



Vol 16. N° 3  
Julio - Septiembre 2016

ISSN: 1317-2255 (IMPRESO)  
Depósito Legal: pp 20002FA828  
ISSN: 2477-9636 (ELECTRÓNICO)  
Dep. legal ppi 201502ZU4642

# Multiciencias

R M C<sub>s</sub>

N F

Universidad del Zulia  
Revista Arbitrada Multidisciplinaria



LUZ Punto Fijo

Núcleo LUZ-Punto Fijo  
Programa de Investigación y Postgrado  
Falcón-Venezuela

**MULTICIENCIAS**, Vol.16, N° 3, 2016 (239-246)  
ISSN: 1317-2255 (IMPRESO) / Dep. Legal pp 20002FA828  
ISSN: 2477-9636 (DIGITAL) Dep. Legal ppi 201502ZU4642

## Tratamiento de aguas residuales fenólicas de refinería por métodos electroquímicos

Rebeca Abreu Cuadra, Jesús Perozo Cuicas, Cornelio Martínez Bracho y Héctor Moran Guillén

*Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda" Departamento de Química*  
[rebekabreu@gmail.com](mailto:rebekabreu@gmail.com); [jrpcuicas@gmail.com](mailto:jrpcuicas@gmail.com); [corneliomar@gmail.com](mailto:corneliomar@gmail.com); [hamorang@gmail.com](mailto:hamorang@gmail.com)

### Resumen

En la República Bolivariana de Venezuela como potencia energética mundial, la explotación y transformación del petróleo es y seguirá siendo una actividad que consolida el modelo productivo socialista. Los grandes centros refinadores generan efluentes que contienen cantidades considerables de contaminantes y las tecnologías aplicadas han resultado insuficientes para remover compuestos orgánicos recalcitrantes, como el fenol, soportado por elevados valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) observados en efluentes caracterizados. Se propone un tratamiento de aguas residuales fenólicas aplicando oxidación electroquímica bajo condiciones galvanostáticas, utilizando electrodos tridimensionales de carbón vítreo reticulado (CVR) y contraelectrodo de AI-316. La evaluación de los niveles de fenol en aguas residuales indicó que no cumple con la normativa ambiental. Se alcanzó una remoción de 1,12 mg de fenol por cm<sup>2</sup> de electrodo de CVR en 30 minutos, representando una remoción de 18,4%, valor aceptable considerando el tiempo del tratamiento y una densidad de corriente de 0,7 mA/cm<sup>2</sup>.

**Palabras clave:** Electro-oxidación; aguas residuales; refinería; fenol

# Phenolic Wastewater Refinery Treatment by Electrochemical Methods

## Abstract

In Venezuela as a world energy power, exploitation and processing of oil is and will remain an activity that strengthens the socialist production model. Large refineries generate effluents containing considerable amounts of pollutants and the technologies applied have proved insufficient to remove recalcitrant organic compounds, such as phenol, supported by high Chemical Oxygen Demand (COD) values observed in effluents characterized. It is proposed a treatment of phenolic waste water by applying electrochemical oxidation under galvanostatic conditions, using three-dimensional reticulated glassy carbon electrodes and AI-316 as a counter-electrode. The evaluation of phenol levels in wastewater indicated that they do not comply with environmental regulations. A removal of 1.12 mg of phenol per cm<sup>2</sup> of glassy carbon electrode was achieved in 30 minutes, representing a removal of 18.4%, acceptable value considering the treatment time and 0,7 mA/cm<sup>2</sup> of current density.

**Keywords:** Electro-oxidation; wastewater; refinery; phenol.

## Introducción

En la República Bolivariana de Venezuela, la explotación y transformación del petróleo es y seguirá siendo una actividad que consolida el modelo productivo del país, pero esta actividad debe asegurar que la producción y el consumo de energía contribuyan con el cuidado y la conservación del medio ambiente, preservando en todos los casos el equilibrio de los ecosistemas.

En el país se encuentran grandes centros refinadores y complejos petroquímicos cuyas aguas residuales contienen cantidades considerables de contaminantes orgánicos, principalmente hidrocarburos aromáticos, alifáticos, olefinicos, aceites y grasas, amoníaco, sulfuros, metales pesados y compuestos fenólicos, siendo estos últimos una seria amenaza para el medio ambiente dada su elevada toxicidad [11]. Estos efluentes deben ser tratados de manera tal que puedan ser adecuados para su descarga en las respectivas redes de vertido o sistemas naturales, de acuerdo a los límites de concentración permitidos en la descarga de efluentes provenientes de los procesos industriales establecidos por la legislación venezolana [30].

Las aguas residuales industriales que contienen compuestos fenólicos representan un problema serio de descarga debido a su baja biodegradabilidad, alta toxicidad y aspectos ecológicos [10]. Los compuestos fenólicos, benceno, etilbenceno, xileno, tolueno e hidrocarburos aromáticos policíclicos poseen extrema toxicidad y su estabilidad los habilita a permanecer por tiempos prolongados y bioacumularse,

causando daños considerables en los ecosistemas y en la salud humana [16].

El fenol y sus derivados son letales para los peces en bajas concentraciones (0,5 mg/L) y cuando se bioacumula sus efectos a largo plazo son más graves [2, 18, 36]. En tal sentido, la remoción de fenoles de las aguas residuales industriales tiene gran importancia ambiental.

La tecnología aplicada en los centros de refinación del país para tratar los efluentes provenientes de las unidades de proceso generalmente se estructura en dos etapas, la primera con pre-tratamiento mecánico por separadores por gravedad API (American Petroleum Institute), donde los sólidos suspendidos y líquidos inmiscibles como grasas y aceites son reducidos significativamente, seguida de tratamientos fisicoquímicos, donde procesos como la coagulación, sedimentación y flotación disminuyen la concentración de sólidos suspendidos y metales pesados [12].

Luego se pasa a un tratamiento secundario con el objeto de reducir a los límites permitidos las concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO), aceites y grasas, fenoles, aromáticos totales y compuestos con nitrógeno y azufre [29]. Mundialmente el tratamiento más empleado en esta etapa es el biológico [8] y aunque son sistemas capaces de remover muchos de los compuestos carbonados disueltos, no son suficientes para degradar en su totalidad la materia orgánica presente en los mismos, principalmente los hidrocarburos aromáticos recalcitrantes, como el fenol y sus derivados. Esta afirmación se soporta en los elevados valores de DQO observados en efluentes tratados [33]. Muchos de estos compuestos son estables y difíciles de oxidar mediante sistemas biológicos, por lo que se

requiere de tratamientos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes [22]. Es así como surgen los métodos electroquímicos como una alternativa prometedora en el tratamiento de aguas residuales de refinería. Son especialmente útiles en sistemas de pre-tratamiento de contaminantes resistentes a la biodegradación, o como pos-tratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de ser descargadas [7], siendo uno de los métodos más empleados la oxidación electroquímica [25].

La oxidación electroquímica está basada en la generación de especies altamente reactivas, como el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), el cual tiene el poder de oxidar, en medio acuoso, compuestos orgánicos. Este concepto fue inicialmente establecido por Glaze y col. (1987) [14] y se ha ido empleando cada vez más en varios países desarrollados en el tratamiento de agua con alto contenido de contaminantes orgánicos tóxicos [27]. Por presentar el radical hidroxilo un alto potencial de reducción, comparado con otras especies es capaz de oxidar casi cualquier compuesto orgánico, pudiendo llegar hasta su mineralización [9], o en algunos casos formar productos menos agresivos [3, 7, 20].

En la oxidación electroquímica el agua contaminada es tratada en el compartimiento anódico de una celda dividida, empleando electrodos convencionales como Pt [32],  $\text{PbO}_2$  dopados y modificados [40],  $\text{Ti}/\text{IrO}_2$  [5],  $\text{Ti}/\text{RuO}_2$ ,  $\text{Ti}/\text{SnO}_2$ -Sb [19, 31] o con diamante dopados con boro (DDB) [28, 39], que han resultado con excelentes rendimientos [4]. Empleando electrodos de  $\text{Ti}/\text{TiO}_2$ - $\text{RuO}_2$ , se ha logrado degradar fenol en aguas de refinería en un 94,5% y una remoción en DQO de 74% [38]. Cuando se empleó la oxidación electroquímica en aguas sintéticas que simulan las aguas residuales de refinería, con electrodos de rutenio mezclado con óxidos metálicos (Ru-MMO) se obtuvo un 99,53% de remoción de fenol y 96,04% en DQO, con una densidad de corriente de 5  $\text{mA}/\text{cm}^2$  en un tiempo de 40 minutos [23]. El principal problema para la aplicación industrial de estos procesos radica en el elevado precio que presentan los materiales electródicos. Se hace necesario entonces estudiar el comportamiento de materiales más económicos y existentes en el mercado, como el carbón vítreo reticulado, monolítico o modificado con polímeros conductores, grafito y óxidos metálicos modificados.

El carbón vítreo reticulado (CVR), es un material poroso que tiene como propiedades baja densidad, baja expansión térmica y alta conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, que le permiten un amplio rango de aplicabilidad en sus diferentes geometrías, gran área superficial, estructura rígida y baja resistencia a flujo de fluidos [13]. Se han empleado electrodos de carbón vítreo reticulado como sensores y estudios

electroanalíticos [37], en la remoción de metales como cobre [23], zinc [17], cadmio [35], en electrosíntesis orgánica [34], en procesos de oxidación de compuestos orgánicos como reactivo Fenton [15], oxidación electroquímica de tolueno en solución acuosa, mostrando que algunos de los productos de reacción son electroquímicamente activos y se adsorben sobre la superficie del carbón vítreo [24]; debida a la actividad catalítica que presenta el CVR y su gran área interfacial, el presente estudio presenta su empleo como material electródico en la oxidación electroquímica del fenol en un agua real de refinería.

## Materiales y Métodos

### Caracterización de las aguas residuales

Todas las sustancias químicas empleadas en los diferentes ensayos fueron de grado analítico. Las aguas residuales de este estudio son aguas provenientes de una refinería de la República Bolivariana de Venezuela la cual se caracterizó. Los parámetros fisicoquímicos y sus rangos en la descarga, de acuerdo con el Decreto 883 de las Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos [30], se muestran en la Tabla 1, así como los métodos analíticos utilizados.

Tabla 1. Características de un agua residual de refinería en la descarga

| Parámetro     | Rango     | Método APHA-AWWA-WPCF [1] |
|---------------|-----------|---------------------------|
| pH            | 6,0 - 9,0 | 4500-H+ B                 |
| T (°C)        | <35       | 2550 B                    |
| SST (ppm)     | 80        | 5540D                     |
| Fenoles (ppm) | 0,5       | 5530-D                    |
| DQO (ppm)     | 350       | 5220 D                    |
| DBO5 (ppm)    | 60        | 5210 B                    |

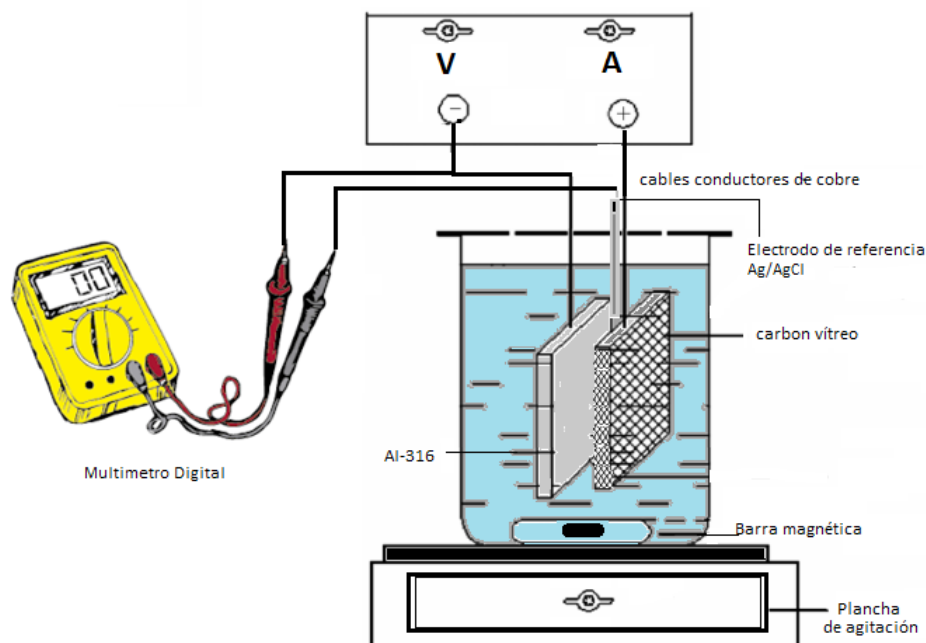
Fuente: Propia

### Configuración experimental para el proceso de electro-oxidación (EO)

El diagrama esquemático de la configuración del experimento de EO mostrado en la Figura 1 consiste en una celda electrolítica constituida por vaso de precipitados de 500 mL, un ánodo de carbón vítreo reticulado de 500 ppi (1,5 cm x 0,7 cm x 2 cm) de área superficial aproximada 10  $\text{cm}^2$  y un área efectiva de 700  $\text{cm}^2$ , con cátodo de acero inoxidable AI-316. La distancia entre los electrodos de 1,5 cm conectados a una fuente de poder con electrodo de referencia comercial de  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  saturado en  $\text{KCl}$ . El electrodo de CVR (ánodo) se polariza positivamente, y el contraelectrodo (cátodo)

se polariza negativamente. El modo de operación por lotes con un tiempo de retención de 30 minutos, para un volumen de reacción de 400 mL. El potencial aplicado fue de 2,5 V e intensidad de corriente constante igual

a 500 mA. Se estableció el fenol como compuesto aromático para el estudio de la cinética de oxidación electroquímica en el reactor.



**Figura 1.** Diagrama de la configuración experimental del proceso de EO.

Los experimentos fueron llevados a cabo en condiciones galvanostáticas usando una fuente reguladora de poder DC marca Tektronix, modelo CPS250 (0 ~ 20 V y 0,5 A), y se registró el potencial existente entre el electrodo de trabajo vs el electrodo de referencia (ET vs ER) con un multímetro digital Dmiotech durante los 30 minutos de duración de la electrólisis. La agitación se realizó empleando una plancha de agitación magnética analógica Cimarec y durante la electrólisis las muestras fueron tomadas en diferentes tiempos para la medición del fenol por cromatografía gaseosa. La temperatura se mantuvo constante a 25°C, medida en intervalos de 5 minutos con un termómetro de mercurio, y el pH del agua real no fue modificado. No se agregó electrolito soporte debido a la alta conductividad presente en el agua residual.

### Mediciones analíticas

La técnica de cromatografía gaseosa fue adoptada para el análisis de la concentración de fenol del agua sin tratar y tratada por EO. Las muestras fueron recolectadas cada 5 minutos una vez iniciada la electrólisis. Para la

cuantificación de compuestos fenólicos, se empleó la técnica de normalización de áreas, por el método de patrón interno. Se utilizó un cromatógrafo de gases (CG) Agilent Tecnolgies Modelo 6890N, con Columna Hp-Innowax Polypropilene Glicol Capilar, con detector FID a 250°C, gas de arrastre N<sub>2</sub> a 20 mL/min y temperatura del horno 185°C, dentro del cual se inyectó un volumen de 1 µL de muestra preparada con 1 mL de agua residual y 100 µL de solución de estándar interno.

### Determinación de la eficiencia de la EO de las aguas residuales de refinería

Fue realizada la evaluación del reactor electroquímico a partir del estudio de la oxidación del fenol presente en el agua residual, con la finalidad de verificar el rendimiento y la eficiencia en la degradación de la sustancia orgánica contaminante, en las condiciones de operación escogidas, midiendo la concentración inicial y final de fenol, volumen de solución, densidad de corriente y tiempo de electrólisis. Fueron calculados los parámetros siguientes:

% Conversión ( $C_m$ ):

$$C_m = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad (3)$$

$C_o$ : concentración inicial de reactivo

$C_f$ : concentración final del reactivo a un tiempo  $t$

Eficiencia faradaica ( $\phi$ ):

$$\phi = \frac{n \times F (n_o / C_{6H5OH} - n_f / C_{6H5OH})}{I \times t} \times 100 \quad (4)$$

$\phi$  = Eficiencia de corriente [Adi]

$n$  = Número de electrones transferidos en la reacción electroquímica [ $e^-$ ]

$F$  = Constante de Faraday [96.485 C/mol]

$n_o / C_{6H5OH}$  = Moles iniciales de fenol [ $\text{mol}/\text{cm}^3$ ]

$n_f / C_{6H5OH}$  = Moles finales de fenol [ $\text{mol}/\text{cm}^3$ ]

$I$  = Corriente [A, C/s]

$t$  = Tiempo [s]

Eficiencia espacio-tiempo:

$$\rho_{et} = \frac{A \times \phi \times i \times M}{n \times F} \quad (5)$$

$\Phi$  = Eficiencia de corriente promedio de las electrólisis [ADI].

$A$  = Área del electrodo de trabajo en función del volumen del compartimiento del reactor [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ].

$n$  = Número de electrones transferidos en la reacción electroquímica [ $e^-$ ]

$F$  = Constante de Faraday [96.485 C/mol].

$M$  = Masa molar [kg/mol]

$i$  = Densidad de corriente [ $\text{A}/\text{m}^2$ ]

## Resultados y Discusión

La composición del agua residual de la refinería antes del tratamiento se especifica en la Tabla 2. Se realizaron seis muestreos para tener datos precisos sobre la descarga del efluente a la costa marina.

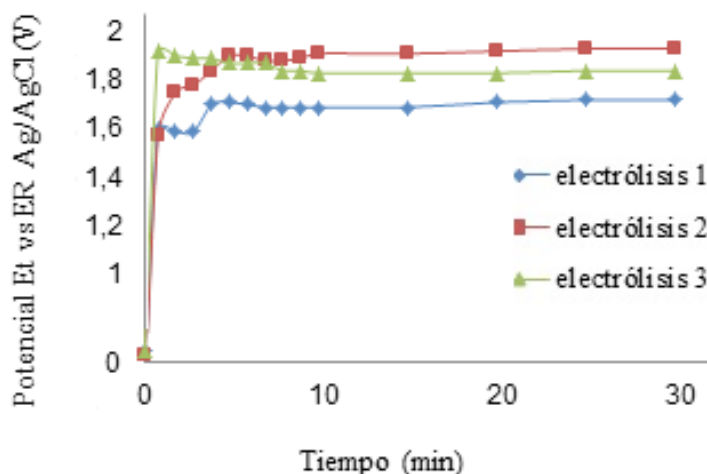
Tabla 2. Composición del agua residual de refinería.

| Parámetro                | Valor (media $\pm$ SD) | Límite máximo de descarga [30] |
|--------------------------|------------------------|--------------------------------|
| pH                       | 6,36 $\pm$ 1,02        | 6,0 – 9,0                      |
| T ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 34,3 $\pm$ 0,52        | <35                            |
| SST (ppm)                | 3,80 $\pm$ 1,44        | 80                             |
| TDS (g/L)                | 18,8 $\pm$ 5,81        | -                              |
| Conductividad (mS/cm)    | 26,36 $\pm$ 8,56       | -                              |
| Fenoles (ppm)            | 12,9 $\pm$ 24,2        | 0,5                            |
| DQO (ppm)                | 844,2 $\pm$ 551,9      | 350                            |
| DBO5 (ppm)               | 156,5 $\pm$ 102,6      | 60                             |

**Fuente:** Propia

Se puede observar que valores de concentración de fenoles, DQO y DBO<sub>5</sub> se encuentran fuera del límite máximo permitido por la ley, lo cual evidencia que requiere tratamiento. La Tabla 3 muestra los resultados de la degradación del fenol y la evolución del potencial contra el tiempo durante la electrólisis. Como se muestra en la Figura 2, la evolución del potencial frente al tiempo en la electrólisis 1, parte del potencial a circuito abierto (PCA) 0,05 V, es decir, aquel que posee el ET vs ER únicamente frente al paso de la solución electrolítica a corriente cero, luego de la aplicación del pulso de corriente, el potencial de circuito externo presenta un comportamiento casi constante durante los treinta minutos que dura la electrólisis, con un ascenso y descenso progresivo en la medida de potencial, un valor máximo promedio en el potencial alcanzado de 1,67 V y un potencial mínimo promedio de 1,54 V.

La evolución del potencial frente al tiempo en la electrólisis 2 y 3 parte del potencial de circuito abierto de 0,05 V, al aplicar el pulso de corriente la reacción electroquímica ocurre sobre el electrodo, el potencial cambia bruscamente observándose un pico pronunciado, debido a que ocurre un proceso faradaico asociado a la oxidación anódica del agua sobre la superficie del electrodo, luego se observa un ligero descenso, en el que ocurre la oxidación de fenol a un potencial de equilibrio aproximado de 1,78 V. En la segunda y tercera electrólisis se observa un comportamiento similar con máximo promedio en el potencial de 1,88 V y un mínimo promedio de 1,52 V (Figura 2).



**Figura 2.** Estudio cronopotenciométrico. Potencial de oxidación de fenol sobre electrodo de CVR vs. Ag/AgCl ( $KCl_{\text{saturado}}$ ) en agua residual de refinería durante una electrolisis de 30 minutos, corriente aplicada  $I = 500$  mA, 2,5 V, 3,5 rpm, a pH 6,36 y una conductividad de 26,36 mS/cm.

Tabla 3. Promedio de degradación del fenol durante las electrolisis del agua residual de refinería.

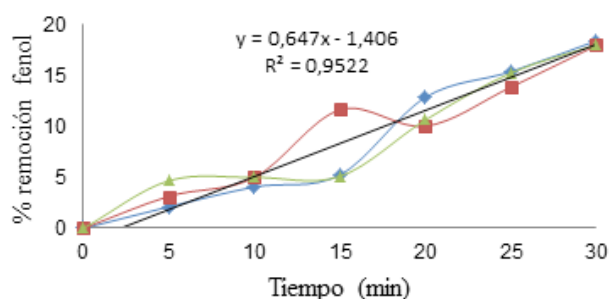
| Muestras | A (ppm) | B (ppm) | Promedio | Desviación | Error  | % Remoción |
|----------|---------|---------|----------|------------|--------|------------|
| M0       | 96,2566 | 97,2996 | 96,778   | 0,7375     | 0,7621 |            |
| M5       | 94,6987 | 94,7622 | 94,730   | 0,0449     | 0,0474 | 2,116      |
| M10      | 92,6789 | 93,0065 | 92,843   | 0,2317     | 0,2495 | 4,066      |
| M15      | 91,8026 | 91,6040 | 91,703   | 0,1404     | 0,1531 | 5,244      |
| M20      | 84,5643 | 84,0982 | 84,331   | 0,3296     | 0,3908 | 12,861     |
| M25      | 83,7654 | 79,9977 | 81,882   | 2,6642     | 3,2537 | 15,393     |
| M30      | 79,3390 | 78,5868 | 78,963   | 0,5319     | 0,6737 | 18,408     |

La eficiencia de corriente promedio obtenida de acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 3 fue de 28,45% , representando la cantidad de intensidad de corriente efectiva para oxidar fenol desde 96,78 mg/L a 78,96 mg/L, pudiendo ser una de las causas de la baja eficiencia el consumo de energía que se incrementa porque una parte de la carga consumida es gastada en reacciones secundarias como la electrolisis del agua y debido a la probable desactivación de la superficie del CVR electrodo por la oxidación del fenol sobre el CVR [6, 21, 24].

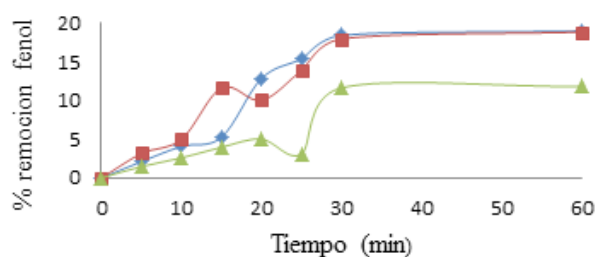
La eficiencia espacio-tiempo obtenida de acuerdo con la Tabla 3 fue de 0,867 kg/m<sup>3</sup>s, valor que representa la cantidad de fenol removida por unidad de tiempo y de

volumen del reactor electroquímico. Al considerar que la reacción ocurre en la superficie del carbón y no en toda el área efectiva se logra la remoción de 1,12 mg de fenol por cm<sup>2</sup> de superficie de carbón, lo cual representa una remoción aceptable considerando el tiempo de duración de cada electrolisis.

La Figura 3 muestra el comportamiento de la remoción del fenol en función del tiempo para las electrolisis realizadas bajo las mismas condiciones, manteniendo el voltaje en 2,5 V y una densidad de corriente de 0,714 mA/cm<sup>2</sup>. La tendencia en remoción muestra un buen ajuste al comportamiento lineal con un  $R^2 = 0,9522$ .



**Figura 3.** Degradación del fenol sobre electrodos de carbón vítreo, con densidad de corriente 0,714 mA/cm<sup>2</sup>, pH 6,36, conductividad 26,36 mS/cm, con tiempo de electrólisis de 30 minutos.



**Figura 4.** Porcentaje de remoción de fenol sobre electrodos de CVR, con densidad de corriente 0,714 mA/cm<sup>2</sup>, tiempo de electrólisis de 60 minutos.

Durante cada electrólisis realizada galvanostáticamente y con corriente constante, fueron registrados en el multímetro bajos valores de potencial, necesarios para evitar la evolución de oxígeno que consume energía, por lo que la actividad del ánodo decreció con el tiempo debido a la adsorción de especies contaminantes en la superficie del electrodo, pudiendo causar la pasivación del mismo [6]. Estas especies solo pueden ser oxidadas por el  $\bullet\text{OH}$  generado a altos potenciales anódicos, ocurriendo simultáneamente la evolución de oxígeno, produciendo la regeneración de la superficie del ánodo. La evolución de oxígeno puede recubrir los poros del CVR a altos valores de sobrepotencial, lo cual causa una reducción de la transferencia de carga en la superficie del electrodo [21]. La presencia de iones cloruro en el agua residual de refinería pudo haber causado interferencias en la degradación del fenol, así como el pH del agua real, el cual fue de 6,36 cercano a la neutralidad, siendo conocido que la oxidación electroquímica directa de los compuestos aromáticos sobre la superficie del electrodo se favorece cuando el medio acuoso es ácido [21, 24, 26]. A valores de pH ácidos, en presencia de cloruros, se propicia la evolución de cloro, generando cloro activo, en cambio a valores de pH cercanos a la neutralidad y básico predomina la generación de radicales hidroxilo generados en la electrólisis del agua [21].

## Conclusiones

La oxidación electroquímica presenta como ventaja el poder tratar residuales muy tóxicos, operar a temperatura y presión atmosférica, y es ambientalmente amigable debido a que sólo emplea energía, cuyo consumo dependerá de la concentración del contaminante a degradar. Debido a la complejidad del agua residual tratada, el comportamiento electroquímico del CVR sin ser modificado fue el esperado en el intento de remover fenol. En condiciones galvanostáticas los resultados mostraron que el material electródico tiene la capacidad de promover reacciones de oxidación sobre el fenol con una remoción razonable para el tiempo de duración de la electrólisis y la baja densidad de corriente aplicada.

## Referencias

- [1] AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (2005). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 21<sup>th</sup> Edition, American Public Health Association 1015 fifteenth street, N.W. Washington, D.C. USA.
- [2] ATTIOGBE, F; GLOVER, M; NYADZIEHE, K (2007). Correlating biochemical and chemical oxygen demand of effluents. **Water African Journal Applied Ecol.** vol 11, pp 110-118.
- [3] BOLTON, J; BIRCHER, K; TUMAS, W; TOLMAN, C (2001). Figures of merit for the technical development and application of advanced oxidation technologies for both electric- and solar- driven systems (IUPAC Technical Report). **Pure Appl. Chem.**, 73(4), 627-637.
- [4] CAÑIZARES, P; PAZ, R; LOBATO, J; SAÉZ, C; RODRIGO, M (2006). Electrochemical treatment of the effluent of a fine chemical manufacturing plant. **Journal of Hazardous Materials**, vol 138, n 1, 173-181.
- [5] CHATZISYMEON, E; FIERRO, S; KARAFYLLIS, I; MANTZAVINOS, D; KALOGERAKIS, N; KATSAOUNIS, A; ABDULKARIM, M (2010). Anodic oxidation of phenol on Ti/IrO<sub>2</sub> electrode: Experimental studies. **Catalysis Today**, vol 151, pp 185-189.
- [6] CIRIACO, L; SANTOS, D; PACHECO, M; LOPES, A (2011). Anodic oxidation of organic pollutants on a Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O anode. **Journal of Applied Electrochemistry**. Vol. 41, 577-587.
- [7] COMNINELLIS, C; POULIOS, I; KAPALKA, A; MANTZAVINOS, D; MALATO, S; PARSON, S (2008). Perspective Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D". **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**. Vol 83, pp 769-776.



- [8] DIYAUDDEEN, B; ASHRI, W; AZIZ, A (2011). Treatment technologies for petroleum refinery effluents: a review. **Process safety and environmental protection**. Vol. 89, pp 95-105.
- [9] DURÁN, A; MONTEAGUDO, J; AMORES, E (2008). Solar foto-Fenton degradation of Reactive Blue in CPC reactor. **Applied Catalysis B: Environmental**, vol. 80, pp 40-50.
- [10] EL-ASHTOUKHY, E; EL-TAWEEL, Y; ABDELWAHAB, O; NASSEF, E (2013). Treatment of Petrochemical Wastewater Containing Phenolic Compounds by Electrocoagulation Using a Fixed Bed Electrochemical Reactor. **Int. J. Electrochem. Sci.**, vol. 8, 1534 – 1550.
- [11] EL-NAAS, M; AL-ZUHAIR, S; ALHAIJA, M (2009) "Reduction of COD in refinery wastewater through adsorption on Date-Pit activated carbon". **Journal of Hazardous Materials**, vol. 173, pp. 750-757.
- [12] EL-NASS, M; AL-ZUHAIR, S; ALHAIJA, M (2009). Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater. **Journal of Environmental Manage**, vol. 91, pp180-185.
- [13] FRIEDRICH, J; PONCE DE LEÓN, C; READE, G (2004). Carbón Vítreo Reticulado como material electródico. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, vol 561, pp 203-217.
- [14] GLAZE, W; KWANG, J; CHAPIN, D (1987). Chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. **Ozone Science and Engineering**. Vol. 9, 335-352. ISSN 0191-9512.
- [15] HUISSOUD, A; TISSOT, P (2008). Electrochemical reduction of 2-ethyl-9,10-anthraquinone on reticulated vitreous carbon and mediated formation of hydrogen peroxide. **Journal of Applied Electrochemistry**, vol 28, pp 653-657.
- [16] IRWIN, R. J; VANMOUWERIK, M; STEVENS, L; SEESE, M; BASHAM, W (2012) Entry for BTEX and BTEX compound. In W. R. D. National Park Service (6 Ed.), *Environmental Contaminants Encyclopedia* (Vol. 1, pp. 6-8). Fort Collins, Colorado.
- [17] LANZA, M; BERTAZZOLI, R (2000). Removal of Zn (II) from chloride medium using a porous electrode: current penetration within the cathode. **Journal of Applied Electrochemistry**, vol. 30, n 1, pp 61-70.
- [18] LI, Y; MEI, H; FANG, H (2013). A review of treating oily wastewater. **Arabian Journal of Chemistry**. doi. org/10.1016/j.arabjc.2013.07.020.
- [19] LI, X; FENG, Y; XIE, Z; GU, J (2005). Reaction pathways and mechanisms of the electrochemical degradation of phenol on different electrodes. **Water Research**, vol. 39, n 10, pp 1972-1981.
- [20] LINARES, I; MARTÍNEZ, V; BARRERA, C; PAVÓN, S; BERNAL, L LUGO, V (2011). Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos. **Avances en Ciencias e Ingeniería** (ISSN: 0718-8706) vol. 2(1), pp. 21-36.
- [21] LÓPEZ, G; GUTIERREZ, M; DURÁN, A (2015). Efecto del pH sobre la oxidación electroquímica del fenol empleando un ánodo dimensionalmente estable de  $\text{SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5\text{-RuO}_2$ . **Revista Mexicana de Ingeniería Química**. Vol.14, 2, pp. 437-452.
- [22] LOYA, D; MOROYOQUI, P; DROGUI, P; IBARRA, M; ESTRADA, I (2010). Tecnologías electroquímicas como alternativas en el tratamiento de aguas contaminadas: adsorción por carbón activado. **Ide@s CONCYTEG** 5, vol. 60, pp.14-30.
- [23] MARCO, P; CARLO, S; GIACOMO, C (1999). Electrochemical remediation of copper (II) from an industrial effluent Part II: three-dimensional foam electrodes. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 27, n 4, pp. 299-307.
- [24] MARTÍNEZ, C; ORTIZ, R (2010). Voltammetric Comparison of the Electrochemical Oxidation of Toluene on Monolithic and Reticulated Glassy Carbon Electrodes in Aqueous Medium. **Portugaliae Electrochimica Acta**, vol. 28, n 6, pp. 397-404.
- [25] MARTINEZ HUITLE, C; BRILLAS, E (2008). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. **Applied Catalysis B: Environmental**, vol. 41, pp. 154-189.
- [26] MARTÍNEZ HUITLE, C; HERNÁNDEZ, F; FERRO, S; QUIROZ, M; DE BATTISTI, A (2006). Oxidación electroquímica: Una alternativa para el tratamiento de aguas con contaminantes orgánicos. **Revista Afinidad**, vol. 63 (521), pp.26-34.
- [27] MOTA, A; ALBUQUERQUE, L; BELTRAME, L; CHIAVONE-FILHO, O; MACHULEK, A; NASCIMENTO, C (2008). Advance oxidation processes and their application in the petroleum industry: a review. **Brazilian Journal of Petroleum and Gas**, vol. 2, n 3, pp. 122-142.
- [28] PANIZZA, M; BRILLAS, E; COMNINELLIS, C (2008). Application of Boron-doped diamond electrodes for wastewater treatment. **Journal of Environmental Eng Manage**, vol. 18, n 3, pp. 139-153.
- [29] PDVSA (2012). Sistema de tratamiento de efluentes (Ambiente, Trans.). MPPEM (Ed.), *Especialización en Ingeniería de Procesos* (Vol. 1, pp. 1-20). Punto Fijo: Centro de Refinación Paraguaná.
- [30] República Bolivariana de Venezuela (1995). Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.021. **Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o Efluentes Líquidos**. Caracas, 18-12-1995. 8
- [31] SANTOS, A; LIMA, K; EGUES, S; TAVARES, R; DANTAS, L (2007). Toluene deep oxidation over noble metals, Copper and Vanadium Oxides. **Catalysis Letters**, vol. 114, n 1-2, pp. 59-63.

- [32] SANTOS, F; AZEVEDO, E; SAN'T ANNA, G; DEZOTTI, M (2007). Photocatalysis as a tertiary treatment for petroleum refinery wastewater. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, vol. 23, n 4, pp. 451-460.
- [33] SHOKROLLANHZADEH, S; AZIZMOHSENI, F (2008). Biodegradation potential and bacterial diversity of a petrochemical wastewater treatment plan in Iran. **Bioresour Technology**, vol. 99, pp. 6127-6133.
- [34] SZANTO, D; TRINIDAD, P; WALSH, F (1998). Evaluation of carbon electrodes and electrosynthesis of coumestan and catecholamine derivatives in the FM01-LC electrolyser. **Journal of Applied Electrochemistry**, vol. 28, n 3, pp. 251-258.
- [35] TRAMONTINA, J; AZAMBUJA, D; PIATNICKI, C (2002). Removal of Cd<sup>2+</sup> ion from diluted aqueous solutions by electrodeposition on reticulated vitreous carbon electrodes. **J. Braz. Chem. Soc.**, vol. 13, n 4, pp. 469-473.
- [36] USEPA. Technical support document for effluent guidelines, 2016. United State of America.
- [37] WIECK, H; HEIDER, G; YACYNYCH, A (1984). Chemically modified reticulated vitreous carbon electrode with immobilized enzyme as a detector in flow-injection determination of glucose. **Anal. Chim. Acta**, vol. 158, pp. 137-141.
- [38] YUZUF, Y; KOPARAL, A (2007). Electrochemical oxidation of phenol in a parallel plate reactor using ruthenium mixed metal oxide electrode. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 136, pp. 296-302.
- [39] YUZUF, Y; KOPARAL, A; ÖGÜTVEREN, U (2010). Treatment of petroleum refinery wastewater by electrochemical methods. **Desalination**, vol. 258, n 1-3, pp. 201-205.
- [40] ZHOU, M; DAI, Q; LEI, L (2005). p-Nitrophenol degradation by electrochemical oxidation in the presence of NaCl. **Environmental Science and Technology**, vol. 5, pp. 67-73.



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

---

# Multiciencias

Vol 16, N° 3

*Edición por el Fondo Editorial Serbiluz.*

*Publicada en septiembre de 2016.*

*Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve)

[www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)

[produccioncientifica.luz.edu.ve](http://produccioncientifica.luz.edu.ve)