

# Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

ISSN 1409-2441

Vol. 16 (2)

Ago/Dic 2006

## CONTENIDO

### Artículos

1. Estudio catódico de cinética de corrosión del acero al carbón en fluido geotérmico mediante un electrodo de disco rotatorio..... 17-22  
**Vega, Mario.**
2. Sintonización de controladores *PI* y *PID* utilizando modelos de polo doble más tiempo muerto ..... 23-31  
**Solera, Eugenia; Alfaro, Víctor.**
3. La naturaleza de la Ingeniería..... 33-43  
**Herrera, Rodolfo.**
4. Dimensionado y construcción de un túnel de viento de baja velocidad ..... 45-54  
**Monge, Juan Gabriel.**
5. Centrifugal fan impeller failure analysis using finite elements..... 55-62  
**Monge, Juan Gabriel.**
6. Nuevo formato de datos para el Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica..... 63-74  
**Moya, Aarón.**
7. Evaluación de la potencia de operación de un eje de turbina vertical mediante el método de elementos finitos ..... 75-83  
**Monge, Juan Gabriel.**
8. Representación de lenguajes de patrones de análisis de dominio ..... 85-101  
**Calderón, Alan.**
9. Evaluación del concreto con reductor de agua en clima cálido ..... 103-111  
**Solís, Romel; Moreno, Eric; Chuc, Nadine.**

### Nota técnica

- Experiencia docente en la Universidad de Costa Rica en el uso de puntos de función y metodologías orientadas a objetos para estimar proyectos de software ..... 115-127  
**Salazar, Gabriela.**

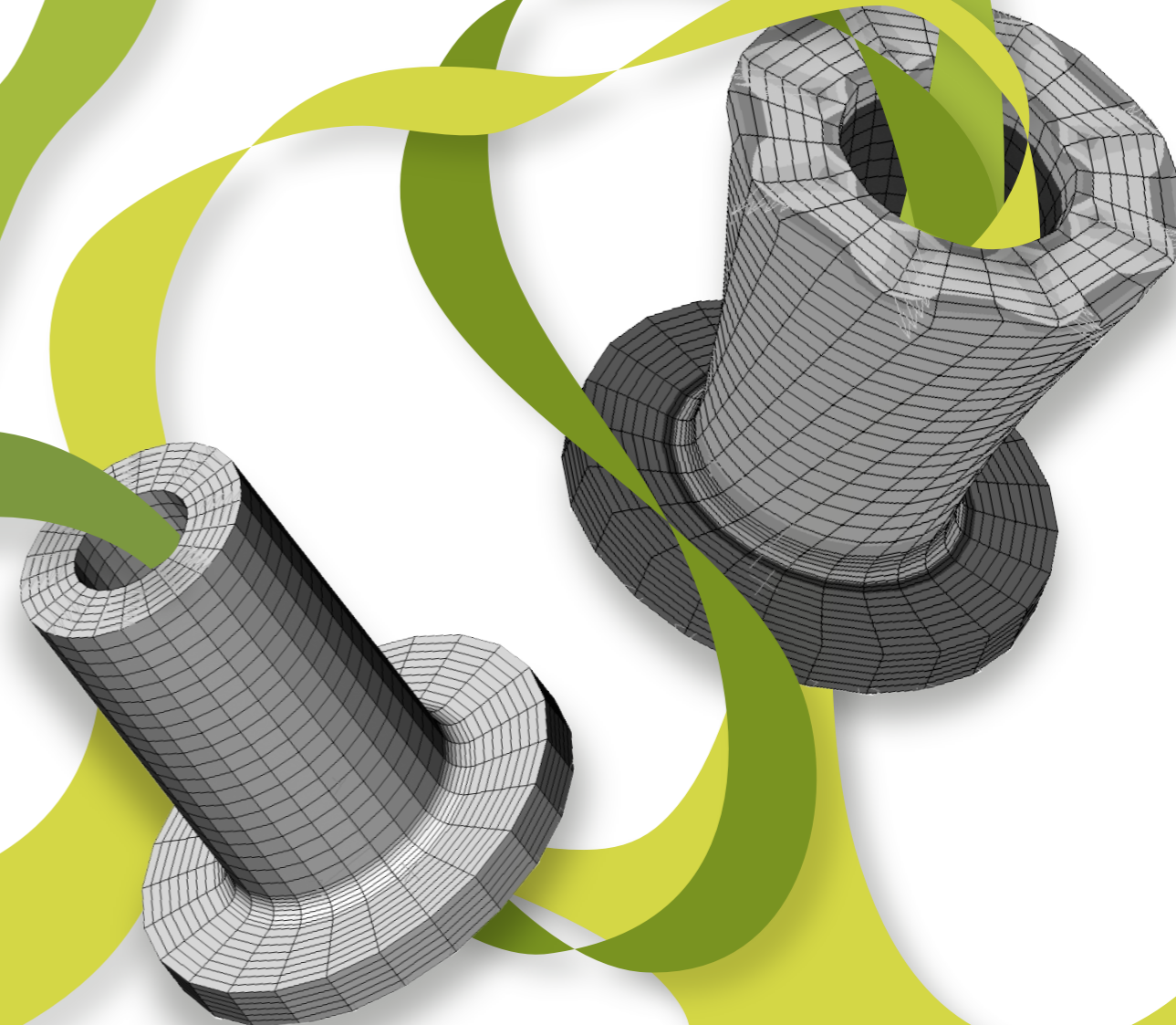
### Normas

- Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería..... 131-138



# Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica  
AGOSTO/DICIEMBRE 2006 - VOLUMEN 16 - Número (2)



# ESTUDIO CATÓDICO DE CINÉTICA DE CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBÓN EN FLUIDO GEOTÉRMICO MEDIANTE UN ELECTRODO DE DISCO ROTATORIO

*Mario A. Vega León*

## Resumen

En este estudio se realizan curvas de polarización catódica del acero ASTM A-36 en fluido geotérmico, utilizando un electrodo de disco rotatorio a diferentes velocidades de giro, con el objetivo de caracterizar su mecanismo cinético.

Se obtuvieron curvas características de un proceso bajo control difusional y se determinó la ecuación de Levich para el sistema. Se recomienda realizar el experimento a diferentes temperaturas y a mayores velocidades de flujo, pero usando electrodo cilíndrico.

**Palabras clave:** corrosión, polarización catódica, electrodo disco rotatorio.

## Abstract

In this study, cathodic polarization curves for ASTM A-36 steel was developed in geothermic fluid, using rotating electrode disc at different spin velocities, to characterize it kinetic mechanism.

Typical curves for diffusional control process were obtained and Levich relation for the system was carry out. Develop the experiment at different temperatures and higher fluid velocities, but using cylinder electrode is recommended.

**Keywords:** corrosion, cathodic polarization, rotating electrode disc.

**Recibido:** 15 de marzo del 2006 • **Aceptado:** 14 de junio del 2006

## 1. INTRODUCCIÓN

La explotación del potencial geotérmico en Costa Rica, ha llevado a desarrollar varias plantas de generación eléctrica que requieren gran cantidad de tuberías de acero para trasiego de fluidos geotérmicos, desde los pozos de producción a la casa de máquinas y de vuelta a los pozos de reinyección. Resulta de gran importancia conocer la resistencia del material de las tuberías al efecto de la corrosión, como parte del mantenimiento preventivo de los sistemas y como referencia para posteriores sustituciones o ampliaciones de las líneas de distribución de fluido.

El principal objetivo, de este proyecto es construir las curvas de polarización catódica de un acero ASTM A-36 bajo diferentes patrones de flujo; para caracterizar el mecanismo cinético

de transferencia de masa de las especies hasta la superficie del metal y complementar los resultados obtenidos por Tres & Saborío (2001).

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

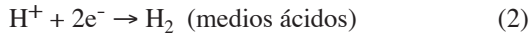
Los metales se corroen, principalmente, por un mecanismo electroquímico, esto es que se lleva a cabo una reacción química en la cual participan especies químicas y corriente eléctrica en forma de electrones.

En los procesos de corrosión se da un intercambio de especies en la superficie del sustrato, que se pueden resumir en las reacciones (1),(2) y (3):

Oxidación:



Reducción:



Las curvas de polarización anódica brindan información sobre el mecanismo de corrosión de un material, mientras que las de polarización catódica lo hacen sobre la reacción de reducción. Estas curvas resultan de gran valor cuando se requiere conocer el comportamiento del proceso de corrosión de un material en un medio dado y se pueden establecer criterios para la evaluación y selección de materiales.

Si la reacción catódica se detiene o se acelera, se afectará directamente el desarrollo de la reacción anódica. En general, las reacciones catódicas son las más lentas y controlan la velocidad de los procesos por los efectos siguientes (Arganis & Malo, 1998):

**Activacional:** Si hay suficientes especies en la interfase y el transporte de cargas es el paso limitante.

**Difusional:** Si no hay suficientes especies en la interfase y se debe esperar a que lleguen.

Debido a la naturaleza electroquímica de la corrosión, este fenómeno se ve influenciado por el potencial, concentración y velocidad del fluido.

Por medio de dispositivos hidrodinámicos, puede modificarse la velocidad de transporte de masa desde el seno del electrolito hasta la interfase y estudiar así su efecto sobre el proceso de corrosión.

Existen dos formas principales de crear movimiento dentro de una celda electroquímica (National Association of Corrosion Engineers [NACE], 1994). La primera de ellas puede ser fijando el electrodo y haciendo circular fluido sobre la superficie por acción de una fuerza (generalmente presión). El segundo método

consiste en mover el electrodo por rotación, para hacer que el fluido se mueva por la agitación que esto provoca. De esta forma se pueden crear patrones de flujo desde condiciones laminares hasta turbulentas, que pueden ser caracterizados por el concepto del número de Reynolds.

El electrodo de disco rotatorio (EDR) es un dispositivo que ayuda a mantener un patrón de flujo muy bien definido; consta de un disco en el extremo de un eje que gira a una velocidad angular controlada.

Si la reacción es limitada por la velocidad de transporte de especies hacia la superficie, la distribución de corriente sobre el disco será uniforme y la densidad de corriente promedio en el electrodo puede ser descrita por la ecuación (4) o ecuación de Levich (NACE, 1994).

$$i_{\text{lim}} = 0,62nFC_b D^{0,67} \nu^{-0,167} \omega^{0,5} \quad (4)$$

Donde:

$i_{\text{lim}}$  es la corriente límite,

$n$  es el número de electrones transferidos

$F$  es la constante Faraday

$C_b$  es la concentración de la especie reaccionante,

$D$  es el coeficiente de difusión

$\nu$  es la viscosidad cinemática

$\omega$  es la velocidad angular.

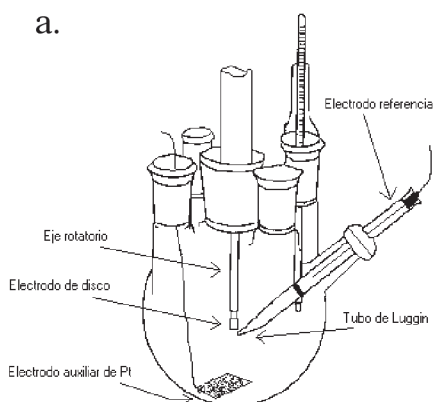
En números adimensionales, la relación anterior puede ser expresada mediante la ecuación (5)

$$Sh = \frac{0,62Sc^{0,33} Re^{0,5}}{1 + 0,298Sc^{-0,33} + 0,145Sc^{-0,66}} \quad (5)$$

donde:  $Sh$ ,  $Re$  y  $Sc$  son los números de Sherwood, Reynolds y Schmidt, respectivamente.

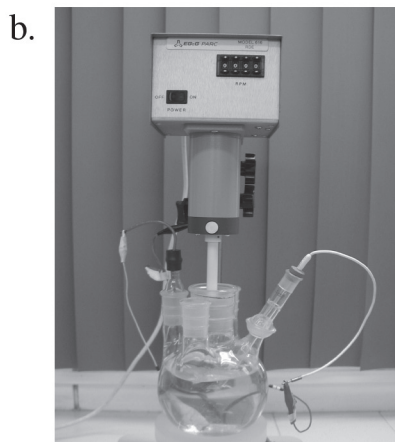
### 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se construyeron curvas de polarización catódica para acero ASTM A-36 en fluido geotérmico. Los experimentos fueron desarrollados con un equipo de pruebas electroquímicas de la casa *ACM Instruments*, controlado por un software denominado *AUTOTAFEL*. Las pruebas se llevaron a cabo en una celda, según se esquematiza en la Figura 1a, usando un electrodo rotatorio de la casa *EG & G* (Figura 1b) con un disco de 14 mm de diámetro, sumergido en fluido geotérmico tomado del Pozo 1 del campo geotérmico Miravalles I, cuyos pH y porcentaje de oxígeno disuelto fueron 6,7 y 10 % respectivamente. Antes de cada corrida, se preparó la superficie de trabajo puliendo hasta grado de espejo y enjuagándola con agua destilada y acetona.



**Figura (1a)** Esquema de la celda electroquímica.

Fuente: (El autor)



**Figura (1b)** sistema de trabajo

Fuente: (El autor)

Las curvas se obtuvieron realizando barridos potenciodinámicos a razón de 50 mV/min, con velocidades de rotación entre 0 rpm y 25 rpm, a presión atmosférica y con una temperatura de 25 °C. Se utilizó platino como electrodo y un electrodo saturado de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) como referencia.

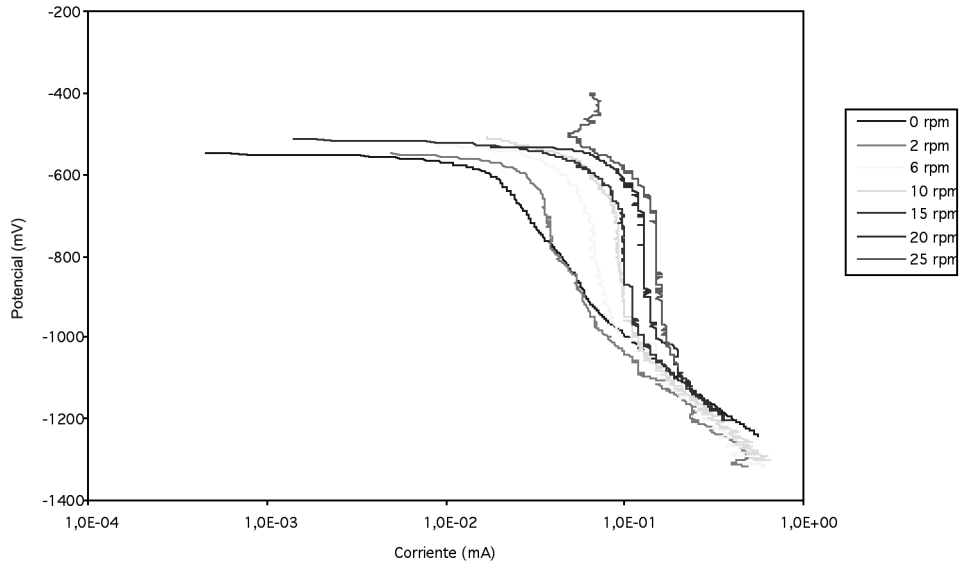
### 4. RESULTADOS

Los experimentos se realizaron bajo condiciones estacionarias y a bajas velocidades de agitación, lográndose establecer tanto patrones de flujo laminares, como turbulentos, pero con números de Reynolds no mayores de 10 000. Estas condiciones se establecieron con el fin de estudiar meramente el efecto de transferencia de masa.

En la Figura 2 se presentan las curvas de barrido catódico a diferentes velocidades de giro del electrodo de disco. La curva obtenida en ausencia de agitación (0 rpm), indica que la reacción está controlada por un mecanismo activacional por transferencia de carga en la doble capa, donde se da la formación de hidrógeno diatómico. En las curvas restantes se observa claramente la presencia de una corriente límite ( $i_{lim}$ ) dependiente de la velocidad de rotación. Al aumentar la velocidad de rotación se experimenta un desplazamiento de dicha corriente hacia la derecha, este fenómeno indica que el movimiento del electrolito incrementa el transporte de masa hacia la superficie y reduce la concentración de polarización del electrodo, aumentando la difusión de las especies oxidantes, tal es como el oxígeno, hacia la doble capa para que se pueda dar el intercambio de cargas.

A partir de los 800 mV para la curva a 2 rpm y de 1000 mV para el resto de las corridas con agitación, se observa una segunda contribución catódica en el proceso. Este comportamiento coincide con lo informado por Jones (1996) y los resultados obtenidos por Mendoza & Turgoose (2000) para procesos a potenciales muy bajos, donde la reacción de formación de hidrógeno por reducción del agua, según la relación (6), empieza a tener mayor peso.

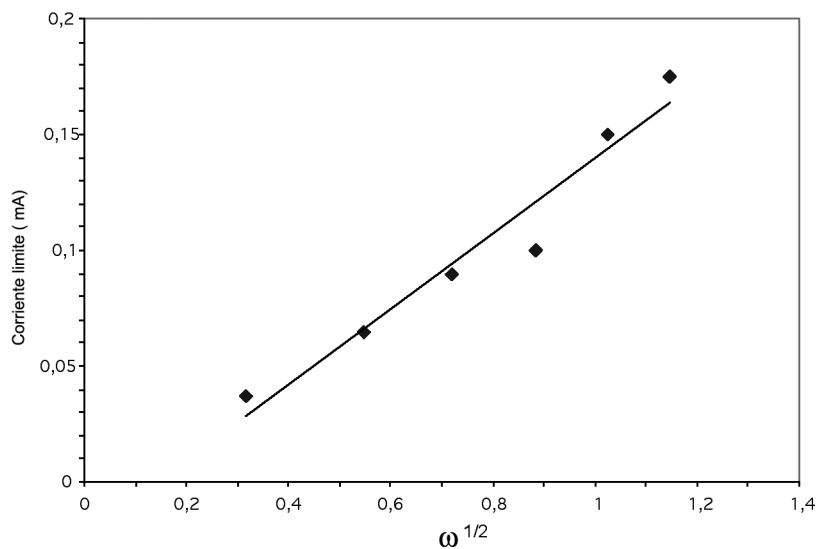




**Figura 2.** Curvas de polarización catódica de acero ASTM A-36 en fluido geotérmico  
Fuente: (El autor, 2005)

De acuerdo con el postulado de Levich (NACE, 1994) presentado en la ecuación (4), se graficaron las corrientes límite en función de la raíz de la velocidad angular; según se muestra en la Figura 3, las desviaciones de la linealidad se deben

muy probablemente a formación de películas polarizantes sobre la superficie de trabajo. Sobre los puntos graficados, se realizó una regresión lineal, encontrándose con un coeficiente de correlación de 0,947, la ecuación (7).



**Figura 3.** Curva de Levich para el sistema estudiado  
Fuente: (El autor, 2005)

$$i_{\text{lim}} = 0,1627\omega^{0,5} - 0,0229 \quad (7)$$

La anterior relación se puede expresar en términos adimensionales según la ecuación (8).

$$i_{\text{lim}} = (1,8E - 3Re^{0,5}) - 0,0229 \quad (8)$$

La velocidad de corrosión del sistema bajo condiciones de flujo en los que se establece un control difusional, puede ser estimada como la que corresponde a la corriente límite, según indican Arganis & Malo (1998). De acuerdo con la Ley de Faraday, esta corriente se puede expresar como pérdida de material (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2002) al sustituir en la relación (9)

$$r = 3,27E - 3 \frac{i}{n\rho} \quad (9)$$

Considerando la ecuación anterior, las velocidades de corrosión para los casos estudiados resultan mayores que la medida por Tres & Saborío (2001), según se esquematiza en el Cuadro 1. Estos resultados coinciden con lo esperado para procesos bajo condiciones

de flujo, ya que el movimiento favorece el mecanismo de corrosión, reportándose un mayor desgaste de material.

## 5. CONCLUSIONES

Existe una relación entre las condiciones hidrodinámicas del acero ASTM A-36 en fluido geotérmico y la velocidad de corrosión.

La velocidad de corrosión se ve incrementada por el flujo del electrolito, acelerando la reacción catódica.

De acuerdo con la ecuación de Levich, la velocidad de corrosión para el sistema estudiado bajo condiciones de flujo puede ser expresada por medio de las ecuaciones (7) u (8), con un coeficiente de relación de 0,947.

El mecanismo que controla el proceso bajo movimiento del electrolito es el transporte de especies oxidantes desde el seno del líquido hasta la interfase.

Para tratar de reproducir más fielmente las condiciones de servicio del acero en las condiciones de servicio, se recomienda realizar este experimento aumentando la temperatura del fluido, a mayores velocidades de giro (números de Reynolds más altos) y

**Cuadro 1.** Corriente límite y velocidad de corrosión bajo diferentes patrones de flujo

Velocidad angular (rpm)	Número de Reynolds	Corriente límite (mA/cm <sup>2</sup> )	Velocidad de Corrosión (mm/año)
0	0	-	0,24*
0,10	833	3,75E-2	0,28
0,30	2 500	6,75E-2	0,51
0,52	4 333	9,0E-2	0,68
0,78	6 500	1,0E-1	0,76
1,05	8 750	1,5E-1	1,14
1,31	10 916	1,75E-1	1,33

\*Obtenido por LPR según Tres & Saborío (2001)

Fuente: (El autor, 2005)

eliminando al máximo el oxígeno disuelto, pero con electrodo de cilindro, para trabajar bajo patrones de flujo altamente turbulentos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arganis, C. & Malo, J. (1998, agosto). *Resultados preliminares de corrosión asistida por flujo en Cu-Ni 90-10 en agua de mar*. Ponencia presentada en el Congreso LATINCORR 98, Cancún, México.

Jones, D. (1996). *Principles and prevention of corrosion* (2ª ed.). New Jersey, EEUU: Prentice-Hall.

Mendoza, J. & Turgoose, S.. (2000, setiembre). *Study on cathodic and corrosion kinetics of carbon steel in CO<sub>2</sub> containing solutions, using RCE*. Ponencia presentada en el Congreso LATINCORR 2000, Cartagena, Colombia.

Tres, G. & Saborío, E. (2001). Evaluación electroquímica de los aceros usados en

las tuberías del Proyecto Geotérmico Miravalles. *Tecnología ICE*, 11(1), 40-46.

United States, American Society for Testing and Materials (ASTM). (2002). *G-102 Calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements*. Philadelphia: ASTM.

United States, National Association of Corrosion Engineers (NACE). (1994). *T-5A-31, Draft #2. State-of-the-Art report on conducting controlled-flow laboratory corrosion test*. Houston: NACE International.

## SOBRE EL AUTOR

### Mario Alberto Vega León

Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería Química con énfasis en procesamiento de materiales.

Centro de Investigación de Corrosión del Instituto Costarricense de Electricidad.

Teléfono: 220-5164

Fascímil: 297-4070

Correo electrónico: mvegal@ice.go.cr