comerciales que contienen solventes: diluyentes, pegamentos, limpiadores, gasolinas, desengrasantes, etc. Los solventes industriales de mayor uso son los cementos (tricloroetileno, tetracloroetileno), los pegamentos (tolueno, acetato de etilo y varias acetonas), el thinner (destilados de petróleo,



benceno, acetona, tricloroetileno, tetracloroetileno) y los removedores de barniz o pintura (acetona, tolueno, benceno, cloruro de metileno).

Los solventes constituyen un grupo heterogéneo de hidrocarburos volátiles derivados del petróleo y del gas cuyo punto de ebullición es bajo por lo que se evaporan al entrar en contacto con el aire. Su importancia y patrón de uso determinan su clasificación en: solventes activos, cosolventes, solventes latentes, y diluyentes.

## 2.12. SOLUBILIDAD

Es una medida de la capacidad de una sustancia para disolverse en otra. La sustancia que se disuelve se conoce como soluto, mientras que la sustancia donde se disuelve el soluto recibe el nombre de solvente o disolvente. La concentración, por otra parte, hace referencia a la proporción existente entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente en una disolución. La solubilidad puede ser expresada en porcentaje de soluto o en unidades como moles por litro o gramos por litro. Es importante destacar que no todas las sustancias se disuelven en los mismos solventes. El agua es solvente de la sal pero no del aceite, por ejemplo.

La temperatura, es uno de los factores que influye en la solubilidad, así, para muchos sólidos que se encuentran disueltos en agua, la solubilidad aumenta al verse también aumentada la temperatura hasta los 100°C. Sometidos a altas temperaturas, la solubilidad de los solutos iónicos, se ven disminuidos debido a que las propiedades cambian y el agua se convierte en menos polar, al reducirse la constante dieléctrica.

Sin embargo, los solutos en estado gaseoso, muestran un comportamiento algo complejo frente a la temperatura, pues al elevarse la temperatura, los gases tienden a volverse menos solubles (en agua), pero si más solubles en disolventes de carácter orgánicos.

Así, en los compuestos orgánicos, la solubilidad, generalmente aumenta con la temperatura.



La polaridad de las sustancias tiene una gran influencia sobre su capacidad de solubilidad. Hay que tener en cuenta que la solubilidad depende tanto de las características del soluto y del solvente como de la presión ambiental y de la temperatura.

Otro factor que incide en la solubilidad es la presencia de otras especies disueltas en el solvente. Si el líquido en cuestión alberga complejos metálicos, la solubilidad será alterada. El exceso o el defecto de un ion común en la solución y la fuerza iónica también tienen incidencia en la solubilidad.

De acuerdo a las condiciones de la solubilidad, puede hablarse de solución diluida (la cantidad de soluto aparece en mínima proporción de acuerdo al volumen), solución concentrada (con una cantidad importante de soluto), solución insaturada (no alcanza la cantidad máxima tolerable de soluto), solución saturada (cuenta con la mayor cantidad posible de soluto) o solución sobresaturada (contiene más soluto del que puede existir).

Las reglas, obtenidas experimentalmente, hacen que las sustancias se puedan clasificar en: solubles, ligeramente solubles, o insolubles.

- **Solubles:** son las sustancias con una solubilidad superior a 0,02 moles de soluto por litro de disolución.
- **Ligeramente insolubles:** son las sustancias que tienen una solubilidad aproximada de 0,02 moles por litro.
- **Insolubles:** son las sustancias que no llegan a tener una solubilidad de 0,02 moles por litros, pero dado que esta solubilidad no es del todo nula, se suele conocer con el nombre de poco solubles.

### 2.13. MEZCLA

En química, una mezcla es un sistema material formado por dos o más sustancias puras pero no combinadas químicamente. En una mezcla no ocurre una reacción química y cada uno de sus componentes mantiene su identidad y propiedades químicas. No obstante, algunas mezclas pueden ser reactivas, es decir, que sus componentes pueden reaccionar entre sí en determinadas



condiciones ambientales, como una mezcla aire-combustible en un motor de combustión interna.

Los componentes de una mezcla pueden separarse por medios físicos como destilación, disolución, separación magnética, flotación, filtración, decantación o centrifugación. Si después de mezclar algunas sustancias, éstas reaccionan químicamente, entonces no se pueden recuperar por medios físicos, pues se han formado compuestos nuevos. Aunque no hay cambios químicos, en una mezcla algunas propiedades físicas, como el punto de fusión, pueden diferir respecto a la de sus componentes.

Las mezclas se clasifican en homogéneas y heterogéneas. Los componentes de una mezcla pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos.

- **Mezcla homogénea:** Es aquella en la que sus componentes no se perciben a simple vista, ni siquiera con la ayuda del microscopio. Su raíz "homo" significa semejanza de procrear de sí mismo. Está formada por un soluto y un solvente.
- **Dispersión coloidal:** Los coloides son mezclas homogéneas en que las partículas de uno o más componentes tienen al menos dimensiones en el rango de 1 a 1000 por ejemplo si una partícula tendría 8 mm de diámetro la gota de agua tendría un diámetro de 40 KM es decir 400 cuadas.
- **Mezcla heterogénea:** es aquella que posee una composición no uniforme en la cual se pueden distinguir a simple vista sus componentes y está formada por dos o más sustancias, físicamente distintas, distribuidas en forma desigual. Las partes de una mezcla heterogénea pueden separarse mecánicamente.
- **Suspensión:** se denomina a las mezclas que tienen partículas finas suspendidas en un líquido durante un tiempo y luego se sedimentan. En la fase inicial se puede ver que el recipiente contiene elementos distintos. Se pueden separar por medios físicos.



## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL PROYECTO**

La velocidad de corrosión de un metal, va a depender no solo del tipo de metal, sino también de las condiciones del medio en el que se encuentre. En este trabajo se procederá a calcular la velocidad de corrosión de un acero AISI 1045, en una solución salina al 3,5% saturada de CO<sub>2</sub> empleando el líquido extraído de la cascara de la nuez del merey (LCM) como inhibidor a diferentes concentraciones.

Para ello, se seleccionó un solvente adecuado y se probó si el LCM es soluble en éste, se determinarán las características químicas y físicas del acero en estudio y se realizarán pruebas electroquímicas, con las cuales se podrá calcular la velocidad de corrosión del acero en este medio. Al finalizar las pruebas se estudiará la morfología del acero para ver los daños causados por la corrosión en la superficie.

#### **3.1. Selección del solvente y estabilidad de la mezcla**

Los solventes de uso más común para los inhibidores tipo aceite, son compuestos aromáticos, y otros derivados del petróleo de corte más fino, tales como el kerosene, benceno, tolueno, xileno, ya que eso los hace muy buenos para disolver y servir de vehículo dentro del medio al inhibidor, permitiéndole llegar hasta los puntos donde es necesario controlar la corrosión.

Se seleccionó el kerosene por sus ventajas sobre los otros solventes, en cuanto a manejo, almacenamiento y costo, los compuestos aromáticos son cancerígenos y de alto riesgo para su almacenamiento, mientras que el kerosene es fácil de almacenar a temperatura ambiente y sus vapores son menos tóxicos al organismo que los provenientes de los compuestos aromáticos, además de poseer buenas características y ser de uso común como solvente en otras aplicaciones.



Tabla 3.1. Características de algunos solventes comunes

Compuesto	Formula	Pto. Ebullición (°K)	Pto. Fusión (°K)
Kerosene		338,15	179,15
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	353,2	278,6
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	383,8	178
Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	411,15	248,15
Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	354	280

Para determinar la estabilidad de la mezcla se procedió a realizar una solución usando tubos de ensayo, variando la cantidad de líquido extraído de la cascara de la nuez del merey y kerosene de acuerdo a las proporciones indicadas en la tabla 3.2, primero se añade el LCM, luego el kerosene y se agita la mezcla hasta homogeneizar, para luego dejar estabilizar y reposar por un periodo de 72 horas y observar cómo se comporta en el tiempo y si no hay separación de fases entre el soluto y el solvente.

Tabla 3.2. Proporciones mezcla LCM – Kerosene.

Tubo N°	Cant. LCM (ml)	Cant. Kerosene (ml)	Conc. LCM (% v/v)
1	10	0	100%
2	8	2	80%
3	6	4	60%
4	5	5	50%
5	4	6	40%
6	2	8	20%

### 3.2. Caracterización del acero y preparación de la muestra

Las probetas usadas son del tipo cilíndrico de un acero al carbono AISI 1045, con un diámetro promedio de 0,95cm, una altura de 1,27cm, un área promedio de 3,7cm<sup>2</sup>, y una densidad de 7,87 g/cm<sup>3</sup>.



### **3.2.1. Caracterización del acero**

Procedimiento para observar la microestructura del acero:

- Lavar la probeta con un detergente suave.
- Devastar la cara de la probeta con papel de Carburo de Silicio (lija) grano 180.
- Lavar y devastar con papel de Carburo de Silicio (lija) grano 240
- Repetir el procedimiento anterior con papel de Carburo de Silicio (lija) grano 320, 400, 600 y 1200.
- Lavar la probeta con detergente y pulir con alúmina de 0,5 micras en un paño de pulido.
- Lavar la probeta con detergente y pulir con suspensión de pasta de diamante.
- Lavar la probeta con detergente, enjuagar con metanol y secar.
- Aplicar ácido nítrico y metanol en la superficie de la probeta.
- Observar la superficie atacada de la probeta bajo el microscopio a diferentes aumentos.

### **3.2.2. Preparación de las muestras**

Procedimiento para la preparación de las probetas metálicas (electrodo de trabajo):

- Lavar la probeta con un detergente suave para retirar la suciedad de la superficie.
- Comenzar a devastar la probeta con papel de Carburo de Silicio (lija) grano 180.
- Lavar y pasar a devastar con papel de Carburo de Silicio (lija) grano 240.
- Repetir el procedimiento anterior para un papel de Carburo de Silicio (lija) grano 320, 400, 600 y 1200.



- Lavar la probeta con detergente y pulir con alúmina de una micra en un paño de pulido.
- Lavar la probeta con detergente y secar bien para proceder a ingresarla a la celda electroquímica.

### 3.3. Realización de las pruebas electroquímicas para la obtención de las curvas de resistencia a la polarización y polarización potenciodinámica

Las pruebas electroquímicas se realizarán según normas ASTM G5-94 y ASTM G59-97, usando un equipo Gamry® modelo PCI4/300 Potentiostat/Galvanostat/ZRA, cuyas características son mostradas en el anexo A, y una celda electroquímica para pruebas de corrosión marca Gamry® cuyas características se encuentran en la tabla 3.3 y en la figura 3.1 está un ejemplo de una, no termo estatizada, la cual consta de un electrodo de referencia colocado dentro de un lugging, un contra electrodo, un tubo para burbujear gases, y un electrodo de trabajo formado por un porta electrodo y la probeta cilíndrica de acero en el extremo.

Tabla 3.3. Características de la celda electroquímica.

Marca	Gamry®
Modelo	CCK CORROSION CELL KIT
Volumen	1,1 litro capacidad máxima 800 ml aproximadamente en uso normal
Tamaño	14cm diámetro por 30cm de altura incluyendo los electrodos y adaptadores usados
Electrodo trabajo	Cilindro acero AISI 1045 0,95cm diámetro 1,27cm alto.
Electrodo referencia	Calomel saturado (SCE) 8mm diámetro por 15cm largo
Contra electrodo	Barra de grafito de alta densidad 6mm diámetro por 25cm largo

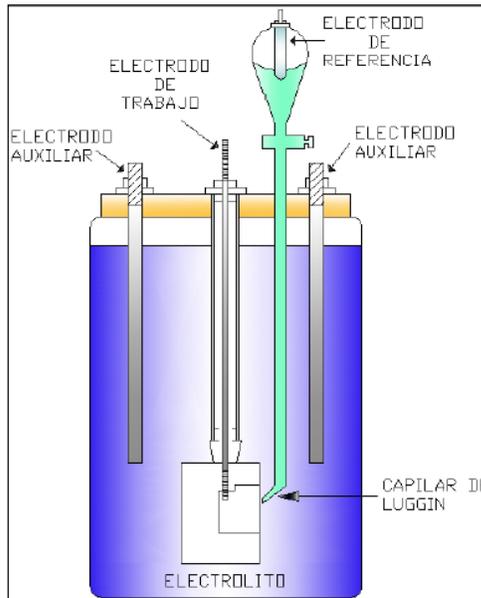


Figura 3.1. Esquema de una celda de corrosión.

### 3.3.1. Pasos a seguir según las normas ASTM mencionadas anteriormente para preparar la celda

- Lavar la celda y sus componentes con un detergente suave, luego curar con agua destilada y proceder a armar la celda.
- Usar un puente salino que acerque el electrodo de referencia a 2 o 3mm de la superficie del electrodo de trabajo, insertar el contra electrodo de grafito y el tubo para burbujear gases.
- Adicionar el electrólito, solución estandarizada de NaCl al 3,5% peso/volumen, preparada con 36 gramos de NaCl sólido, en un matraz aforado de volumen un litro, y completado con agua destilada hasta la línea de aforo, a temperatura de 24°C, misma que se mantendrá en la celda durante el experimento.
- El pH deberá estar dentro de un rango de 6 a 7, para controlarlo se usó una solución de NaHCO<sub>3</sub> 1 molar, preparada a partir de 1 litro de agua destilada y 84,4 gramos de NaHCO<sub>3</sub> sólido grado reactivo, que fue



dosificada dentro de la celda en una cantidad de 10 mililitros, después de ser agregado el electrólito.

- Introducir el electrodo de trabajo, preparado y pulido previamente, tal como se explica en el punto anterior (3.2).
- Realizar las conexiones de los terminales del potencióstato con los electrodos dentro de la celda.
- Burbujear nitrógeno gaseoso dentro de la celda a una tasa de 2,5 libras por pie cubico de presión, por un tiempo de 2 minutos, esto para desalojar el oxígeno que se encuentre presente en la celda.
- Inyectar dióxido de carbono gaseoso a igual tasa y tiempo que el nitrógeno, para saturar la celda de  $\text{CO}_2$  y por consiguiente producir ácido carbónico como producto de la reacción entre el  $\text{CO}_2$  y el agua, el cual actuará como principal agente corrosivo en las pruebas.
- Iniciar las pruebas electroquímicas usando el Gamry® Framework, software provisto por la casa Gamry®, para el uso con el potencióstato PCI4/300 Potentiostat/Galvanostat/ZRA en las pruebas y estudios electroquímicos.

### 3.3.2. Potencial a circuito abierto

- La prueba de potencial a circuito abierto (PCA) fue la primera en ser realizada y tuvo una duración de 55 minutos, ver secuencia de programación en la figura 3.2 y pantalla en la figura 3.3.



Figura 3.2. Programación del potencióstato, prueba de potencial a circuito abierto.

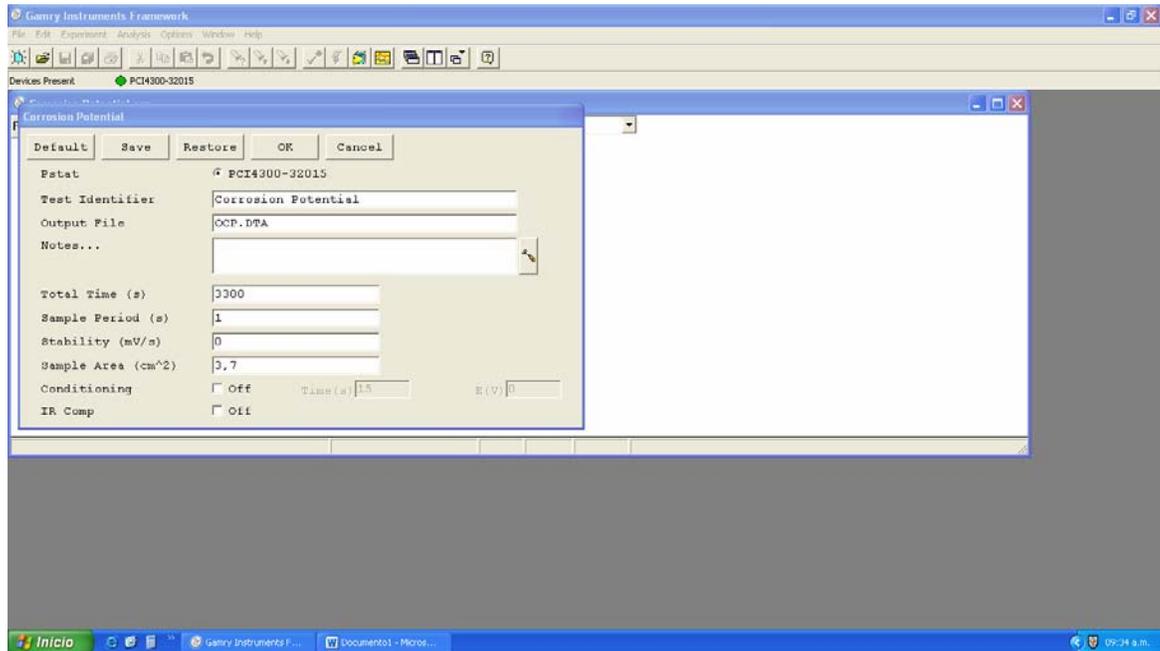


Figura 3.3. Pantalla Gamry Framework, prueba potencial a circuito abierto.

### 3.3.3. Resistencia a la polarización

- En la prueba de resistencia a la polarización se comienza con un voltaje de 30 milivoltios más negativo que el valor del potencial a circuito abierto y termina con un valor de 30 milivoltios más positivo que el valor del PCA, con una velocidad de barrido de 0,167 milivoltios por segundo, ver figuras 3.4 y 3.5.



Figura 3.4. Programación del potencióstato, prueba de resistencia a la polarización.

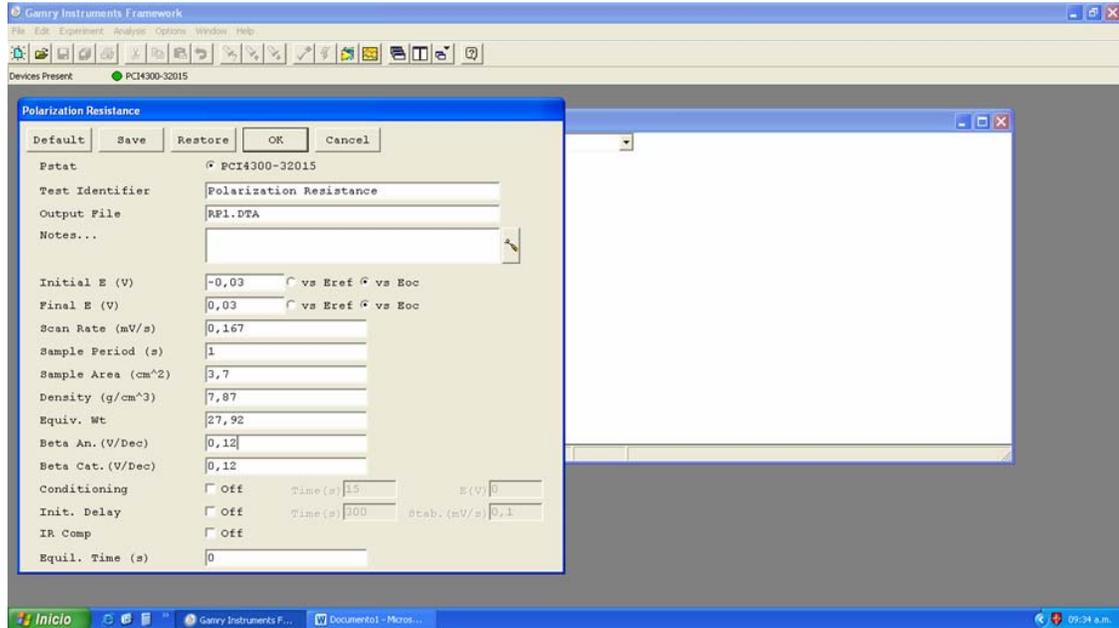


Figura 3.5. Pantalla Gamry Framework, ensayo de resistencia a la polarización.

### 3.3.4. Polarización potencia dinámica

- La polarización potencia dinámica se inicia con un voltaje de 50 milivoltios menor al obtenido en el PCA y un voltaje final de 50 milivoltios mayor al obtenido en el PCA, con igual velocidad de barrido que la usada en la prueba de resistencia a la polarización. Ver figuras 3.6 y 3.7.



Figura 3.6. Programación del potencióstato, prueba polarización potenciodinámica.

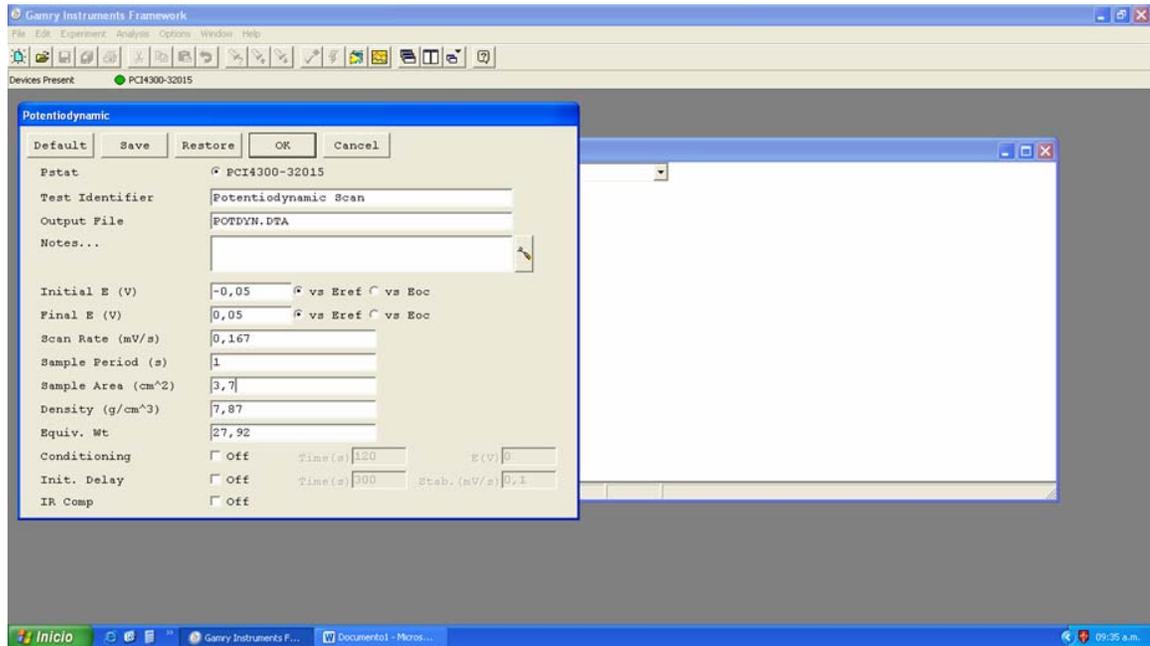


Figura 3.7. Pantalla Gamry Framework, ensayo polarización potenciodinámica.

De estas tres pruebas se obtuvieron las gráficas de tafel (ver figura 3.8) y de resistencia a la polarización (ver figura 3.9), necesarias para determinar los valores del  $E_{corr}$ ,  $i_{corr}$ , constantes de tafel anódica ( $\beta_{anódica}$ ) y catódica ( $\beta_{catódica}$ ), y la tasa o velocidad de corrosión.

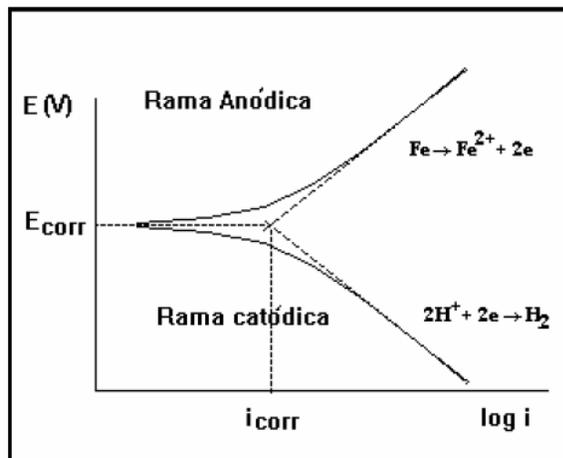


Figura 3.8. Grafica de tafel para determinar  $\beta_a$  y  $\beta_c$ .

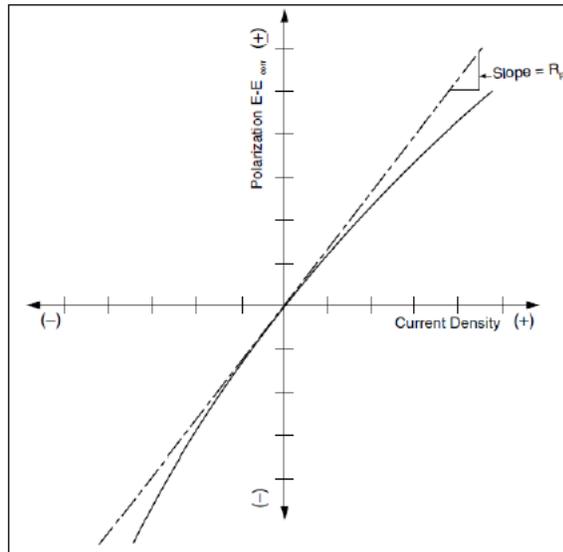


Figura 3.9. Gráfica de Resistencia a la Polarización, para determinar  $E_{cor}$ ,  $i_{cor}$ .

El procedimiento está descrito para realizar los ensayos con un blanco sin adición de LCM, o muestra patrón, sin presencia de inhibidor en la celda. El procedimiento es similar para los ensayos con inhibidor (LCM – kerosene), solo que éste se agrega en el paso después de adicionar el  $\text{NaHCO}_3$  para controlar el pH, en una proporción de 300 ppm cuya relación en este caso es de 300 micro litros para la celda cargada a 1 litro de solución salina, para dosificar el inhibidor dentro de la celda se utilizó una micropipeta, y debe realizarse antes de introducir el electrodo de trabajo y desalojar el oxígeno, para evitar que con la dosificación del inhibidor ingrese oxígeno nuevamente a la celda.

#### **3.4. Estudio de la morfología superficial de las probetas luego de realizadas las pruebas electroquímicas.**

Para estudiar la morfología de las probetas se empleó una lupa estereoscópica con un aumento de 5X y en microscopio con un aumento de 50X y 100X para ver el detalle de los ataques que sufrió el metal, de acuerdo a los siguientes pasos:



- Una vez terminadas las pruebas electroquímicas, se retiró la probeta de la celda y se lava con un detergente suave y un cepillo de cerdas suaves.
- Se seca y resguarda la muestra del aire ambiente, envolviéndola en papel absorbente grueso y guardándola en un lugar sin humedad.
- Se lleva la muestra bajo la lupa y el microscopio, de ser posible el mismo día o al siguiente, se observa toda la superficie de la probeta y se guarda registro fotográfico y documentado de las características más resaltantes en ella presentes, para su posterior análisis.
- Una vez hecho el estudio y tomadas las fotografías de la superficie se guarda nuevamente la probeta para protegerla de las condiciones ambientales en caso de ser necesaria posteriormente.
- Con las fotos y anotaciones tomadas se procedió a realizar un análisis de la morfología en la superficie de la probeta y así saber las proporciones del ataque corrosivo.



## **CAPITULO IV**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En esta investigación se determinó mediante técnicas electroquímicas la velocidad de corrosión de probetas de acero al carbono AISI 1045, empleando mezclas del líquido extraído de la cascara de la nuez del merey (LCM) con kerosene como solvente en concentraciones de 20, 40, 50, 60, 80 y 100%, en un medio de NaCl al 3,5% saturado con CO<sub>2</sub>.

#### **4.1. Determinación de la solubilidad y estabilidad de la mezcla LCM - Kerosene.**

La mayoría de los aceites son insolubles en agua, pero si solubles en gran medida en compuestos derivados de los hidrocarburos, por ello en esta investigación se empleó un componente proveniente de ellos, la decisión de usar el kerosene en el presente trabajo se debe a la cualidad que ha demostrado en otras industrias como disolvente de aceites muy viscosos y pesados, además de ser fácil de conseguir, almacenar y manipular, y por tener un costo bajo en comparación con otros solventes derivados de los hidrocarburos.

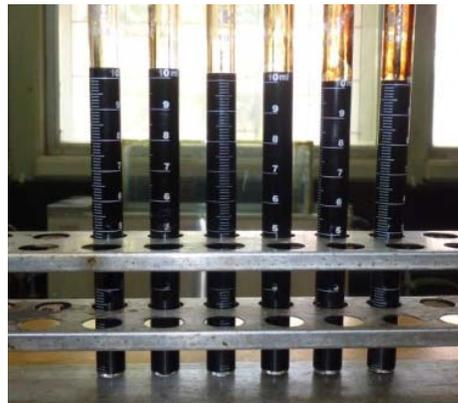


Figura 4.1. Mezcla LCM – Kerosene, concentraciones de LCM de izquierda a derecha, 100%, 80%, 60%, 50%, 40%, 20%.



Una vez preparadas cada una de las mezclas de aceite – kerosene en los tubos de ensayo, se agitaron hasta homogenizar cada una de ellas, y se observó que no hubo separación entre soluto y solvente en ninguno de los casos (ver figura 4.1), por lo cual se puede decir que la disolución fue total y el kerosene funciona como solvente para el LCM. Para ver la estabilidad de la solución preparada, se dejó reposar la mezcla por un periodo de 72 horas continuas a condiciones ambiente entre 26 y 30 grados centígrados.

Transcurridas las 72 horas de reposo para las soluciones sin ninguna perturbación, se observó que no hubo ningún tipo de separación entre el LCM y el Kerosene, por lo cual se considera que la solubilidad del soluto en el solvente es total, y la estabilidad de la mezcla es buena, ya que no hay separación de fases y por consiguiente no es necesaria la adición de ningún tipo de aditivo o la aplicación de algún tratamiento adicional si se deja la mezcla por un largo periodo de tiempo sin manipular, como una nueva agitación para volver a homogenizar la solución, puesto que ésta se mantiene homogénea una vez preparada y agitada la primera vez.

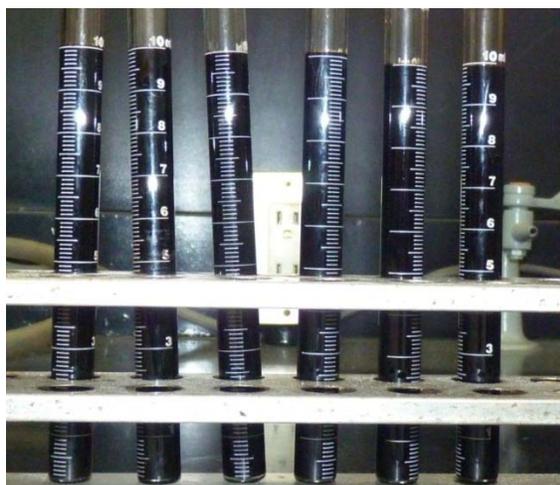


Figura 4.2. Mezcla LCM – kerosene, transcurridas 72 horas de reposo, concentraciones de LCM de izquierda a derecha, 100%, 80%, 60%, 50%, 40%, 20%.



## **4.2. Caracterización de la probeta de acero**

Las características de dureza, maleabilidad, y resistencia de los aceros varían dependiendo de la concentración de los diversos metales que se encuentren presente en él, así como su microestructura. El acero usado durante los ensayos es un AISI 1045, tiene una composición química la cual se puede apreciar en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Propiedades químicas para el acero AISI 1045.

% carbono	% Manganeso	% Fosforo	% Azufre
0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,04 máximo	0,05 máximo

Al observar las propiedades químicas de este acero se puede decir que es un acero medio en carbono, el cual es utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarias en condición de suministro, puede ser forjado con martillo. Responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción, pero no es recomendado para cementación o cianurado. Por sus características de temple, se tiene una amplia gama de aplicaciones automotrices y de maquinaria en general, en la elaboración de piezas como ejes y semiejes, cigüeñales, piñones, cuñas, tornillos, partes de maquinaria, herramientas agrícolas y remaches, de resistencia media.

Para determinar la microestructura de la probeta de acero usada durante la investigación, se procedió primero a preparar la probeta con lijado y pulido como se explicó en la sección 3.2 del capítulo 3, y luego fue atacada con una solución de ácido nítrico y metanol, conocida como nital, secando y limpiando la superficie objeto del ataque, para llevarla bajo el microscopio.

Al observar bajo el microscopio la superficie de la probeta se pudo ver la microestructura expuesta luego del ataque, y encontrándose que es de perlita – ferrita, ver figuras 4.3 y 4.4, donde la parte más clara es la perlita y la parte oscura es ferrita, esta microestructura es característica de aceros con contenido medio en carbono y cuyo proceso de fabricación es por revenido, donde se



calienta hasta temperaturas muy altas y luego se enfría de forma muy lenta para darles mayor grado de dureza que el de los aceros bajo en carbono, aunque esto los hace menos dúctiles y maleables para la fabricación de algunas piezas los hace excelentes para otros usos industriales por su resistencia, en comparación con los aceros bajo carbono.



Figura 4.3. Microestructura de la probeta de acero, magnificación de 300X.

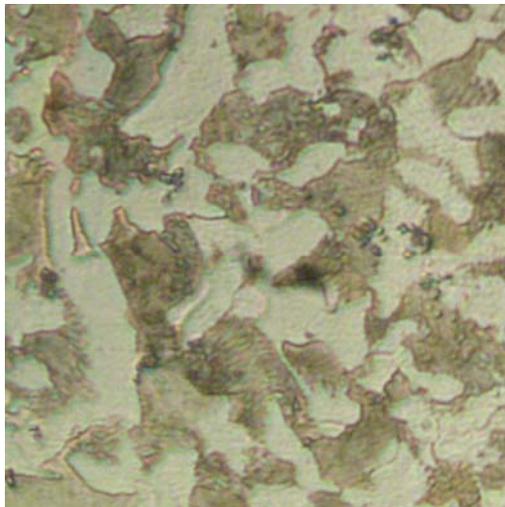


Figura 4.4. Microestructura de la probeta de acero usada, magnificación de 750X.



### **4.3. Determinación de la velocidad de corrosión a partir de las gráficas de resistencia a la polarización y polarización potenciodinámica**

La determinación de la velocidad de corrosión a partir de gráficas de potencial de corrosión a circuito abierto, resistencia a la polarización y polarización potenciodinámica es un método que consiste en determinar las pendientes a las curvas características de cada tipo de gráfica en específico y a partir de ese valor y con la ayuda de ecuaciones empíricas y correlaciones, obtener el valor de la tasa de corrosión para un material específico, en un medio dado a condiciones características del medio, y de esta manera saber que tanto daño le causa el medio (solución salina) al material y cuál es la resistencia que opone el material a dicho daño.

Para el estudio de la velocidad de corrosión de una probeta de acero AISI 1045, expuesto a una solución salina de NaCl al 3,5% saturado con CO<sub>2</sub> se ajustó el pH en 6,40 agregando NaHCO<sub>3</sub> y la temperatura fue de 26 grados °C, se empleó LCM a concentraciones de 20 a 100% en kerosene en dosis de 300 ppm. Se programaron y realizaron ensayos de potencial a circuito abierto, resistencia a la polarización y polarización potenciodinámica, y se determinaron los siguientes parámetros: potencial a circuito abierto ( $E_{corr}$ ), resistencia a la polarización ( $R_p$ ), constante de tafel anódica ( $\beta_a$ ), constante de tafel catódica ( $\beta_c$ ) y la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ).

#### **4.3.1. Potencial a circuito abierto**

Se determinó midiendo la diferencia de potencial existente entre la probeta de acero AISI 1045 sumergida en la solución salina y un electrodo de referencia de calomel saturado, por un tiempo de 55 minutos. Las gráficas obtenidas para el potencial a circuito abierto se muestran en la figura 4.5 y el anexo B, estas dan información importante que se puede utilizar para ver como es el comportamiento del sistema con el tiempo, cómo reacciona ante perturbaciones externas y cuando se alcanza la estabilidad del sistema y se mantiene constante el PCA.



En la figura 4.5, se muestran las curvas del potencial a circuito abierto para las diferentes concentraciones de LCM (inhibidor de corrosión) usadas, y para la muestra sin inhibidor. En ella se observa que todas las concentraciones salvo la de 20% están cercanas unas a otras, además se mantienen constantes y sin perturbaciones a partir de los 1000 segundos, esto indica, que el sistema a partir de ese tiempo se estabiliza y mantiene la mismas condiciones sin ningún cambio, no hay desplazamiento del inhibidor dentro del medio ni hacia la superficie metálica, mientras que la de concentración 20% no mantiene la misma tendencia, no porque el sistema no se estabilice, sino porque a esa concentración el inhibidor, se desplaza constantemente del medio a la probeta metálica y viceversa, estas observaciones fueron hechas de forma visual en la celda mientras se realizaban los ensayos electroquímicos.

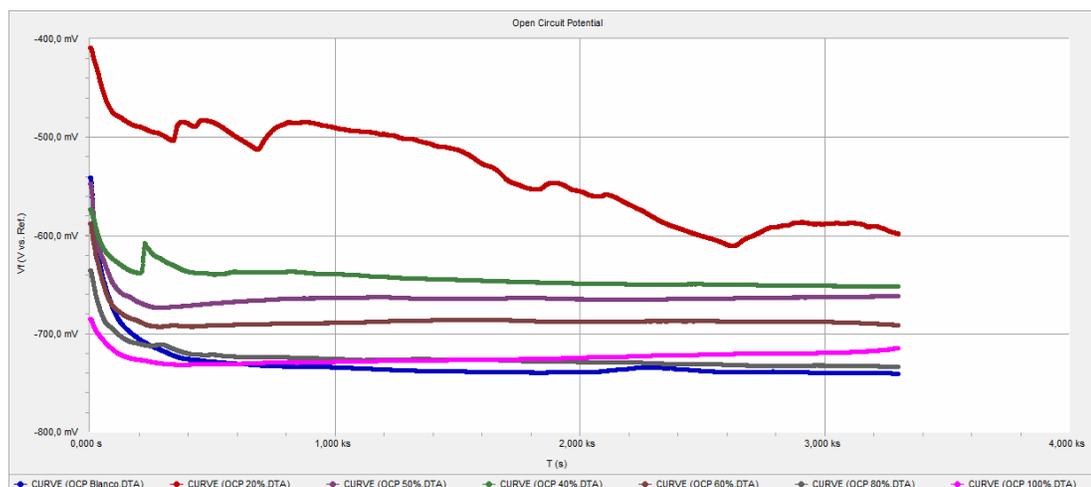


Figura 4.5. Potenciales a circuito abierto para diferentes concentraciones de LCM.

Se encontró que a medida que disminuye la concentración de LCM en relación con el kerosene el potencial de corrosión se hace menos negativo, esto ocurre por el efecto de inhibición que realiza el LCM sobre la superficie de la probeta metálica e indica que el proceso de corrosión está siendo menor o que



la velocidad a la cual este ocurre está disminuyendo. El potencial de corrosión obtenido para la muestra sin inhibidor al final de la prueba fue de -738,40 mV, y para cada una de las diferentes concentraciones de inhibidor fue para 100% LCM de -715,10 mV, 80% LCM de -735,4 mV, 60% LCM de -694,10 mV, 50% LCM de -663,00 mV, 40% LCM de -651,50 mV y 20% LCM de -600,30 mV. Estos valores se observan en la figura 4.5 donde están representadas las curvas de potencial a circuito abierto para cada una de las diferentes concentraciones.

#### **4.3.2. Polarización potenciodinámica**

Esta prueba se basa en la ruptura del equilibrio en las reacciones de oxidación – reducción, favoreciendo alguna de las reacciones y dando paso al flujo de electrones de la probeta de acero al medio, esto se consigue aplicando una rampa de potencial, que en esta investigación comienza con un voltaje 50 mV más negativo que el potencial de corrosión obtenido a circuito abierto y termina con un voltaje 50 mV menos negativo que el potencial de corrosión a circuito abierto y usando una velocidad de barrido de 0,167 mV/s.

Los resultados obtenidos del ensayo potenciodinámico son conocidos como grafica de tafel, y permiten conocer los valores de las constantes anódica y catódica de tafel ( $\beta_a$  y  $\beta_c$ ), a partir del cálculo de la pendiente para cada rama, este cálculo se hace a través del programa Echem Analyst provisto por Gamry® para el análisis de los resultados en los ensayos electroquímicos.

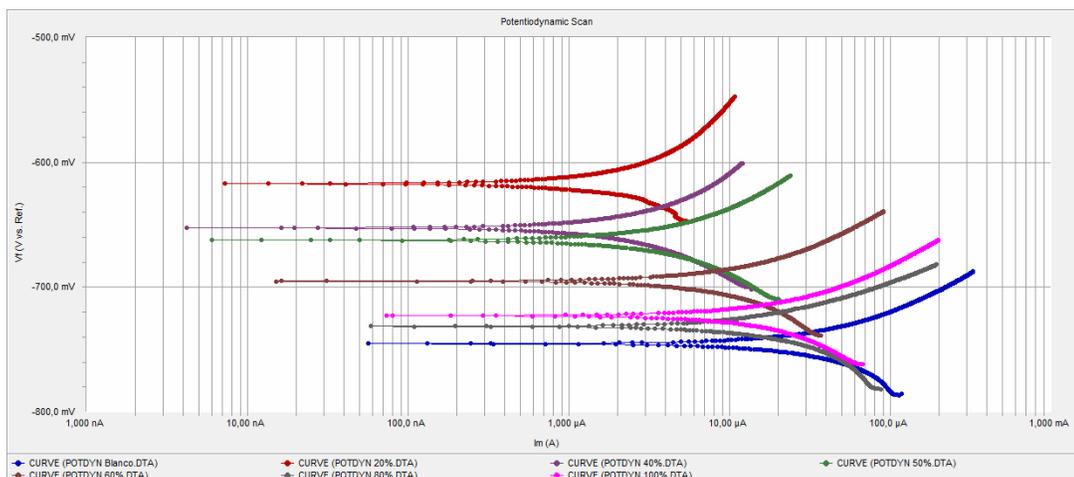


Figura 4.6. Graficas de tafel para diferentes relaciones de LCM – Kerosene.

Al observar la figura 4.6, se puede ver la forma característica de la gráfica de tafel para las diferentes concentraciones de LCM – kerosene usadas en las pruebas, el desplazamiento entre una curva y otra se debe a la diferencia de potencial existente entre ellas, esta diferencia ocurre, por el efecto que causa el LCM como inhibidor en el proceso corrosivo el cual ocurre durante el ensayo potenciodinámico. El inhibidor recubre la probeta metálica, no permite que sea atacado por el agente corrosivo ( $\text{CO}_2$ ) logrando un potencial más noble (menos negativo) con respecto a la probeta que no tiene inhibidor. La amplitud y forma de las curvas está directamente relacionada con el valor de la pendiente, mientras más abierta y pronunciada sea la curva, mayor será el valor de las constantes de tafel y mientras más cerrada y lineal tienda a ser la curva menor será el valor de las constantes de tafel, este criterio aplica tanto para la zona anódica como para la zona catódica, por lo que se puede deducir que en una gráfica de tafel cuyas curvas sean perfectamente simétricas el valor de  $\beta_a$  y  $\beta_c$  será igual. En la tabla 4.2, se muestran los valores de las constantes  $\beta_a$  y  $\beta_c$  para cada una de las curvas observadas en la figura 4.6.



Tabla 4.2. Valores de  $\beta_a$  y  $\beta_c$  para diferentes concentraciones de LCM.

Concentración	Blanco	20%	40%	50%	60%	80%	100%
$\beta_a$ (V/dec)	0,0884	0,3213	0,1328	0,0875	0,0551	0,0924	0,0867
$\beta_c$ (V/dec)	0,2723	0,1345	0,1207	0,0978	0,0752	0,1837	0,1682

### 4.3.3. Resistencia a la polarización

El método consiste en la aplicación de un sobre-potencial, respecto del potencial de equilibrio, lo suficientemente pequeño como para no alterar el sistema pero suficiente como para poder conocer cuál es el comportamiento del electrodo en ese medio frente a las reacciones de oxidación y de reducción. El sobre potencial usado en esta investigación comenzó en 30 mV más negativo que el potencial de equilibrio y termino en 30 mV más positivo que el potencial de equilibrio, usando una velocidad de barrido de 0,167 mV/s.

Los valores de  $\beta_a$  y  $\beta_c$  obtenidos en el paso anterior son usados en conjunto con las gráficas obtenidas para resistencia a la polarización, ver figura 4.7, con el programa Echem Analyst aplicando las ecuaciones 2.26 y 2.27, para calcular la resistencia a la polarización, el potencial de corrosión ( $E_{cor}$ ), la corriente de corrosión ( $i_{cor}$ ) y la velocidad de corrosión para cada concentración de LCM usada durante las pruebas, para así comparar los resultados de las diferentes concentraciones usadas y decidir cuál es la más efectiva y eficiente en el control de la corrosión para las condiciones dadas.

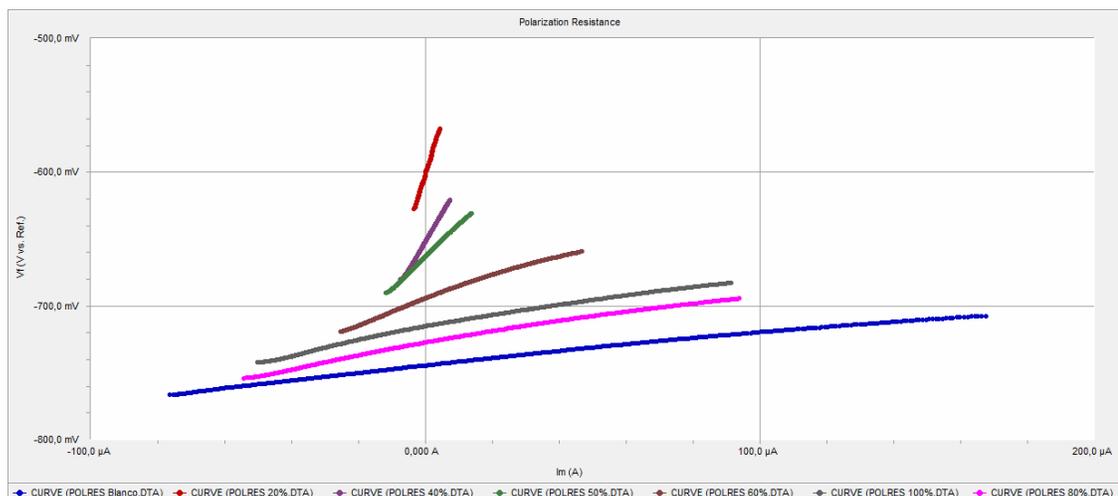


Figura 4.7. Graficas de resistencia a la polarización para diferentes concentraciones LCM.

En la figura 4.7, se muestran las curvas de resistencia a la polarización para la muestra sin inhibidor y las muestras con diferentes concentraciones de inhibidor, al observar las curvas se puede notar que existe una tendencia a ser más verticales a medida que disminuye la concentración de LCM en la mezcla del inhibidor, esto debido a que a menor concentración de LCM, la corriente de corrosión ( $i_{cor}$ ) disminuye, porque se hace más difícil que circule a través de la muestra y con ello se disminuye la intensidad de la corriente, el diferencial de voltaje se mantuvo constante en 60mV para todos los ensayos realizados sin presencia de inhibidor y con presencia de inhibidor. Por lo que se puede decir que a menor concentración, el LCM ofrece mejor efecto inhibidor del proceso corrosivo. Partiendo de los valores de las constantes de tafel anódicas y catódicas ( $\beta_a$  y  $\beta_c$ ), obtenidos por el ensayo potenciodinámico, y las curvas obtenidas para  $R_p$ , se procede a calcular los valores de  $R_p$ ,  $E_{cor}$ ,  $i_{cor}$ , y velocidad de corrosión, usando el programa Echem Analyst de Gamry® y las ecuaciones 2.26 y 2.27, los resultados de resistencia a la polarización ( $R_p$ ), potencial de corrosión a circuito abierto ( $E_{cor}$ ), corriente de corrosión ( $i_{cor}$ ) y



velocidad de corrosión obtenidos para cada una de las concentraciones de LCM probadas, son expresados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Resultados de Rp, Ecor, icor y velocidad de corrosión.

Concentración	Rp (omhs)	Ecor (mV)	icor (μA)	Velocidad de corrosión (mpy)
Blanco	252,7	-738,40	114,700	14,160
20%	8023,00	-600,30	5,131	0,634
40%	4232,00	-651,50	6,488	0,801
50%	2431,00	-663,00	8,248	1,019
60%	876,60	-694,10	15,750	1,945
80%	347,10	-735,4	48,710	6,015
100%	435,80	-715,10	57,010	7,040

Usando los resultados expresados en la tabla 4.3, se puede calcular la eficiencia del inhibidor partiendo de la ecuación 4.1.

$$Eficiencia = \frac{CR_m - CR_{inh}}{CR_m} * 100 \quad (Ec. 4.1)$$

Dónde:

Eficiencia: es la eficiencia del inhibidor, que va de 0% a 100%.

CR<sub>m</sub>: velocidad de corrosión de la muestra sin inhibidor.

CR<sub>inh</sub>: velocidad de corrosión de la muestra aplicando el inhibidor.

Si se aplica la ecuación 4.1, para una concentración de inhibidor del 100%, tomando los datos necesarios de la tabla 4.3, se obtiene el siguiente resultado:

$$Eficiencia = \frac{14,160 - 7,040}{14,160} * 100 \quad (Ec. 4.2)$$



$$\text{Eficiencia} = 50,28\% \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Repitiendo el mismo procedimiento para las diferentes concentraciones de LCM usadas, se calcula la eficiencia de cada concentración y se reporta en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Eficiencia del LCM como inhibidor a diferentes concentraciones.

<b>Concentración</b>	100%	80%	60%	50%	40%	20%
<b>Eficiencia</b>	50,28%	57,52%	86,26%	92,80%	94,34%	95,52%

De los resultados expresados en las tablas 4.3 y 4.4, y comparándolos entre ellos, se concluye que la mejor concentración y donde el inhibidor demostró ser más eficiente ocurre cuando se emplea una concentración 20% LCM - kerosene, observando con mayor detenimiento todos los resultados se puede ver que existe una tendencia al aumento de la eficiencia del inhibidor a medida que disminuye su concentración en relación con el kerosene, esto se debe a la viscosidad de la mezcla, a menor concentración de LCM la viscosidad es más baja, y se difunde mejor en el medio, logrando un mayor recubrimiento de la probeta de acero, por consiguiente se obtiene una mayor protección al ataque corrosivo del medio.

También se puede decir que esta concentración del 20% ofrece mejores resultados por la relación costo beneficio, al aplicar LCM puro solo se consigue un 50% de eficiencia, por el alto costo que representa la obtención del LCM, y la poca protección que ofrece, mientras que aplicando dosis en las cuales el LCM se encuentra en menor cantidad, hay mayor protección y menor consumo, lo que resulta en costos más bajos para la fabricación de un inhibidor a partir del LCM.



Al observar la figura 4.8, se puede ver cuál es el comportamiento del potencial a circuito abierto para tres muestras de una concentración de LCM al 20% en kerosene, se observa que hay diferencias significativas entre unas y otras al comienzo del experimento, pero a medida que avanza el tiempo las tres muestras tienden a estar dentro del mismo rango para un valor de potencial a circuito abierto de -597,40 mV a -617,00 mV, estas diferencias se pueden deber a perturbaciones sufridas por la celda como algún movimiento brusco o agitación del medio dentro de la celda, mal contacto entre los terminales de los electrodos y el potencióstato, alguna burbuja presente en la superficie de la probeta de acero, o alguna otra perturbación.

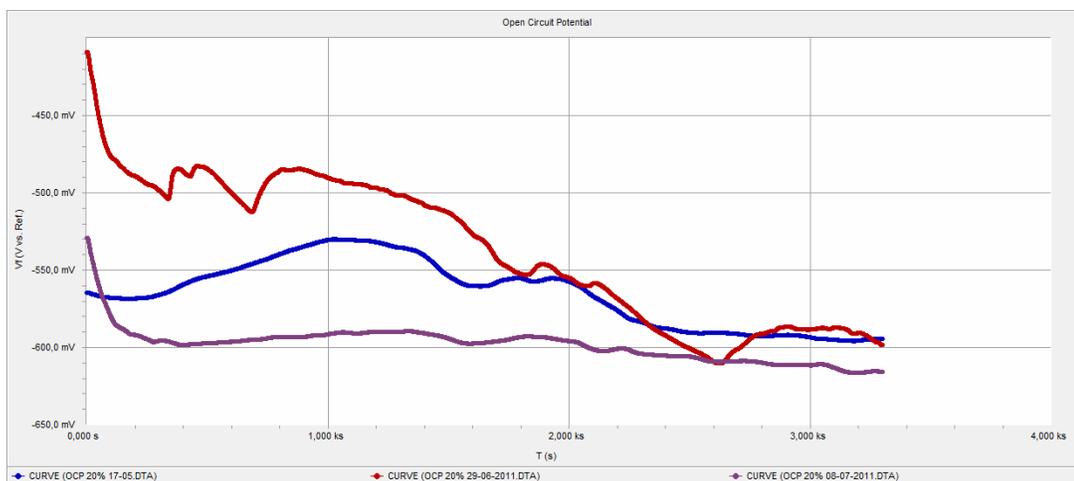


Figura 4.8. Potenciales a circuito abierto para 20% LCM en kerosene.

Observando la figura 4.9, donde se muestran las gráficas de tafel para tres pruebas de concentración 20% LCM en kerosene, se puede ver la repetitividad de los resultados, aunque existen pequeños desplazamientos entre una curva y otra, esto debido muy posible a pequeños cambios o imperfecciones en la superficie de la probeta metálica, o perturbaciones en la celda.

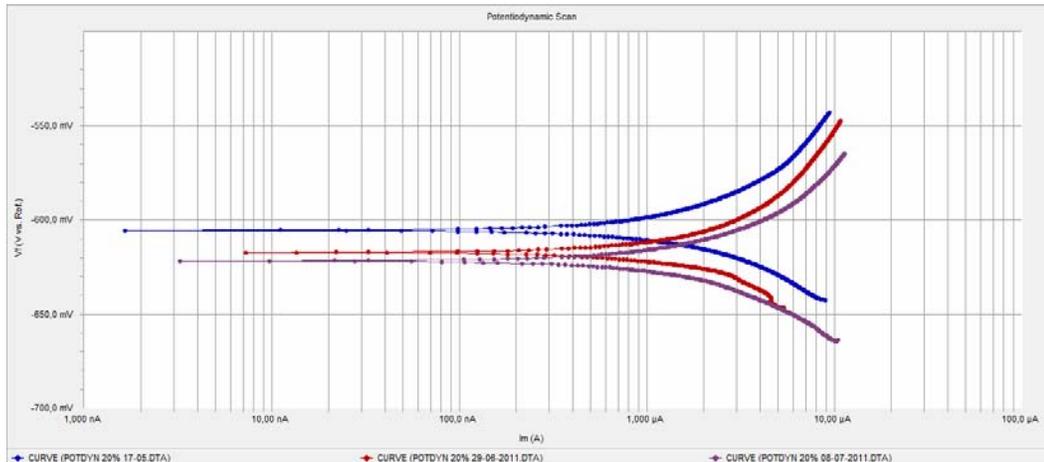


Figura 4.9. Graficas de tafel para 20% LCM en kerosene.

En la figura 4.10, se muestran las curvas de resistencia a la polarización, para tres experiencias a una concentración de 20% LCM en kerosene, que resultó ser la más eficiente de todas las concentraciones probadas, se puede ver un pequeño desplazamiento entre las curvas, esto debido a los mismos desplazamientos ocurridos en las gráficas de tafel, mas sin embargo no es motivo para dudar de la repetitividad de los resultados ni de lo eficiente del inhibidor a esa concentración.

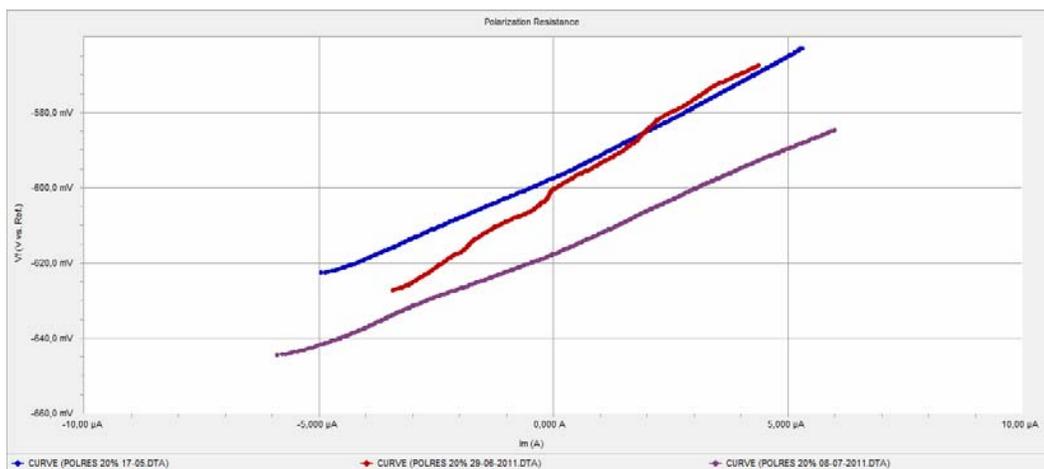


Figura 4.10. Graficas de resistencia a la polarización para 20% LCM en kerosene.



#### 4.4. Morfología superficial después de las pruebas electroquímicas

Las pruebas electroquímicas dan excelentes resultados que permiten determinar si ocurre el fenómeno de la corrosión y la velocidad a la que este se da, pero no ofrece datos sobre que fenómeno corrosivo es el que ocurre y que tanto daño sufre la probeta a raíz de este fenómeno, por ello se hace necesario recurrir a este método, donde simplemente se observo bajo el microscopio la probeta metálica que fue usada en el ensayo para la muestra patrón o blanco y la probeta metálica usada para la concentración de 20% LCM en kerosene, para así poder determinar el tipo de corrosión que ocurre por acción del medio y que daño causo en la superficie de la probeta metálica.

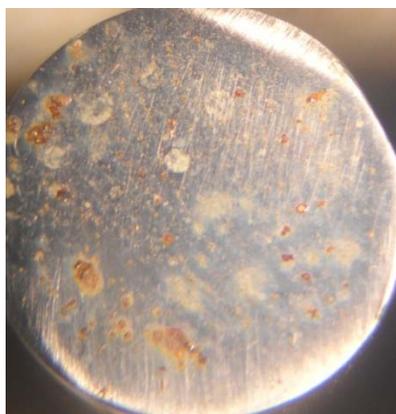


Figura 4.11. Blanco después del ensayo electroquímico, lupa estereoscópica a 5X.

Al observar las figuras 4.10, 4.11 y 4.12, se puede ver el daño que causa el medio sobre la probeta de acero AISI 1045 sin inhibidor. En la figura 4.10, foto tomada con una lupa estereoscópica a 5X, se aprecian pequeñas manchas de diferentes tamaños dispersas en la superficie, estas manchas son depósitos de herrumbre un producto de la corrosión, la presencia de esta herrumbre indica que efectivamente se da el fenómeno de la corrosión en la superficie de la probeta.



La figura 4.11, es una foto tomada bajo el microscopio a 150X, donde se observa una zona pequeña de corrosión uniforme, y varios puntos pequeños que indican corrosión por picadura o localizada.

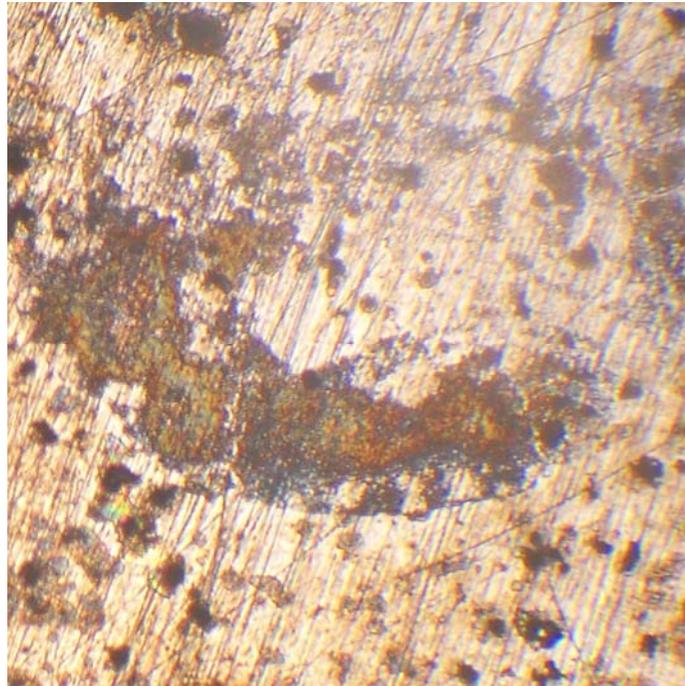


Figura 4.12. Blanco después del ensayo electroquímico, magnificación 150X.

En la figura 4.12, tomada bajo el microscopio a 300X, se observan varios puntos pequeños indicativos de corrosión por picadura, y no se observan zonas de corrosión uniforme, por lo que se puede decir que la zona de corrosión uniforme observada con una magnificación de 150X, figura 4.11, son varias zonas de corrosión por picadura muy cercanas entre si y que ya alcanzaban un tamaño mayor. La corrosión por picadura o localizada es el mecanismo típico de corrosión por dióxido de carbono, y era de esperar que fuera el que ocurriera en las superficie de las probetas metálicas durante las pruebas electroquímicas.

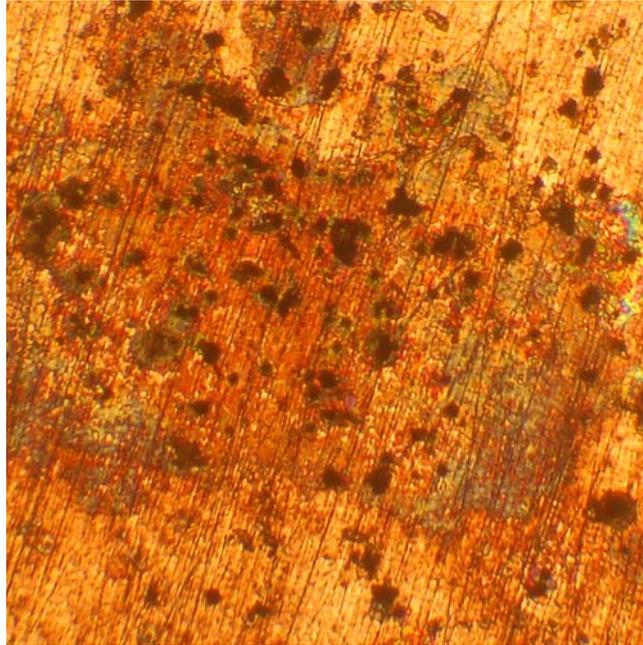


Figura 4.12. Blanco después del ensayo electroquímico, magnificación 300X.

En las figuras 4.12, 4.13 y 4.14, se observa la superficie de la probeta de acero AISI 1045 sometida a una prueba electroquímica donde se empleó la mezcla de 20% LCM en kerosene, como inhibidor de corrosión. En la figura 4.12, foto tomada en una lupa estereoscópica a 5X, está libre de manchas o puntos que podrían indicar ataques corrosivos en la superficie.

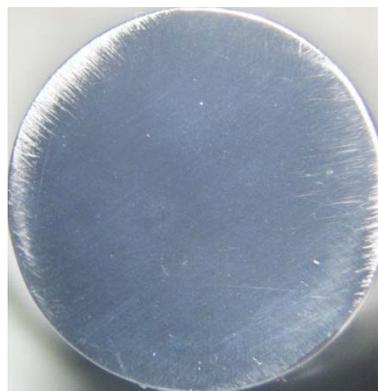


Figura 4.13. Mezcla 20% LCM – kerosene después del ensayo electroquímico,  
lupa estereoscópica a 5X.



La figura 4.13, es una foto tomada bajo el microscopio a 150X, en esta foto tampoco se aprecian zonas o puntos que indiquen haya ocurrido algún tipo de ataque corrosivo en la muestra, solo se ven líneas en la superficie causadas por el papel de silicio de carburo usado durante el lijado y pulido de la probeta para realizar las pruebas electroquímicas.



Figura 4.14. Mezcla 20% LCM – kerosene después del ensayo electroquímico, magnificación 150X.

En la figura 4.14, foto tomada bajo microscopio con una magnificación de 300X, tampoco se aprecian puntos o zonas donde haya rastro de herrumbre, que permitan decir que ocurrió algún ataque corrosivo, solo se aprecian con mayor detalle las rayas producidas por el papel de silicio de carburo durante el proceso de lijado y pulido de la muestra.



Figura 4.15. Mezcla 20% LCM – kerosene después del ensayo electroquímico, magnificación 300X.

Estas observaciones y las hechas en el punto anterior (4.3), permiten concluir que la mezcla de concentración 20% LCM en kerosene, resulta ser un buen inhibidor de la corrosión en presencia de  $\text{CO}_2$ , al ofrecer una barrera de protección contra el ataque corrosivo del medio, al disminuir la velocidad de corrosión, y tener una eficiencia mayor al 95% para lograr este objetivo, además de ser la que mejor eficiencia demostró de todas las mezclas formuladas y estudiadas.



#### **4.5. CONCLUSIONES**

1. El kerosene es un buen solvente del LCM para todas las concentraciones estudiadas, la mezcla demostró ser estable con el tiempo, al no presentar separación de fases después de un periodo de reposo.
2. El acero usado AISI 1045, tiene las características de un acero medio en carbono, una microestructura de perlita – ferrita, cualidad obtenida por la forma de fabricación y el tratamiento térmico posterior de revenido.
3. La velocidad de corrosión obtenida para la muestra de acero AISI 1045 expuesta al medio corrosivo sin adición de inhibidor fue de 14,160 milésimas de pulgada por año (mpy).
4. La velocidad de corrosión del acero AISI 1045 empleando el LCM como inhibidor de corrosión con una concentración del 100% fue de 7,040 milésimas de pulgada por año, y su eficiencia como inhibidor de corrosión fue de 50,28%.
5. La menor velocidad de corrosión para el acero AISI 1045 fue de 0,634 milésimas de pulgada por año y se obtuvo empleando como inhibidor el LCM con una concentración de 20%, eficiencia superior al 95%.
6. Según la morfología de la superficie del acero AISI 1045 para el ensayo sin inhibidor fue del tipo picadura, mecanismo característico de la corrosión por dióxido de carbono.
7. La morfología superficial de la probeta de acero AISI 1045 usando el LCM como inhibidor en una concentración de 20% diluido en kerosene, no mostro ataque visible en la superficie.



#### **4.6. RECOMENDACIONES**

1. Preparar la probeta a ser utilizada al momento de realizar el ensayo, para evitar daños en la superficie por las condiciones ambiente.
2. Evitar mover o perturbar la celda electroquímica durante la prueba, para no generar lecturas erróneas por el potencióstato o datos incorrectos.
3. Revisar que no haya filtración del medio electrolítico en la unión de la probeta con el porta muestra, para evitar un sobre potencial en la celda y un error en el potencióstato.
4. No introducir, ni retirar ningún electrodo u otro objeto de la celda una vez desalojado el oxígeno con nitrógeno, para evitar el ingreso de nuevas burbujas de oxígeno.
5. Determinar la velocidad de corrosión para un acero AISI 1045, disminuyendo la dosis de inhibidor aplicada a menos de 300 ppm.
6. Estudiar el efecto del uso de otro solvente para diluir el LCM.



## BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, M. (2004). *Evaluación de inhibidores de corrosión en el sistema de gas alta presión del campo Dación*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Oriente, Puerto La Cruz.

B. Guruviah y S. Selvaraj. Extracting Process of CNSL and its by Products [en línea] [fecha de consulta: 31 de Mayo del 2010]. Disponible en <[#>](http://www.adarshsanoor.com/cnslprocess.html)

Callister, W. (2004). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales tomo II*. Barcelona, España: Reverte.

Cedeño, F. (2006). *Estudio de la contribución de las bacterias reductoras de sulfato (SRB) al proceso de corrosión de la tubería de producción en el campo JOBO, área JOBO 02*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Oriente, Puerto La Cruz.

Fontana, M. (1986). *Corrosion Engineering (3ra edición)*. New York: McGraw Hill.

García, A. (2004). *Diseño conceptual de una planta para la obtención del líquido de cáscara de nuez del merey*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Oriente, Puerto La Cruz.

Roberge, P (2000). *Handbook of corrosion engineering*. New York: McGraw Hill.

Rondón, R. (2005). *Evaluación del potencial de corrosividad interna en los gasoductos principales y líneas de recolección de gas del área mayor*



*anaco*. Trabajo de grado no publicado. Universidad de Oriente, Puerto La Cruz.

Schweitzer, P. (2007). *Corrosion of linings and coatings* (second edition). New York: CRC press



**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>TÍTULO</b>	<b>CALCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN UN ACERO AL CARBONO EMPLEANDO EL LÍQUIDO EXTRAÍDO DE LA CASCARA DE LA NUEZ DEL MEREY (LCM) COMO INHIBIDOR EN PRESENCIA DE CO<sub>2</sub></b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>MATA BRAVO, SIMÓN JESÚS</b>	<b>CVLAC: 18.583.820</b> <b>E MAIL: <a href="mailto:saimon312@gmail.com">saimon312@gmail.com</a></b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>

**PALABRAS O FRASES CLAVES:**

**CORROSIÓN**

---

**INHIBIDOR**

---

**MEREY**

---

**DIÓXIDO DE CARBONO**

---

**PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS**

---

**RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN**

---

**POLARIZACIÓN POTENCIODINÁMICA**

---

**POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO**

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y ciencias aplicadas	Ingeniería Química
Ciencias Administrativas	
Ciencias de la Salud	

**RESUMEN (ABSTRACT):**

La corrosión es un fenómeno común en todos los procesos y plantas industriales, existen varias formas de controlarla, una en específico es la aplicación de inhibidores, que disminuyen o neutralizan la velocidad a la que ocurre este fenómeno. En esta investigación se determinó la velocidad de corrosión de un acero AISI 1045 en una solución salina al 3,5% y saturada con CO<sub>2</sub>, empleando como inhibidor el líquido extraído de la cascara de la nuez del merey (LCM) a diferentes concentraciones, mediante pruebas electroquímicas, utilizando el LCM puro y diluido con kerosene desde 20 hasta 80%. Se encontró que para la muestra de acero sin inhibidor la velocidad de corrosión fue de 14,16mpy (milésimas de pulgadas por año) y con adición de 300ppm de LCM puro fue de 7,04mpy, Al realizar análisis morfológico a las superficies expuestas al medio corrosivo, se observa que la muestra sin inhibidor presenta depósitos de herrumbre, y el tipo de corrosión es por picadura, característico de altas concentraciones de CO<sub>2</sub> en el medio.



**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU x	JU
MONCADA, FIDELINA	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
PARRA, FRANK	ROL	CA	AS	TU	JU x
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
COLMENARES, ANA	ROL	CA	AS	TU	JU x
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2011	11	23
AÑO	MES	DÍA

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS Simon Mata.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F  
G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t  
u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: \_\_\_\_\_

TEMPORAL: \_\_\_\_\_

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Química

INSTITUCIÓN:

Universidad De Oriente Núcleo de Anzoátegui



**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

**De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado:**

**“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SÓLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.**

\_\_\_\_\_  
**Simón J Mata B  
AUTOR**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Fidelina Moncada, M.Sc.  
TUTOR**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Frank Parra  
JURADO**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Ana Colmenares, Ph.D.  
JURADO**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Yraima Salas  
POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**