

Remoción de lubricantes industriales en aguas residuales por electrocoagulación

A. Soto Vázquez¹, P. Sánchez Galindo¹, J. A. Barraza Madrigal^{1*}, J. I. Guzmán Castañeda¹, Y. V. Sánchez Sánchez¹, X. Juárez Ángeles¹

¹Academia de Física, Instituto Politécnico Nacional, ESIQIE-IPN, Ciudad de México, México
Teléfono (55) 5729-6000 Ext. 54220 E-mail: jabarraza@ipn.mx

Resumen —En la presente investigación, son definidas las condiciones de operación óptimas para el tratamiento por electrocoagulación de un análogo de agua residual contaminado con aproximadamente 1 ml de residuos de lubricantes industriales quemados. Para definir las condiciones de operación óptimas, se realizaron pruebas de caracterización en un reactor tipo batch de geometría rectangular fabricado en vidrio donde se instalaron dos pares de electrodos de aluminio 6061 conectados en un arreglo en paralelo. Las pruebas se llevaron a cabo a una densidad de corriente de 40 A/m² variando el tiempo de operación (10-50 minutos) y el uso de un electrolito soporte (100 ml de solución de NaCl a 2g/L). A los 30 minutos de operación se obtuvo el mayor porcentaje de la masa inicial recuperada (91%) utilizando NaCl como aditivo y con un requerimiento energético de 8.7 V. A partir de este resultado se deduce que la electrocoagulación es un tratamiento efectivo para la remoción de lubricantes industriales presentes en aguas residuales, no solo por su eficiencia, sino por sus condiciones de operación, la accesibilidad de sus aditivos y por ser un proceso sustentable debido a sus bajos requerimientos energéticos.

Palabras Clave – agua residual, electrocoagulación, lubricante industrial, remoción

Abstract —Through this article, the optimum operation conditions were defined for the electrocoagulation treatment of a wastewater analogue polluted with approximately 1 ml of lubricant oils waste. The treatment tests were carried out in a batch reactor made up of glass with rectangular geometry using two pairs of aluminum 6061 electrodes connected in a parallel arrangement. Also, a current density of 40 A/m² was applied to the electrodes varying the operation time (10-50 minutes) and the use of an electrolyte additive (100 ml of a NaCl at 2 g/L) between each test. The highest recovery percentage of the initial lubricant oil (91%) was accomplished by using the electrolytic solution and applying 8.7 V to the electrocoagulation system for 30 minutes keeping the same current density. According to this result, the electrocoagulation is an effective removal treatment for wastewater polluted with lubricant oils waste, not only for its efficacy but also thanks to its operation conditions, its affordable additives and for being a sustainable process because of its low energetic requirements.

Keywords — electrocoagulation, industrial oils, removal, wastewater

I. INTRODUCCIÓN

A nivel industrial se ha incrementado el uso de diversos aceites lubricantes para eliminar la fricción y el desgaste entre

las partes metálicas de las máquinas y los motores [1]. El mantenimiento de estos equipos implica el reemplazo de lubricantes industriales usados, que se convierten en residuos industriales. Su disposición debe realizarse de conformidad con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos [2]. Sin embargo, cuando la disposición de residuos peligrosos no se realiza correctamente, los residuos de lubricantes industriales llegan a ser descargados directamente en los sistemas de drenaje.

La presencia de lubricantes industriales en las aguas residuales se ha vuelto un serio problema debido a que es un vector de contaminación que, por su toxicidad e inflamabilidad, amenaza la vida de los organismos acuáticos, seres humanos y el medio ambiente. Los lubricantes industriales son uno de los contaminantes más comunes a nivel global, de allí la necesidad de desarrollar de técnicas para el tratamiento de aguas aceitosas que resulten efectivas, accesibles y con bajo impacto ambiental.

En las últimas décadas se ha desarrollado una amplia gama de técnicas de remoción de aceites presentes en aguas residuales. Dentro de estas alternativas, se encuentran la flotación, el uso de mallas y membranas y la floculación-coagulación. A pesar de que estos tratamientos presentan resultados significativos de remoción, tienen algunas limitantes, tales como el uso de aditivos de difícil separación, condiciones de operación que requieren alta presión o períodos prolongados de tiempo, las cuales impiden su uso a gran escala [3] [4].

Las limitantes que presentan las técnicas anteriormente mencionadas han motivado a los investigadores a buscar métodos de remoción alternativos, cuyas condiciones de operación sean más accesibles y que los aditivos utilizados sean de fácil separación o que su presencia en el agua tratada no afecte su calidad. Como resultado de esta búsqueda, recientemente se ha reportado en la literatura que los tratamientos de remoción a través de métodos electroquímicos, como la electrocoagulación, han mostrado resultados efectivos para la eliminación de grasas, aceites, biodiesel y microplásticos en aguas residuales provenientes de diferentes industrias [5]. Estos resultados representan un área de oportunidad para la aplicación de la electrocoagulación como tratamiento de remoción. Por ello, la presente investigación experimental estará orientada a la definición de las condiciones de operación óptimas de la técnica de electrocoagulación para eliminar una cantidad

significativa de aceites lubricantes industriales presentes en aguas residuales.

II. METODOLOGÍA

Con el objetivo de definir las condiciones de operación óptimas bajo las que un sistema de electrocoagulación es capaz de remover la mayor cantidad de aceite lubricante industrial de una matriz de agua contaminada, se llevaron a cabo diez pruebas de caracterización del sistema operando con diferentes condiciones de pH, conductividad y tiempo de operación (Ver Tabla I y Tabla II). Al final de cada prueba se cuantificó la cantidad de aceite removido de la matriz de agua contaminada, y se identificaron las condiciones de operación óptimas para el sistema propuesto.

A. Descripción del equipo utilizado.

El equipo empleado (Ver Figura 1) consistió en una pecera rectangular fabricada en vidrio por la facilidad que ofrece este material para la observación tanto del fenómeno de la electrocoagulación, como de los cambios que presentó el agua durante el tratamiento. La pecera era de geometría rectangular con 23 cm de largo, 15 cm de alto y 12 cm de fondo y con una capacidad de 4L, la cual funcionó como reactor tipo batch. Adicionalmente, se utilizaron cuatro electrodos rectangulares de aluminio 6061 de 3/8" de espesor, 3" de largo y 2" de ancho a fin de incrementar el área de contacto entre el medio conductivo y el electrodo, permitiendo una mayor formación de burbujas. Es importante destacar que la geometría y el material de fabricación del reactor se eligió según lo reportado en [6], mientras que las dimensiones y material de los electrodos se basaron en [7].

Además, se utilizaron accesorios para realizar las conexiones necesarias para la operación y control de las variables de experimentación. Estos accesorios incluyen cuatro pares de cables tipo caimán-caimán de color rojo y negro empleados para interconectar los electrodos, dos pares de cables banana-caimán de color rojo y negro, un par de cables banana-banana de color negro utilizados para conectar la fuente de energía con el arreglo de electrodos, un soporte de madera con tres tornillos para ajuste especialmente diseñado para el reactor, una plancha de calentamiento con agitación magnética con un rango de agitación desde 100 hasta 1500 rpm y con un rango de temperatura de calefacción de 50 a 500°C, dos agitadores magnéticos, un conductímetro, un amperímetro, una fuente de alimentación de corriente directa con una capacidad de 32V y 5A, una mufla de 1500W de potencia, una bomba de vacío de 0.5 HP de potencia, un matraz Kitasato, un embudo Büchner y un equipo de extracción por recirculación de solvente.



Fig. 1 Equipo utilizado.

En lo que respecta a la conexión de los electrodos, estos se conectaron en un arreglo en paralelo monopolar (Ver Fig. 2) con una separación de 3.5 cm entre ellos. Este arreglo se caracteriza por conectar a los electrodos de manera intercalada donde solamente uno de ellos está recibe directamente el voltaje suministrado por la fuente de alimentación de corriente directa. Asimismo, permite que el voltaje sea el mismo en todos los electrodos y evita la disminución de la eficiencia de remoción ocasionada por la formación de óxidos en los electrodos.



Fig. 2 Arreglo de electrodos y proceso de electrocoagulación.

Es importante mencionar que el tratamiento se llevó a cabo con agitación continua a una velocidad moderada de 260 rpm con ayuda de dos agitadores magnéticos que formaron una hélice para abarcar una mayor área de remoción y un mezclado más homogéneo que permitiera una mejor distribución de los compuestos hidroximetálicos formados durante el proceso.

B. Limpieza de electrodos

La eliminación de impurezas en los electrodos resulta imprescindible para evitar contaminación acumulada sobre su superficie y evitar la alteración de los resultados experimentales. Por ello, los electrodos se sometieron a una limpieza mecánica y, posteriormente, a una limpieza química previo a introducirlos al reactor de electrocoagulación y posterior a su uso.

La limpieza mecánica consistió en un lavado de los electrodos con agua jabonosa empleando una fibra sintética. Posteriormente, se pulieron los electrodos con papel de lija de agua grado 120 para metales hasta obtener un acabado libre de residuos, defectos y óxidos. De esta manera se eliminó la mayor cantidad alteraciones

formadas durante el tratamiento ejecutado en pruebas anteriores.

La limpieza química se efectuó mediante el uso de diluyente, también conocido como alcohol etílico, con la finalidad de eliminar los residuos remanentes de aceites, grasas y limadura metálica.

C. Variables de operación

Las variables que fueron manipuladas durante el proceso de electrocoagulación se basan en los parámetros principales que controlan este fenómeno electroquímico tales como la densidad de corriente, la conductividad del medio y el tiempo de operación.

La densidad de corriente determina la velocidad con la que se liberan los electrones durante la reacción electroquímica. En consecuencia, dicho parámetro, se mantuvo a 40 A/m^2 con el objetivo de asegurar la suficiente producción de compuestos hidroximetálicos que coagulan las partículas de lubricante industrial y, a su vez, evitar una excesiva turbiedad en el agua tratada.

La conductividad del medio está directamente relacionada con el suministro energético ya que de ella dependerá la magnitud de voltaje requerido para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación. Con respecto a ello, se espera que el voltaje disminuya a medida que aumenta la conductividad del agua análoga debido a que es inversamente proporcional a la resistencia. El valor de la conductividad se controló mediante la adición de un electrolito soporte. En este caso, se eligió una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 2 g/L tanto por su accesibilidad económica como su efectividad. El electrolito soporte se añadió en un volumen constante de 100 ml a cinco de las diez pruebas de caracterización que mantenían las mismas condiciones de operación, a fin de dar visibilidad al efecto que esta tiene en la eficiencia del proceso de electrocoagulación y obtener una mayor eficiencia de remoción debido a la transferencia de electrones.

En lo que respecta al tiempo de operación, se consideró un intervalo de 10 a 50 minutos, es decir, se realizaron pruebas con variaciones de 10 minutos entre cada una. Esto debido a que, si el tiempo de operación es menor, la cantidad compuestos hidroximetálicos formados podría no ser suficiente para alcanzar una remoción considerable. Mientras que, si es un tiempo de operación mayor, la reacción electroquímica podría alcanzar su máximo grado de formación de compuestos y detener la coagulación de partículas de residuos de aceite lubricante por encontrarse en exceso.

D. Análogo de agua residual

Tomando como referencia la información expuesta en [6] y con el objetivo de estandarizar las condiciones iniciales de la matriz de agua contaminada para la totalidad de las pruebas experimentales, se generó un análogo de agua residual contaminada con residuos de lubricantes industriales. La elaboración de un agua

residual análoga permite cuantificar los cambios ocurridos después de la aplicación de la electrocoagulación debido a que se controla la cantidad de aceite lubricante industrial añadida inicialmente, la cual sirve como una medida de referencia para conocer, mediante un análisis gravimétrico, la cantidad de aceite recuperada al finalizar el tratamiento.

El agua análoga se preparó directamente en el reactor de electrocoagulación para evitar pérdidas durante el vaciado. Esta preparación se realizó añadiendo aproximadamente 1 ml de aceite por cada litro de agua potable con el objetivo de asegurar un medio acuoso conductivo. Una vez añadida la cantidad de aceite, se mantuvo en agitación constante a 260 revoluciones por minuto hasta la finalización del tratamiento.

El aceite empleado para la preparación del agua análoga se obtuvo a través de una donación de un taller mecánico donde los residuos de aceites lubricantes industriales de características similares se mezclaron en un único contenedor que al agregarlos al agua análoga le confirieron un color amarillento (Ver Figura 3).



Fig. 3 Agua análoga sin tratamiento con electrodos sumergidos en el reactor.

El agua análoga contiene una concentración superior al límite máximo permitido por la normatividad vigente, se espera que con el tratamiento de electrocoagulación propuesto, esta concentración disminuya lo suficiente para ser descargada en alcantarillados municipales o urbanos de conformidad con la norma NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece un límite máximo permisible de 100 mg/L instantáneo [8].

E. Determinación de la concentración de grasas y aceites

Para las pruebas de caracterización de las condiciones de operación óptimas del proceso de electrocoagulación, se empleó un método gravimétrico fundamentado en la extracción de grasas utilizando hexano como disolvente, de conformidad con la norma NMX-AA-005-SCFI-2013, que establece el procedimiento para determinar la concentración de grasas y aceites en aguas residuales regulado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [9].

El procedimiento para determinar la concentración de aceite lubricante industrial removido durante estas pruebas no caracteriza los aceites, sino mide un grupo de

sustancias con las mismas características fisicoquímicas de solubilidad. Ergo, la medición comprende cualquier sustancia susceptible de ser extraída con hexano.

La extracción de grasas se realizó una vez finalizado el tratamiento del agua análoga por electrocoagulación. El proceso consistió en vaciar el contenido del reactor en tres vasos de precipitados de 500 ml, el volumen total de agua tratada se filtró empleando un matraz Kitasato y un embudo Buchner.

Posterior a la filtración, con ayuda de unas pinzas, se introdujo el filtro que contenía los flóculos de grasa en un cartucho fabricado en papel filtro. El proceso de preparación consistió en tapar el cartucho con fragmentos de algodón impregnados con hexano y trazas de aceite recuperado por la limpieza de: las paredes del reactor, los electrodos y los vasos de precipitados que estuvieron en contacto con el agua análoga.

El cartucho, que contenía el papel filtro y los fragmentos de papel algodón, fueron introducidos en una mufla a una temperatura de 103°C durante un periodo de 30 minutos a fin de eliminar las trazas de humedad que este pudiera contener. Transcurrido el tiempo de secado, el cartucho fue introducido en la cámara de extracción del extractor Soxhlet.

En seguida, se añadieron 40 ml de hexano en el matraz balón y 40 ml en la cámara de extracción. Luego de la adición se montó el equipo de extracción Soxhlet sobre una plancha de calentamiento y se ajustó la temperatura a 155°C con el objeto de promover una ebullición del hexano constante (Ver Figura 4).



Fig.4 Equipo de extracción Soxhlet

Se consideró un tiempo de operación de 4 horas a una velocidad de 2 ciclos por hora a fin de evitar la descomposición de los residuos de aceite y asegurar la extracción de la mayor cantidad de aceite removido. Esto puede ser observado al remover el cartucho de la cámara de extracción, una vez finalizada la operación, el cual al desdoblarlo presentaba una coloración más clara en comparación con el color amarillento inicial.

Al finalizar el proceso de extracción, el aceite extraído que se encontraba mezclado con el hexano es

trasvasado a un matraz tipo balón, con una capacidad de 30 ml, con el objeto de efectuar la recuperación de hexano y cuantificar gravimétricamente el aceite recuperado.

Cabe destacar que la recuperación del hexano fue realizada en un equipo de destilación a microescala debido a que la cantidad de aceite que se esperaba recuperar era menor a un gramo. El equipo de destilación microescala estaba compuesto principalmente por un matraz de bola de fondo plano, un conector de tres vías y un tubo refrigerante.

Adicionalmente, se empleó un vaso de precipitados para la recolección del hexano y un termómetro para el monitoreo de temperatura. La temperatura no debía superar los 55±2°C para evitar una ebullición violenta, en consecuencia, la temperatura fue controlada con la ayuda de una plancha de calentamiento (Ver Figura 5).



Fig.5 Equipo de destilación microescala para la recuperación de hexano

Resulta fundamental considerar que el procedimiento descrito en la NMX-AA-005-2013 requiere que el matraz balón de fondo plano donde se lleve a cabo la recuperación del hexano se encuentre en masa constante [8]. Con el objetivo de asegurar esto, de manera paralela al tratamiento por electrocoagulación, se introdujo el matraz previamente limpio a un horno a una temperatura de 103°C, se enfrió en el desecador y se pesó. Este ciclo se repitió hasta obtener una diferencia menor o igual a 0.0005g en dos pesadas consecutivas.

Por último, se pesó el matraz balón con el aceite recuperado libre de hexano en una balanza analítica (Ver Figura 6), y se determinó la cantidad de aceite recuperado respecto a lo añadido inicialmente en términos de porcentaje Ec. (1):

$$\% \text{ recuperado} = (m_{\text{recuperada}}/m_{\text{inicial}}) * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

$\% \text{ recuperado}$: porcentaje de aceite recuperado (%)

$m_{\text{recuperada}}$: masa de aceite recuperada (g)

m_{inicial} : masa de aceite añadida inicialmente (g)



Fig.6 Determinación de la masa de aceite recuperada

III. RESULTADOS

A. Pruebas de caracterización

A fin de definir el valor óptimo de las condiciones de operación, fueron realizadas pruebas de caracterización. El objetivo principal fue obtener la mayor cantidad de aceite recuperado después de someter el agua análoga al proceso de electrocoagulación.

Se realizaron en total diez pruebas en un intervalo de tiempo de 10 a 50 minutos conservando una densidad de corriente de 40 A/m^2 y variando el uso de un electrolito soporte, es decir, solamente a cinco de las pruebas se les añadieron 100 ml de solución de NaCl con una concentración de 2 g/L .

El pH del agua para tratamiento fue registrado con el objetivo de contar con esta información como parámetro de trabajo. Esto debido a que, de acuerdo con la información expuesta [5], presenta una variabilidad considerable durante el proceso de electrocoagulación que compromete el control de los parámetros (Ver Tablas I y II).

En consecuencia, no se modificó el valor del pH del agua análoga para evitar la adición de sustancias corrosivas de difícil separación que pudieran resultar nocivas para el medio ambiente y, de esta manera, preservar la sustentabilidad del tratamiento.

TABLA I.
CONDICIONES DE OPERACIÓN SIN ELECTROLITO SOPORTE

Prueba (No.)	Condiciones de operación sin electrolito soporte				
	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Voltaje (V)	Intensidad de corriente (A)	Tiempo de operación (min)
1	6.97	2566	9.55	240	10
2	8.1	2180	11.86	240	20
3	8.18	2182	11.86	240	30
4	6.96	2182	11.86	240	40
5	8.15	2328	11.57	240	50

TABLA II.
CONDICIONES DE OPERACIÓN CON ELECTROLITO SOPORTE

Prueba (No.)	Condiciones de operación sin electrolito soporte				
	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Voltaje (V)	Intensidad de corriente (A)	Tiempo de operación (min)
1	7.7	3048	8.3	240	10
2	7.7	3056	8.4	240	20
3	8.1	2920	8.7	240	30
4	8.1	2896	8.7	240	40
5	7.7	3142	8.2	240	50

El valor del pH se mantuvo en un rango de 6.9 a 8.2 (Ver Tablas I y II), el cual se encuentra dentro del intervalo permisible estipulado en la normatividad vigente que va de 5 a 10 unidades [8]. Por ende, el agua tratada sería potencialmente viable para descargarse al alcantarillado urbano.

B. Condiciones de operación óptimas

La medición gravimétrica del contenido de residuos de aceites lubricantes antes y después de la aplicación de un tratamiento de remoción permitió establecer una comparación entre ambos valores y servir como punto de partida para verificar la efectividad de eliminación del método.

El mayor porcentaje de aceite recuperado utilizando un electrolito soporte corresponde al 91% (Ver Tabla IV) el cual se obtuvo al tratar el agua residual análoga durante 30 minutos bajo una densidad de corriente de 40 A/m^2 (Ver Tabla II).

Por otra parte, se logra remover el 86% de aceite añadido cuando se omite el uso de electrolito soporte (Ver Tabla III) y sometiendo el agua análoga al tratamiento electroquímico durante 20 minutos a 40 A/m^2 (Ver Tabla I).

TABLA III.
RECUPERACIÓN DE ACEITE SIN ELECTROLITO SOPORTE

Prueba (No.)	Recuperación de aceite sin electrolito soporte		
	m_{inicial}	$m_{\text{recuperada}}$	% Recuperado
1	0.8225	0.3515	43%
2	0.6867	0.593	86%
3	0.6867	0.5472	80%
4	0.8225	0.5452	66%
5	0.8754	0.387	44%

TABLA IV.
RECUPERACIÓN DE ACEITE CON ELECTROLITO
SOPORTE

Prueba (No.)	Recuperación de aceite con electrolito soporte		
	m _{inicial}	m _{recuperada}	% Recuperado
1	0.6867	0.5583	81%
2	0.6867	0.5847	85%
3	0.6867	0.6225	91%
4	0.6867	0.5748	84%
5	0.6867	0.5668	83%

C. Comportamiento del voltaje e intensidad de corriente

A lo largo del tratamiento por electrocoagulación, la intensidad de corriente se mantuvo constante, considerando una variación máxima de $\pm 2\text{mA}$.

En lo que respecta al voltaje, presentó una tendencia a disminuir a medida que aumentaba la conductividad del medio (Ver Figura 7). Esto debido a que, al existir mayor concentración de iones en el sistema, disminuye la resistencia que ofrece el medio.

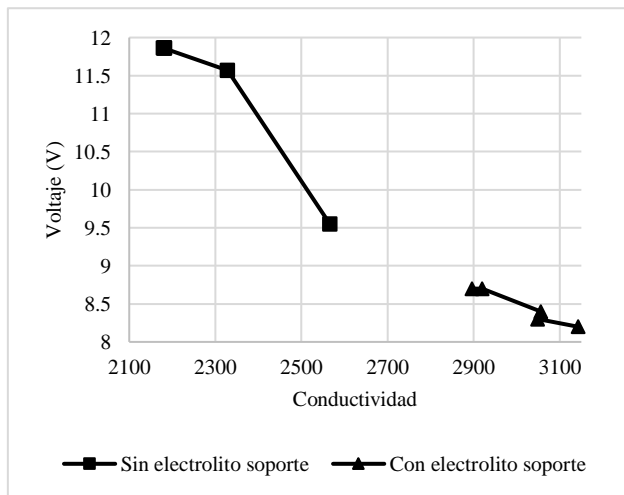


Fig. 7 Comportamiento del voltaje respecto al aumento de conductividad del medio

La mayor conductividad alcanzada fue de 3142 $\mu\text{S/cm}$ después de añadir 100 ml de solución de NaCl con una concentración de 2 g/L. El sistema con este valor de conductividad presentó la menor resistencia al paso de corriente. Por ello, requirió del menor suministro energético (8.2 V) para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación.

Finalmente, el agua análoga tratada cambió su coloración inicial de amarillo a incoloro y con sólidos sedimentables correspondientes a los compuestos hidroximetálicos producidos durante la reacción de electrocoagulación (Ver Figura 8).



Fig. 8 Agua análoga tratada posterior al filtrado (izquierda) y agua análoga tratada sin filtrado (derecha)

IV. DISCUSIÓN

Las pruebas de caracterización realizadas con la ayuda de un electrolito soporte presentaron resultados más favorables que las que no lo utilizaron, como se reporta en las Tablas III y IV.

Los requerimientos energéticos del tratamiento por electrocoagulación fueron considerablemente reducidos gracias al aumento de la conductividad derivado de la adición de una solución de cloruro de sodio (NaCl) como electrolito soporte. Este fenómeno ocurre por dos razones principales. En primer lugar, porque la conductividad es inversamente proporcional a la resistencia, por lo que se requiere un menor voltaje para llevar a cabo el proceso [10]. En segunda instancia, los iones de cloro (Cl^-) reducen significativamente los efectos adversos provocados por la precipitación del carbonato de calcio presente en el agua que forma capas alrededor de los electrodos provocando una disminución de la eficiencia energética y, por ende, una reducción en la capacidad de remoción [11].

En lo que respecta a los mayores porcentajes de remoción, estos ocurren a los 20 y 30 minutos sin electrolito soporte y con electrolito soporte, respectivamente. Este intervalo de tiempo de operación podría considerarse como el valor óptimo ya que se observa que más allá de ese tiempo, el fenómeno de floculación llega a su límite dejando de aglutinar las partículas de aceite. Por otra parte, un tiempo de operación menor a los 20 minutos resulta insuficiente para lograr una formación significativa de flóculos.

V. CONCLUSIONES

Las condiciones de operación óptimas para lograr la mayor remoción de aceite lubricante industrial presente en un agua análoga preparada corresponden a un pH de 8.1 unidades, conductividad de 2920 $\mu\text{S/cm}$, consumo energético de 8.7 V, intensidad de corriente de 240 A, tiempo de operación de 30 minutos y adición de 100 ml de solución de NaCl con 2 g/L de concentración. Bajo estas condiciones, el

sistema de electrocoagulación logró eficiencias de remoción de aceite de hasta un 91% de la cantidad inicial presente en la matriz de agua, con tiempos de operación de 20 a 30 minutos y un menor requerimiento energético al aumentar la conductividad del medio mediante una solución salina.

De conformidad con los resultados obtenidos, se concluye que el tratamiento de aguas contaminadas con residuos de aceites lubricantes industriales mediante electrocoagulación, bajo las condiciones adecuadas de operación, resulta ser un método eficiente y funcional, pudiendo implementarse en alguna de las etapas que conforman el tratamiento de aguas residuales como son el pre-tratamiento, la etapa primaria, la etapa secundaria y la etapa terciaria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y a la Academia de Análisis Instrumental de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE-IPN) por su valioso e invaluable apoyo en la Investigación, y por facilitar los equipos e instrumentos necesarios para realizar la experimentación, Así mismo, los autores agradecen a la Sección de Posgrado e Investigación (SIP) por el apoyo y soporte para la realización del presente proyecto de investigación SIP20220391.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Nacional de Ingeniería Química, «Anuario Estadístico de la Industria Química,» 2019. [En línea]. Available: <https://aniq.org.mx/anuario/2019/Capitulo16/aceites-industrial-lubricantes.html>. [Último acceso: 23 Septiembre 2021].
- [2] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, «Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos,» 8 Octubre 2003. [En línea]. Available: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpgir/LGPGIR_orig_08oct03.pdf. [Último acceso: 20 Septiembre 2021].
- [3] R. K. Gupta, G. J. Dunderdale, M. W. England y A. Hozumi, «Oil/Water Separation Techniques: A review of recent progresses and future directions,» *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 5, n° 31, pp. 16025-16058, 5 Mayo 2017.
- [4] Condorchem Envitech, «Tratamiento de emulsiones (Aguas Residuales Aceitosas),» [En línea]. Available: <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-emulsiones/>. [Último acceso: 10 Septiembre 2021].
- [5] M. Shen, B. Song, Y. Zhu, G. Zeng, Y. Zhang, Y. Yang, X. Wen, M. Chen y H. Yi, «Removal of microplastics via drinking water treatment: Current knowledge and future directions,» *Chemosphere*, vol. 251, n° 126612, pp. 1-13, 30 Marzo 2020.
- [6] W. Perren, A. Wojtasik y Q. Cai, «Removal of Microbeads form Wastewater Using Electrocoagulation,» *ACS Omega*, vol. 3, pp. 3357-3364, 2018.
- [7] R. K. Gupta, G. J. Dunderdale, M. W. England y A. Hozumi, «Oil/Water Separation Techniques: A review of recent progresses and future directions,» *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 5, n° 31, pp. 16025-16058, 5 Mayo 2017.
- [8] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, «Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal,» 3 Junio 1998. [En línea]. Available:

- <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>. [Último acceso: 20 Septiembre 2021].
- [9] Secretaría de Economía, «NMX-AA-005-SCFI-2013 Análisis de agua - Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba,» 11 Abril 2014. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166764/nmx-aa-005-scfi-2013.pdf>. [Último acceso: 11 Octubre 2021].
- [10] D. T. Moussa, M. H. El-Naas, M. Nasser y M. J. Al-Marri, «A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges,» *Journal of Environmental Management*, vol. XXX, n° 186, pp. 1-18, 15 Octubre 2016.
- [11] J. Nepo Hakizama, B. Gourich, M. Chafí, Y. Striba, C. Vial, P. Drogui y J. Naja, «Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches» 2017. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>. [Último acceso: 25 Octubre 2021].