

# Corrosión de acero SAE 1018 en aguas amargas colectadas de la industria del petróleo: efecto de la temperatura

Esparza Zúñiga E. M.<sup>1</sup>, Veloz Rodríguez M. A.<sup>1,\*</sup>, Uruchurtu Chavarín J.<sup>2</sup>,  
Reyes Cruz V. E.<sup>1</sup>

<sup>1,\*</sup> Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Carr. Pachuca Tulancingo Km 4.5, Col. Carboneras, Mineral de la Reforma, Hgo.

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Mor.

\*e-mail: [mveloz@uaeh.reduaeh.mx](mailto:mveloz@uaeh.reduaeh.mx)

En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación electroquímica de un sistema de acero al carbono SAE 1018, sumergido en una muestra de agua amarga colectada en la industria del petróleo, variando la temperatura, entre 25 y 50°C, sin agitación. La evaluación se realizó utilizando técnicas de ruido electroquímico, impedancia, polarización lineal, curvas de polarización de Tafel y obteniendo imágenes de MEB en cada temperatura evaluada. Los resultados de ruido electroquímico con respecto al índice de localización muestran que los sitios de corrosión localizada aumentan conforme aumenta la temperatura hasta los 40°C, después disminuyen considerablemente e incluso son menores que a 25°C. Los resultados de polarización lineal indican una disminución de la  $R_p$  aunque no lineal, que puede estar muy relacionada con la morfología de los productos de corrosión. Asimismo, se observó que la corriente límite de la rama catódica en las curvas de polarización de Tafel tiene un comportamiento no predecible ya que, hasta los 40°C, la velocidad de reducción aumenta conforme la temperatura y a partir de allí disminuye incluso más que a 35°C. Las imágenes de microscopía muestran una capa compacta de productos de corrosión que a 45 y 50°C cambia sus propiedades totalmente, mostrando productos de corrosión diferentes. Estos resultados indican que la variación en la temperatura puede ocasionar modificación de la estructura de los productos de corrosión y con ello la severidad de los daños ocasionados en el metal.

Palabras claves: Corrosión, aguas amargas, acero SAE 1018, temperatura.

## 1. Introducción

La corrosión es originada por la interacción de tres factores tales como la reacción, el medio y el material; por esta razón es importante conocer cómo estos factores influyen en el mecanismo de corrosión, ya sea promoviendo o inhibiendo la corrosión.

El acero al carbono SAE 1018 es ampliamente utilizado como un material de construcción en muchas industrias debido a sus excelentes propiedades mecánicas y bajo costo [1], por lo que la evaluación del mismo puede aportar mucha información útil al campo del control de la corrosión en la industria. Por otro lado el agua amarga es un agua residual con contenido de sulfuros y cloruros, entre otros componentes (Tabla 1); este tipo de aguas resulta muy dañino para los equipos metálicos que se encuentran en contacto con ella, produciendo velocidades de corrosión muy importantes y que llevan a fallas o desgaste del material [2].

**Tabla 1 Principales componentes del agua amarga proveniente de la planta primaria AFA-4 en la Refinería “Miguel Hidalgo” de Tula, Hgo**

pH	Cloruros (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)
(4.7 - 8.9)	(8 - 82)	(0 - 0.89)	(0 - 0.09)

Un factor importante que interviene en el proceso de corrosión es la temperatura, ya que por ejemplo la velocidad de corrosión incrementa con el incremento de la temperatura, para el electrolito soporte, es decir el medio corrosivo [3]. Sin embargo esto no ocurre en todos los sistemas, por ejemplo en el caso del acero AISI tipo 304 SS, a altas temperaturas se tiene un incremento en la velocidad de corrosión; pero, a medianas temperaturas tiene similares velocidades de corrosión y a bajas o moderadas temperaturas, se encuentra en un estado pasivo seguido de una región transpasiva. Por otro lado, en la literatura [4] se observó con el método de polarización anódica, un pequeño rango de pasividad a altas temperaturas y por lo tanto una inestable película pasiva.

No obstante para un acero al carbono en presencia de aniones agresivos, la velocidad de corrosión aumenta en proporción a la concentración de estos aniones y del incremento en la temperatura. Asimismo a bajas concentraciones de aniones agresivos y temperaturas, la velocidad de corrosión va disminuyendo, en cambio a concentraciones y temperaturas intermedias, esta velocidad de corrosión incrementa con una tendencia logarítmica [5].

Lo anterior, indica que es importante realizar un estudio del comportamiento del acero al carbono SAE 1018 a diferentes temperaturas en el medio corrosivo que permita caracterizar los fenómenos que ocurren en el sistema.

En este trabajo se presentan los resultados del estudio realizado a temperaturas entre 25 y 50°C, en un sistema de acero al carbono SAE 1018 en presencia de un agua amarga proveniente de la planta primaria AFA-4 en la Refinería “Miguel Hidalgo” de Tula, Hgo, sin agitación.

## **2. Experimental**

Se utiliza una celda típica de tres electrodos con el acero al carbono SAE 1018 como electrodo de trabajo, una barra de grafito como contraelectrodo y finalmente un electrodo de calomel saturado como referencia. Dichos electrodos fueron sumergidos en una muestra de agua amarga proveniente de la industria del petróleo a 25, 30, 35, 40, 45 y 50°C. La solución fue de-aireada con nitrógeno durante media hora. El electrodo de trabajo con un área superficial de 0.7 cm<sup>2</sup>, se pulió antes de cada experimento y se sometió a baño ultrasónico durante 5 minutos para eliminar los residuos del pulido.

Se trazaron curvas de Polarización con una velocidad de barrido de 1 mV/s, en el intervalo de potenciales de  $E_{corr} \pm 300$  mV, en la solución a dichas temperaturas, con un tiempo de inmersión de 10 minutos, previo a cada experimento. El equipo utilizado fue un potencióstato-galvanostato Autolab Mod. PGSTAT 30 con el software proporcionado por la misma compañía. Posteriormente las muestras obtenidas en cada experimento, tanto anódico como catódico, y el acero al carbono

SAE 1018 que no estuvo expuesto al medio corrosivo, se analizaron en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y en el detector de energía dispersiva (EDS).

También se utilizó la técnica de ruido electroquímico en donde se midieron las fluctuaciones de corriente entre dos electrodos de trabajo “idénticos” de acero al carbono SAE 1018, para este caso y por cuestiones prácticas, con un área superficial de  $0.5 \text{ cm}^2$  cada uno, y el potencial con un electrodo de referencia de calomel, inmersos en una muestra de agua amarga de la industria del petróleo a las mismas temperaturas que para las curvas de polarización. De igual manera que antes, la muestra de agua fue de-aireada con nitrógeno por media hora. La tasa de muestreo fue de un segundo por muestra y se hicieron 1024 registros en la serie de tiempo. El equipo utilizado fue un Gill AC y el software utilizado fue el ACM.

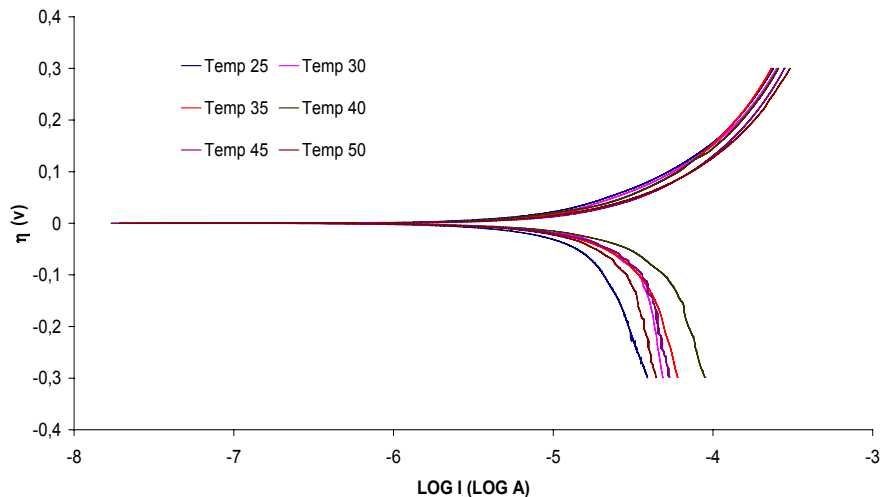
### **3. Discusión de resultados**

En la figura 1 se presentan las curvas de polarización obtenidas para el sistema a diferentes temperaturas. En ella, se observa que para las temperaturas de 25 a  $40^\circ\text{C}$ , las corrientes anódicas son muy similares, pero en cuanto la temperatura aumenta a 45 y  $50^\circ\text{C}$ , se tiene el efecto de aumento en las corrientes anódicas, ya que éstas son mayores que para el resto de las temperaturas. Las imágenes obtenidas por MEB muestran la presencia de una capa compacta con pequeñas zonas de rompimiento y formación de nuevos productos de corrosión (figura 2), que pueden ser responsables de que las corrientes anódicas sean muy similares.

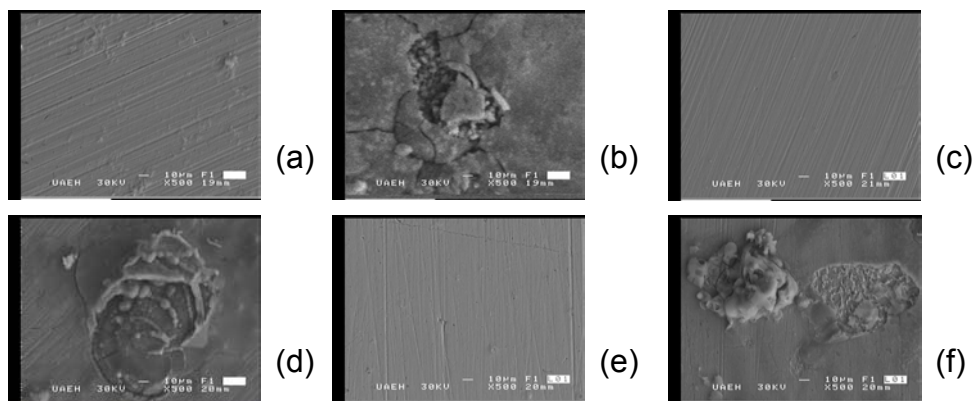
Por otro lado, la rama catódica es más sensible al cambio de temperaturas ya que se observa, en la figura 1, que en el intervalo de 25 a  $40^\circ\text{C}$ , las corrientes de reducción van en aumento, conforme aumenta la temperatura, mientras que con las temperaturas de 45 y  $50^\circ\text{C}$ , se muestra una disminución e incluso un aumento en la pendiente respecto a lo que ocurre a  $35^\circ\text{C}$ . Lo anterior se puede explicar con la formación y redisolución de productos de corrosión que están muy relacionados con la evolución de hidrógeno; puesto que las imágenes del MEB (ver figura 3) muestran entre 25 y  $40^\circ\text{C}$  una capa compacta con zonas porosas de productos de corrosión. Por otro lado, a 45 y  $50^\circ\text{C}$  la morfología de la película de productos de corrosión es

completamente diferente, indicando un probable control por difusión, además de la formación y redisolución de los productos, como ya se mencionó (figura 4).

Asimismo los resultados de EDS a diferentes temperaturas muestran la presencia de oxígeno, lo que indica que los únicos productos de corrosión que se están formando son óxidos o hidróxidos de diferentes estequiometrías, lo que daría precisamente una diferencia en la morfología.



**Figura 1. Curvas de polarización obtenidas para un sistema de acero al carbono SAE 1018 sumergido en una muestra de agua amarga proveniente de la industria del petróleo a diferentes temperaturas. La velocidad de barrido es de 1 mV/s.**

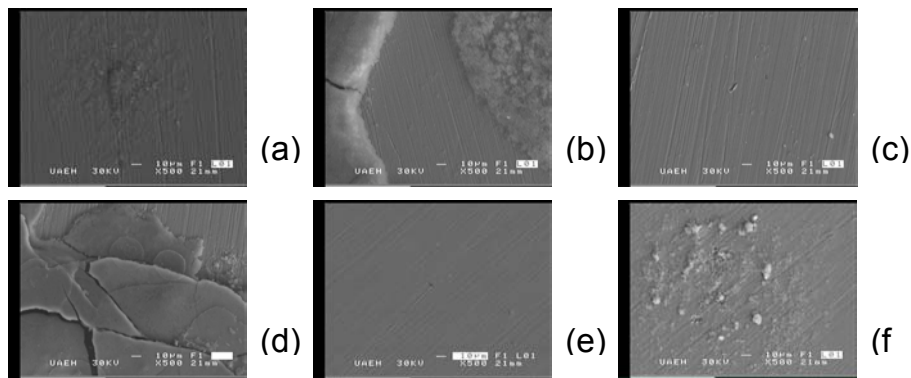


**Figura 2: Superficie resultante de la exposición del acero al carbono SAE 1018 a una temperatura de 30°C (a) y (b), 40°C (c) y (d) y 50°C (e) y (f), en el medio amargo realizando un barrido anódico. 500x. 30kV. 2.0cm.**

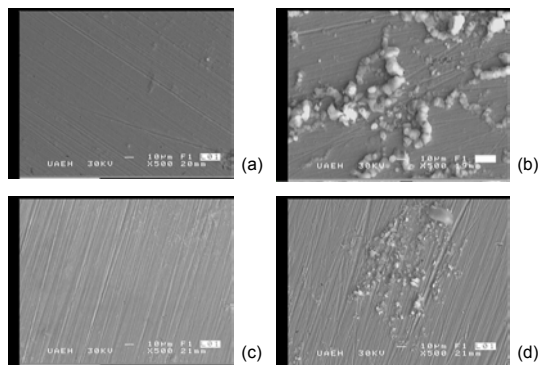
Ahora bien, con el fin de realizar un análisis cuantitativo de los parámetros de corrosión obtenidos a las diferentes temperaturas de estudio se construyó la tabla 2 a partir de los resultados de polarización lineal y Tafel. En ella se muestran el Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), la Resistencia a la polarización ( $R_p$ ), las Pendientes de

Tafel anódica (ba) y catódica (bc) y la Densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ).

En la tabla 2 se observa que los valores del potencial de corrosión, son más catódicos que a 25°C lo que implica que la reacción de reducción se ve favorecida con el aumento de la temperatura. Esto se corrobora con las pendientes catódicas que se obtienen ya que son valores muy altos indicativos de la presencia de procesos difusivos, posiblemente del hidrógeno. Por otro lado la resistencia de polarización muestra valores altos, respecto a otros sistemas en medios ácidos amargos [6], indicando la presencia de productos de corrosión ligeramente protectores. Además se observa una disminución, aunque no lineal, que puede estar muy relacionada con la morfología de los productos de corrosión (ver figuras 2 y 3).



**Figura 3: Superficie resultante de la exposición del acero al carbono SAE 1018 a una temperatura de 25°C (a) y (b), 30°C (c) y (d) y 35°C (e) y (f), en el medio amargo realizando un barrido catódico. 500x. 30kV. 2.0cm.**



**Figura 4: Superficie resultante de la exposición del acero al carbono SAE 1018 a una temperatura de 45°C (a) y (b) y 50°C (c) y (d), en el medio amargo realizando un barrido catódico. 500x. 30kV. 2.0cm.**

**Tabla 2 Parámetros de corrosión obtenidos de las curvas de polarización para el acero al carbono SAE 1018 sumergido en una muestra de agua amarga proveniente de la industria del petróleo a diferentes temperaturas.**

Temperatura °C	$E_{corr}$ (V)/ESC	$I_{corr}^{Rp}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$R_p$ ( $\Omega$ )	$b_a$ (V/dec)	$b_c$ (V/dec)
25	-0.6796	7.71E-06	2056	0.2174	-0.8456
30	-0.6679	1.26E-05	1256	0.2957	-1.0647
35	-0.6905	1.11E-05	1426	0.2728	-0.6306
40	-0.6686	1.45E-05	1095	0.3232	-0.6581
45	-0.6961	1.17E-05	1357	0.2734	-1.2438
50	-0.6985	1.02E-05	1557	0.2289	-1.1614

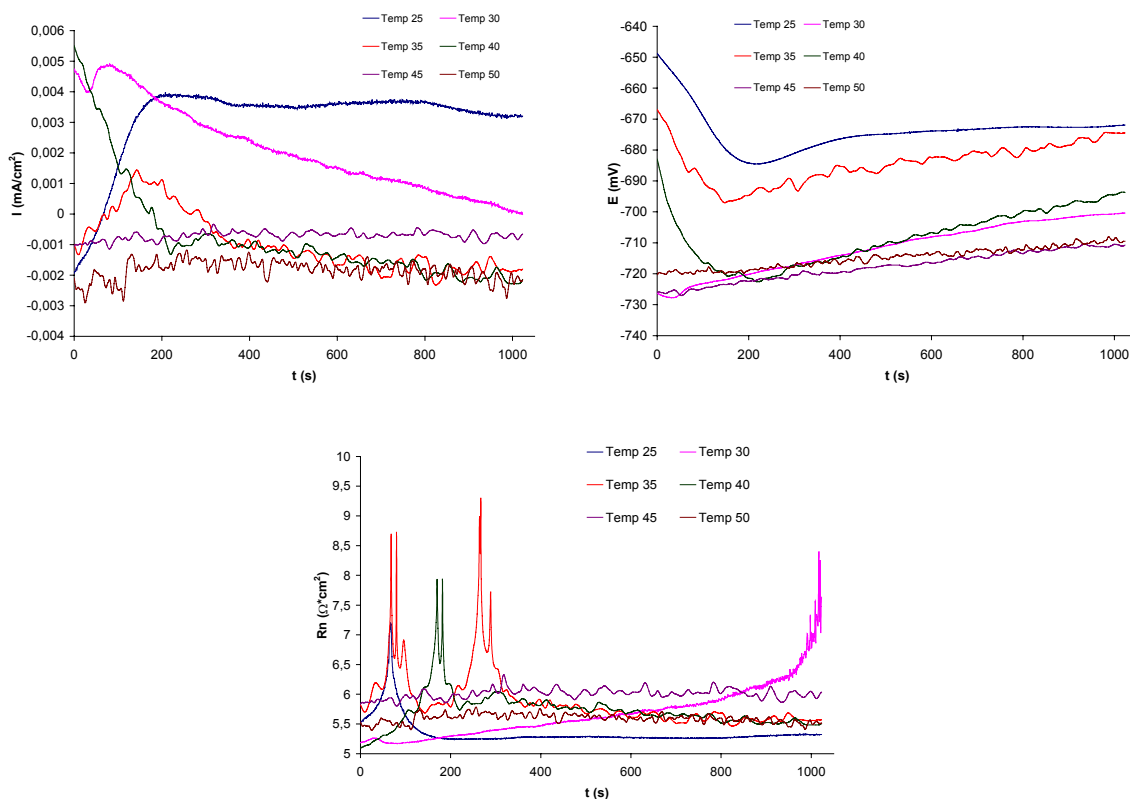
En cuanto a la corriente de corrosión, que está directamente relacionada con la velocidad de corrosión, se observa que está en el mismo orden de magnitud excepto para la de 25°C, indicando que, aparentemente, el aumento en la temperatura no tiene un efecto significativo en ella. Lo cual muestra que la velocidad de corrosión en este caso no puede tomarse como un parámetro confiable, ya que la morfología es diferente, como ya se mencionó.

En las figuras 5 a 7, se muestran los resultados de tiempo obtenidos de la técnica de ruido electroquímico tales como corriente, potencial y resistencia al ruido. En la figura 5, se observa que en el caso de la temperatura de 30°C y especialmente a partir de los 35°C, aparecen oscilaciones con amplitudes más grandes o sea mayor nivel de ruido y en consecuencia más sitios de corrosión localizada, contrario a la de 25°C, que podría tener corrosión más generalizada.

En la figura 6 se muestra una caída de potencial lenta en el acero al carbono para las temperaturas de 25, 35 y 40°C, en sentido catódico asociado con la región de actividad, para posteriormente alcanzar el estado estacionario, contrario a la temperatura de 30°C, la cual tiene un incremento en sentido anódico. Las otras dos señales correspondientes a las temperaturas muestran un incremento muy pequeño en el potencial. Ahora bien, con respecto a las temperaturas de 35, 45 y 50°C, se puede observar, en las figuras 5 y 6, que las oscilaciones en corriente exhiben algunos aumentos relativamente rápidos y en esos mismos períodos se presentan pequeñas caídas del potencial correspondiente, lo cual podría representar que hay procesos del picado que están repasivando los sitios activos, como resultado de la

reacción catódica; aunque estos períodos de picado son mucho menos predecibles tanto en amplitud como en tiempo de ocurrencia que para el acero al carbono con 0.025M de NaCl [7].

En la figura 7 se observa que la resistencia al ruido no es tan cambiante para las temperaturas de 25, 45 y 50°C; sin embargo es variable para las temperaturas de 30, 35 y 40°C, pues a través del tiempo presentan incrementos y decrementos sin mostrar una tendencia definida, asimismo el sistema para la temperatura de 35°C es la que presenta las oscilaciones más grandes, estos cambios donde disminuye y aumenta la resistencia podrían deberse a poros locales o defectos donde la corrosión localizada puede originarse, formando productos de corrosión y por lo tanto aumentando nuevamente la resistencia.

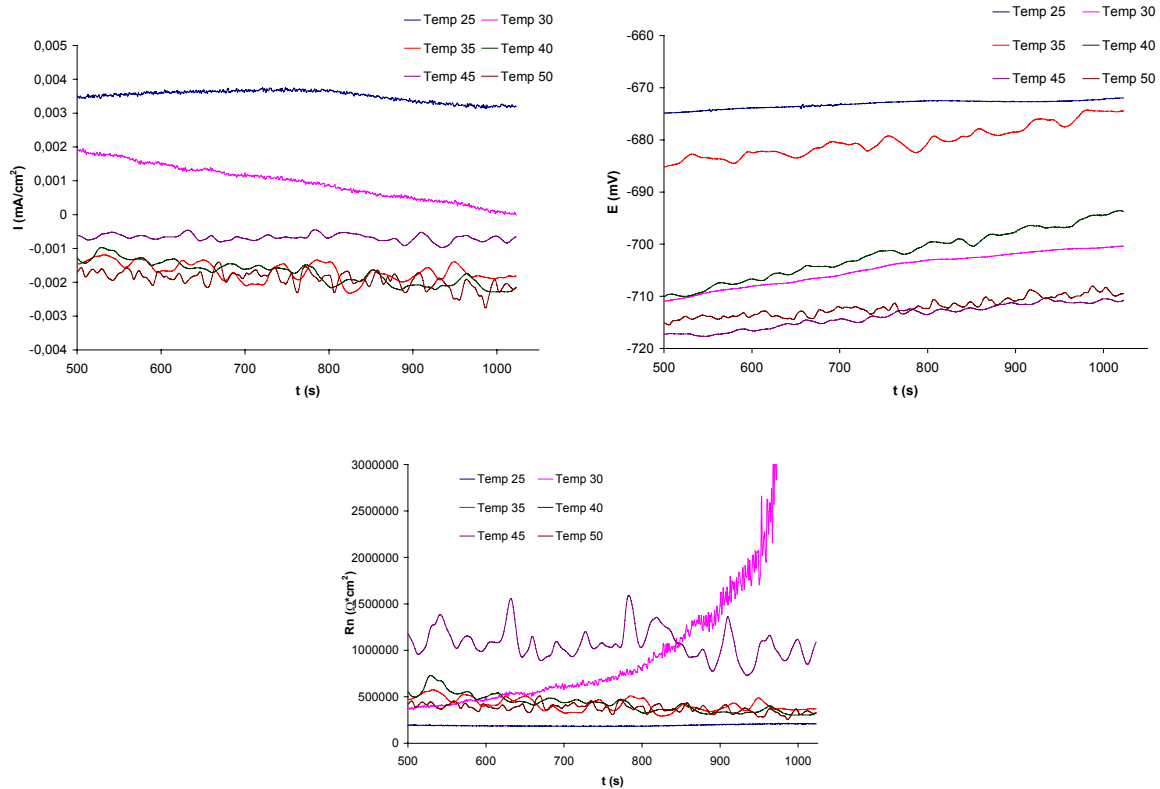


**Figuras 5, 6 y 7. Corriente, potencial y resistencia al ruido obtenidos mediante ruido electroquímico para un sistema de acero al carbono SAE 1018 sumergido en una muestra de agua amarga proveniente de la industria del petróleo a diferentes temperaturas. La tasa de muestreo es de un segundo por muestra.**

Posteriormente se realizó un análisis local de los datos, a partir del registro 500 en adelante de la serie de tiempo, para la corriente, el potencial y la resistencia al ruido,



esto se muestra en las figuras 8 a 10. En la figura 8 se observa que las corrientes medias para el sistema a 30°C cambian de 0.002 a 0.0001 mA/cm<sup>2</sup>, lo que implica que este sistema no alcanza el estado estacionario, como el resto de los sistemas. En la figura 9 se observa que para las temperaturas de 30 y 40°C el potencial se incrementa haciéndose más anódico, lo cual podría originar más sitios de corrosión localizada. En la figura 10 se muestra que la temperatura de 25°C tiene una tendencia definida con respecto al tiempo, contrario a los sistemas restantes. Asimismo se observa que la temperatura de 45°C es la que presenta las mayores amplitudes (750000 a 1500000 Ω\*cm<sup>2</sup>) y las demás temperaturas se mantienen casi en el mismo orden de magnitud; sin embargo la de 35°C tiende a aumentar con respecto al tiempo.



**Figuras 8, 9 y 10. Vista local de la corriente, potencial y resistencia al ruido obtenidos mediante ruido electroquímico para un sistema de acero al carbono SAE 1018 sumergido en una muestra de agua amarga proveniente de la industria del petróleo a diferentes temperaturas. La tasa de muestreo es de un segundo por muestra**

Con estos mismos datos se obtuvieron los resultados cuantitativos de la técnica de ruido electroquímico (Tabla 3), tales como la desviación estándar de la corriente y del potencial, así como la resistencia al ruido ( $R_n$ ), que es la desviación estándar del

potencial entre la desviación estándar de la corriente ( $Rn = \sigma_v / \sigma_i$ ), y el índice de localización (IL) obtenido a partir del cociente de la desviación estándar de la corriente entre la raíz cuadrática media (rms) de la corriente:

$$IL = \sigma_i / i_{rms} \quad \text{Ec. 1}$$

$$rms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^2)} \quad \text{Ec. 2}$$

Como puede observarse en la tabla 3 el índice de localización aumenta considerablemente de 25 a 30°C, que es la temperatura con mayor valor de IL que sugiere mayor corrosión localizada; sin embargo para las siguientes temperaturas este índice disminuye considerablemente lo que indica que los sitios de corrosión localizada podrían ser menores. Esto se debe probablemente a que los productos de corrosión se solubilizan. Asimismo la desviación estándar de la corriente es mayor para las temperaturas de 30, 35, 40 y 50°C, implicando que la velocidad de corrosión es mayor que para las otras dos temperaturas que tienen menor desviación estándar de la corriente.

**Tabla 3 Parámetros de corrosión obtenidos la técnica de ruido electroquímico para el acero al carbono SAE 1018 sumergido en una muestra de agua amarga proveniente de la industria del petróleo a diferentes temperaturas.**

Temperatura °C	$\sigma$ de I	$\sigma$ de E	Rn ( $\Omega$ )	I.L.
25	0.00008	0.75440	9041	0.0475
30	0.00026	3.15101	11966	0.4824
35	0.00026	2.95473	11234	0.1550
40	0.00034	4.72511	13699	0.1964
45	0.00010	2.26825	22939	0.1439
50	0,00023	1,75146	7595	0,1199

En cuanto a la Rn, se puede observar que tiene un comportamiento no previsible, ya que la mayor resistencia se presenta a 45°C y la menor a 50°C, asimismo a temperaturas entre 30 y 40°C, se tiene una mediana resistencia a la corrosión, lo cual podría indicar que el efecto de la temperatura permite la formación y redisolución de productos de corrosión como resultado de la reacción catódica.

Es importante mencionar que los estudios realizados se hicieron sin agitación del

sistema, no obstante, este puede ser un parámetro que modifique u homogeneice la morfología de los productos de corrosión. Este es un estudio que se está realizando actualmente.

#### **4. Conclusiones**

Los resultados anteriores, indican que la variación en la temperatura de operación puede ocasionar modificación de la estructura de los productos de corrosión, de las velocidades de corrosión y por lo tanto del daño que presente el material expuesto. Asimismo las temperaturas donde se observan cambios en el comportamiento están en 30 y 45°C. Es importante resaltar que los resultados obtenidos son sin agitación e instantáneos y pueden verse modificados con la agitación y el tiempo de exposición.

#### **5. Agradecimientos**

Los autores agradecen a SEP-CONACyT por el proyecto de Ciencia Básica 023889 y al Programa del Mejoramiento del Profesorado (PROMEP), por el financiamiento del proyecto UAEHGO-PTC-293. A la Refinería Miguel Hidalgo por las muestras proporcionadas y al M.C. Juan Hernández Ávila por su apoyo en el MEB. Estella Esparza agradece la beca CONACyT para sus estudios de Doctorado, así como a ECOES—Santander por la beca para la Estancia Doctoral en la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

#### **6. Referencias.**

1. Abdallah, Helal, Fouda. "Aminopyrimidine derivatives as inhibitors for corrosion of 1018 carbon steel in nitric acid solution". Corrosion Science. Cambridge, U. K. Vol. 48. 2006. 1639-1654 pp
2. Industrias químicas. Petróleo y gas natural. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Disponible en World Wide Web: <http://www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo3/78.pdf>
3. Stoyanova, Sokolova, Raicheva. "The inhibition of mild steel corrosion in 1M HCL in the presence of linear and cyclic thiocarbamides--effect of concentration and temperature of the corrosion medium on their protective action". Corrosion Science. Cambridge, U. K. Vol. 39, No. 9. Septiembre 1997. 1595-1604 pp.
4. Girija, Kamachi, Khatac, Baldev. "The application of electrochemical noise resistance to evaluate the corrosion resistance of AISI type 304 SS in nitric acid". Corrosion Science. Cambridge, U. K. Vol. 49, 2007 4051-4068 pp.

5. Shinichi, Yasuo. "Effects of temperature and aggressive anions on corrosion of carbon steel in potable water". Corrosion Science. Cambridge, U. K. Vol. 49, 2007. 240-247 pp.
6. B. Esparza, Evaluación de inhibidores de corrosión en medio ácido amargo. Tesis de licenciatura UAEH, Pachuca, Hgo., México, 2007.
7. Cottis, Turgoose. Electrochemical Impedance and Noise. USA. NACE International. 1999. 71-93 pp.