

ACIPET

Tecnología emergente para el tratamiento de agua residual industrial asociada a la producción de petróleo pesado en un campo colombiano aplicando técnicas electroquímicas

L.E Garcia – INDUSTRIAS PARBER, R. J. Camargo - UNIVALLE, N. Marriaga – UNIVALLE, F. Machuca – UNIVALLE.

Categoría: Marque con una “X”

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

X

Derechos de Autor 2023, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XX Congreso Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia. Este artículo fue seleccionado para presentación por el Comité Técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el (los) autor(es).

Resumen

Actualmente en Colombia las empresas de petróleo y gas le apuestan a la reutilización de aguas como estrategia para disminuir los volúmenes de captaciones de agua fresca y vertimientos. Lo anterior conlleva a la búsqueda de tecnologías para tratamiento de aguas residuales y especialmente que puedan acoplarse a fuentes de energía renovables para su operación.

Existe la coagulación química convencional para el tratamiento de aguas residuales, no obstante la electrocoagulación se considera una alternativa emergente y amigable al medio ambiente para la eliminación de contaminantes suspendidos en varios tipos de agua residual (Secuela et al.,2014; Emmamjomeh y Sivakumar,2009). Sin embargo, la electrocoagulación presenta desafíos en la reposición de los ánodos de sacrificio tras su agotamiento.

A nivel mundial se han realizado trabajos de electrocoagulación para el tratamiento de aguas de producción de petróleo, basadas algunas de ellas en aguas sintéticas a nivel de laboratorio (Kailas L. Wasewar, et al, 2007. India, Younker, S.Y. Lee, G.A. Gagnon and M.E. Walsh. 2011). Por lo anterior el propósito de este trabajo es aplicar la electrocoagulación con iones metálicos de Hierro aplicada a agua real tomada directamente de un pozo con alto corte de agua de un campo de petróleo pesado colombiano.

La metodología incluye una serie de pasos a nivel de laboratorio que incluyen la toma de una muestra directamente de la cabeza del pozo de un campo de petróleo pesado en el Valle Medio del Magdalena. Se usaron ánodos y cátodos de Hierro en forma monopolar conectados en paralelo, aplicando una densidad de corriente de $1\text{mA}/\text{cm}^2$.

Los resultados fueron positivos, obteniéndose porcentajes de remoción de 99,81% (grasas y aceites), 97,2% (turbidez) y 98,4% (color). A su vez el consumo eléctrico por tratamiento fué de $0,598\text{ kWh}/\text{m}^3$ para la carga eléctrica de 3.000 C/l, mientras que para 2.000 C/l y 1.000 C/l fueron $0,292\text{ kWh}/\text{m}^3$ y $0,226\text{ kWh}/\text{m}^3$ respectivamente.

Introduccion

La industria petrolera a nivel mundial es uno de los sectores que produce volúmenes importantes de aguas residuales que contienen grasas y aceites, sólidos en suspensión y sólidos disueltos. Además, estas aguas residuales son mezclas complejas que contienen metales pesados alcalinos y alcalinotérreos que pueden causar problemas ambientales al ser vertidas, reinyectadas o utilizadas para disposición subterránea. Por lo tanto, es necesario realizar tratamientos integrales que permitan depurarlos y así poder reutilizarlos para diferentes procesos dentro de una misma industria.

Teniendo en cuenta que la producción de agua en los pozos petroleros aumenta con el tiempo, es importante estudiar tecnologías como la electrocoagulación que brinden una alternativa en la remoción de petróleo de los fluidos de producción [2]. En Colombia existen grandes volúmenes de agua susceptibles a aplicar esta tecnología, ya que para el año 2019 la relación de barriles de agua por cada barril de petróleo producido fué de 13,08 [3].

Actualmente existen tecnologías convencionales para la eliminación de grasas y aceites, compuestos orgánicos disueltos. Sin embargo, existen otras tecnologías como la electrocoagulación para la remoción de contaminantes basada en el concepto electroquímico que ofrecen muchas aplicaciones y ventajas, que pueden integrarse fácilmente a las convencionales.[4]

El principio básico de la electrocoagulación se originó a partir de la “electrólisis” [2], ocurre cuando la corriente eléctrica directa pasa a través del electrolito, produciendo reacciones electroquímicas en las superficies de los electrodos y reacciones de hidrólisis posteriores. Básicamente, la tecnología de electrocoagulación consiste en un reactor, formado por una celda electrolítica que contiene unos ánodos y unos cátodos que se conectan a una fuente de alimentación externa de corriente eléctrica. Esta tecnología involucra una serie de etapas sucesivas tales como: la formación de coagulantes por disolución anódica, desestabilización de partículas contaminantes por hidrólisis de cationes de hierro, ruptura de emulsiones y agregación de las partículas para formar flóculos. Es relevante resaltar la formación de hidrógeno a partir de las reacciones de óxido- reducción (Redox) que ocurren dentro de la electrocoagulación, las cuales ayudan a remover las partículas contaminantes disueltas y suspendidas [5].

El propósito de este estudio fue establecer la capacidad de remoción del contenido de grasas y aceite, turbidez y color del agua producida en un pozo de petróleo pesado de un campo colombiano, utilizando electrodos de hierro como ánodo y cátodo aplicando técnicas electroquímicas.

Diagrama General

La electroquímica se considera una tecnología emergente que puede ser aplicada al tratamiento de aguas de producción en general y muy prometedora si la acoplamos a fuentes de energía renovables para reducir la producción de gases efecto invernadero y a su vez el impacto en la huella de carbono del proceso en forma integral como se visualiza en la **Figura 1**.

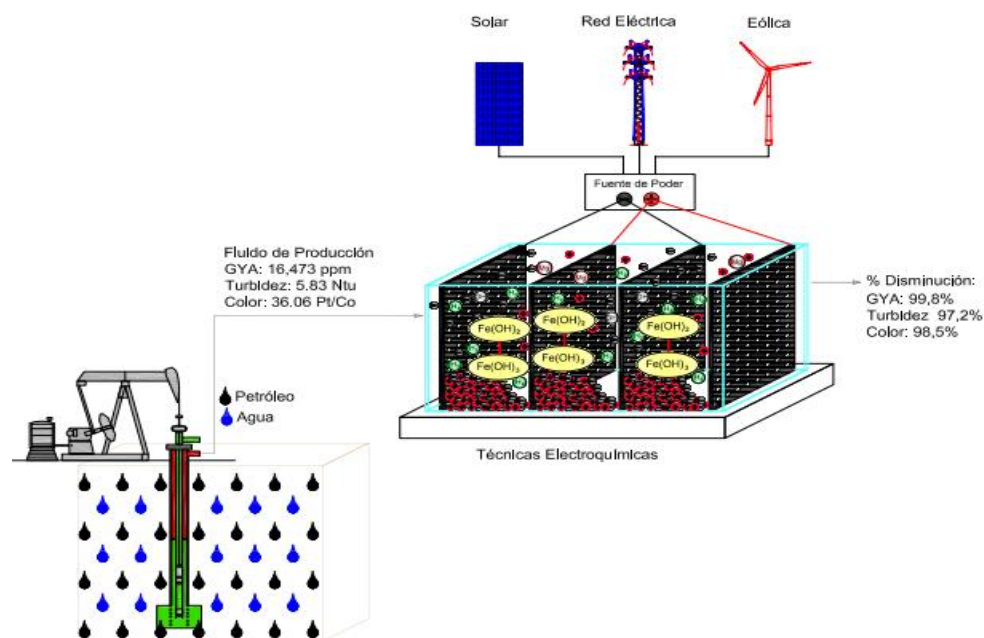


Figura 1. La electroquímica acoplada a energía Solar, Eólica ó red eléctrica.

Fuente: García Rodríguez, Luis E., 2022.

La técnica de electrocoagulación y electroflotación involucrada en la electroquímica ha sido aplicada con éxito en la industria del petróleo a nivel mundial como se visualiza en la revisión consignada en la **Tabla 2**, sin embargo, en Colombia son escasos los trabajos realizados.

Autor/ Lugar	Descripción	Logros
Kailas L. Wasewar, et al, 2007. India.	Electroflotación (EF) para la para el tratamiento de aguas residuales de petróleo (GYA 50 mg/l), usando electrodos perforados de Aluminio.	Disminución de GYA 94.4%.
Muftah H. El-Nass, et al., 2009. Emiratos Árabes.	Electrocoagulación (EC) para el tratamiento de aguas residuales en refinerías de petróleo pesado. Sulfatos Iniciales 887 mg/l y COD de 596 mg/l, usando electrodos de Aluminio, hierro y acero inoxidable.	Disminución de Sulfatos 93% y COD 63%.
Moussavi, et al., 2011. Irán.	EC, Electrocoagulación para el tratamiento de aguas contaminadas con petróleo. Hidrocarburos totales de petróleo (TPH) inicial 64 mg/l], usando electrodos de Aluminio, hierro y acero inoxidable.	Disminución de THP: 71.7 % y 95.1 %.
J. Younker, S.Y. Lee, G.A. Gagnon, and M.E. Walsh. 2011. Canadá. Offshore.	Agua residual sintética que contenía una emulsión de petróleo crudo en una solución de salmuera.	Disminución de DQO con EC (56%) bajo una dosis de 20.6 mg / L de hierro a pH 5 comparado con coagulación química (DQO) (62%) a pH 8 a una dosis de FeCl ₃ de 80 mg / L.
Garcia Rodriguez, Luis E, 2014. Colombia. Onshore.	Técnicas Electroquímicas aplicadas a la remoción de cloruros y sólidos disueltos de una muestra de agua de producción asociada a un campo campo de petróleo en Colombia. Alto contenido de cloruros.	% residual de cloruros del 77.6 y % residual de sólidos disueltos de 77.4.
Hanadi Ghanem, Stefan Rosiwal, and Maximilian Göltz, Douglas Espin. 2015.	Aplicación de la tecnología de tratamiento electroquímico del agua producida en un campo de petróleo pesado, a través del electrodo BDD de diamante dopado con Boro. GYA Inicial 5,909 mg/L, TSS 288 mg / l y TDS 225 mg / l, DQO 1145 mg de O ₂ / l.	Se logró una tasa de eliminación de DQO del 97% en 5 horas a 6,4 mA / cm ² en comparación con el 90% a 9 mA / cm ² hasta 6,75 h.

Tabla 1. Aplicaciones de Técnicas Electroquímicas en la Industria del Petróleo.

Fuente: García Rodríguez, Luis E., 2019, SPE Water Managment Seminar.

Descripción de la muestra de fluido. La muestra de fluido se tomó directamente de la cabeza de un pozo con alto corte de agua (**Figura 2**) ubicado en la cuenca del Valle del Magdalena Medio en Colombia. El fluido de producción corresponde a un yacimiento de crudo pesado, con una densidad de petróleo entre 8° API y 20° API [6]. La muestra fluida tiene grasas y aceite de 16.473 ppm con un pH aproximado de 7,3 con una turbidez de 5,83 NTU y color de 36,06 Pt-Co.



Figura 2. Muestra de fluido de producción tomada directamente del cabezal del pozo de petróleo.

Equipos e Insumos Químicos. Los equipos o insumos utilizados durante este trabajo se visualizan en la **Tabla 2**.

Equipo, insumo ó material	Marca
Turbidímetro, rango 0-4,000 NTU.	Hach.
Planchas de calentamiento.	Corning PC-420D.
Multiparámetro digital para medición de pH, conductividad y temperatura.	Eijkelkamp.
Una fuente de tensión CD Programable 200 Vatios (40voltios/5 Amperios).	Extech Instruments modelo 382280.
Equipo de filtración en polisulfona 47mmx30 ml.	Mfs.
Poliacrilamida aniónica, PAM - grado comercial. 0.1%.	Profloc 6040.
Placas de acero al carbono ASTM36.	-
Electrodo de pH con conector BNC.	Eijkelkamp
Hexano HPLC-Hidróxido de potasio (KOH)- Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) y/o HNO ₃ . Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) - Cal viva (CaO).	-
Tierra diatomácea 1 %.	Agenquimicos.
Equipo soxhlet completo (condensador bolas x 250mm, parte central x 250 ml, balón x 500ml).	Agenquimicos.

Espectrofotómetro visible Genesys 10 Vis	Thermo Scientific.
Magneto.	Maser.
Dedal de extracción Nro 84 celulosa 33*80 mm PK*25.	Mfs.
Espectrofotómetro, Spectroquant Pharo 300, 190-1100 nm.	Merck.

Tabla 2. Equipos, Materiales e Insumos.

Electrocoagulación. La electrocoagulación es una tecnología electroquímica formada por una celda electrolítica que contiene un ánodo y un cátodo que se conecta a una fuente de alimentación externa visualizada en la **Figura 3**. En este caso las placas de acero al carbono ASTM A36 presentadas en la **Figura 4** son los electrodos monopolares conectados en paralelo los cuales cumplen la función de ánodo y cátodo y una fuente externa de 200 Watts de voltaje CD Programable (40 volts / 5 Amps).



Figura 3. Celda electrolítica con ánodos y cátodos de Hierro.

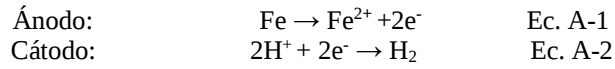


Figura 4. Placas de acero al carbono ASTM A36.

La densidad de corriente utilizada fué de 2 mA/cm^2 y 60 grados centígrados, con un área anódica promedio de 252 cm^2 en 2000 mililitros de muestra de fluido y mediante el uso de un inversor se alternó la polaridad con el fin de lograr la limpieza en línea de los electrodos (Eyvaz, et al., 2009). Las variables manipuladas de la carga específica por electrodisolución fueron 1000, 2000 y 3000 C/l.

Esta tecnología implica una serie de etapas sucesivas, tales como: la formación de coagulantes por electrodisolución, la desestabilización de contaminantes y la formación de hidrógeno. El Fe(OH)_n formado aparece después de la oxidación del producto de placas de acero al carbono [5].

Durante este proceso de electrodisolución, los cationes metálicos se generan in situ a través de la disolución de ánodos de hierro de sacrificio, manteniendo el pH ácido, no solo para mejorar la velocidad de disolución del metal, sino para evitar la pasivación de los electrodos (Mansouri, et al., 2011). Las reacciones presentes en la electrodisolución en el ánodo y el cátodo son:

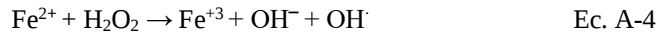


La cantidad de coagulante o materia disueltos durante la generación de electrodisolución de cationes de hierro se calculó teóricamente utilizando la ley de Faraday (Kim et al., 2002; Adhoum y Monser, 2004; Mollah et al., 2004).

$$m = \frac{I \times t \times M}{z \times F} \quad \text{Ec. A-3}$$

Donde m es la cantidad de material anódico disuelto (g), I la corriente (A), t el tiempo de electrólisis (s), M el peso molecular específico (g/mol), z el número de electrones involucrados en la reacción y F la constante de Faraday (96485.34As/mol). En este estudio los valores calculados estuvieron entre 670 mg y 2040 mg de coagulante total.

Se utilizó peróxido de hidrógeno para oxidar Fe^{2+} y obtener especies ferrosas Fe^{+3} (Neyens & Baeyens, 2003). Este agente oxidante es versátil y compatible con el medio ambiente.



El consumo específico de energía eléctrica E (kWh/m³) de las aguas residuales galvánicas se calculó mediante la siguiente ecuación (Ramesh et al., 2007).

$$E = \frac{U \times I \times t}{V \times 1000} \quad \text{Ec. A-6}$$

Donde U era el voltaje requerido (V), I la corriente aplicada (A), t el tiempo EC requerido (h) y V el volumen (m³). Para cargas específicas de 1.000 c/l, 2.000 c/l y 3.000 c/l, el consumo de energía kWh/m³ fue de 0,226; 0,292 y 0,598, respectivamente.

Resultados y Discusiones.

Espectrofotometría UV: Esta técnica se aplicó para determinar la concentración de un compuesto en solución, a mayor presencia de compuestos orgánicos (dobles y triples enlaces, grupos aromáticos, carbonilo, mayor absorbancia. Por lo tanto, se observó que la electrodisolución ofrece una disminución significativa del contenido de contaminantes en el agua de producción ó muestra de fluido (cruda 1). La búsqueda de respuestas en la aplicación de una carga específica de 1000 C/l, 2000 C/l y 3000 C/l se presenta en la **Figura 5**.

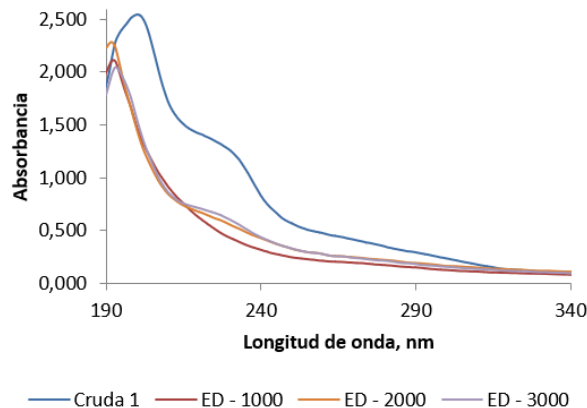


Figura 5. Placas de acero al carbono ASTM A36.

Se ejecutaron las corridas de electrodisolución aniónica como se presenta en la **Tabla 3**, posteriormente, se realizaron sus respectivos procesos de oxidación y floculación como se muestra en la tabla 4.

ITEM	Condiciones de Electrodisolución		
	1000 c/l	2000 c/l	3000 c/l
Volumen, l	2	2	2
Densidad de Corriente, mA / cm ²	2	2	2
Temperatura, °C	60	60	60
Carga, C/l	2000	4000	6000
Corriente, Amp	0.504	0.504	0.504
Tiempo, Min	66	132	198
Coagulante Insitu generado, gr	0.677	1.354	2.032
Consumo de energía, Kwh/m ³	0.226	0.292	0.598

Tabla 3. Condiciones de Electrodisolución.

Factor	Corridas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C/l	1000	1000	1000	2000	2000	2000	3000	3000	3000
pH, Unidad	9.5	10.5	11.5	9.5	10.5	11.5	9.5	10.5	11.5
Peróxido de Hidrógeno, ppm	100	200	300	200	300	100	300	100	200
Volumen, ml	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Cal Hidratada, ml	7.6	8.2	12	10.8	11.4	13.2	14.4	15	16.4
pH, Unidad	9.56	10.59	11.51	9.56	10.4	11.48	9.63	10.57	11.47
Ph ₀ , Unidad	8.09	9.65	11.18	6.56	8.22	11.15	6.87	9.74	10.92
pH ₁₅ , Unidad	8.36	9.96	11.23	8.42	8.45	11.32	7.75	10.29	10.94
pH ₃₀ , Unidad	8.4	9.99	11.34	8.65	8.53	11.37	8.4	10.37	10.95
Poliacrilamida, ml	1.5								
Agitación, rpm	100 to 700								

Tabla 4. Corridas en Laboratorio.

Se observaron diferentes colores del lodo precipitado debido a la oxidación de las especies ferrosas. El color del lodo en las floculaciones de 1000 C/l fue naranja, mientras que en la floculación de 3000 C/L fué de apariencia café verdoso como se muestra en la **Figura 6** [7].

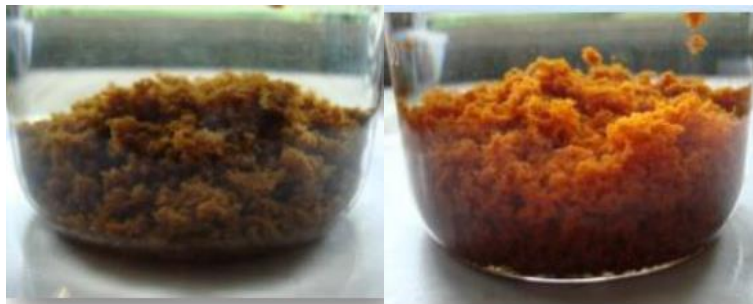


Figura 6. Muestras de Sobrenadantes.

Todas las muestras de sobrenadante, como se muestra en la **Figura 6**, se filtraron con un kit de polisulfona con papel de filtro Whatman de 1,5 micras que se presenta en la **Figura 7** [7].



Figura 7. Polisulfona.

Posteriormente, se obtienen las muestras de agua clarificada para cada una de las corridas presentadas en la Figura 8 [7].



Figura 8. Muestras de agua clarificada y/o filtradas.

Finalmente, los resultados obtenidos de las variables de respuesta se presentan en la **Tabla 5**.

Variables de Respuesta	Corridas								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Turbidez Inicial, Ntu	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84
Turbidez Final, Ntu	0.21	0.43	0.18	0.22	0.34	0.52	0.25	0.24	0.16
Remoción %	96.38	92.61	96.8	96.13	94.09	91.02	95.66	95.73	97.2
Color Inicial, pt-Co	36.06	36.06	36.06	36.06	36.06	36.06	36.06	36.06	36.06
Color Final, pt-Co	7.27	14.38	6.15	12.13	15.87	9.51	5.40	0.54	5.02
Remoción %	79.83	60.12	82.94	66.36	55.99	73.61	85.01	98.4	86.05

Tabla 5. Porcentajes de Remoción de Turbidez y Color.

Las grasas y aceites se determinaron con un equipo Soxhlet (**Figura 9**) y los resultados se observan en la **Tabla 6** [7].



Figura 9. Equipo Soxhlet.

ITEM	Muestra	1000 C/l	2000 C/l	3000 C/l
W ₁ , gr	165.2975	165.3029	165.4178	165.3692
W ₂ , gr	169.4159	165.3107	165.4305	165.3821
GYA, gr	4.1184	0.0078	0.0127	0.0129
Volumen, l	0.25	0.25	0.25	0.25
GYA, ppm	16,473.6	31.2	50.8	51.6
Diferencia		16,442.4	16,422.8	16,422
Remoción, %		99.81	99.69	99.68

Tabla 6. Porcentajes de remoción de grasas y aceites (GYA).

Conclusiones.

En este estudio se estableció la capacidad de remoción de la electrocoagulación utilizando electrodos de hierro para disminuir el contenido de grasas y aceites, turbidez y color del agua producida en un pozo de crudo pesado de un campo colombiano. La remoción de contaminantes en general alcanzaron porcentajes superiores al 90% en sus mejores resultados.

Se obtuvo una remoción de 99.81% en la variable de grasas y aceites, aplicando una carga eléctrica de 1,000 C/l, a su vez la remoción de grasas y aceites con las demás cargas eléctricas de 2,000 C/l y 3,000 C/l son muy similar al obtener 99.69 % y 99.68 %, respectivamente. Se obtuvo una remoción de 97,2 % en la turbidez y 98,4 % para el color, aplicando una carga eléctrica de 3.000 C/l, logrando así una calidad de agua con potencial de reutilización y/o recirculación en otras áreas de la industria del agua Petróleo y permitiendo por Turbidez cumplir la norma NACE TMO273-05.

Los consumos de energía para las cargas eléctricas de 1000 C/l, 2000 C/l y 3000 C/ fueron de 0,226 kWh/m³, 0,292 kWh/m³ y 0,598 kWh/m³, valores que para el caso de 1.000 C/l con los que Se considera interesante la mayor remoción de grasas y aceites que se obtuvo. La combinación de técnicas electroquímicas para el tratamiento del agua es una alternativa viable que además puede integrarse a fuentes de energía alternativas como la solar o la eólica, para su aplicabilidad en cualquier tipo de industria.

El dato obtenido de remoción de GYA del 99.8 % fue similar o mayor que algunos estudios similares ó reportados a nivel mundial en literatura por los autores Kailas L. Wasewar, et al, en el 2007 y en Irak por Thamer Mohammed- Esraa Abbas- Thabit Ahmed en el 2018.

La electrocoagulación se proyecta como una tecnología emergente aplicable al tratamiento de aguas residuales industriales y prometedora ambientalmente, debido a que se puede conectar a fuentes renovables como la eólica ó solar para obtener la energía que se necesita para producir el material disuelto como coagulante insitu.

Referencias

1. Hanadi Ghanem, Stefan Rosiwal, and Maximilian Göltz. "Application of Electrochemical Treatment Technology of Produced Water of a Heavy Oil Field, via Boron Doped Diamond BDD Electrode". Doi:10.2118/181178-MS. (2016)
2. Chunjiang An, Gordon Huang, Yao Yao, Shan Zhao. "Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review". Doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.062. (2016).
3. "Environmental performance report of the Colombian petroleum association.2016-2019". <https://acp.com.co/web2017/es/publicaciones-e-informes/informe-ambiental>.
4. Dina T. Moussa, Muftah. El-Naas, Mustafa Nasser and Mohammed J. Al-Marri. "A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*". "Sciencedirect". Doi: 10.1016/j.jenvman.2016.10.032.
5. M. Yousuf A. Mollah¹, Robert Schennach, Jose R. Parga, David L. Cocke. "Electrocoagulation (EC) science and applications. *Journal of Hazardous Materials*" **V84-2001-29-41**. Doi:10.1016/S0304-3894(01)00176-5. (2001).
6. Farouq Ali. "Practical Heavy oil Recovery" Petrogroup. Bogotá. Colombia. (2014).
7. Luis Eduardo Garcia Rodriguez. "Aplicación de un proceso electroquímico para el tratamiento de aguas residuales de producción asociadas a yacimientos de petróleo liviano y pesado" Tesis Univalle. 2014.
8. I. Heidmann, W. Calmano, "Removal of Ni, Cu and Cr from a galvanic wastewater in an electrocoagulation system with Fe-and Al-electrodes". "Separation and Purification Technology" **V71 -2010- 308-314**.
9. Holt, L. Wei, S. Guo, G. Yan, C. Chen, and X. Jiang, "Electrochemical pretreatment of heavy oil refinery wastewater using a three-dimensional electrode reactor, *Electrochim Acta*, vol. 55, no. 28, pp. 8615- 8620.
10. Bharath M*, Krishna B M and Manoj Kumar B. "A Review of Electrocoagulation Process for Wastewater Treatment. *International Journal of ChemTech Research*" Doi: 10.20902/IJCTR.2018.110333.
11. Rosie Jotin, Shaharin Ibrahim, Normala Halimoon. "Electrocoagulation for removal of chemical oxygen demand in sanitary landfill leachate" Doi: 10.6088/ijes.2012030132020.
12. Morales, M., Revelo, A., "Technical and environmental performance of conventional and modern technologies of water treatment produced. Undergraduate thesis. *Petroleum Engineering School*", "Industrial University of Santander", Bucaramanga, Colombia. (2016).
13. Orathai Chavalparit¹, Maneerat Ongwandee. "Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology". "J. Environ". Doi: 10.1016/S1001-0742(08)62445-6.
14. Hassan, I., Nirdosh, I., Sedahmed, G.H. "Separation of oil from oil-water emulsions by electrocoagulation in an electrochemical reactor with a fixed-bed anode". "Water Air Soil Pollut". Doi: 1-12. 10.1007/s11270-015-2521-4.
15. Kongjao, S., Damronglerd, S., Hunsom, M. "Simultaneous removal of organic and in-organic pollutants in tannery wastewater using electrocoagulation techniques". "Korean J. Chem. Eng". **V25, 703-709**. Doi:10.1007/s11814-008-0115-1.(2008).
16. Tir, M., Moulai-Mostefa, N. "Electrochemical treatment of metal working emulsions using Box-Behnken design. *Desalin. Water Treat*". **V7, 214-219**. Doi: 10.5004/dwt.2009.730.
17. Thyara Campos Martins Nonato et al." Combination of electroflotation process and down-flow granular filtration to treat wastewater contaminated with oil". DOI: 10.1080/09593330.2017.1310306.
18. K. Hmidi, I. Ksentini, and L. B. Mansour.2017. "Treatment of OlivePomace Oil Refinery Wastewater Using Combined coagulationElectroflotation Process". Doi: 10.3103/S1063455X17050046.
19. Carmem L.P.S. Zanta et al. "The application of electrochemical technology to the remediation of oily wastewater". Doi: 10.1016/j.chemosphere.2005.12.036.
20. Muftah H. El-Naas et al. 2009. "Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater" doi:10.1016/j.jenvman.2009.08.003.
21. Edris Bazrafshan, Kamal Aldin Ownagh, & Amir Hossein Mahv. "Application of Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminum Electrodes for Fluoride Removal from Aqueous Environment". "E-Journal of Chemistry". Doi: 10.1155/2012/102629.