

Evaluación de la corrosión de un cobre comercialmente puro en mezclas de bioetanol-gasolina, mediante gravimetría y electroquímica.

Evaluation of the corrosion of commercially pure copper in ethanol – gasoline mixtures by gravimetry and electrochemistry

María del Pilar Jaimes Silva¹, Darío Yesid Peña Ballesteros², José Luis Tristancho Reyes³, Hugo Armando Estupiñán Duran⁴

¹Profesional de Proyectos-Programa de Integridad VIT, Bogotá.

maria.jaimes@ecopetrol.com.co

² Profesor Asociado, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

dypena@uis.edu.co

³ Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.

josetris@utp.edu.co

⁴ Profesor Asistente, Facultad de Minas, Universidad Nacional, Medellín, Colombia.

haestupinand@unal.edu.co

Resume— Este estudio se hizo con el fin de evaluar la corrosión y el comportamiento del cobre utilizado para fabricar algunas piezas del sistema de combustible en los automóviles. La determinación de la velocidad de corrosión de cobre expuesto en bioetanol, se realizó mediante ensayos de gravimetría y técnicas electroquímicas de extrapolación Tafel y espectroscopia de impedancia electroquímica. Los ensayos estáticos de inmersión se realizaron en mezclas de etanol-gasolina al 5-20% y 100% de bioetanol, a una temperatura promedio de 24°C, mediante cupones inmersos a tiempos de exposición de 7, 14, 21 y 28 días. A partir de la pérdida de peso se determinó la velocidad de corrosión, y a su vez, se determinó que la morfología de daño fue corrosión uniforme, y algunos eventos de corrosión localizada. Las curvas de polarización indicaron que la reacción del sistema se encuentra bajo control mixto. En general se observó que la velocidad de corrosión del cobre aumentó con el tiempo de exposición y con el aumento de la concentración de etanol en las mezclas, atribuido a la formación de una capa de óxido porosa, no adherente y no estable sobre la superficie metálica.

Palabras claves— Bioetanol, cobre, velocidad de corrosión, técnicas gravimétricas, técnicas electroquímicas.

Abstract— This study was done to evaluate the corrosion behaviour of copper used to manufacture some parts of the fuel system in cars. The determination of the corrosion rate of copper exposed to bioethanol was performed by gravimetry tests and electrochemical techniques, Tafel extrapolation and electrochemical impedance spectroscopy. The immersion static tests were performed in ethanol-gasoline mixtures at 5, 10, 15, 20 and 100% bioethanol, at average temperature of 24°C, by immersed coupons at exposure times of 7, 14, 21 and 28 days. From weight loss, the corrosion rate was determined

and also the morphology of damage under described conditions, which showed uniform corrosion and some localized corrosion events. The polarization curves indicated that the reaction of the system is under mixed control. In general it was observed that the corrosion rate of copper increased with exposure time and with increasing concentration of ethanol in the mixtures, attributed to the formation of a porous oxide layer non-stick and unstable on the metallic surface.

Key Word — Bioethanol, copper, corrosion rate, gravimetric techniques, electrochemical techniques

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha surgido una constante preocupación por los temas ambientales, en especial aquellos relacionados con la contaminación producida por el sector automotriz, ya que su uso es la principal fuente de gases que causan el cambio climático y el calentamiento global. [1]

En la exploración de nuevas fuentes de energía que replacen el uso de los carburantes fósiles, se encuentra como opción el bioetanol, un excelente sustituto de la gasolina, el combustible más utilizado en los automóviles del mundo.

Sin embargo, en el motor del automóvil, el combustible entra en contacto con una gran variedad de partes metálicas que están siempre sujetas a corrosión; degradación que se ve influenciada usualmente por la formación de óxidos. Se ha sugerido que la adición de etanol a la gasolina acelera la corrosividad del combustible. [2]

Algunos materiales plásticos utilizados en los sellos antiguos, mangueras y filtros, como el caucho natural y butilo caucho sintético, tienden a degradarse más rápidamente en presencia de etanol.

Con respecto a los metales, en condiciones normales de uso, estos materiales están siempre sujetos a la corrosión, lo que requiere una adecuada selección y, posiblemente, el uso de recubrimientos de protección. Los metales considerados de baja resistencia al etanol y sus mezclas son las aleaciones de fundición a presión (tipo Zamak) y algunas aleaciones de aluminio [Owen y Coley (1995)].

La agresividad de bioetanol depende del contenido de alcohol en la gasolina y se asocia particularmente con la presencia de agua, ácidos y contaminantes orgánicos. Para las mezclas de gasolina con 10% de etanol, el desgaste de los componentes de metal ha sido ampliamente estudiado y se considera irrelevante, en comparación con la gasolina normal. En niveles más altos, hay un temor real de los problemas de compatibilidad y la corrosión

Uno de los problemas más significativos en compatibilidad de materiales con mezclas oxigenadas es la corrosión del latón y el cobre, ya que algunos de los componentes fabricados a partir de estos materiales normalmente hacen parte del sistema eléctrico del vehículo. Se han evidenciado conexiones eléctricas muy deterioradas mostrando de manera significativa aumento de corrosión al entrar en contacto con la mezcla E20. La corrosión en estos materiales afecta el buen desempeño eléctrico de los componentes ya que puede causar cambios en la resistencia eléctrica en las bombas de gasolina que se encuentran sumergidas en los tanques de combustible de los vehículos. [3]

II. CONDICIONES EXPERIMENTALES

A. Determinación de Variables:

Pueden encontrarse diversas variables que afectan la corrosión en el cobre, pero se han propuesto en esta investigación solo dos variables en el sistema, que permitan evaluar la corrosión del material en estudio para nuestro interés. Teniendo en cuenta esto, el deterioro del material trabajado (cobre comercialmente puro) fue evaluado mediante técnicas gravimétricas y electroquímicas, variando la concentración de la solución, en mezclas de bioetanol del 5-20% de bioetanol y 100% bioetanol y el tiempo de inmersión del material en cada solución.

B. Preparación de Materiales:

La preparación, calibración e instrucción del uso de los materiales y equipos se realizaron de acuerdo a la norma ASTM G1, y de esta manera se logró obtener datos confiables y exactos de las pruebas realizadas. Para cada ensayo experimental; tanto para la determinación de la

pérdida de peso, así como para las técnicas electroquímicas se utilizaron electrodos y mezclas de etanol similares.

1. Preparación de cupones de trabajo:

El material se trabajó utilizando cupones preparados siguiendo los procedimientos que se describen en la norma ASTM E3-01y con las siguientes dimensiones:

- Diámetro : 19,05 mm
- Espesor: 3 mm
- Área : 285,02 mm²

2. Preparación de las soluciones:

Las soluciones se prepararon la norma ASTM D4806-09, que describe las mezclas de combustibles que son comercializadas a nivel mundial. A lo largo de la investigación se trabajaron soluciones con un volumen de 300 ml, para cada concentración en estudio.

C. Pruebas Realizadas:

1. Ensayo Gravimétrico:

De acuerdo a la norma ASTM G-31-90 "Practica Estándar para Pruebas de Corrosión por Inmersión de Metales en Laboratorio"; llevado a cabo en un tiempo de inmersión de 28 días, con toma de muestras cada 7 días y evaluación de la pérdida en masa a este tiempo. Se controló el nivel de evaporación del bioetanol para evitar cambios en las condiciones del mismo.

2. Ensayos Electroquímicos:

Se realizaron en una celda electrolítica plana conectada a un Potenciostato-Galvanostato ACM GILL, que a su vez fue conectado a una computadora con software ACM versión 5.0. Se utilizó como electrodo de referencia, un electrodo de Ag/AgCl, además de dos contraelectrodos de platino; una lamina de platino y una varilla con punta de platino de alta pureza (99.9%), esto debido a que el platino muestra un comportamiento muy estable que asegura con la prueba resultados confiables. El electrodo de trabajo, en este caso el cobre, contaba con un área de exposición al electrolito de 1 cm².

3. Análisis de Imagen:

Para determinar la morfología de la estructura del cobre comercialmente puro, una vez expuesto con mezclas de bioetanol ha determinado tiempo, mediante análisis metalográfico y microscopia electrónica de barrido SEM.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A. Determinación de la Velocidad de Corrosión mediante pruebas gravimétricas:

En la tabla 1, se presenta el valor promedio de las velocidades de corrosión con su respectiva desviación estándar, dichos valores se obtuvieron a partir de los datos de la prueba gravimétrica; las velocidades de corrosión se calcularon utilizando la siguiente ecuación, [7]:

$$\text{Velocidad de corrosión} = \frac{K * W}{A * T * D}$$

A: Área de las probetas: 2,85 cm²

D: Densidad del material (cobre): 8,94 g/ cm³.

K: 3.45*10⁶

W: Pérdida de masa (gramos)

T: Tiempo en horas

% Bioetanol	Velocidad Promedio	Desviación Estándar
5%	0,04365	0,03358
10%	0,07218	0,06093
15%	0,14608	0,06858
20%	0,16120	0,11399
100%	0,19142	0,15213

Tabla 1. Velocidad promedio de Corrosión.

En la figura 1 es posible observar, que a medida que aumenta la concentración de bioetanol en la mezcla, también aumenta la velocidad de corrosión que se traduce en una pérdida de masa en la muestra expuesta al electrolito.

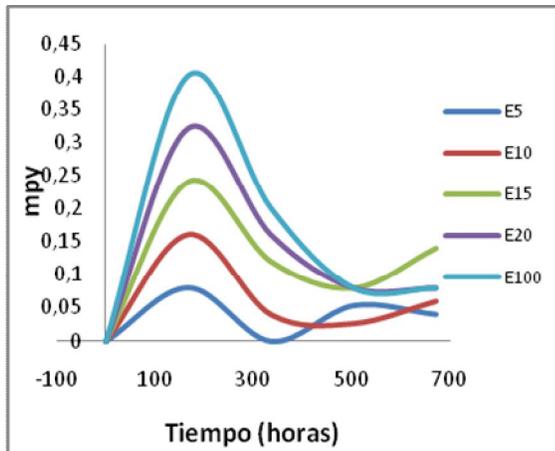


Figura 1. Gravimetría del cobre.

Además se observó que al transcurrir el tiempo, se reduce considerablemente la pérdida de masa en el cobre. La gráfica permite ver también que todas las concentraciones presentan un comportamiento similar hasta un tiempo de 300 horas aproximadamente; donde para la concentración E5, la velocidad de corrosión empezó a aumentar, y hacia un tiempo de 500 horas, inició nuevamente su comportamiento decreciente, esto igualmente sucedió para las concentraciones E10 y E15, donde estos comportamientos se iniciaron a un tiempo de 500. Finalmente para las concentraciones más altas E20 y E100,

la velocidad de disolución fue disminuyendo para todos los tiempos.

Lo anteriormente mencionado, se atribuye a la formación de una película protectora sobre la superficie del material donde la reacción catódica es la reducción del oxígeno para formar iones hidróxido. A pesar de esto, la corrosión continúa su proceso, lentamente, a causa posiblemente que la película formada es no adherente y conductora permitiendo el paso de electrones.

A. Análisis Superficial:

1. Observación Microestructural:

La figura 2, muestra la metalografía del cobre a diferentes tiempos de inmersión en mezcla E20 a 100 aumentos. a) 7 días. b) 14 días. c) 21 días. d) 28 días.

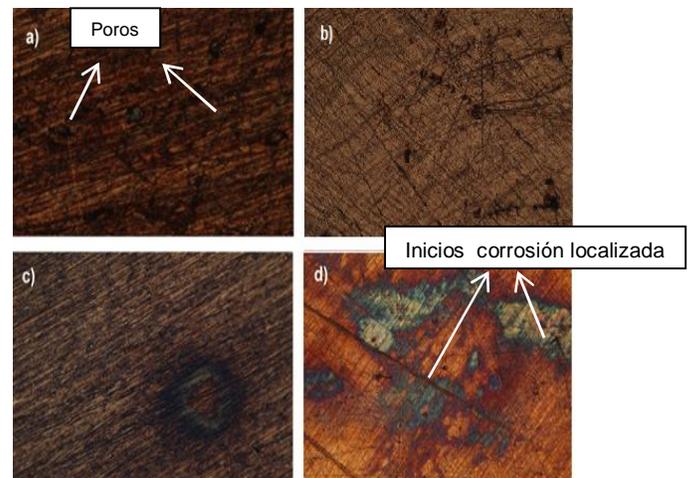


Figura 2. Metalografía del Cobre.

Además en la figura 1d, se evidencia un cambio en la coloración del metal en ciertas zonas de la muestra, esto puede deberse a los productos sólidos de la corrosión del cobre en el ácido acético presente en el bioetanol, acetatos básicos de color verde o azulado cuya composición corresponde a $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ o bien $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$. [9] Mientras que para el resto del metal base, se presentó una coloración oscura, propia de un óxido de cobre como la cuprita Cu_2O . [4]

3.2.2. Microscopía Electrónica de Barrido:

Este ensayo evidencia la formación de unos productos de corrosión asociados principalmente a la cuprita Cu_2O y acetatos de cobre.

En la figura 3 se muestra la morfología obtenida por SEM de la superficie del cobre, inmerso en mezcla de bioetanol E100 con un tiempo de inmersión de 28 días, tomado en diferentes zonas.

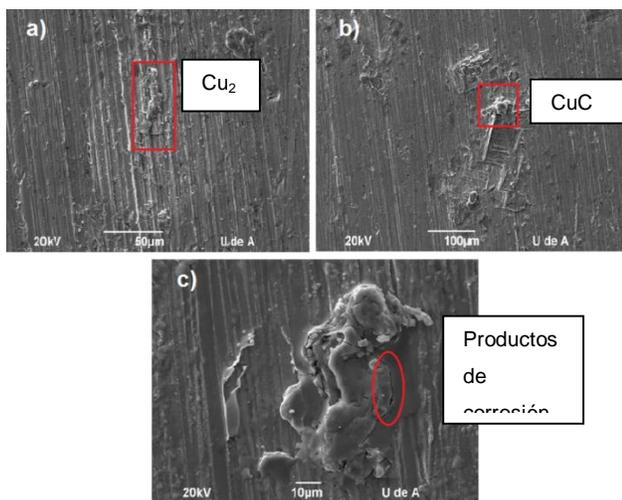


Figura 3. Micrografía SEM, morfología de la superficie del cobre

La cuprita (Cu_2O) es el principal producto de corrosión formado durante todos los tiempos de exposición del cobre en las mezclas de bioetanol, y se debe a las reacciones electroquímicas entre el cobre y el agua contenida en el bioetanol; que como ya se ha mencionado el agua es acompañante de las mezclas bioetanol-gasolina debido a que el bioetanol es altamente higroscópico.

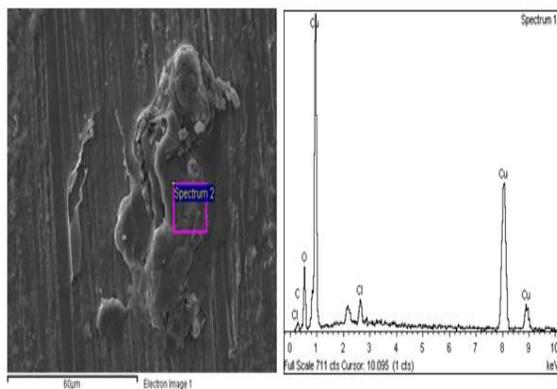


Figura 4 Análisis EDX del cobre en mezcla de E100, en 28 días de inmersión.

La fotografía 4 muestra los espectros EDX de las micrografías SEM de las muestras de cobre; indicando que los principales elementos presentes son el Cu y el O. La presencia de oxígeno en los productos de corrosión ratifica la presencia de óxidos sobre la superficie del cobre asociado a la cuprita.

B. Ensayos Electroquímicos.

1. Extrapolación de Tafel:

En la figura 5, se muestran las curvas Tafel obtenidas para la concentración E15 a los diferentes tiempos de inmersión

en el electrolito. Los datos obtenidos para todas las concentraciones se reportan en la Tabla 2.

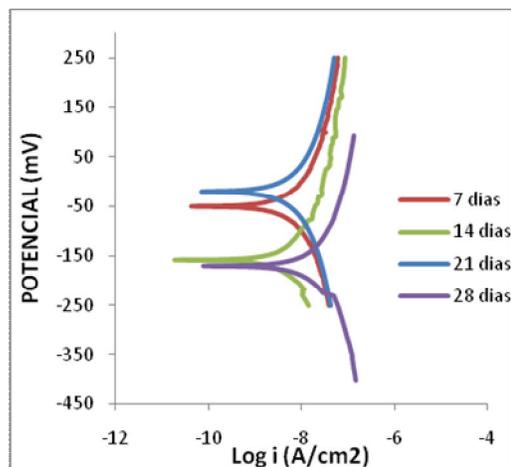


Figura 5. Curvas Tafel en E15 a diferentes tiempos de inmersión.

A un tiempo de 14 días el potencial de corrosión pasa a valores más negativos y la densidad de corriente aumenta, con respecto al tiempo inicial de medida de 7 días. Este comportamiento indica un aumento en la velocidad de corrosión, es decir, que los productos de corrosión formados se están desplazando a una zona de inestabilidad de óxidos, lo cual hace suponer una disolución de los productos de corrosión.

A 21 días se presenta un comportamiento inverso al anterior, pues se da un aumento en el potencial mixto y disminuye la densidad de corriente, lo cual puede atribuirse a que la capa de óxido formada puede ser porosa, que permite el intercambio de electrones, para facilitar la formación de óxidos de cobre. Para 28 días, se muestra que el potencial de corrosión nuevamente decae a la zona de potenciales activos y aumenta la densidad de corriente lo cual indica que la película de óxido formada no es estable a través del tiempo a las condiciones del ensayo, por lo cual esta no protege el material del deterioro, corroborando de esta manera el análisis SEM.

En la figura 6, se muestra la curva de Tafel para la mezcla E100 a los diferentes tiempos de inmersión en el electrolito; cuyo comportamiento es similar al presentando en las curvas Tafel para las mezclas E15 y E20. Se observa, además en la curva catódica, que es posible que la etapa controlante para la corrosión en las mezcla E100, sea la transferencia de masa debido a que la corriente catódica se aproxima a la corriente límite de difusión.

Se puede decir que la reacción del sistema para todas las mezclas, a excepción del bioetanol puro, se encuentra bajo un control mixto ya que la velocidad de transferencia de carga tiene un valor similar a la velocidad de transferencia de masa, lo cual se puede comprobar con el análisis de la pendiente de la linealidad de Tafel que tiende a tener valores muy cercanos.

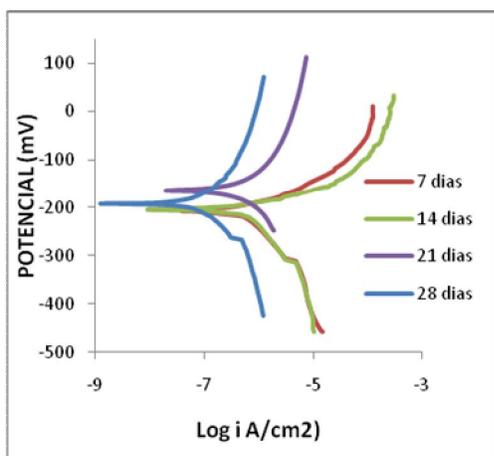


Figura 6. Curvas Tafel en bioetanol 100% a diferentes tiempos de inmersión.

Tabla 2. Datos obtenidos de Extrapolación de Tafel.

	Tiempo (días)	I _{corr} (µA/cm²)	B _c	B _a	B (V)	Mpy
E15	7	3,70E-03	-115,4	113,86	3704,78	1,69E-03
	14	3,02E-03	-99,84	113,06	-370,76	1,38E-03
	21	3,09E-03	-104,95	106,73	-2732,47	1,41E-03
	28	8,66E-03	-102,8	104,42	-2877,18	3,96E-03
E20	7	3,43E-01	-74,256	72,137	1097,65	1,57E-01
	14	8,10E-02	-42,32	40,15	339,99	3,71E-02
	21	3,48E-03	-118,67	105,29	405,48	1,59E-03
	28	1,25E-01	-144,7	139,78	1785,06	5,74E-02
E100	7	5,02E-01	-121,3	71,62	75,93	2,30E-01
	14	5,78E-01	-140,5	42,93	26,84	2,65E-01
	21	4,66E-01	-120,9	119	3287,95	2,13E-01
	28	8,21E-02	-114,45	80,04	115,60	3,76E-02

2. Espectroscopia de Impedancia Electroquímica:

La figura 7 muestra que el comportamiento electroquímico de la interface metal-solución, es diferente en función del tiempo de exposición; se observa que el diámetro del semicírculo, disminuye gradualmente a medida que transcurrieron los días de estudio, donde se presenta una disminución de la resistencia a la transferencia de carga y así un aumento en la velocidad de corrosión.

Sin embargo, a 21 días de inmersión, se presentó un aumento en el valor de la impedancia, pero luego disminuyó a los 28 días nuevamente disminuyó siguiendo el mismo comportamiento corrosivo con el transcurrir del tiempo. Este cambio del comportamiento del material en el tiempo se atribuye a que la capa de óxido formada sobre la

superficie del cobre, es de tipo protector, (es un óxido que disminuye el intercambio de especies desde la solución al material), pero en la condiciones del ensayo, esta película se hace porosa, no estable y con propiedades no pasivas, además se da una disolución de este óxido en la mezcla.

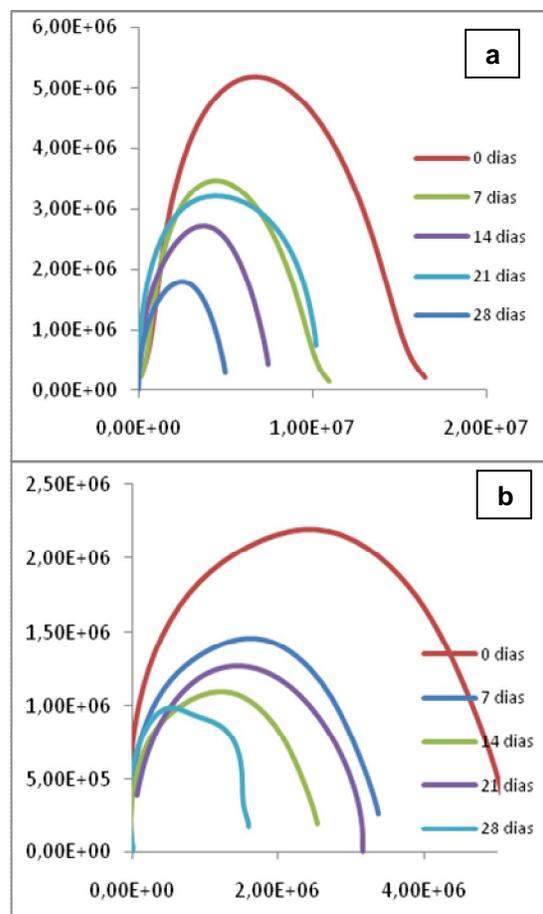


Figura 7. Diagrama de Nyquist en bioetanol a diferentes tiempos de inmersión. a) E5, b) E20.

Además se observa que los espectros de Nyquist tienden a formar un solo arco capacitivo, indicio del estado activo del material y muestra de que el proceso se encuentra controlado por transferencia de carga.

La figura 8 representa el comportamiento del sistema, sin productos de corrosión, a medida que se varía la concentración de bioetanol en la mezcla.

En las condiciones dadas, se observa como a medida que se aumenta la concentración de bioetanol en la mezcla, el diagrama de Nyquist tiene la tendencia a cerrar un semicírculo en la región de bajas frecuencias, disminuyendo su resistencia a la polarización y a su vez la resistividad de la solución.

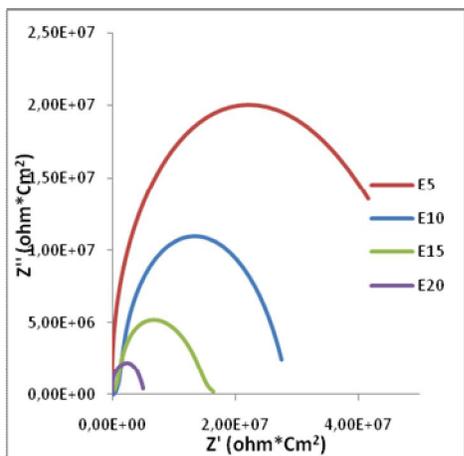


Figura 8. Diagrama de Nyquist para el cobre en mezclas de bioetanol a 0 días.

Para todas las concentraciones la película formada sobre la superficie del cobre no tiene carácter protector; el incremento de bioetanol en la gasolina hace menos resistiva la mezcla y aumenta la velocidad de corrosión.

Cuando el electrolito, es bioetanol puro, (ver figura 9) ocurre un cambio en la forma de los diagramas de Nyquist. En primer lugar se presenta la formación de la mitad de un semicírculo a altas frecuencias y luego una línea recta con tendencia a un pequeño semicírculo a bajas frecuencias.

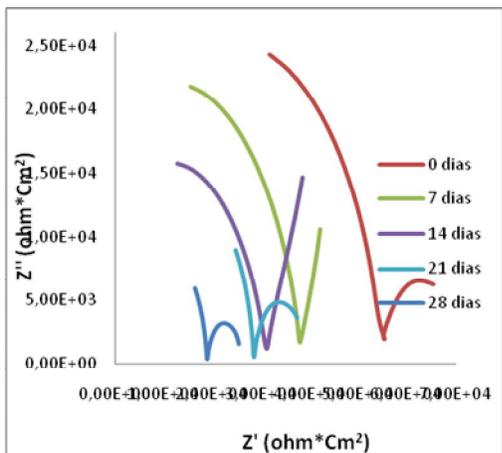


Figura 9. Diagrama de Nyquist en bioetanol puro (E100) a diferentes tiempos de inmersión.

A altas frecuencias este comportamiento puede atribuirse a que la transferencia de carga, a través del óxido puede ocurrir fácilmente y no determina la velocidad del proceso; el desgaste por corrosión del metal que se da por la transferencia de iones a través de la capa, es controlado por difusión, lo cual comprueba los resultados obtenidos mediante la extrapolación Tafel para la concentración E100, que indica la formación de una capa porosa sobre la superficie metálica donde la corrosión ocurre más rápidamente. [5]

3. Descripción del Circuito Equivalente propuesto:

El circuito equivalente presentado en la figura 10, es válido para los diagramas de impedancia estudiados, en el cual, están involucrados todos los procesos en la respuesta eléctrica del sistema.

El primer elemento en el circuito es una resistencia (R_s) que corresponde a la resistencia óhmica del sistema, un elemento de fase constante, CPE_1 , representa la capacitancia de la doble capa y la resistencia R_1 representa la resistencia a la transferencia de carga de la oxidación del metal. El segundo subsistema corresponde a la resistencia R_2 y la capacitancia de la película (óxido de cobre) formada sobre la superficie metálica.

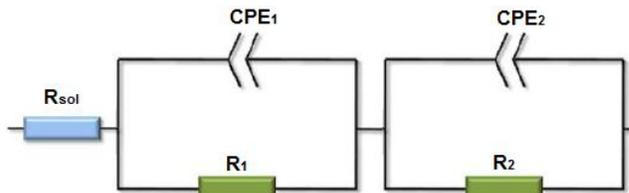


Figura 10. Circuito equivalente para el sistema metal-mezcla (gasolina-bioetanol) y E100

Los diferentes elementos fueron evaluados por un procedimiento de ajuste, y los datos obtenidos tomados como ejemplo se muestran en la tabla 3.

% Bioetanol	R_s (Ohm \cdot cm^2)	CPE1 (F)		R_1 (Ohm \cdot cm^2)	CPE2 (F)		R_2 (Ohm \cdot cm^2)
		CPE 1-T	CPE 1-P		CPE 2-T	CPE 2-P	
E10	2,956 E05	5,18 E-12	0,8	9,60 E06	1,02 E-11	0,68	5,39 E06
E15	58652	1,29 E-10	0,72	6,10 E06	6,72 E-10	0,94	3,56 E06
E100	6804	1,01 E-09	0,9	62258	4,56 E-06	0,8	12961

Tabla 3. Valores de resistencia y capacitancia, mezclas (gasolina-bioetanol) y E100.

Los valores del sistema de cobre en el bioetanol pueden ser interpretados de la siguiente manera: la capacitancia de la doble capa simulada con un elemento de fase menor a 1 indica que el comportamiento corresponde a un capacitor con algunas imperfecciones como rugosidad y porosidad. La resistencia R_1 corresponde a la oxidación del metal, después de esta oxidación se forma la película de óxido de cobre (Cu_2O), la capacitancia de esta película fue simulada con un elemento de fase, con valores mayores a 0.5 y menores a 1, lo cual indica su naturaleza porosa. La resistencia R_2 , representa la resistencia de la fase óxido-metal, con un valor inferior a la primera resistencia, esta disminución puede atribuirse a una mala adherencia del óxido sobre la superficie del cobre, y la capacitancia de la interfase

óxido-electrolito es menor que la capacitancia de la interface óxido – metal, y esto indica que hay mayor cantidad de electrolito en contacto con el metal.

Además el aumento en los valores de la resistencia a la solución R_s , para las concentraciones de bioetanol, indican que el bioetanol contenido en la gasolina, aumenta su conductividad.

IV. CONCLUSIONES.

- Los valores de velocidad de corrosión obtenidos por medio de la técnica de pérdida de peso y extrapolación Tafel, confirma el efecto de la concentración de bioetanol sobre las mezclas utilizadas, se observa una tendencia en el aumento de la corrosión con el incremento de la concentración de etanol.
- De acuerdo a los datos obtenidos para los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica, se afirma que el tiempo de exposición influye significativamente en el comportamiento del metal, indicando que a mayor tiempo de exposición, la capa de óxido se hace menos protectora y estable, causando mayor corrosión.
- La morfología de daño encontrada sobre la superficie del cobre, muestra la presencia de corrosión uniforme y eventos de corrosión localizada, se evidencia la formación de productos de corrosión asociados principalmente a la cuprita Cu_2O y acetatos de cobre que no fueron de carácter protector para la superficie metálica.
- Se atribuye como componente importante, para la corrosión del cobre en bioetanol, la presencia de ácidos orgánicos contenidos en el etanol como el ácido acético; y la naturaleza higroscópica del bioetanol, permitiendo la presencia de agua en la mezcla; que causan un aumento en la interacción del metal con la mezcla, acelerando la corrosión del cobre.
- No es recomendable utilizar cobre como material para la fabricación de autopartes que estén en contacto con las mezclas de bioetanol, como los contactos eléctricos, que podrían verse afectados y causar mal funcionamiento de la bomba de gasolina.

REFERENCIAS

- [1] Bioetanol de caña de azúcar, energía para el desarrollo sostenible [en línea]. Rio de Janeiro: banco de desarrollo de Brasil y centro de gestión e estudios estratégicos, 2008 [consultado julio de 2010]. Disponible en internet: <http://www.bioetanoldecanaazucar.org/>
- [2] L. Horta., L. Aspectos complementarios para la definición de un programa de bioetanol en América Central. [En línea] México: Naciones Unidas-Comisión económica para América latina y el Caribe, 2004 [consultado julio de 2010]. Disponible en: <http://www.agrocombustibles.org/conceptos/CepalBioetanolLac2004.pdf>
- [3] Baena L., Calderón J.A., Gómez M. Prueba de evaluación basado en determinar los impactos de un combustible de gasolina del 20% de etanol en la mezcla de la flota de vehículos de pasajeros de Australia - 2000hrs pruebas de compatibilidad de los materiales bajo ambientes simulados. [En línea]. Orbital Engine Company, 2003 [consultado noviembre 2010]. Disponible en: <http://www.environment.gov.au/atmosphere/fuelquality/publications/2000hours-vehicle-fleet/pubs/2000-hours-vehicles.pdf>
- [4] ASM Handbook, volumen 12 “CORROSION”, 1952.
- [5] Jaimes, M. Evaluación de la corrosión de cobre comercialmente puro en mezclas de bioetanol al 5, 10, 15, 20 y 100% de etanol mediante pruebas gravimétricas y electroquímicas. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2011.
- [6] Peña, D. Vásquez, C. Estupiñan, H. Corrosión de partes de vehículos fabricadas con latón y bronce expuestas a mezclas de bioetanol-gasolina. Revista ION, Bucaramanga, vol. 24, p.p. 43-52. 2011.
- [7] American Society for Testing and Materials. STANDARD PRACTICE FOR PREPARING, CLEANING AND EVALUATING CORROSION TEST SPECIMENS. ASTM G1- 90. 1999