

Using experimental designs to evaluate corrosion inhibitors in chemical cleaning

Miguel Sánchez, Yolanda Hernández and Omar Ruiz

*Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia
Maracaibo, Venezuela. Apdo. 10482. Telf. 58-61-598527. Fax. 58-061-598527*

Abstract

This paper studies the parameters affecting the efficiency of the corrosion inhibitors used in chemical cleaning for the removal of deposits in carbon steel equipment. Optimum values from the parameters indicate that the corrosion rate will be minimized. Experimental Analysis and Design Techniques were used to establish relationships between the factors under study (temperature and concentration) by using well-planned experiments designed to determine an experimental region consisting of values that could be used in the industry. SAE 1020 carbon steel rods (0,3 cm in diameter) were embedded in teflon and coupled to an electrode rotating at a speed of 3000 rpm to simulate fluid flow conditions. These rods were immersed in inhibited HCl solutions. Electrochemical tests were carried out using the calomel electrode as the reference electrode and the platinum one as an auxiliary electrode. Potentiodynamic curves were used to calculate the corrosion rate. The overall results show that temperature was the most important factor that increases the corrosion rate.

Key words: Corrosion inhibitors, chemical cleaning, electrochemical tests, central rotary composite design, response surfaces methodology.

Uso de diseños experimentales para evaluar inhibidores de corrosión en limpieza química

Resumen

En el presente trabajo se estudiaron mediante Técnicas de Diseño y Análisis de experimentos los parámetros que influyen en la eficiencia de inhibidores de corrosión utilizados en limpieza química para remover incrustaciones en equipos de acero al carbono. Obteniendo valores óptimos de operación de los parámetros se minimiza la velocidad de corrosión. Las Técnicas de Diseño y Análisis de Experimentos, permiten relacionar los factores estudiados (temperatura y concentración), mediante experimentos planificados, con el fin de estudiar una región experimental consistente con valores utilizados en la industria. En general se logra, como resultado, productos de mayor confiabilidad y menores costos. Para las pruebas se utilizaron probetas de acero al carbono SAE 1020 con un área de $0,071 \text{ cm}^2$, empotradas en teflón y acopladas a un electrodo rotatorio con velocidad de 3000 rpm con el fin de simular condiciones de movimiento del fluido, sumergidas en soluciones de ácido clorhídrico inhibidas. Se utilizó el electrodo de calomelano como electrodo de referencia y el de platino como electrodo auxiliar. Las curvas potenciodinámicas se utilizaron para el cálculo de la velocidad de corrosión. Como resultado de este estudio, se determinó que el único factor significativo en el incremento de la velocidad de corrosión fue la temperatura.

Palabras clave: Inhibidores de corrosión, limpieza química, técnicas electroquímicas, diseño compuesto central rotable, metodología de superficies de respuesta.

Introducción

El agua utilizada en los procesos industriales generalmente presenta sales de calcio y magnesio. Cuando estas sales precipitan forman incrustaciones, que se adhieren a la superficie metálica, ocasionando problemas de transferencia de calor, restricción de flujo, pérdida de producción y corrosión por celdas de concentración [1].

Debido a los problemas mencionados se hace necesaria la limpieza de los equipos industriales. Esta limpieza puede ser en forma mecánica o química. Generalmente, se utiliza la limpieza química con ácidos porque es la forma más sencilla y rápida de remover las incrustaciones y porque son capaces de aflojar o disolver muchas incrustaciones que no pueden ser removidas por otros medios, debido al diseño complejo de muchos equipos. El ácido clorhídrico es el medio de limpieza química más usado para desincrustar aceros, ya que debido a la alta velocidad de disolución de las costras, es posible una velocidad más alta de limpieza, aun a menores temperaturas [2]. Pero por ser éste tan corrosivo para el metal expuesto, es recomendable adicionarle un inhibidor.

La efectividad de la limpieza depende de las concentraciones utilizadas de HCl e inhibidor, y de la temperatura. Por esta razón deben estudiarse los factores que influyen en la limpieza para encontrar los valores que minimicen la velocidad de corrosión. Para esto es importante aplicar Técnicas de Análisis y Diseño de Experimentos, y así determinar las condiciones que optimizan la variable dependiente, en este caso, la velocidad de corrosión.

Los experimentos diseñados son pruebas o series de pruebas en las cuales se inducen cambios en las variables de entrada de un sistema, de manera que sea posible observar o identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida, por ejemplo determinar cuáles variables (x_1, \dots, x_k) tienen mayor influencia en la variable de respuesta, "y" [3]. Los métodos de diseño experimental son importantes en el desarrollo de procesos para mejorar el rendimiento. En muchos casos, el objetivo es desarrollar un proceso afectado mínimamente por fuentes de variabilidad externas.

El uso del diseño experimental en el área de Ingeniería puede dar por resultado productos

con mayor confiabilidad, menores costos y menor tiempo de diseño y desarrollo del producto. La metodología de superficie de respuesta (RSM), es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para analizar problemas en los cuales varias variables independientes influyen en la variable dependiente o respuesta. Su objetivo es determinar las condiciones de operación óptima para un sistema o determinar una región del espacio de los factores en el cual las especificaciones operacionales son satisfactorias [3]. El primer paso a seguir en RSM es encontrar una aproximación apropiada para la verdadera relación funcional entre "y", variable respuesta, y el conjunto de variables independientes. Por lo general, se emplea un polinomio de bajo grado. Si hay curvatura en el sistema, se debe utilizar un polinomio de grado superior, tal como el modelo de segundo orden [3].

Un diseño experimental para ajustar un modelo de segundo orden debe tener un mínimo de tres niveles de cada factor para que los parámetros del modelo puedan ser estimados. El modelo preferido para diseñar la superficie de respuesta de segundo orden es el modelo de diseño compuesto central rotatable. De esta familia de diseños, los diseños rotables y ortogonales son los de uso más frecuente, la rotabilidad es una propiedad muy importante en la elección de un diseño de superficie de respuesta, ya que proporciona estimaciones igualmente precisas en todos los puntos de la región experimental direcciones que están a igual distancia del centro de la misma.

El diseño compuesto central es probablemente el diseño experimental más utilizado para ajustar superficies de respuesta de segundo orden. Este diseño consiste en una estructura experimental, en la cual se reconoce: un núcleo factorial conformado por 2^k ensayos, 2^k ensayos en los ejes axiales y n_c ensayos centrales. Un diseño compuesto central se convierte en rotatable mediante la elección de α . El valor de α para lograr la conversión a diseño rotatable, depende del número de puntos de la porción factorial del diseño. "De hecho, $\alpha = (n_f)^{1/4}$ proporciona un diseño compuesto central rotatable, donde n_f es el número de puntos en la porción factorial del diseño" [3].

La relación entre las variables se caracteriza por un modelo matemático conocido como ecuación de regresión. El análisis de regresión es

Tabla 1
Factores y Niveles de la Región Experimental

Factores	Niveles		
Temperatura (°C)	30	50	70
HCl (% p/p)	5,0	7,5	10,0
Inhibidor (% p/p)	2	3	4

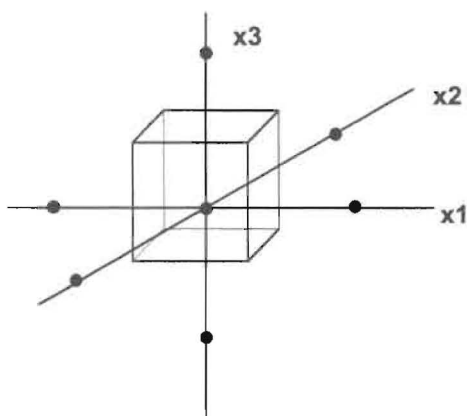


Figura 1. Representación geométrica del diseño compuesto central rotatable.

útil en experimentos diseñados. El análisis de varianza ayuda a determinar qué factores son importantes, usándose el de regresión para construir un modelo cuantitativo que relaciona los factores importantes con la respuesta.

El objetivo principal de este trabajo consiste en usar Técnicas de Diseño y Análisis de Experimentos para obtener una región experimental con valores que se correspondan con los utilizados en la limpieza industrial, en la que se pueda estudiar la eficiencia de un inhibidor de corrosión con HCl a diferentes concentraciones y temperaturas en acero al carbono.

Procedimiento Experimental

Determinación de la región experimental

Con el fin de planificar los experimentos eficientemente y con un número reducido de pruebas se aplicó una estrategia experimental en dos etapas: En la primera fase se ajustó una superficie de respuesta de segundo orden a través de un

diseño compuesto central rotatable, lo cual permitió redefinir la región experimental. En la segunda etapa se seleccionó un diseño de arreglo ortogonal de Taguchi del tipo L_8 para determinar los valores de los factores que minimizan la velocidad de corrosión.

Los factores o variables independientes seleccionados fueron la temperatura de la solución, la concentración del ácido clorhídrico y la concentración del inhibidor. Luego, se fijaron los niveles para cada uno de estos factores, seleccionando los valores usados con más frecuencia en el proceso real de limpieza química en la industria (Tabla 1).

Para representar de manera sencilla la región se codificaron los valores en los niveles estandarizados 0 y ± 1 , donde el nivel -1 representa el valor mínimo del factor, 0 el valor central y +1 el valor máximo del factor. Conocidos los factores y niveles a estudiar, se aplicó el diseño compuesto central rotatable (Figura 1). Este diseño se representa geoméricamente mediante un cubo, el cual posee 20 puntos experimentales: 8 combinaciones de niveles de la forma $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$ representadas por los vértices de un cubo, 6 combinaciones de niveles a distancias axiales de la forma $(\pm \alpha, 0, 0)$, $(0, \pm \alpha, 0)$ y $(0, 0, \pm \alpha)$, que se encuentran en cada uno de los puntos ubicados en los ejes coordenados y la combinación formada por el valor central de cada factor $(0, 0, 0)$ que representa físicamente el centro del cubo, y se repite n_c veces. Este experimento central se repitió 6 veces, con la finalidad de determinar el error experimental y asegurar la condición de rotabilidad del diseño. El diseño compuesto central, adquiere la propiedad rotatable mediante un valor α , donde $\alpha = (n_f)^{1/4}$ y n_f representa el número de puntos factoriales (8 experimentos), por lo tanto, $\alpha = 1,682$. Con este valor se consiguieron los experimentos axiales. El número de experimentos a realizar, se obtuvo sumando el número de puntos axiales, factoriales y el ensayo central con sus 6 repeticiones. La correspondencia entre los niveles de cada factor, en unidades originales y codificadas se representan en la Tabla 2. El orden de ejecución de los tratamientos puntos experimentales se efectuó de manera aleatoria.

Tabla 2
Valores Codificados por Factor

Factores	Niveles				
	-1,682	-1	0	1	1,682
Temperatura (°C)	16,36	30,00	50,00	70,00	83,64
Inhibidor (% p/p)	1,318	2,000	3,000	4,000	4,682
HCl (% p/p)	3,3	5,0	7,5	10,0	11,7

Elaboración de la región experimental L₈

La región experimental L₈ es un diseño que permite determinar el punto óptimo, con un número reducido de pruebas [4]. El diseño experimental anterior sirvió de base para determinar los niveles en que se encontraba el punto óptimo de operación, pero no fue posible calcular los valores que minimizaran la velocidad de corrosión, por lo que se diseñó una nueva región que tomara en cuenta los valores de los factores en los cuales se esperaba que la corrosión disminuyera (Tabla 3). Este nuevo diseño solamente toma en cuenta los niveles extremos de los factores, o sea, los valores codificados -1 y +1, quedando desarrollada la segunda región experimental.

Medidas electroquímicas

Como electrodo de trabajo se usó varillas de acero al carbono SAE 1020 de 3,0 mm de diámetro empotrado en teflón, el cual se hizo rotar a 3000 rpm, para así simular las condiciones de servicio. Antes de cada prueba, las probetas fueron pulidas sucesivamente con papel de carburo de silicio No. 80, 120, 400 y 600, y alúmina (Al₂O₃) 5; 0,3 y 0,05 µm. Finalmente, las probetas se lavaron con agua destilada, alcohol y se secaron con aire caliente. Como medio electrolítico se utilizó solución de ácido clorhídrico a concentraciones de 5,0; 7,5 y 10,0%p/p sin y con inhibidor, a concentraciones: 2,000; 3,000 y 4,000% p/p, la cual se agregó en una celda de vidrio termostática. Se usó como electrodo de referencia calomelano saturado y como electrodo auxiliar, el electrodo de platino.

Se empleó un potencióstato/galvanostato EG & G Princeton Applied Research modelo 173 con una interfase modelo 276, la cual permite el acoplamiento de un computador que sirve para el

Tabla 3
Factores y Niveles de la Región Experimental L₈

Factores	Niveles	
Temperatura (°C)	45,0	55,0
HCl (% p/p)	5,0	10,0
Inhibidor (% p/p)	2,000	4,000

procesamiento de datos, con la ayuda del software de corrosión PARC. La polarización potenciodinámica se efectuó a 0,28 mV/s entre -300 y +600 mV del potencial inicial.

Resultados y discusión de resultados

Velocidad de corrosión obtenida mediante técnicas electroquímicas

Una vez determinado el número de experimentos a realizar de acuerdo al diseño de experimentos, la velocidad de corrosión se adquirió mediante las curvas potenciodinámicas [5], por extrapolación de la pendiente catódica de Tafel a potencial de circuito abierto. La eficiencia del inhibidor se calculó de acuerdo a la ecuación:

$$\eta = (i_{\text{corr}_0} - i_{\text{corr}}) / i_{\text{corr}_0} \quad [6]$$

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4 (sin inhibidor) y la Tabla 5 (con inhibidor) a concentraciones de ácido, inhibidor y temperatura de acuerdo al diseño experimental. Se observa un cambio en la velocidad de corrosión cuando se utilizan altas temperaturas en la solución de HCl con el inhibidor estudiado, lo que de-

Tabla 4
Velocidad de Corrosión en Acero al Carbono SAE 1020 en Soluciones de HCl sin Inhibidor

Blanco	Temp. (°C)	% p/p HCl	($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	(mm/año)
1	30,0	5,0	5875,0	68,15
2	30,0	10,0	17692,3	205,25
3	70,0	5,0	55555,5	644,44
4	70,0	10,0	117647,0	1364,70
5	16,36	7,5	7000,0	81,20
6	50,0	7,5	50000,0	580,00
7	50,0	3,3	19615,3	227,53
8	50,0	11,7	54444,4	631,55
9	83,64	7,5	93333,3	1082,66

Tabla 5
Velocidad de Corrosión en Acero al Carbono SAE 1020 en Soluciones de HCl con Inhibidor

Prueba	Temp. (°C)	% p/p HCl	% p/p INH	($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	(mm/año)
1	50,0	3,3	3,000	8000,0	92,80
2	16,36	7,5	3,000	1307,6	15,16
3	50,0	7,5	3,000	9000,0	104,40
4	50,0	7,5	3,000	8250,0	95,70
5	70,0	10,0	2,000	90000,0	1044,00
6	70,0	5,0	4,000	39000,0	452,40
7	30,0	10,0	2,000	1730,7	20,07
8	50,0	7,5	3,000	7000,0	81,20
9	83,64	7,5	3,000	80000,0	928,00
10	30,0	5,0	4,000	1800,0	20,88
11	70,0	10,0	4,000	60000,0	696,00
12	50,0	11,7	3,000	13076,9	151,69
13	30,0	10,0	4,000	900,0	10,44
14	50,0	7,5	4,682	6166,6	71,53
15	50,0	7,5	3,000	7250,0	84,10
16	70,0	5,0	2,000	40000,0	464,00
17	30,0	5,0	2,000	2230,7	25,87
18	50,0	7,5	1,318	22500,0	261,00
19	50,0	7,5	3,000	8600,0	99,76
20	50,0	7,5	3,000	6833,3	79,26

muestra que este pierde su efecto inhibitor, por lo tanto no es conveniente su uso en estas condiciones, ya que el cambio en la velocidad de corrosión es casi de dos ordenes de magnitud. En las mismas tablas se observa que cuando la temperatura es baja (16,36°C), hay una marcada variación de la velocidad de corrosión del acero en la solución inhibida con respecto al blanco. Mientras que a 83,64°C los valores (con y sin inhibidor) son similares, lo que demuestra que el inhibidor pierde su acción inhibitoria. Es conveniente destacar que los valores axiales de temperatura calculados (16,36°C y 83,64°C) no son temperaturas reales de operación cuando se realiza una limpieza química.

La eficiencia promedio del inhibidor a 30 y 50°C permanece alrededor de 85% aproximadamente. Cuando se usan temperaturas de 70°C ó más la eficiencia disminuye a valores bastante bajos (14%), con lo cual se define que éste pierde toda su capacidad inhibitoria al incrementar la temperatura.

Análisis estadístico

Los valores de velocidad de corrosión del acero al carbono obtenidos experimentalmente mediante pruebas electroquímicas, se sometieron a un análisis de regresión múltiple, utilizando para ello un modelo lineal, los cálculos desarrollados de regresión múltiple y análisis de varianza [3], fueron ejecutados utilizando el paquete estadístico statgraphic, versión 7.10:

$$y_i = \beta_0 + \sum \beta_j \cdot x_i + \sum \sum \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \epsilon_i$$

$$i = 1, \dots, k; \quad j = 1, \dots, k; \quad i \neq j$$

El coeficiente de determinación (R^2) calculado, siendo x_i la variable acero al carbono, se consideró bajo (0,64), por lo tanto se decidió desarrollar un modelo que incluyera los efectos cuadráticos y las interacciones:

$$y_i = \beta_0 + \sum \beta_i \cdot x_i + \sum \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \epsilon$$

$$i = 1, \dots, k; \quad j = 1, \dots, k; \quad i \neq j$$

Donde: y_i = variable de respuesta; β_i = coeficientes; x_i = variables o factores; y ϵ = error experimental

En estas condiciones se obtuvo un valor considerablemente elevado para el coeficiente de determinación del material en estudio ($R^2 = 0,94$). Luego, se realizó la prueba de bondad del modelo, es decir, se determinó si el modelo seleccionado ajustaba adecuadamente los datos experimentales. Para tal fin, se utilizó el análisis de varianza. El valor calculado F^* resultó ser 91,0; como el F tabulado es 5,05 y $F^* > F$, demuestra porque el modelo propuesto ajustó [5].

Para tener una idea de los posibles valores de las variables se determinaron las condiciones óptimas de operación. Se observó que el punto encontrado incluye valores de niveles de los factores temperatura y concentración de HCl ubicados dentro de la región experimental, no así para la concentración de inhibidor cuyo valor se ubica fuera de la región experimental estudiada. En resumen, las condiciones fueron, temperatura: 48,56°C, 5,84 %p/p HCl y 9,450 %p/p de inhibidor. Para este punto estacionario la velocidad de corrosión fue demasiado grande (320,58 mm/año).

A fin de determinar la naturaleza de este punto se procedió a efectuar un análisis canónico, el cual indica la dirección y magnitud de los cambios en los niveles de los factores en estudio para obtener mejoras en la velocidad de corrosión y por tanto, caracterizar si el referido punto corresponde a una situación de respuesta máxima, mínima o de inflexión. Después de los cálculos necesarios se obtuvo que el punto estacionario es un punto de inflexión [3]. Esto implica que el desplazamiento en un eje de coordenadas puede disminuir la velocidad de corrosión y el movimiento en otro eje conduce a un incremento de la respuesta. Con las raíces características se calculó una nueva región experimental de forma analítica [7]. Sin embargo se determinó que los valores de los factores no representaron valores físicos que pudieran utilizarse en la práctica [3].

Analizando los resultados obtenidos, se pudo deducir que el modelo cuadrático para estos datos no fue el apropiado. Sin embargo, se notó que en todos ellos el factor más significativo era la temperatura; con esto y observando los valores críticos de velocidad de corrosión a alta temperatura se concluye que el HCl y el inhibidor no participan en esta región, en la explicación de la velocidad de corrosión, es decir, no afectan de

manera altamente significativa la velocidad de corrosión. Por lo antes expuesto, se decidió desarrollar un ajuste polinómico de tercer grado con temperatura como única variable independiente, y con ello poder precisar una región experimental alterna en la que se pudiera apreciar el efecto no solo de temperatura sino también de concentración de HCl y concentración de inhibidor.

Modelo de tercer orden

Utilizando un modelo de tercer orden se realizó la regresión múltiple, obteniendo:

$$y = -6,542306 \times 10^5 + 44426,30 \times T - 941,38 \times T^2 + 6,2905 \times T^3$$

Los valores de temperaturas determinados mediante el modelo de tercer orden desarrollado fueron para la primera raíz valores entre (29-31)°C, la segunda raíz entre (69-71)°C y la tercera raíz entre (47-50)°C.

El valor de temperatura cercano a los 70°C, no puede tomarse como temperatura óptima, ya que en las anteriores pruebas se determinó que a esa temperatura el inhibidor pierde su efectividad, y por lo tanto hay un alto grado de corrosión, a cualquier concentración de HCl e inhibidor. La temperatura cercana a los 30°C tampoco debe considerarse, ya que por experiencia se conoce que la limpieza química es más eficiente al aumentar la temperatura de la solución ácida. Por lo tanto, se recomendó utilizar 50°C en la nueva región experimental de la temperatura, eligiendo 45°C como nivel mínimo y 55°C como nivel máximo. Los niveles de las concentraciones de HCl e inhibidor fueron seleccionados de acuerdo a los

resultados obtenidos en la primera fase experimental.

Cálculo de la velocidad de corrosión de la región experimental L_3

Utilizando los nuevos valores de temperatura, determinados con el modelo de tercer orden, se calculó nuevamente la velocidad de corrosión (Tablas 6 y 7). Aquí se observa el aumento moderado de la velocidad de corrosión con el incremento de la concentración de ácido clorhídrico. Los valores obtenidos aquí verifican la acción efectiva del inhibidor en cuanto a la velocidad de corrosión, los cuales disminuye casi un orden de magnitud y son mucho más aceptable que los presentados en la Tabla 5. La eficiencia del inhibidor sobre el acero al carbono, aumento en esta nueva región experimental, manteniéndose todos los valores por encima del 80%, excepto cuando se utilizó alta temperatura (>55,0°C) y alta concentración de HCl (10,0% p/p), percibiéndose de este modo que la temperatura es uno de los factores más crítico en el incremento de la velocidad de corrosión.

Cálculo del punto óptimo de operación

Los nuevos valores de velocidad de corrosión se analizaron mediante una regresión múltiple utilizando un modelo lineal, con el fin de determinar la variabilidad entre estos valores y calcular el punto óptimo.

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon_i$$

$$i = 1, \dots, n$$

Tabla 6
Valores de Velocidad de Corrosión en Soluciones sin Inhibidor de Acero al Carbono SAE 1020

Blancos	Temp (°C)	% p/p HCl	icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	mm/año
1	55,0	10,0	67777,7	786,22
2	55,0	5,0	43333,3	502,66
3	45,0	10,0	39090,9	453,45
4	45,0	5,0	21875,0	253,75

Tabla 7
Valores de Velocidad de Corrosión y Eficiencia para el Acero al Carbono SAE 1020

Prueba	Temp °C	% p/p HCl	% p/p INH	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	mm/año	η (%)
1	45,0	10,0	4,000	4285,7	49,71	89,03
2	45,0	5,0	4,000	3000,0	34,80	86,28
3	45,0	10,0	2,000	5428,5	62,97	86,11
4	45,0	5,0	2,000	4333,3	50,26	80,19
5	55,0	10,0	4,000	14615,3	169,53	78,44
6	55,0	5,0	4,000	5000,0	58,00	88,46
7	55,0	10,0	2,000	16538,4	191,84	75,59
8	55,0	5,0	2,000	8500,0	98,60	80,38

donde el valor del coeficiente de determinación (R^2) fue igual a 0,99 y el nuevo modelo dio altamente significativo. Lo que demuestra que la variabilidad entre los datos ha disminuido, por no existir ahora cambios drásticos en la temperatura.

Aplicando el diseño de arreglos ortogonales de Taguchi, cuando se considera una característica de calidad del tipo "mientras más pequeño es mejor" [4], se deducen las condiciones experimentales en las que se obtendrá la menor velocidad de corrosión.

Gráficamente, estas condiciones se consiguen al localizar el mayor valor de la variable de respuesta para cada nivel de un factor seleccionado. Esto se repite para cada factor en estudio. La gráfica se caracteriza por representar los factores en el eje de las abscisas y la respuesta NS en el eje de las ordenadas, donde NS es igual a:

$$NS = -\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y^2\right)$$

En la Tabla 8 se muestran los niveles de los factores que optimizan esta variable. De acuerdo al análisis estadístico desarrollado a lo largo del trabajo se determinó que a estas condiciones se logra minimizar la variable de respuesta, en este caso, la velocidad de corrosión.

Este desarrollo experimental pudiese apreciarse inadecuado, si se considera los resultados reportados por Biagotti [8], según los cuales los

Tabla 8
Punto Optimo de Operación

Factor	Nivel
Temperatura (°C)	45,0
% p/p HCl	5,0
% p/p Inhibidor	4,000

diseños experimentales reducidos (fraccionales y Taguchi) pudiesen ser inapropiados para determinar efectos sinérgicos en sistemas donde existen reacciones químicas. Sin embargo, en nuestro caso se logró determinar una región experimental (mediante el uso del diseño compuesto central rotatable) donde las interacciones son no significativas, entonces los diseños de arreglos octogonal tipo Taguchi son altamente eficiente para determinar los efectos principales de los factores considerados.

Conclusiones

Cuando se realizan pruebas experimentales y se desarrollan diseños de experimentos disminuye el número de pruebas a realizar y se economiza tiempo y material necesario para la experimentación, además que se obtienen resultados para su implementación.

La variable de respuesta fue afectada, por utilizar un amplio intervalo de valores de tempe-

ratura (30,0°C - 70,0°C), ya que los resultados de velocidad de corrosión obtenidos difieren mucho entre sí, causando falta de ajuste en los modelos estadísticos propuestos.

Cuando se diseñó la segunda región experimental, la variable de respuesta (velocidad de corrosión) mejoró, indicando esto que el inhibidor es más efectivo cuando se utiliza en un intervalo de temperatura entre 40-50°C.

De acuerdo a los resultados del diseño de experimentos desarrollado, el punto óptimo de operación para realizar la limpieza química obteniendo bajas velocidades de corrosión, es HCl a 5,0 %p/p, 4,000 %p/p de inhibidor y 45,0°C .

De los resultados obtenidos usando el diseño de experimentos desarrollado, la temperatura fue el factor más significativo en el incremento de la velocidad de corrosión. Un alto valor de concentración de HCl no afectó tanto la velocidad de corrosión como fue con el aumento en la temperatura.

El inhibidor estudiado fue perdiendo drásticamente su efecto protector a medida que se aproximaba a los 70°C ó más. Por lo que un aumento brusco en la temperatura, incremento significativamente la velocidad de corrosión.

Referencias Bibliográficas

1. Powell, Sheppard T.. Acondicionamiento de aguas para la industria. Editorial LIMUSA. México. 1979.
2. Limpieza Química. Calgon Interamerican C. A.. Maracaibo. Venezuela. 1989.
3. Montgomery, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. Grupo editorial Iberoamérica. México. 1991.
4. Phadke, Madhav. Quality Engineering using Robust Design. AT Bell Laboratories. New Jersey. 1989.
5. Hernández López, Yolanda E. Optimización de factores que inciden en la eficiencia de inhibidores de corrosión utilizados en limpieza química. Escuela de Ingeniería Química. Universidad del Zulia. Maracaibo. Venezuela. Julio 1994.
6. González Fernández, José A.. Control de la corrosión, estudio y medida por técnicas electroquímicas. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Madrid. 1989.
7. Myers, R. H. Response Surface Methodology. Allyn and Bacon Inc. Boston. 1971.
8. Biagotti S., The use of experimental designs for corrosive oilfield, CORROSION /97, paper no. 97009 (New Orleans - USA, TX: NACE, 1997).

Recibido el 4 de Marzo de 1997

En forma revisada el 4 de Noviembre de 1997