

Artículo Original

Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación

Álvaro Arango-Ruiz¹

Artículo recibido: 30 de Enero de 2014 / Artículo aceptado: 30 de Mayo de 2014

■ RESUMEN

En este artículo se hace una revisión de la electrocoagulación, presentando su evolución histórica, su potencial de aplicación en el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales, sus ventajas y desventajas. Realiza una discusión de los retos y oportunidades de esta tecnología. Finalmente, se plantean los mecanismos de reacción, el diseño y operación de los reactores.

Desde esta perspectiva, la electrocoagulación se vislumbra como un proceso electroquímico que puede tener resultados exitosos en su aplicación optimizando los factores que lo conforman, alcanzando el reto de proteger, conservar y recuperar el recurso hídrico.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, electrocoagulación, electrólisis, electrodos, coagulación, electroflotación.

¹ Ingeniero Químico, PhD en Ingeniería. Profesor Facultad de Ingenierías, Programa Ingeniería Ambiental, Corporación Universitaria Lasallista. E-mail: alarango@lasallista.edu.co

■ INTRODUCCIÓN

Hoy en día la humanidad enfrenta, la que quizás sea una de las mayores problemáticas del siglo XXI y es la necesidad de proveer agua para una creciente población mundial, que satisfaga las demandas de agua potable, de aguas de riego y de agua para la industria. El panorama es tal que se estima que 1.1 billones de personas, el equivalente a una sexta parte de la población mundial no tienen garantizado el acceso al agua potable (Holt, Peter K., Barton, Geoffrey W. and Mitchell, Cynthia A., 2005) y 2.2 billones no cuentan con servicios básicos de saneamiento (Oei, 2006) Entre tanto, la demanda de agua va en aumento en relación con el agua disponible y existe una sobreexplotación de las fuentes, además de contaminación, mal uso y desperdicio por la utilización de sistemas de distribución inadecuados e ineficientes.

Alrededor del mundo los lagos, ríos, canales y otros cuerpos de agua son contaminados por descargas industriales, por la actividad antropogénica o por procesos naturales. En los países en desarrollo, un 70% de los desechos industriales se vierten al agua sin tratamiento alguno, contaminando así el agua disponible y más del 80% de los desechos peligrosos del mundo son producidos en los Estados Unidos y en otros países industrializados (WWAP, 2016).

Muchas regiones del planeta sufren por la escasez de agua, mientras que en otros, el problema no es la falta del recurso sino, más bien, su mala gestión y distribución, además los métodos empleados para ello. Es por esto que uno de los mayores desafíos que enfrenta hoy en día la humanidad es el de proporcionar agua, principalmente potable, a la inmensa

mayoría de población mundial, siendo una necesidad particularmente crítica en los países en vía de desarrollo, dado a factores como la pobreza, la poca disponibilidad del recurso y su mal manejo.

El uso del agua a nivel mundial se distribuye entre doméstico, industrial y agrícola. Para los países desarrollados 11% se utiliza para fines domésticos, 59% para la industria y 30% para la agricultura mientras que para los países en vía de desarrollo sólo el 8% tiene uso doméstico, 10% para la industria y el 82% para la agricultura (WWAP, 2016). A nivel global el 70% del agua dulce es demandada por la agricultura y el 22% por la industria (UNESCO, 2009), es importante resaltar que en la actualidad, la población mundial es cuatro veces mayor que hace 100 años, mientras que el consumo de agua se ha multiplicado por 9 y la necesidad de agua industrial por 40 (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2004; Libhaber, Menahem, 2004).

Frente a esta problemática mundial en torno al agua, los países desarrollados como Estados Unidos y los países de la Unión Europea están experimentando la necesidad de tratar sus aguas residuales, para de esta manera evitar o controlar la contaminación de su recurso hídrico y garantizar su disponibilidad para los diferentes usos, al mismo tiempo se han visto en la necesidad de desarrollar una serie de estrategias de manejo sustentable del agua (Robert Schennach, Parga, Jose R., Cocke, David L.

El reúso y recirculación son operaciones que hacen parte de las estrategias de manejo del agua. Sin embargo, es necesario realizar tratamientos a los efluentes. Estos

tratamientos deben ser adecuados para el propósito, tener una alta eficiencia, bajos costos y adicionalmente traer ventajas ambientales. Por consiguiente, es importante desarrollar técnicas innovadoras que entren a competir técnica, económica y ambientalmente con las tecnologías tradicionales. Dentro de las tecnologías tradicionales encontramos procesos biológicos y procesos físico-químicos. Los procesos físico-químicos más comunes son filtración, intercambio iónico, precipitación química, oxidación química, adsorción, ultrafiltración, ósmosis inversa y electrodiálisis entre otros.

Hoy en día, existen una serie de tecnologías emergentes que están basadas en la electroquímica y que actualmente se presentan como alternativas que ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales. Podemos mencionar en este grupo la electrocoagulación, electroflotación y electrodecantación [Rajeshwar, Krishnan and Ibanez, Jorge, 1997].

La electrocoagulación aunque no es una tecnología nueva ha sido poco estudiada y desarrollada, pese a esto, ha logrado alcanzar un aprovechamiento comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes, ubicándose como una técnica con mayores ventajas comparativas con las tecnologías tradicionales de tratamiento. Por ésta razón en los últimos años ha cobrado interés científico, acción que busca entender a fondo el proceso y sus mecanismos.

■ HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

La electroquímica es una ciencia que nace a finales del siglo XVIII, con los trabajos de Galvani y Volta y ha tenido desarrollos y aplicaciones en múltiples áreas, podemos mencionar su uso en el arranque de los motores de los automóviles, en procesos de síntesis química y métodos para la eliminación de la contaminación [Gonzalez-Garcia, J., Garcia, V., Iniesta, J., Montiel, V. and Aldaz, A., 2001].

La electrocoagulación ha sido una tecnología emergente desde 1906 con la primera patente concedida en Estados Unidos. Problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos generaron tropiezos para que la industria adoptara esta técnica, pero se conocen desarrollos anteriores. Desde el siglo XIX, en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster, este proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, con una caída de potencial de 1.8 vatios entre los electrodos distantes una pulgada y una corriente anódica de 0.6 Amp/pie² [Orozco, Julio, 1985].

En 1893 Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY. [Adhoum, Nafaâ, Monser, Lotfi, Bellakhal, Nizar and Belgaied, Jamel-Eddine, 2004]. En 1896 se usó en Louisville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizó ánodos de hierro y aluminio [Petterson. James W., 1985]. En 1908 el proceso Webster se utilizó en Santa Mónica con reducciones de 40% de materia orgánica.

En 1914 se utilizó en New York una modificación del proceso Webster llamado Landreth, en éste se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito. En 1932 fue utilizada la electrocoagulación en Alemania con eficiencias del 50% en reducción de la DBO de aguas residuales. Igualmente, la falla de estos procesos se dio por el alto costo de la energía y a la necesidad de recambiar los electrodos.

En 1947, en URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido de ferroso, obteniendo remociones de 70-80% para la DBO. Unos años más tarde, en 1958, el profesor Mendía de la Universidad de Nápoles utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25-30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis. En Noruega, Föyn se combinó 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrólisis para la remoción de fosfato utilizando electrodos de carbón. Aunque la eficiencia del proceso fue buena hubo problemas de corrosión pie2 (Orozco, Julio, 1985).

Durante las dos últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa, además en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos de electroplateado, textiles y en procesos de potabilización del agua (Holt, Peter, barton, Geoffrey and Mitchell, Cynthia, 1999) .entre otros.

■ LA ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Es así que los contaminantes, de muy diversos efluentes, son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico, cuya función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado, como se muestra en la figura 1. Podemos entonces definir la electrocoagulación, como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidos, emulsionados o disueltos en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados [Chen, Guohua, 2004].

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general, este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando ésto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido, estos iones metálicos tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados (Stephenson, Rob and Tennant, Bruce, 2003).

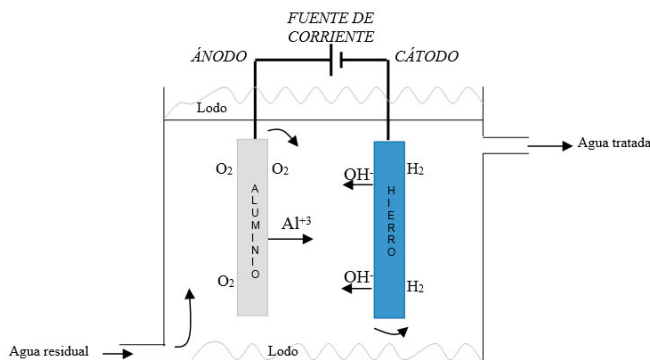


Figura 1. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro.

■ RETOS Y OPORTUNIDADES

A pesar que la electrocoagulación es una tecnología que se conoce hace ya más de cien años, no se ha desarrollado una investigación sistemática que pueda predecir el proceso desde su comportamiento químico, reacciones y mecanismos, ni provea las herramientas suficientes para el diseño y operación de los reactores. Es importante aclarar que en las diferentes publicaciones que se han venido haciendo sobre el tema, se encuentran una serie de diseños a escalas de laboratorio y piloto, pero no hay diseños de reactores prototipos en uso hoy en día. La literatura disponible básicamente se limita a comparar los trabajos reportados (Molla, M.Yousuf, et al, 2001). Esto se ha dado en parte por la reputación que ha adquirido la electrocoagulación como tecnología demandante de electricidad que puede ser costosa en muchos lugares, obligando a que se abandonen sus estudios sin un análisis más detenido, y por otra parte dado a que esta tecnología se ha aplicado de manera empírica en muchos casos y como tratamiento puntual sobre un contaminante específico.

En los últimos años y dado a la imperante necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes de diversas aguas residuales, se ha reconsiderado la electrocoagulación como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, cobrando un importante interés científico e industrial, hecho este que permitirá avanzar sobre los escollos que han dejado a esta tecnología rezagada durante varias décadas. Es así que nos enfrentamos al reto de investigar los parámetros que controlan el proceso de electrocoagulación de manera organizada y sistemática, que permita diseñar el proceso en su totalidad, desde su requerimiento de energía hasta su reactor, para que de esta forma se pueda optimizar, adaptar y aplicar, ubicándola como una tecnología de punta que brinde sus ventajas en la protección y conservación del recurso hídrico.

Aplicaciones de la electrocoagulación

La electrocoagulación se ha aplicado para la remoción de diversas aguas residuales. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante, esto se realiza en un proceso en la misma celda o en celdas consecutivas (Morante, Gonzalo, 2002).

Una de las aplicaciones más conocida y popular de la electrocoagulación se ha dado en el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico (Jiang, Jia-Qian, Graham, N.,

André,C., Kelsall, GH and Brandon,N.,2002; Mollah, Mohammad,Paul, Gomes, Jewel A.G., Kesmez, Mehmet, Parga, Jose and L., David,2004; Lai, Chen L. and LIN, Sheng, 2004) ,proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante (Gatsion, Evangelos, Hahladakis, Jhon N. and Gidakos, Evangelos, 2015).

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes utilizan en sus procesos cromo (+6); este elemento tiene una alta toxicidad. Las descargas de cromo son muy reguladas a nivel mundial, y para su remoción, se utilizan métodos convencionales que incluyen adsorción, precipitación química y degradación biológica, entre otros. La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo en esta agua residual, este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5ppm (Ping, Gao, Chen, Xueming, Shen, Feng and Chen, Guohua, 005).

la industria mecánica, refinerías, talleres de reparación automotriz y transporte, distribución y almacenamiento de aceites producen aguas residuales con altos contenidos de aceites y grasas, que se caracterizan por presentar una gran estabilidad química de sus emulsiones aceite-agua, esto representa una problemática ambiental importante. La electrocoagulación ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y grasas (Bergmann, H., Rittel A., Iourtchouk, K. and Bouzek, K.,2003; Adhoum, Nafaâ and Monser, Lotfi, 20004; Chen, Guohua; Chen, Xueming, and Yue ,Po

Lock, 2000; Harinarayanan Nampoothiri, M.G, Manilal, A.M. and Soloman, P.A., 2016).

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria (CAR/ PL, 2002; Comisión nacional del medio ambiente - región metropolitana, 1998; Aymerich, Sigfrido, 2002;), esta agua se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO además de altos porcentajes de grasas. Una investigación realizada con las aguas residuales de los restaurantes de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente Wiblbrecht, Gerard, 2000; Tezcan Un, Umran , 2014).

Una de las áreas de aplicación en la cual se han desarrollado algunos avances importantes de esta tecnología e incluso que mayor implementación ha tenido la misma, es en el tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color (Ge, J., Qu, J. Lei, P. and Liu, H., 2004; KIM, Tak-Hyun, 2002 ; Brillas, Enric and Casado, Juan, 2002; Kinética S.A., 2005; Naje, A.S., Chelliapan, Shreeshivadasan, Zakaria, Zuriati and Abbas, Saad A., 2016).

La electrocoagulación también ha sido probada en la potabilización de aguas, es importante resaltar que el paso de la corriente eléctrica a través del agua a tratar tiene efecto desinfectante en cuanto que destruye, en porcentajes por encima del 99%, los microorganismos presentes en el agua (Powell Water Systems Inc., 2005). En esta misma aplicación, se ha venido estudiando

la electrocoagulación con buenos resultados en el tratamiento de aguas para consumo humano contaminadas con arsénico, contaminación ésta que puede afectar la salud de la población mundial, ya que puede ocurrir en cualquier región y país (Kumar, P. Ratna, Chaudhari, Sanjeev, C. Khilar, Kartic and Mahajan, S.P., 2004).

Otras posibles aplicaciones de la electrocoagulación están dadas en la remoción de nitratos en aguas superficiales y subterráneas contaminadas por nitratos lixiviados, procedentes de los fertilizantes artificiales usados en los cultivos [37]. (KoparaL, A. Savas and Ogutveren, Ulker Bakir, 2002) Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica como DBO en aguas residuales domésticas (Powell Water Systems Inc, 2001 ;Duc Nguyen, D. Ngo, H. Hao, Guo, W., Nguyen, T. Thanh, Chang, Soon W., Jang, A. and Yoon, Yong S., 2016), efluentes de la industria de los colorantes (Brillas, Enric and Casado, Juan, 202) y la industria papelera (Jaafarzadeh, Nemat. Omidinasab, Maryam, and Ghanbari, Farshid, 2016).

Ventajas

Son muchas las ventajas de la electrocoagulación, entre las más relevantes están:

- Requiere de equipos simples y de fácil operación (Molla, M.Yousuf et al, 2001).
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos (Powell Water Systems Inc, 2001).
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, que involucra menor problemática de disposición de estos lodos (Garg, Krishan Kishor and PRASAD, Basheshwer, 2016).
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada (Molla, M.Yousuf et al, 2001).
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes (Powell Water Systems Inc, 2001).
- Purifica el agua y permite su reciclaje.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas incrementando la coagulación (Molla, M.Yousuf et al, 2001).
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados (Molla, M.Yousuf et al, 2001).
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros (Powell Water Systems Inc, 2001).

- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad (Molla, M.Yousuf et al, 2001).

Desventajas

Las principales desventajas del proceso de electrocoagulación son (Molla, M.Yousuf et al, 2001):

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- El óxido formado en el ánodo, puede en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

■ MECANISMOS Y REACCIONES

Proceso de electrocoagulación

Durante la electrólisis ocurren una serie de procesos físicos y químicos que permiten la remoción de los contaminantes, estos procesos se pueden describir de la siguiente manera:

En los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo provee

iones metálicos, a este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse.

Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes presentes en el agua. Cuando estas cargas se han neutralizado, los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen, permitiendo la formación de agregados de los contaminantes iniciando así el proceso de coagulación.

Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de contaminantes que se puede dar por dos vías, la primera por reacciones químicas y precipitación y la segunda procesos físicos de agregación de coloides que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar.

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres, estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua- contaminantes que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua. De acuerdo con la ley de Faraday, ley que gobierna el proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de cargas que pasan a través del sistema, y el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la cantidad de electricidad puesta en el sistema (Rajeshwar, Krishnan and Ibanez, Jorge, 1997)

A diferencia de la coagulación química, proceso en el cual el coagulante es adicionado al sistema como agente químico, en la electrocoagulación el coagulante es formado in situ mediante las reacciones dadas por la disolución de iones del metal que conforma el electrodo de sacrificio. Como se explicó anteriormente, la producción de iones metálicos se da en el ánodo (Zinola, C.F., 1999) y son los iones que por oxidación electrolítica dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante (Larue, Olivier, Vorobiev, Eugène, Vu, C. and Durand, Bernard, 2003).

Según es expuesto por Molla et al (Molla et al, 2001), se considera que en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas; inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y finalmente se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de estas en el coagulante.

Reacciones involucradas en la electrocoagulación

Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio, por esta razón se tratará de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, no sólo para hierro y aluminio sino también aquellas reacciones que ocurren cuando los electrodos son de otros metales o materiales. El proceso de electrocoagulación es afectado por diferentes

factores, entre los más importantes se encuentran, la naturaleza y concentración de los contaminantes, el pH del agua residual y la conductividad, estos factores determinan y controlan las reacciones ocurridas en el sistema y la formación del coagulante.

Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes, estos pueden ser hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$ o hidróxido férrico $Fe(OH)_3$ (Bayramoğlu, Mahmut, Kobya, Mehmet, Can, Orhan Taner and Sozbir, Mustafa, 2004)

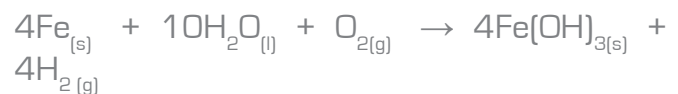
Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

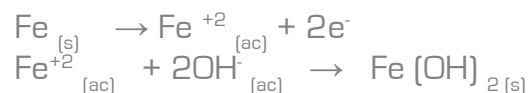


Reacción global:



Mecanismo dos: Formación del hidróxido ferroso

En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



Reacción global:



Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas (Larue, Olivier et al, 2003).

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes (Kobyas, Mehmet, Can, Orhan Taner and Bayramoglu, Mahmut, 2004):

En el ánodo:



En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^- reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $Al(OH)_2^+$, $Al_2(OH)_2^+$, $Al(OH)_2^+$, y otras poliméricas tales como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ y $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_3(s)$ como se muestra en la reacción de ánodo.

El $Al(OH)_3(s)$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinosa que expone una gran área superficial con propiedades absorbentes, que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Bayramoglu et al, 2004).

■ DISEÑO Y OPERACIÓN DEL REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN

Los reactores para la electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como reactores tipo batch o reactores de sistema continuo (Kobyas, M., Gengec, E. and Demirbas, E., 2016). La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar.

Analizando el reactor tipo batch, encontramos que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo, tiene la desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo. Pero tiene la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento localizado de aguas,

Una segunda clasificación de los reactores está dada en función de la flotación, una vez que el contaminante ha sufrido el proceso de coagulación existen dos formas de separarlo del medio acuoso a saber: flotación y sedimentación así pues los reactores pueden diseñarse como reactores con sólo coagulación o con coagulación y flotación. Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del

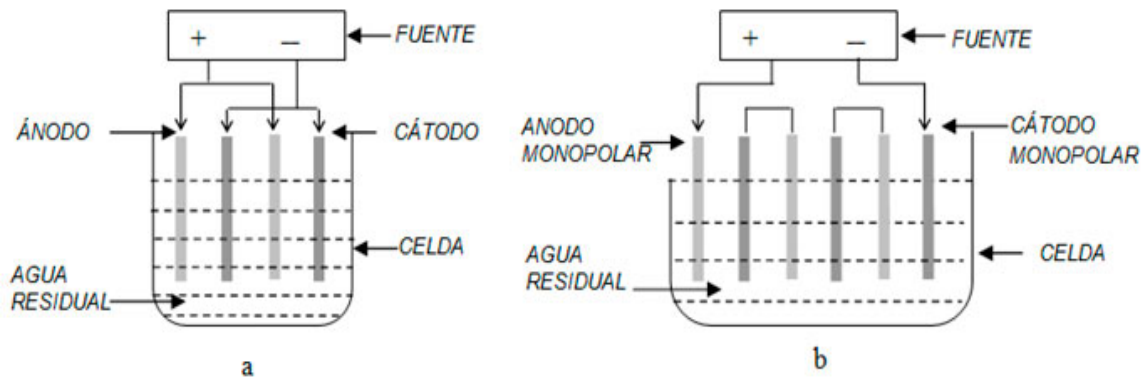
contaminante por flotación; mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación.

La separación por sedimentación es la más común. La densidad de corriente empleada en el reactor determina la cantidad de burbujas generadas. Se ha podido observar de la experimentación que a bajas corrientes se producen bajas densidades de burbujas, obteniéndose un bajo flux de momentum hacia arriba que hace que predomine la sedimentación sobre la flotación. Situación contraria se presenta cuando se aumenta la corriente pues la densidad de burbujas aumenta, resultando en un aumento del flux de momentum hacia arriba favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes [Rajeshwar, Krishnan and Ibanez, Jorge, 1997].

Los procesos que utilizan sólo coagulación pueden combinarse con otras tecnologías, para lograr la separación del contaminante [Pérez, Laura S., Rodriguez, Oscar M., Reyna,

Silvia, Sánchez-Salas, José Luis, Lozada, J. Daniel, Quiroz, Marco A., Bandala, Erick R., 2016]. Estas tecnologías pueden ser: flotación por aire disuelto, electroflotación, filtración y clarificación [Wiblbrett, 2000]. Estas combinaciones de técnicas de separación con el proceso de electrocoagulación se pueden llevar a cabo integrando ambas tecnologías en el diseño del reactor o se pueden presentar en unidades separadas. Es importante señalar que la combinación de estas tecnologías y su diseño depende en gran medida de las propiedades y características que tenga el agua residual a tratar y sus contaminantes, adicionalmente a lo anterior, es importante considerar el uso del efluente.

Se ha observado que cuando en el reactor se usan dos placas, una como ánodo y otra como cátodo, no se presenta una buena disolución de iones metálicos, para mejorar esta disolución se debe aumentar el área superficial de los electrodos, lo cual se logra aumentando el número de placas, disponiéndolas en serie en forma paralela monopolar o bipolar [Jiang et al, 2002; Mollah et al.2004] como se muestra en la Figura 2.



(a) Reactor con electrodos monoplares conectados en paralelo,
 (b) Reactor con electrodos monoplares conectados en serie.

Figura 2. Reactores para electrocoagulación tipo bach

Existen otros tipos de reactores para la electrocoagulación, uno de ellos es el tipo filtro prensa, este está constituido por un par de marcos, uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara como se

muestra en la Figura 3. El agua a ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo turbulento para incrementar la eficiencia del proceso. Este sistema hace que su operación y mantenimiento sea relativamente simple [Chen, Guohua, 2004].

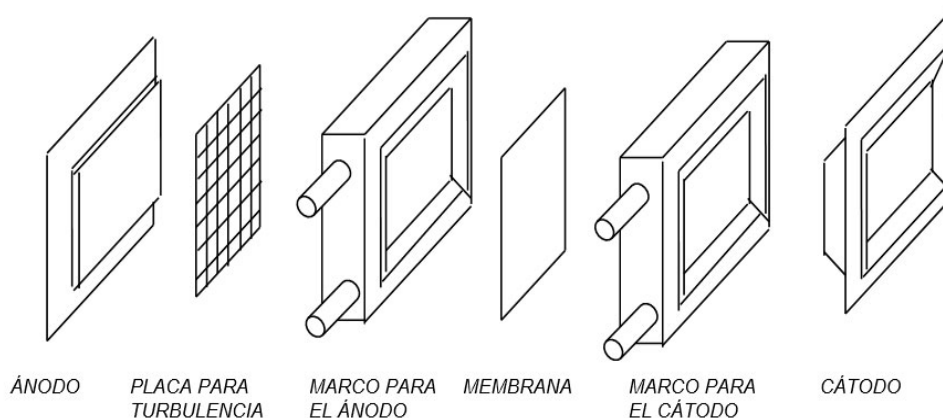


Figura 3. Reactor tipo filtro prensa

Para la remoción de metales se usa el reactor de electrodo cilíndrico rotativo en el cual el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo como se muestra en la Figura 4.

modernos son fabricados de titanio con una pequeña capa de óxidos de metales nobles. Sin embargo, el material más comúnmente utilizado es el aluminio. El cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio [Chen, Guohua, 2004].

Esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo. Finalmente, también es usado para la remoción de metales el reactor de lecho fluidizado mostrado en la Figura 5. Este permite aumentar el área superficial mejorando la eficiencia del proceso [Chen, Guohua, 2004].

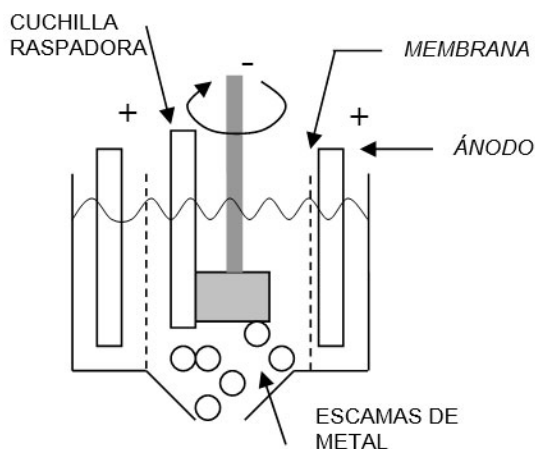


Figura 4. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo

Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables, tales como el acero que se utiliza en los reactores para la recuperación de metales, los electrodos más

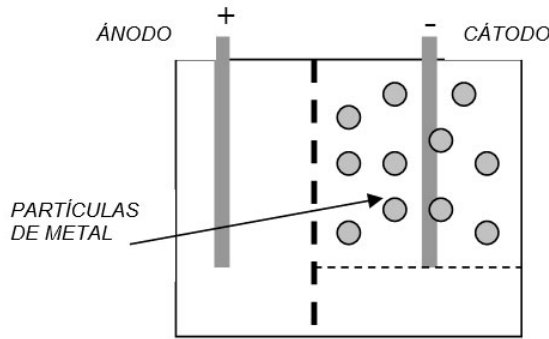


Figura 5. Reactor de lecho fluidizado

FACTORES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación, algunos de estos factores tienen mayor influencia sobre el proceso, a continuación discutiremos aquellos que se relacionan más directamente con la efectividad del proceso.

pH: El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido [Chen, Guohua, 2004]. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación [Ge, J., et al, 2004; Kobya, Mehmet et al, 2003; Bayramoglu et al, 2004; Kumar et al, 2004; Zinola, C.F., 1999], esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas [Ge, J., et al, 2004; Mejía, Claudia y Osorio, Víctor, 2003], efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo [Mejía, Claudia y Osorio, Víctor, 2003, Kumar et al, 2004], en contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer, a su vez y dependiendo de la naturaleza del

contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso.

Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, incluso este rango puede ser amplio [Kumar et al, 2004] En términos generales, las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7, ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da a pH entre 6 y 8 [Kumar et al, 2004] y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se da pH de 7 [Kobya et al, 2003].

Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación, le dan al medio acuoso capacidad buffer especialmente en aguas residuales alcalinas, esta propiedad previene grandes cambios de pH Kobya et al, 2003], con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH.

Densidad de corriente: Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio.

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía incrementan con el incremento en la densidad de corriente [Adhoum, Nafaâ and Monser, Lotfi, 2004; Yilmaz, AE, Boncukcuoğlu, R, Kocakerim, MM and Keskinler, B., 2005]. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía incrementa proporcionalmente con los incrementos de

conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor energía, para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso [Larue et al, 2003]. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierro Fe^{+2} liberados por los respectivos electrodos.

En general un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante [Bayramoglu, 2004]. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación como pH y temperatura [Chen, Guohua, 2004].

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción [Molla M. et al, 2001].

Conductividad: Un incremento en la conductividad eléctrica, genera un incremento en la densidad de corriente, cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación, adicionalmente, el incremento de la conductividad manteniendo la densidad de corriente constante, produce una disminución del voltaje aplicado [Chen,

Xueming; Chen, Guohua, and Yue, Po Lock, 2002].

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o $CaCl_2$ generan un aumento en la conductividad del agua residual [41,42], adicionalmente se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^{2-} pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{+2} y Mg^{+2} produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos, que aumentaría el potencial entre los electrodos decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl^- alrededor del 20% [Chen, Guohua, 2004].

Temperatura: Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a $60^\circ C$ punto donde se hace máxima, para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo.

En la tabla 1 se presenta un resumen de algunas investigaciones mostrando los valores de las variables más importantes en el proceso y la remoción alcanzada para diversos contaminantes en distintas aguas residuales industriales.

COSTOS

El proceso de electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica y ambiental para el tratamiento de las aguas residuales de muchas industrias. El capital y los costos de operación son mucho menores comparados con un tratamiento por coagulación química, incluso se pueden llegar a recuperar los costos de capital en menos de un año. Estos costos dependen del caudal a tratar, de la naturaleza del agua residual, de los contaminantes a ser removidos y de la

región o localidad en la que se desea realizar el tratamiento.

Se ha estimado que los costos de operación para tratar por electrocoagulación 1500 000 GPA [5 GPM] de agua residual con contenidos de TSS, Grasas y aceites y algunos metales como níquel y zinc es de U\$ 1500, mientras que los costos para tratar la misma agua residual por medio de coagulación química es del orden de U\$ 45000, para un ahorro anual del orden U\$ 43500 cuando se aplica electrocoagulación en lugar de coagulación química, estos costos no incluyen transporte y disposición de lodos ni mano de obra [Powell Water Systems Inc., 2005].

Agua residual	Corriente	Ánodo / cátodo	Parámetro eléctrico	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	pH	Contaminante	Remoción %	Tiempo (min)	Referencia
Colorantes textil	CD	Al/Fe	$\geq 150 \text{ A/m}^2$	1000-4000	3- 6	Turbiedad	98	15	Kobya , et al 200
						DQO	61-65		
						Fe/Al	80-100 A/m^2		
		cercano a 10	DQO	47-77					
			Turbiedad	87					
			DQO	26					
Electroplateado, industria del Cr, fertilizantes e industria de los metales.	--	Fe/Fe	30 A/m^2	1500	5-6	Cr^{6+}	97	--	Ping, Gao et al 2005
Restaurantes	CD	Al/Al	1.8-6.8V	1290	6.94	DQO	67	15	Chen, Guohua, 2004
						Grasas y aceites	>97		
						SS	90		
Alimentos (gelatinas)	CD	Fe/Al	6.26 A/m^2	1,2Mhos	10.86	Grasas y aceites	Agua cruda 1195ppm	15	Morante, Gonzalo
							Agua tratada 115ppm		
						DQO	Agua cruda 3104ppm		
							Agua tratada 931.2ppm		
Lavandería	CA	Al	32V/30A	--	5-9	DQO	70	5	Ge, J. et al 2004
						Turbiedad P-fosfato surfactante	90		

Agua consumo humano		Fe/- -	1.53 A/m ²	--	6-9	As	>99	20	Kumar P. et al
		Al/- -					37		
		Ti/- -					>58		
Industria del boro	CD	Al/- -	1.2-6 mA/cm ²	bajos	8	B	97	--	Yilmaz, AE et al 2005
Suspensión de látex	CD	Fe/Fe	1.1 A/Dm ²	0.6-1 S/m	6.5-7	estireno	Remanente 7%	26	Zinola C.F.,1999
						vinilo	Remanente 8%		
Industria semiconductores (pulido mecánico químico)	CD	Al/Fe	93 A/m ²	450-470	7.3	color	96	< 30	Lai, Chen L. and Lin, 2004
						Cu	99		
						DQO	88.7		
Producción aceite de oliva	CD	Al/- -	75 mA/cm ²	--	4-6	DQO	76	25	Adhoum et al, 2004
						polifenoles	91		
						color	95		

Se ha estimado que los costos de operación para tratar por electrocoagulación 1500 000 GPA (5 GPM) de agua residual con contenidos de TSS, Grasas y aceites y algunos metales como níquel y zinc es de U\$ 1500, mientras que los costos para tratar la misma agua residual por medio de coagulación química es del orden de U\$ 45000, para un ahorro anual del orden U\$ 43500 cuando se aplica electrocoagulación en lugar de coagulación química, estos costos no incluyen transporte y disposición de lodos ni mano de obra (Powell Water Systems Inc., 2005).

Cuando se compara la coagulación con alumbre y la electrocoagulación, este último tratamiento produce 83% menos volumen de lodos que el primero, lo cual representa diferencias significativas en los costos del transporte y disposición final de los lodos.

Los costos de operación dependen en buena medida del material de los electrodos, por ejemplo cuando se trata el agua residual de la industria textil por electrocoagulación con electrodo de hierro como electrodo de

sacrificio, los costos de operación son del orden de U\$ 0.1 por kg de DQO removido y cuando el electrodo de sacrificio es el aluminio, su costo de operación es del orden de U\$ 0.3 por kg de DQO removido (Bayramoglu, M., 2004). Los costos del electrodo de sacrificio son alrededor del 50% de los costos totales para el hierro y del 80% para el aluminio.

También se ha observado que la densidad de corriente influye sobre los costos operativos, en general el comportamiento depende del material del electrodo gastado. Para la industria textil, en el caso del hierro hay un comportamiento lineal de los costos; para incrementos de densidad de corriente de 50 a 200 A m⁻² los costos de operación se incrementan del 48 al 62%, mientras que para el aluminio hay una disminución de los costos de operación por kilogramo de DQO removido alrededor de 100 A m⁻².

Finalmente la inversión inicial involucra los costos de la fuente de energía y la celda, además de adecuaciones y otros equipamientos, este costo inicial es del orden

de \$ 107000 USD para tratar 1.5 GPM y de \$112000 USD para tratar 3GPM (Powell Water Systems Inc., 2005).

■ CONCLUSIÓN

La electrocoagulación es en la actualidad una tecnología emergente que se presenta como alternativa para el tratamiento de aguas residuales, ofreciendo un potencial muy grande en la remoción de muy diversos contaminantes presentes en las aguas residuales de diferentes fuentes.

Aunque ésta técnica es conocida hace ya algunas décadas y aplicada en muchos casos, es aún tema de investigación y experimentación, que ha comenzado a recobrar interés dado a sus potenciales en la aplicación, facilidad de manejo y operación, versatilidad y adaptabilidad a diferentes procesos y a sus ventajas ambientales y económicas. Es así que, el diseño de reactores para la electrocoagulación, la selección de los materiales de los electrodos y las condiciones de operación son aspectos que se deben perfeccionar mediante la investigación, con la finalidad de optimizar los procesos y hacerlos económicamente competitivos.

Sin duda alguna, la necesidad de proveer agua para la inmensa demanda mundial y la crisis por el recurso hídrico, son un desafío que requiere una atención urgente. La electrocoagulación como tecnología de alto rigor científico, tiene un significativo valor para ser parte de la solución global en este problema.

El enfoque que se presenta de esta tecnología es positivo y pretende sentar el precedente de

ahondar en todos los aspectos que la hacen completa, pertinente y observada como uno de los mejores modelos, con un gran alcance de aplicación y un muy significativo impacto en la población mundial.

La investigación que se realice en un futuro inmediato del proceso de electrocoagulación arrojará como antecedentes, las revisiones y los experimentos que se hayan estructurado para alcanzar su objetivo, la optimización de la tecnología y de las alternativas en el aprovechamiento de las mismas.

Los costos de montaje y operación son fundamentales en la aplicación de esta tecnología, es por esto que cada caso en particular, requiere de un estudio y análisis minucioso de los aspectos técnicos y económicos del proceso.

■ REFERENCIAS

[Adhoum, Nafaâ, Monser, Lotfi, Bellakhal, Nizar, Belgaied, Jamel-Eddine. (2004). Treatment of electroplating wastewater containing Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr(VI) by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 112, 207-213. Recuperado de <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2004.04.018>

Adhoum, Nafaâ, Monser, Lotfi. (2004). Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing*, 43, 1281-1287. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2003.12.001>

Aymerich, Sigfrido. Conceptos para el tratamiento de residuos lácteos.(2000).

Centro Nacional de Producción Más Limpia. Costa Rica. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/46894997/Tratamientos-residuos-lacteos>

Bayramoğlu, Mahmut, Kobya, Mehmet, Can, Orhan Taner, Sozbir, Mustafa. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37, 117-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2003.09.002>

Bergmann, H., Rittel A., lourtchouk, K., Bouzek, K. (2003). Electrochemical treatment of cooling lubricants. In: Chemical Engineering and Processing. *Chemical Engineering and Processing*, 42, 105–119. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701\(02\)00020-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701(02)00020-X)

Brillas, Enric, Casado, Juan. (2002). Aniline degradation by Electro- Fenton- and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater reactor for wastewater treatment. *Chemosphere*, 47, 241-248. Recuperado de [http://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00221-1](http://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00221-1)

CAR/PL. (2002). *Prevención de la contaminación en la industria láctea*. Recuperado de www.cprac.org/docs/lac_es.pdf

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2004). *El Agua*. Recuperado de <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/elagua.html>

Chen, Guohua.. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>

Chen, Guohua; Chen, Xueming, Yue, Po Lock. (2000). Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 126(9), 858-863. Recuperado de [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2000\)126:9\(858\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2000)126:9(858))

Chen, Xueming; Chen, Guohua, Yue, Po Lock.. (2002). Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. *Chemical Engineering Science*, 57, 2449-2455. Recuperado de [http://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00147-1](http://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00147-1)

Comisión Nacional del Medio Ambiente - Región Metropolitana. (1998). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial. Fabricación de productos lácteos*. Recuperado de www.sinia.cl/1292/articles-26238_pdf_lacteos.pdf

Duc Nguyen, D. Ngo, H. Hao, Guo, W., Nguyen, T. Thanh, Chang, Soon W., Jang, A., Yoon, Yong S. (2016) Can electrocoagulation process be an appropriate technology for phosphorus removal from municipal wastewater?. *Science of the total environment*, 563-564, 549-556. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.045>

Garg, Krishan Kishor, Prasad, Basheshwer. (2016). Treatment of multicomponent aqueous solution of purified terephthalic acid wastewater by electrocoagulation process: Optimization of process and analysis of sludge. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 60, 383-393. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2015.10.038>

Gatsion, Evangelos, Hahladakis, Jhon N., Gidaracos, Evangelos. (2015). Optimization

of electrocoagulation (EC) process for the purification of a real industrial wastewater from toxic metals. *Journal of Environmental Management*, 154, 117-127. Recuperado de http://www.ijirset.com/upload/2016/march/8A_Optimization.pdf

Ge, J., Qu, J. Lei, P., Liu, H. (2004). New bipolar electrocoagulation– electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology*, 36, 33–39. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866\(03\)00150-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866(03)00150-3)

Gonzalez-Garcia, J., Garcia, V., Iniesta, J., Montiel, V., Aldaz, A. (2001). ¿What can electrochemistry do for the environmental?. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 19,171-195.

Harinarayanan Nampoothiri, M.G, Manilal, A.M., Soloman, P.A. (2016). Control of Electrocoagulation Batch Reactor for Oil removal from Automobile Garage Wastewater. *Procedia Technology*, 24, 603-610. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.136>

Holt, Peter K., Barton, Geoffrey W., Mitchell, Cynthia A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59,355–367. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.023>

Holt, Peter, Barton, Geoffrey and mitchell, Cynthia. (1999). *Electrocoagulation as a Wastewater Treatment. The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event*. Recuperado de <http://kremesti.com/water/>

[chemical_and_biological_reference/Electrocoagulation%20PH_GP_CM_1999.pdf](http://www.ijirset.com/upload/2016/march/8A_Optimization.pdf)

Jaafarzadeh, Nemat. Omidinasab, Maryam, Ghanbari, Farshid. (2016). Combined electrocoagulation and UV-based sulfate radical oxidation processes for treatment of pulp and paper wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*.102, 462-472. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.04.019>

Jiang, Jia-Qian, Graham,N., André,C., Kelsall, GH., N. (2002). Laboratory study of electrocoagulation–flotation for water treatment. *Water Research*, 36, 4064–4078. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00118-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00118-5)

Kim, Tak-Hyun, Park, Chulhwan, Lee,Jinwon,Shin, Eung-Bai, Kim, Sangyong. (2002).Pilot scale treatment of textile wastewater by combined process: fluidized biofilm process–chemical coagulation–electrochemical oxidation. *Water Research*, 36, 3979–3988. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00113-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00113-6)

Kinética S.A. [SF]. *Alternativas para Tratamiento y purificación del Agua por el método de electrocoagulación*. Recuperado de www.geocities.com/seofeo555/Q003.html

Kobyas, M.,Gengec, E., Demirbas, E. (2016). Operating parameters and costs assessments of a real dyehouse wastewater effluent treated by a continuous electrocoagulation process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 101,

87-100. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2015.11.012>

Kobyas, Mehmet, Can, Orhan Taner, Bayramoglu, Mahmut. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials, B100, 163-17894*. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00102-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00102-X)

Koparal, A. Savas, Ogutveren, Ulker Bakir. (2002). Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials, B89, 83-94*. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00301-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00301-6)

Kumar, P. Ratna, Chaudhari, Sanjeev, C. Khilar, Kartic, Mahajan, S.P. (2004). Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere, 55, 1245-1252*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.12.025>

Lai, Chen L., Lin, Sheng. (2004). Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics. *Chemosphere, 54, 235-242*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.08.014>

Larue, Olivier, Vorobiev, Eugène, Vu, C. and Durand, Bernard. (2003). Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. *Separation and Purification Technology, 31, 177-192*. Recuperado de [http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866\(02\)00182-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1383-5866(02)00182-X)

Libhaber, Menahem. (2004). *Manejo sostenible de las aguas residuales urbanas en países en vía de desarrollo*. Recuperado de <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/puertorico29/libhaber/parte1.pdf>

Mejía, Claudia y Osorio, Víctor. (2003). Decoloración de aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia-Medellín, 29, 15-118*.

Molla, M.Yousuf, Robert Schennach, Parga, Jose R., Cocke, David L. (2001). Electrocoagulation (EC) science and applications. *Science and applications. Journal of Hazardous Materials, B84, 29-41*. [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)

Mollah, Mohammad, Paul, Gomes, Jewel A.G., Kesmez, Mehmet, Parga, Jose, L., David. (2004). Fundamentals, Present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials, 114, 199-210*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>

Morante, Gonzalo. Electrocoagulación de aguas residuales. (2002). *Revista Colombiana de Física. 34 [2], 484-487*. Recuperado de http://revcolfis.org/publicaciones/vol34_2/articulos/pdf/3402484.pdf

Naje, A.S., Chelliapan, Shreeshivadasan, Zakaria, Zuriati, Abbas, Saad A. (2016). Electrocoagulation using a rotated anode: A novel reactor design for textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management, 176, 34-44*. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.034>

- OEI. (SF). *Década por una educación para la sostenibilidad. Nueva Cultura del agua*. Recuperado de <http://www.oei.es/decada/accion06.htm>
- Orozco, Julio. (1985). La densidad de carga del electrolito como parámetro de control del proceso de electrocoagulación. *Revista Ainsa*. 5 (2), 3-30.
- Pérez, Laura S., Rodríguez, Oscar M., Reyna, Silvia, Sánchez-Salas, José Luis, Lozada, J. Daniel, Quiroz, Marco A., Bandala, Erick R. (2016). Oil refinery wastewater treatment using coupled electrocoagulation and fixed film biological processes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* 91, 53-60. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2015.10.018>
- Petterson. James W. (1985). *Industrial Wastewater Treatment Technology*. Stoneham, Ma. Butterworth Publishers
- Ping, Gao, Chen, Xueming, Shen, Feng, Chen, Guohua. (2005). Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electro flotation without a filter. *Separation and Purification Technology*, 43, 117-123. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.051>
- Powell water systems Inc. (2001). *Powell Electrocoagulation: Sustentable Technology For the Future*. Recuperado de <http://earthmoving.ellers.com.au/documents/PWS%20Technical%20Bulletin.pdf>
- Rajeshwar, Krishnan and Ibanez, Jorge. (1997). *Environmental electrochemistry, Fundamentals and Applications in pollution abatement*. San Diego California. U.S.A. Academic Press limited
- Stephenson R. y Tennant B. (2003) New electrocoagulation process treats emulsified oily wastewater at Vancouver Shipyards, *Environmental Science & Engineering Magazine*. Recuperado de <http://www.esemag.com/0103/electro.html>
- Tezcan Un, Umran. (2014). Continuous electrocoagulation of cheese whey wastewater: An application of Response Surface Methodology. *Journal of Environmental Management*, 146, 245-250. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.006>
- UNESCO. (2009). *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a changing world*. UNESCO Publishing. Recuperado de http://webworld.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/pdf/WWDR3_Water_in_a_Changing_World.pdf
- Wiblbrett, Gerard. (2000). *Limpieza y desinfección en la industria alimentaria*. Zaragoza. Acribia.
- WWAP. (2016). *Agua y Empleo*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>
- Yilmaz, AE, Boncukcuoğlu, R, Kocakerim, MM and Keskinler, B. (2005). The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method. In: *Journal of Hazardous Materials*, 125, 160-165. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.05.020>
- Zinola, C.F. (1999). *Electroquímica Fundamental*. Facultad de Ciencias, Universidad de la República. Montevideo. CSIC.