

ESTUDIO DE LOS DERIVADOS SÓLIDOS OBTENIDOS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN DEL MOSTO DE LAS DESTILERÍAS COMO INHIBIDOR DEL DESCINCADO DE LOS LATONES EN AGUA DEL MAR A ALTAS TEMPERATURAS. (II)

Roger Matos Tamayo, Meivi Hung Gutiérrez
Universidad de Oriente

El presente trabajo forma parte de una de las líneas de investigación que realiza la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente, en la búsqueda de soluciones que permitan de forma económica disminuir la corrosión de los equipos y materiales metálicos. El objetivo principal es el análisis de las variables que influyen en la velocidad de corrosión y en el descincado de los latones amarillos corrientes y la eficiencia de inhibidores ecológicos obtenidos a partir de la vinaza o mosto de las destilerías alcohólicas. El sólido utilizado como inhibidor en este trabajo se obtiene de la electrocoagulación del mosto del Combinado Destilería-Cervecería "Hatuey" en la provincia de Santiago de Cuba.

Se realizaron experimentos de corrosión, en blanco o sea sin la presencia del inhibidor, y con inhibidores y mezclas de éstos utilizando el método gravimétrico. Los inhibidores de la corrosión utilizados para el latón corriente en agua de mar a temperaturas elevadas, fueron los productos obtenidos de la electrocoagulación de la vinaza, producto residual obtenido de la destilación alcohólica: el lodo y la espuma.

El análisis de la influencia de las variables en la velocidad de corrosión y en el descincado, se desarrolló mediante un diseño de experimento multinivel factorial obtenido en el programa profesional STATGRAPHICS 5.1, considerando como variables independientes: la temperatura y la concentración del inhibidor con el fin de obtener las combinaciones óptimas de estas variables que permitan mayor eficiencia de inhibición de la corrosión y del descincado.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que el uso de las sustancias inhibidoras arrojó que los valores de velocidad de corrosión tuvieron una disminución significativa para el rango de temperatura comprendido entre 70 – 90 °C, independientemente de que previnieron la aparición del descincado de los latones según la concentración del inhibidor hasta alcanzar una velocidad estable.

Palabras clave: corrosión, latones, descincado

The present work is part of one of the investigation lines that realizes the Chemical Engineering Faculty of Orient University in Santiago de Cuba, in the searching of solutions that allow an economic form to decrease the corrosion of the equipments and metallic materials. The main purpose is the analysis of the variables that influence in the corrosion rate and in the dezincification of common yellow brasses and the efficiencies of ecological inhibitors obtained from the vinaza of alcoholic distilleries. The solid used as inhibitor in this work is obtained from the electrocoagulation of the vinaza of the Combined Distillery-Brewer "Hatuey" in Santiago of Cuba province.

The corrosion experiments were realized in blank, without the presence of the inhibitor, and with inhibitors and mixes of these using the gravimetric method. The inhibitors used in the corrosion of common brass in sea water at high temperatures were the products obtained by the electrocoagulation of the vinaza, residual product obtained of the alcoholic distillation: the slime and the foam.

The analysis of the influence of the variables in the corrosion rate and in the dezincification was developed by means of a multilevel factorial experiment design obtained in the professional program STATGRAPHICS 5.1, considering as independent variables: the temperature and the concentration of the inhibitor being the purpose to obtain the optimum combinations of these variables that allow the maximum efficiency of corrosion inhibition in the dezincification.

The results obtained were satisfactory, since the use of the substances inhibitors proved that the values of corrosion rate had a significant decrease for the temperature range between 70 – 90 °C, independently that decreases the apparition of the dezincification of the brasses as the concentration of the inhibitor rises until achieving an stable corrosion rate.

Key words: corrosion, brasses, dezincification

Introducción

En la vida diaria con frecuencia se considera la corrosión de los metales como un problema industrial importante que se debe prevenir, y de esta forma evitar desechar los materiales metálicos o bien tener que limpiarlos, repararlos o sino aplicar algún método de protección para que puedan alargar su vida útil. La corrosión es la acción química o electroquímica, lenta o acelerada de la naturaleza o el medio ambiente, que degrada y destruye los metales.

Los metales, en especial el latón se usa en varias ramas productivas de la sociedad por lo que hay que tener en cuenta el fenómeno de la corrosión por su efecto perjudicial tanto económico como medioambiental y buscar las vías de detener la misma o aminorar sus efectos. Uno de los métodos fundamentales utilizados para la prevención de la corrosión es la utilización de inhibidores, que son productos químicos que reaccionan con una superficie metálica, dando a la misma un cierto nivel de protección. Los inhibidores a menudo trabajan fijándose por adsorción en la superficie del metal, protegiéndola a través de la formación de película.

Algunos tipos de residuales contienen elementos que por sus propiedades inhibidoras pueden ser usados para combatir este problema que afecta a nivel mundial. El uso de residuales industriales resulta una alternativa atractiva, que permite el tratamiento adecuado, el aprovechamiento de los mismos y que a la vez disminuya la contaminación medioambiental. De esta forma se puede obtener productos valiosos y lo que era un desecho pasa a ser una materia prima cuyo empleo resulta económicamente ventajoso.

Teniendo en cuenta todos los aspectos anteriores, se llevan a cabo investigaciones sobre la utilización del derivado líquidos obtenidos de la electrocoagulación del mosto como un inhibidor de la corrosión, resolviéndose así dos problemas de gran importancia para la sociedad, la contaminación medioambiental y la corrosión.

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo consistió en realizar un estudio del comportamiento corrosivo del

agua de mar respecto al latón corriente (70 % Cu, 30 % Zn) a temperaturas elevadas en agua de mar, en ensayos de alrededor de 30 h y estudiar el efecto de algunas sustancias inhibidoras, obtenidas a partir de la electrocoagulación del mosto de las destilerías alcohólicas como inhibidores de la corrosión, con el fin de comprobar la aparición del descincado de los latones y el posible efecto inhibitorio de las sustancias mencionadas.

Objetivos particulares

- Estudiar el comportamiento corrosivo del latón corriente en agua de mar a temperaturas de 70, 80 y 90 °C.
- Estudiar el efecto inhibidor, respecto a la aparición del descincado de los latones, de los sólidos obtenidos a partir de la electrocoagulación del mosto de las destilerías, obtenidos por precipitación del sólido de la parte líquida, así como de mezclas de sólidos obtenidos del líquido y de la espuma, a tres concentraciones del mismo (1, 2 y 3 g/L).
- Estudiar el efecto inhibidor de una mezcla al 50 % para la concentración de 1 g/L, de los sólidos obtenidos a partir de la espuma y de la solución, a las 3 temperaturas dadas, con el fin de comprobar un posible efecto sinérgico.

Fundamentación teórica /1, 3, 5, 9, 10, 12, 16,18/

Se define como corrosión el ataque químico o electroquímico que experimentan los materiales por acción del medio ambiente, siempre y cuando esto conlleve a un deterioro de dicho material, la corrosión puede ocurrir de forma lenta pero siempre tiene carácter continuo. Debe destacarse el hecho de que el fenómeno de la corrosión conduce inevitablemente al deterioro o destrucción del equipo o material, produciendo una disminución de su valor de uso, acortando, por tanto, la vida útil del mismo. Esta aclaración es válida puesto que no siempre un ataque químico produce deterioro.

La corrosión es un proceso heterogéneo, de oxidación-reducción, en el que participan al menos dos fases, donde el material metálico se oxida

gracias a la reducción de algún componente del medio corrosivo en contacto. Son varias las formas existentes de expresar la velocidad de los procesos de corrosión. Esto mayormente se debe a la diversidad de formas en que se presenta la corrosión, lo cual obliga a buscar la manera más adecuada de reflejar la intensidad del ataque.

Si se considera que todo proceso de corrosión implica una transformación del metal a formas oxidadas del mismo, entonces la masa metálica que se transforma en la unidad de tiempo y de superficie, es una magnitud representativa de la velocidad del proceso corrosivo, es decir, que la velocidad de corrosión se expresa generalmente como pérdida o ganancia de masa del material metálico por unidad de superficie y por unidad de tiempo.

Se acostumbra a calcularla por la siguiente expresión:

$$DP = \frac{\Delta m}{S \cdot t} \quad (1)$$

donde:

DP: Velocidad de corrosión como pérdida o ganancia de masa por unidad de tiempo y superficie.

S: Superficie de la pieza.

Δm : pérdida o ganancia de masa de la pieza.

t: Tiempo de ataque a la pieza por el medio oxidante.

Las unidades más empleadas para DP son: g/m² día, kg/m² año, mg/dm² día (mdd).

Otra forma muy usada para evaluar la velocidad de corrosión es mediante la disminución de espesor que experimenta el material en la unidad de tiempo. Esta forma tiene mayor aplicación práctica que la anterior (DP) porque brinda una idea aproximada del espesor óptimo que debe tener un material metálico para que dure el tiempo señalado. La velocidad de corrosión hallada de esta manera se representa por DE y es conocida como índice de penetración o disminución del espesor (DE), siendo una de las expresiones utilizadas la siguiente:

$$DE = 8,76 DP/\rho \quad (2)$$

donde:

ρ : Densidad del metal en g/cm³.

DP: Velocidad de corrosión en g/m².h.

La constante 8,76 es un factor de conversión de unidades que permite obtener el DE en mm/año a partir del DP expresado en g/m².h. Otras unidades empleadas para el DE son, en el sistema inglés, la pg/año, (ipy) y la milésima de pulgada por año, mpy.

El índice de penetración permite establecer la estabilidad de un metal en el medio agresivo. Los criterios de corrosión utilizados para la resistencia a la corrosión se deben a Fontana y aparecen en la siguiente tabla:

Tabla 1
Criterios de estabilidad para medir la resistencia a la corrosión, según Fontana

Resistencia a la corrosión relativa	Velocidades de corrosión	
	mpy	mm/año
Sobresaliente	< 1	< 0,02
Excelente	1 – 5	0,02 – 0,1
Buena	5 – 20	0,1 – 0,5
Regular	20 – 50	0,5 – 1,0
Pobre	50 – 200	1,0 - 5
Inaceptable	> 200	>5

El empleo de inhibidores de la corrosión es uno de los métodos más universales, y por tanto difundido, de combate anticorrosivo.

Se define como inhibidor de la corrosión a aquellas sustancias químicas que, adicionadas al medio corrosivo en pequeñas cantidades, producen una disminución sensible de la velocidad de la corrosión, siempre que la acción de los inhibidores se realice en la interfase metal-solución, quedando excluidas de esta definición las sustancias que alteran la concentración de los agentes oxidantes o de otros agentes agresivos del medio.

Inhibidores de corrosión/1,2,3,5,6,13,14,19,20,21/

Los inhibidores en su acción superficial, varían la velocidad de las reacciones de oxidación-reducción entre el metal y el medio oxidante. La forma en que esto se realiza puede variar en dependencia de la naturaleza del inhibidor, sus propiedades químicas, las características del metal y del medio corrosivo. Es por eso que los inhibidores pueden clasificarse desde muchos puntos de vista.

Por su naturaleza química pueden ser inorgánicos y orgánicos. Entre los inorgánicos están el dicromato de potasio y el sulfato de cinc entre otros, en estos la parte activa de la sustancia puede ser el anión, el catión o la molécula. Los orgánicos son mucho más abundantes y variados con grupos funcionales diversos. Como ejemplo

se pueden mencionar las aminas alifáticas y aromáticas, las tioureas, los oniosales, etcétera. La efectividad de un inhibidor depende de múltiples factores, tales como concentración del inhibidor, del material metálico, del tipo y concentración de la solución, la temperatura, la presencia de otros agentes tensoactivos, etcétera. Hay productos que disminuye su efectividad con el aumento de la temperatura y otros que la aumentan.

La forma más usual de expresar la efectividad de un inhibidor es:

$$\eta = \left(1 - \frac{DP_{ci}}{DP_{si}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{DE_{ci}}{DE_{si}}\right) * 100 \quad (3)$$

donde:

η : Eficiencia del inhibidor en %.

DP_{ci} , DP_{si} : Velocidad de corrosión con y sin inhibidor, respectivamente.

La concentración y el tipo de inhibidor a usar en un ambiente corrosivo se determinan generalmente por vía experimental y esta información la suele brindar el fabricante. Es importante la utilización de suficiente cantidad de inhibidor puesto que muchos de estos agentes pueden acelerar la corrosión si están en defecto.

El efecto de los inhibidores de adsorción se puede representar desde el punto de vista teórico a través de la isoterma de Langmuir lo cual se explica a continuación:

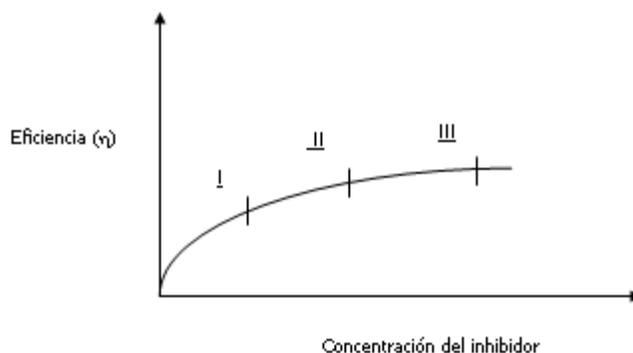


Figura 1. Isoterma de Langmuir

Fig. 1 Isoterma de Laqmuir

Región I: La adsorción aumenta proporcionalmente con la concentración del inhibidor

Región II: La adsorción sigue aumentando pero en este caso no tan bruscamente como en la región anterior.

Región III: La adsorción permanece constante independientemente del aumento de la concentración del inhibidor.

Cuando la superficie del metal está saturada con el adsorbente, un aumento de la concentración no tiene ningún efecto práctico sobre la adsorción. Esta es la razón por la cual no es económico aumentar la concentración del inhibidor por encima de cierto límite, puesto que no se obtiene un aumento de la superficie, excepto a temperaturas algo elevadas, donde el efecto negativo de la adsorción se compensa con un aumento de la concentración del inhibidor. La adsorción disminuye con el aumento de la temperatura y por lo tanto a una concentración dada, será menor a medida que aumenta la temperatura del sistema.

La decisión acerca del uso del inhibidor se determina en última instancia por la facilidad económica, teniendo en cuenta las veces que aumenta la utilización del inhibidor, el tiempo de vida de la instalación y el costo de esta, así como la cantidad de productos necesarios y su costo.

Latones /2, 4, 7, 8/

Los latones son aleaciones de cobre y cinc. El latón es más duro que el cobre, es dúctil y puede forjarse en planchas finas. Antiguamente se llamaba latón a cualquier aleación de cobre, en especial la realizada con estaño. Es posible que el latón de los tiempos antiguos estuviera hecho con cobre y estaño. La aleación actual comenzó a usarse hacia el siglo XVI.

El diagrama de fases del sistema cobre-cinc es típico de las asociaciones complejas de disoluciones y fases intermedias que concurren en los sistemas Cu-Zn, Cu-Al, Cu-Be y Cu-Si. Afortunadamente, las aleaciones útiles de estos sistemas, generalmente, corresponden a regiones de la disolución sólida rica en cobre, y la fase alfa, en

todas ellas, tienen la estructura del cobre, modificadas las dimensiones por la presencia del segundo elemento en disolución sólida.

En todos los sistemas metálicos existe una cierta relación entre las propiedades mecánicas y la microestructura. En el caso de las aleaciones cobre-cinc, en términos generales ocurre que las aleaciones estrictamente de cobre-cinc, que forman la base de la serie completa de latones, se dividen en tres grupos principales:

- Latones alfa: que contienen hasta un 39 % de cinc.
- Latones alfa-beta que empiezan a formarse a un 37,5 % de cinc aproximadamente y terminan en la proporción de un 45 % de cinc.
- Latones beta: que comprenden los de un 46 a un 50 % de cinc aproximadamente.

A un valor próximo al 50 % de cinc comienza la aparición de la fase γ , que hace que el material sea frágil. A continuación aparecen algunos de los principales latones empleados en la práctica industrial.

Latones ordinarios: Son aleaciones de Cu y Zn con más de 55 % de cobre. Presenta sobre el cobre las ventajas siguientes: 1; precio más bajo; 2; mayor facilidad para el moldeo; 3; gran maleabilidad; 4; gran resistencia mecánica y dureza más elevada; 5; mayor resistencia a los agentes atmosféricos.

Latones mecánicos: embutición (latones 70-30, con 70 % de Cu): de fácil mecanización (55 a 50 % de cobre).

Latones de soldadura fuerte: soldaduras del hierro (70 a 90 % de Cu); del cobre (55 a 45 %).

Latones especiales: cuando se requiere un aumento de dureza o de resistencia a la tracción se añade a las aleaciones cobre/cinc 60/40, aluminio, hierro, manganeso, estaño, níquel y algunas veces silicio. Utilizado en tubos de condensación. Son aleaciones Cu-Zn a las que se añaden uno o varios elementos: Pb, Mn, Fe, etcétera.

Latones al estaño: Con la composición 60% de Cu, 23 % de Zn y 2 % de Sn resisten muy bien a la corrosión por el agua del mar, empleándose para bombas y en construcción naval.

Los latones se emplean mucho cuando se necesita embutir, aunque por su tendencia a empañarse o deslustrarse al estar expuestos a la intemperie conviene en muchos casos, protegerlos con un recubrimiento.

Latones rojos

Contienen menos de un 20 % de cinc; se pueden trabajar en caliente entre 750° y 900°, a partir del lingote, pero es corriente terminarlos por laminado o estirado en frío.

La plasticidad de estos metales es mayor cuanto menos cinc contienen; se caracterizan por ser muy resistentes a la corrosión y no sufren descincado ni la corrosión intercrystalina en ciertos ambientes. Son más caros que los latones amarillos.

Descincado de los latones

Cuando el contenido de zinc de un latón se incrementa sobre el 15 % la susceptibilidad al descincado es característica en los latones, ocurre en agua de mar, en agua neutral a altas temperaturas y en aguas estancadas. Este fallo puede ser prevenido usando antimonio, estaño, estroncio y paladio como inhibidores en la aleación. El fenómeno ocurre en toda la superficie del latón, se forman pequeños agujeros, (tipo tapón) o depósitos blancos de óxido de cinc, en el caso de un ataque uniforme. En el caso del descincado tipo tapón o se observan alrededor de los agujeros la coloración roja característica del cobre, pero el resto de la estructura mantiene un color amarillo y no resulta atacada sensiblemente.

Entre las condiciones que favorecen el descincado de los latones está el contacto con aguas con alto contenido de oxígeno y dióxido de carbono, aguas ligeramente ácidas o alcalinas, aguas estancadas o con muy bajas velocidades de flujo, aguas con alto contenido de iones cloruro, aguas suaves y oxigenadas de bajo pH y bajo contenido de minerales. En todos estos casos se produce un ataque uniforme. Además lo favorecen las aguas neutras o alcalinas con alto contenido salino a temperatura ambiente o moderadamente altas.

La fotografía de la figura 2 indica un ejemplo típico de descincado con pequeños agujeros



Fig. 2 Ejemplo típico de descincado

Materiales y métodos

Como ya se ha dicho el material metálico empleado fue el denominado latón corriente (70 % Zn-30 % Cu). El inhibidor sólido de la corrosión utilizado en este trabajo se obtiene de la electrocoagulación de la vinaza, que es un residual del proceso de la destilación alcohólica, a partir de las mieles finales de la caña de azúcar, del complejo Cuba Ron de la Provincia Santiago de Cuba.

Después de obtener el derivado sólido de la electrocoagulación del mosto, se logra dos tipos de sólidos diferentes, uno de la espuma y el otro del lodo, con condiciones variadas tales como el amperaje, tiempo de residencia y temperatura. Para la realización de los experimentos nada más se tuvo en cuenta el uso del sólido proveniente del líquido. Se utilizó además un termostato regulable, ácido sulfúrico concentrado como agente limpiador, tubos de ensayo, una balanza analítica y agua de mar traída de una playa cercana a la ciudad de Santiago de Cuba. El método utilizado fue el método gravimétrico que consiste en medir, limpiar y pesar bien las piezas, someterlas al agua de mar durante 4 h, limpiar las muestras, secarlas y pesarlas de nuevo. Se calcularon las velocidades de corrosión por las expresiones típicas de este método. El tiempo de exposición fue de unas 30 h, suficientes para observar en forma visible la aparición del fenómeno del descincado del latón empleado.

Resultados experimentales

En la tabla N°2 aparecen los resultados experimentales obtenidos para los sólidos obtenidos a partir de la centrifugación del líquido, y en la tabla N°

3, los resultados obtenidos a partir de una mezcla al 50 % y a la concentración de 1 g/L de una mezcla de los sólidos obtenidos a partir de la centrifugación de la solución y de la espuma, formados durante el proceso de electrocoagulación del mosto.

Tabla 1

Valores de la velocidad de corrosión y eficiencia de inhibición a diferentes valores de temperatura y concentración del inhibidor (lodo obtenido a partir de la solución)

T (°C)	C (g/L) de inhibidor	DE (mm/año)	η (%)
70	0	0,169 3	-
	1	0,097 4	42,45
	2	0,085 6	49,46
	3	0,065 7	61,19
80	0	0,253 4	-
	1	0,163 6	35,45
	2	0,158 4	37,50
	3	0,153 3	39,49
90	0	0,365 4	-
	1	0,247 5	32,27
	2	0,240 5	34,19
	3	0,233 7	36,03

Tabla 2

Valores de la velocidad de corrosión y eficiencia de inhibición para una mezcla al 50 % del sólido obtenido a partir de la espuma y del líquido

T (°C)	C (g/L) del Inhibidor	DE (mm/año)	η (%)
70	0	0,169 3	-
	1	0,072 4	57,39
80	0	0,253 4	-
	1	0,115 6	54,38
90	0	0,365 4	-
	1	0,177 6	51,50

En la figura 3 se muestra la diferencia entre el aspecto superficial de una lámina de latón limpia antes de someterse al ataque del medio (a) y después del ataque (b). Se notan a simple vista los efectos del descincado del latón. En la

figura 4, la apariencia superficial de un cilindro de latón, después ser sometido a un proceso corrosivo, donde no se observan depósitos blancos, característicos del fenómeno de descincado.

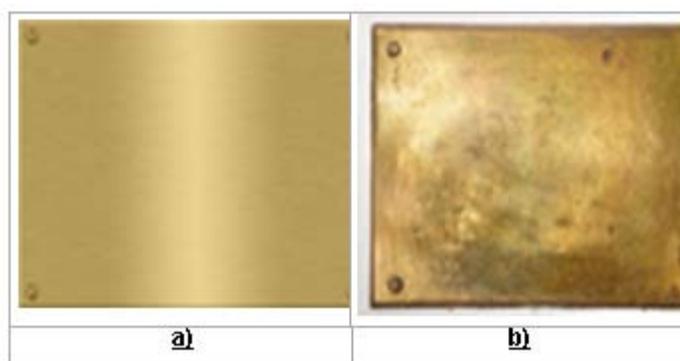


Fig. 3 a) Lámina de latón sin corrosión, b) Lámina de latón con efecto de la corrosión.



Fig. 4 Cilindro de latón, luego ser sometido a un proceso corrosivo, con la presencia de inhibidor, donde no se observan depósitos blancos, característicos del fenómeno de descincado.

Tratamiento estadístico de los resultados

A continuación aparece el procesamiento estadístico de los resultados experimentales, lo cual permitirá realizar un análisis más profundo de estos. Con el tratamiento estadístico de los resultados experimentales se analizará la influencia de algunas variables en la velocidad de corrosión del agua del mar sobre el latón, obteniéndose un modelo matemático que relacione a las mismas con el latón.

Para efectuar dicho análisis es necesario escoger el modelo matemático que describa el comportamiento del sistema en cuestión. El procesamiento estadístico de los valores de velocidad de corrosión se hizo utilizando el programa profesional STATGRAPHICS PLUS 5,1. Es recomendable inicialmente plantear el polinomio general con

todas las interacciones para luego determinar cuáles de éstas son o no significativas.

A continuación se presentan el coeficiente de regresión y el modelo del latón en este mismo orden:

Coeficientes de regresión para la velocidad (latón):

Constante	= -0,175167
A: temperatura	= 0,00170833
B: concentración	= -0,0399
AA:	= 0,000033
AB:	= 0,0004475
BB:	= -0,0013

$R^2 = 99,844 \%$

R^2 (ajustado para los GL) = 99,584 %

Error Estándar de Est. = 0,00444338

Error Absoluto de la media = 0,00225185

Estadístico de Durban- Watson = 2,88615 (P=0,0169)

Auto correlación residual Lag. 1 = -0,476239

Modelo generado sin la simplificación de las variables significativas:

$$DE = -0,175167 + 0,00170833 * T - 0,0399 * C + 0,000033 * T^2 + 0,0004475 * T * C - 0,0013 * C^2 \quad (4)$$

La significación estadística de los parámetros se obtiene analizando la tabla de varianza que brinda el programa. La posibilidad de error fue de un 5% o lo que es igual, el intervalo de confianza escogido fue de un 95 %.

El $R^2 = 99,584 \%$, casi un 100 %, esto indica que el modelo así ajustado explica el 99,264 2 %

de la variabilidad en DE y el estadígrafo Durban-Watson es mayor que 1,4. Este estadígrafo examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0,05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos.

Tabla 3
Análisis de varianza para el latón según el STATGRAPHICS
con todas las variables

Efectos	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados medios	Relación F	Valor P
A:T	0,037 288 2	1	0,037 288 2	1 888,62	0,000 0
B:C	0,000 518 94	1	0,000 518 94	26,28	0,014 4
AA	0,000 021 78	1	0,000 021 78	1,10	0,370 7
AB	0,000 080 102 5	1	0,000 080 102 5	4,06	0,137 4
BB	0,000 003 38	1	0,000 003 38	0,17	0,706 9
Error total	0,000 059 230 8	3	0,000 019 743 6	-	-
Total(Corr)	0,037 971 6	8	-	-	-

En la tabla 3, de análisis de varianza para el latón se observa que existen tres factores que tienen el P-valor mayor que el nivel de significación escogido ($\alpha = 0,05$), esto indica que estos efectos no tienen

significación estadística. La temperatura y la concentración son los únicos efectos con el P-valor menor que 0,05, indicando que tiene significación para un intervalo de confianza del 95 %.

Tabla 4
Análisis de varianza para el latón con las variables significativas

Efectos	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados medios	Relación F	Valor P
A: T	0,037 288 2	1	0,037 288 2	1 360,11	0,000 0
B: C	0,000 518 94	1	0,000 518 94	18,93	0,004 8
Error Total	0,000 164 493	6	0,000 027 415 6	-	-
Total (Corr.)	0,037 971 6	8	-	-	-

Después de eliminadas las variables no significativas el análisis de varianza para la velocidad de corrosión, queda de la siguiente manera:

$$R^2 = 99,5668 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para los GL)} = 99,4224 \%$$

$$\text{Error Estándar de Est.} = 0,00523599$$

$$\text{Error absoluto de la media} = 0,0036963$$

$$\text{Estadístico Durbin-Watson} = 2,42372 \text{ (P=0,1548)}$$

$$\text{Auto correlación residual Lag 1} = -0,370451$$

Si analizamos la tabla 4 podemos darnos cuenta que para el latón las variables que tienen significación estadística son la concentración del inhibidor y la temperatura del medio. De ahí se obtiene el modelo matemático que realmente representa el comportamiento del sistema.

Como modelo general se obtiene el siguiente:

$$DE = -0,451433 + 0,00788333*T + 0,0093*C \quad (4)$$

Modelo matemático para los datos de velocidad de corrosión sin inhibidor

Dado que no se logró obtener un modelo integrado, que representara el comportamiento de la velocidad de corrosión sin inhibidor, y con inhibidor, se decidió procesar los datos para lograr un modelo independiente para los datos obtenidos a partir del medio corrosivo y las temperaturas.

Se trabajó teniendo en cuenta que, solamente la temperatura es la variable significativa, con un solo niveles de concentración de inhibidor.

Tabla 5
Análisis de varianza para el latón sin inhibidor

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados medios	Relación F	Valor P
Modelo	0,067 013 8	1	0,067 013 8	46,05	0,000 3
Residuo	0,010 186 8	7	0,001 455 26	-	-
Total (Corr.)	0,077 200 6	8	-	-	-

Significación estadística de los parámetros

$$\text{Coeficiente de correlación} = 0,931691$$

$$R^2 = 86,8048 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para los GL)} = 84,9197 \%$$

$$\text{Error Estándar de Est.} = 0,0381478$$

$$\text{Error absoluto de la media} = 0,0301844$$

$$\text{Estadístico Durbin-Watson} = 2,55503 \text{ (P=0,0842)}$$

$$\text{Auto correlación residual Lag 1} = -0,431437$$

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre velocidad y temperatura donde se obtuvo la ecuación del modelo ajustado:

$$DE = -0,584 343 + 00105683*T \quad (5)$$

En una hoja de cálculo Excel se obtuvo un segundo modelo matemático, que también mues-

tra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre la velocidad y la temperatura, la ecuación es la siguiente:

$$DE = 4.10^{-07.T3.0603} \quad (6)$$

Modelo matemático para los datos de la velocidad de corrosión de la mezcla de inhibidores

Al igual que en el caso anterior, se procesaron los datos de la misma forma (En el mismo programa STATGRAPHICS PLUS 5.1) esto se debe a que solamente se trabajó con un nivel de concentración en el mismo rango de temperatura, posteriormente se explicará del porqué este proceder.

A continuación se presentan el Análisis de la varianza y el modelo del latón en este mismo orden para este caso:

Tabla 6
Análisis de varianza para el latón en mezclas de inhibidores

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrados medios	Relación F	Valor P
Modelo	0,016 781 3	2	0,008 390 67	754 405,91	0,000 0
Residuo	6,673 33*10 ⁻⁸	6	1,112 22*10 ⁻⁸	-	-
Total (Corr.)	0,016 781 4	8	-	-	-

Significación estadística de los parámetros

Dado que el valor P en la tabla ANOVA (tabla que brinda el programa) es inferior a 0,05; hay relación estadísticamente significativa entre velocidad y temperatura para un nivel de confianza del 95 %.

$$R^2 = 99,9987 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para los GL)} = 99,9982 \%$$

Error Estándar de Est. = 0,000 105 462

Error absoluto de la media = 0,000 060 740 7

Estadístico Durbin-Watson = 2,196 14 (P = 0,1079)

Auto correlación residual Lag 1 = -0,173 327

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre velocidad y temperatura. La ecuación del modelo ajustado es:

$$DE = 0,304 92 + 0,009 996 1 * T - 0,000 095 35 * T^2 \quad (7)$$

Análisis de los resultados

Tomando como base los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio (tablas 1 y 2), se lleva a cabo el análisis de la influencia de los factores tratados en este trabajo (temperatura y concentración del inhibidor) sobre la velocidad de corrosión en el latón, en base a los diferentes gráficos obtenidos en el STATGRAPHICS. Esta parte es de gran importancia pues demostraremos si es o no eficaz la aplicación del inhibidor.

De manera general se puede decir que para todos los materiales metálicos con un aumento de la temperatura y la concentración, se evidencia un comportamiento proporcional con respecto a la velocidad de corrosión; esto queda respaldado por la ecuación de Arrhenius, que plantea que un aumento de temperatura favorece la formación de productos, en este caso aumenta la cinética de las reacciones de oxidación-reducción y se favorece la formación de productos de corrosión. Con respecto a la concentración, el comportamiento que se produce se debe a la formación de una capa protectora en la superficie del latón producida cuando el inhibidor se adsorbe en la

superficie del mismo, por eso es que disminuye marcadamente la velocidad de corrosión.

En las curvas obtenidas se observa un comportamiento típico de una isoterma de adsorción, ya que la eficiencia de inhibición tiende a estabilizarse y hacerse constante a las concentraciones más elevadas.

La temperatura y la concentración del inhibidor, son variables significativas, que hay que tener en cuenta. Es notorio que el inhibidor es ideal para este rango de temperatura, y es capaz de disminuir marcadamente la velocidad con que se corroe este material así como el descincado de los latones en agua de mar. Esto se pudo apreciar mejor en los ensayos, en los que prácticamente no se observó la formación de depósitos blancos de óxido de cinc típicos de este fenómeno, como se observa en la figura 2.

Respecto a la resistencia a la corrosión del latón empleado en agua de mar, ésta puede considerarse entre el rango de excelente a buena, tomando como referencia el criterio de resistencia a la corrosión uniforme, dados por Fontana (tabla 1). No obstante, es bueno recordar que no es precisamente la resistencia a la corrosión

uniforme la preocupante, sino la resistencia del latón al descincado, el que debe ocurrir con un tiempo mayor de exposición. Los experimentos realizados en agua de mar a temperaturas comprendidas entre 70 y 90 °C, durante unas 30 h demostraron un ataque bastante severo con evidencias visibles de inicio del descincado, con la aparición de los depósitos blancos de óxido de cinc visibles a simple vista, por lo que estos experimentos deben tenerse en cuenta para minimizar este tipo de ataque característico de los latones corrientes.

Para el caso de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para la mezcla (tabla 3) se obtuvo un resultado similar, donde se destaca la temperatura como la variable de mayor significación, donde la concentración no posee valor estadístico porque es un valor constante durante el proceso de análisis.

Se utilizó un solo nivel de concentración debido a que para esta experiencia solo se desea comprobar si existe o no efecto sinérgico en la mezcla de lodo y espuma. El sinérgismo es apreciable a las temperaturas comprendidas entre 70 - 90 °C, siendo importantes los valores de eficiencias obtenidos en cada ensayo.

En cierto momento de los ensayos se produjo una fluctuación de temperatura, o errores a la hora de preparar las condiciones y/o medios requeridos, lo que provocó que cierto valor de la velocidad se salieran de rango, podemos apreciarlo en la tabla 2 del anexo, para la mínima de temperatura: 70 °C, y para la máxima de concentración: 3 g/L.

En el modelo que predice el comportamiento de la velocidad de corrosión sin inhibidor, se dio una situación particular: el modelo al que se llegó (en el STATGRAPHICS Plus 5.1) no satisface del todo los requerimientos, donde se plantea un por ciento de error superior al 5 % para el primer dato de velocidad de corrosión sin inhibidor (a 70 °C).

Para el modelo obtenido por la hoja de cálculo Excel, los por cientos de error se encuentran todos muy por debajo del 5 % de error; por lo que se decidió asumir a ambos modelos, porque más o menos, propician un mejor análisis de los resultados.

Conclusiones

Tomando como base los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo de este trabajo, así como su análisis, se arriba a las siguientes conclusiones:

1. Las variables independientes que ejercen influencia sobre la velocidad de corrosión son la temperatura y la concentración del inhibidor.
2. El modelo matemático que predice el comportamiento de la velocidad de corrosión con respecto a las principales variables que inciden en la misma sin mezclas de inhibidores es:

$$DE = -0,451\ 433 + 0,007\ 883\ 33 * T - 0,009\ 3 * C$$

La ecuación que predice el comportamiento de la velocidad de corrosión sin inhibidor es:

$$DE = -0,584\ 343 + 0,010\ 568\ 3 * T$$

Además, se hizo un ajuste exponencial mediante el Excel, obteniéndose el modelo que se ajusta bastante bien a los datos con errores mucho menores que el 5 % y con un valor de $R^2 = 0,999\ 9$. La ecuación es la siguiente:

$$DE = 4,10^{-07} * T^{3,060\ 3} \dots$$

Para un 50 % de espuma y 50 % de líquido el modelo matemático que se obtuvo es el siguiente:

$$DE = 0,304\ 92 + 0,009\ 996\ 1 * T - 0,000\ 095\ 35 * T^2$$

Todos los modelos válidos dentro de los límites estudiados y con un nivel de confiabilidad de 95 %, para un 5 % de error permisible.

3. Las velocidades de corrosión oscilan entre los valores de 0,169 30 y 0,365 40 mm/año para el agua de mar sin inhibidor, entre 0,085 6 y 0,247 5 mm/año con el inhibidor (líquido), y con mezcla de inhibidores de composición 50 % de espuma y 50 % de líquido, entre 0,072 00 y 0,177 9 mm/año, todos a las temperaturas comprendidas entre 70 y 90 °C.
4. Las variaciones de las eficiencias estarán comprendidas desde 32,27 hasta 61,19 % con el inhibidor, para la mezclas de inhibidores la eficiencia se encuentra entre 51,40 y 57,39 %.
5. La velocidad de corrosión aumenta según aumenta la temperatura, y disminuye con el au-

mento de la concentración del inhibidor, hasta un cierto punto después aunque aumente la concentración la velocidad se mantendrá constante comportamiento representado por las isotermas de Langmuir.

6. Con los experimentos realizados los máximos valores de la eficiencia se lograron con los niveles más bajos de temperatura: 70 °C y con el nivel máximo de concentración: 3 g/L.
7. Con los experimentos realizados se pudo observar que aunque el latón corriente tiene una buena resistencia a la corrosión de acuerdo a los criterios de Fontana, no es así en lo referente al descincado, y tanto el inhibidor como las mezclas de inhibidores con los que se experimentó, inhiben la aparición del descincado de estos latones en el agua de mar a temperaturas elevadas, mejorando sensiblemente la resistencia de estos materiales, llegando a adquirir en algunos casos la categoría de excelente.
8. Es evidente el efecto sinérgico observado cuando se utiliza la mezcla de inhibidores. En un trabajo anterior no se reportaba efecto sinérgico, pero esto es debido a la fuente de obtención de las sustancias utilizadas como inhibidores, que en este caso no fue la misma que el caso reportado. Con lo que podemos concluir que el lodo, así como la mezcla del lodo y la espuma producto de la electrocoagulación de la vinaza son excelentes inhibidores de la corrosión para un medio salino a altas temperaturas.

Recomendaciones

En base a todo lo expuesto y analizado a lo largo de esta investigación, podemos sugerir la siguiente recomendación:

- Que los inhibidores utilizados en los ensayos realizados en el laboratorio para los latones, sean utilizados a escala industrial en aquellos casos que se utilizan equipos de intercambio de calor enfriados con agua de mar, los que generalmente se suelen construir de latones amarillos corrientes, debido a los buenos resultados obtenidos a altas temperaturas en agua de mar para contrarrestar el descincado de los mismos. Por otra parte, esto redundaría en el aspecto económico,

ya que las aleaciones de cobre con cinc y níquel, con determinados aditivos, como el latón Admiralty y los cuproníqueles, que resisten el descincado son materiales mucho más costosos que los latones corrientes.

- Con la concentración mínima estudiada, de 1 g/L, se obtienen buenos resultados y se evita, además, la aparición de la corrosión selectiva conocida como descincado, que experimentan los latones en agua de mar a temperaturas elevadas, las que nunca estarán por encima de las temperaturas estudiadas en este trabajo.
- También tendrían un impacto positivo sobre el medio ambiente ya que de ser puesta en práctica esta investigación la cantidad de desechos producidos por la destilería de alcohol, luego de la electrocoagulación serían mínimas, por lo que los contaminantes que se verterían al medio serían en pequeñas cantidades, en comparación con las producidas de no usar estos desechos con ningún otro propósito.

Bibliografía

1. Velásquez Frómeta A. Estudio de los derivados sólidos de la electrocoagulación del mosto de las destilerías alcohólicas como inhibidor de la corrosión de los latones en agua de mar a altas temperaturas. Trabajo de diploma, Universidad de Oriente 2008.
2. Rodríguez de Carvalho A. Estudio de los derivados sólidos obtenidos a partir de la electrocoagulación del mosto de las destilerías como inhibidor de la corrosión de los latones en agua de mar a elevadas temperaturas. Trabajo de diploma, Universidad de Oriente 2007.
3. Dickson N.: Estudio del comportamiento de algunos materiales en agua de mar. Trabajo de Diploma, Universidad de Oriente, 1999.
4. Domínguez J, Matos R, Hing R; "Introducción a la corrosión y protección de los metales"; Ediciones ENPES, La Habana, 1987.
5. Enciclopedia Encarta 2007.
5. Fontana, M. G. and Greene, N. D. Corrosion Engineering. Mc. Graw Hill, 1978.
6. Hing R.: Obtención de un inhibidor de la corrosión ácida a partir del mosto de la destilería de alcohol etílico. Revista Tecnología Química. Año 1, No 1, Universidad de Oriente, 1980.
7. [html.rincondelvago.com/aleaciones de cobre](http://html.rincondelvago.com/aleaciones-de-cobre)
8. [html.rincondelvago.com/aleaciones industriales](http://html.rincondelvago.com/aleaciones-industriales)
9. html.rincondelvago.com/corrosion-de-materiales.html "Corrosión de materiales".. 2004
10. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/html/quimica.html>. 2005

-
11. <http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volume2/ciencia/3/079/htm>; “Corrosión electroquímica”. 2005
 12. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Corros%C3%A3o>
 13. <http://WWW.arquitectura-técnica.Com./CORROSION-PROTEC.htm> “Corrosión y Protección”.
 14. <http://www.inves.com.mx/htm/corrosion.html>. Corrosión y control de la corrosión.
 15. <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=01170030905>
 16. http://www.mspc.eng.br/tecdiv/corr1.asp#form_corr
 17. <http://www.quiprocura.net/corrosao.htm>
 18. Perry, Robert M y Chilton, Cecil M. “Chemical Engineers Handbook”. 6a edición. Publicaciones del Ministerio de Educación.
 19. Rodríguez, K. “Estudio de Inhibidores de la Corrosión”. Trabajo de Diploma, Universidad de Oriente, 2002.
 20. Tomashov, N. D. Theory of Corrosion and Protection of Metals. Edición Revolucionaria, La Habana, 1971.
 21. Uhlig H. Corrosion and Corrosion Control. Edición Revolucionaria, La Habana, 1966.