

II. ELECTROCOAGULACIÓN

2.1 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. Se puede 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 [14]. 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 (exactamente en 1888), se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster. Su 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. En 1893, Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY. 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 utilizaron ánodos de hierro y aluminio. En 1908 el proceso Webster se utilizó en Santa Mónica, con reducciones de 40% de materia orgánica. [14]

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. La falla de estos procesos se debió por el alto costo de la energía y la necesidad de recambiar los electrodos. En 1947, en la URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso, obteniendo remociones de 70% al 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. [14]

En este proceso se mezcló 25% al 30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis. En Noruega, Föyn 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. Durante las dos últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos de electroplateado, textiles y en procesos de potabilización del agua misma, entre otros. [14]

2.2 La Electrocoagulación

La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. 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. Se puede entonces definir la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas 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. [1]

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes [14] [15]. Por lo general, este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto 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 y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados. [14]

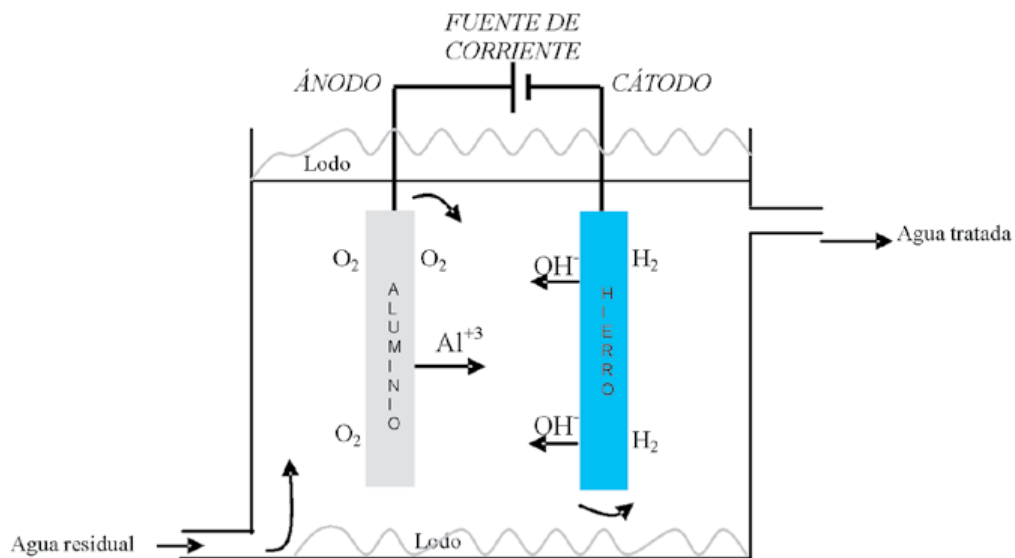


Figura1. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro.

A pesar de 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. Esto se ha dado en parte por la reputación que ha adquirido la electrocoagulación como tecnología demandante de electricidad, la que puede ser costosa en muchos lugares obligando a que se abandonen sus estudios sin un análisis más detenido, y, por otra parte, a que esta tecnología se ha aplicado de manera empírica en muchos casos y como tratamiento puntual sobre un contaminante específico.[14]

En los últimos años, y debido a la imperante necesidad de investigar, adaptar e implementar tecnologías eficientes en la remoción de contaminantes de

diversas aguas residuales, se ha vuelto a considerar la electrocoagulación como alternativa viable en el tratamiento de los efluentes líquidos, cobrando un importante interés científico e industrial, lo cual permitirá avanzar sobre los obstáculos que han dejado a esta tecnología rezagada durante varias décadas. Es así como se enfrenta al reto de investigar los parámetros que controlan el proceso de electrocoagulación de manera organizada y sistemática, de una forma que permita diseñar el proceso en su totalidad, desde su requerimiento de energía hasta su reactor para así optimizarlo, adaptarlo y aplicarlo, ubicando dicho proceso como una tecnología de punta que brinde sus ventajas en la protección y conservación del recurso hídrico. [14]

2.3 Aplicaciones de la Electrocoagulación

Se ha aplicado la electrocoagulación 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. Una de las aplicaciones más conocidas ha sido el tratamiento de aguas residuales de la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico, proceso que busca remover la carga de metales solubles en las descargas de una industria por demás contaminante. [14]

La industria metalúrgica, la de producción de cromo, las curtiembres y la industria de fertilizantes, utilizan en sus procesos cromo, elemento de 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. Este tratamiento ha permitido obtener aguas tratadas con concentraciones de cromo por debajo de 0.5 ppm. [14]

La industria mecánica, las refinerías, los talleres de reparación automotriz, el transporte y la distribución y almacenamiento de aceites, producen aguas residuales con altos contenidos de elementos propiamente aceitosos y grasosos, que se caracterizan por presentar una gran estabilidad química de sus emulsiones aceite-agua. Esto representa una problemática ambiental importante. [15]. La electrocoagulación ha mostrado alta efectividad en desestabilizar dichas emulsiones y la consecuente remoción de los aceites y grasas. [14]

La electrocoagulación también ha sido utilizada en el tratamiento de las aguas residuales de la industria alimentaria, estas aguas se caracterizan por altos contenidos de DBO y DQO (demanda química de oxígeno), además de altos porcentajes de grasas. Una investigación realizada con las aguas residuales de los restaurantes de la ciudad de Hong Kong, las cuales fueron tratadas por electrocoagulación y electroflotación, mostró remociones de 99 y 88 % en grasas y DQO respectivamente. [14]

Una de las áreas de aplicación en las cuales se han desarrollado algunos avances importantes de esta tecnología y que incluso ha tenido mayor implementación de la misma, es el tratamiento de las aguas residuales de lavanderías, tintorerías e industria textil, obteniendo eficiencias importantes en la remoción de materia orgánica, turbiedad y color. [14]

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, 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 o país. [14]

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. Finalmente, la electrocoagulación también ha sido probada en el tratamiento de aguas cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO en aguas residuales domésticas y efluentes de la industria de los colorantes.[14]

2.4 Ventajas y Desventajas de la Electrocoagulación

Ventajas:

Son muchas las ventajas de la electrocoagulación. Entre las más relevantes están [14] [15]:

- ✓ Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- ✓ Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- ✓ Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- ✓ Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
- ✓ Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
- ✓ Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- ✓ 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.
- ✓ 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.

- ✓ Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- ✓ Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad.

Desventajas:

Las principales desventajas del proceso de electrocoagulación son [14] [15]:

- ✓ 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.

2.5 Reacciones Involucradas en la 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. [14] [15]

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 e iniciando así el proceso de coagulación. [14]

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. [14] [15]

De acuerdo con la ley de Faraday, que rige 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.[15]

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 y son los iones que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante. En el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la

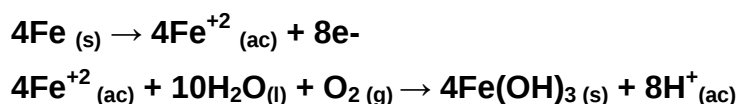
desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de flóculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante. [14]

Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. La bibliografía referenciada trata ampliamente estas reacciones, sólo para hierro y aluminio. 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. [14] [15]

Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso Fe(OH)_2 o hidróxido férrico Fe(OH)_3 .

Mecanismo 1 Formación del hidróxido férrico:

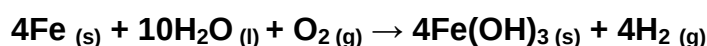
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo ocurre la reacción:

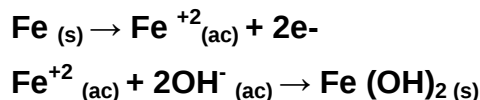


Reacción global:

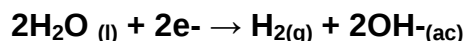


Mecanismo dos: Formación del hidróxido ferroso

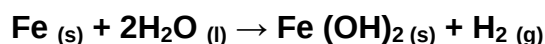
En el ánodo se dan las reacciones:



En el cátodo:



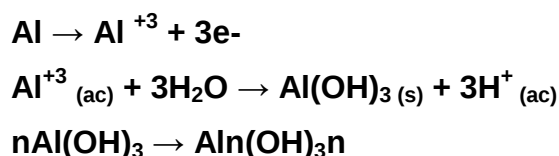
Reacción global:



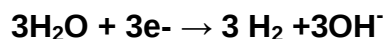
Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas. [14] [15]

Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes.

En el ánodo:



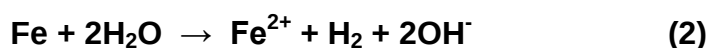
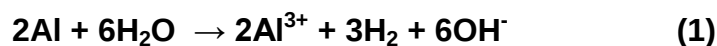
En el cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^{-} reaccionan para formar algunas especies monoméricas como Al(OH)_2^{+} , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+}$, y otras poliméricas, tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $\text{Al(OH)}_3(\text{s})$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $\text{Al(OH)}_3(\text{s})$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con propiedades

absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes. [14] [15] [16]

Reacciones químicas presentes en la electrocoagulación:



2.6 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. 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. [15]

Analizando el reactor tipo batch, se encuentra que éste debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo. Tiene como desventaja que sus condiciones cambian con el tiempo, pero tiene también la ventaja de ser simple y de bajo costo para el tratamiento 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: flotación y sedimentación. [15]

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. [14] [15]

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 flujo de impulso 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 flujo de impulso hacia arriba, favoreciendo la flotación de las partículas contaminantes. [14] [15]

Los procesos que utilizan sólo coagulación pueden combinarse con otras tecnologías para lograr la separación del contaminante. Estas tecnologías pueden ser: flotación por aire disuelto, electroflotación, filtración y clarificación. 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 [15]. Es importante señalar que la combinación de estas tecnologías y su diseño dependen en gran medida de las propiedades y características que tenga el agua residual a tratar y sus contaminantes. Además, es importante considerar el uso del efluente. [15]

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 como se muestra en la figura 2. [15]

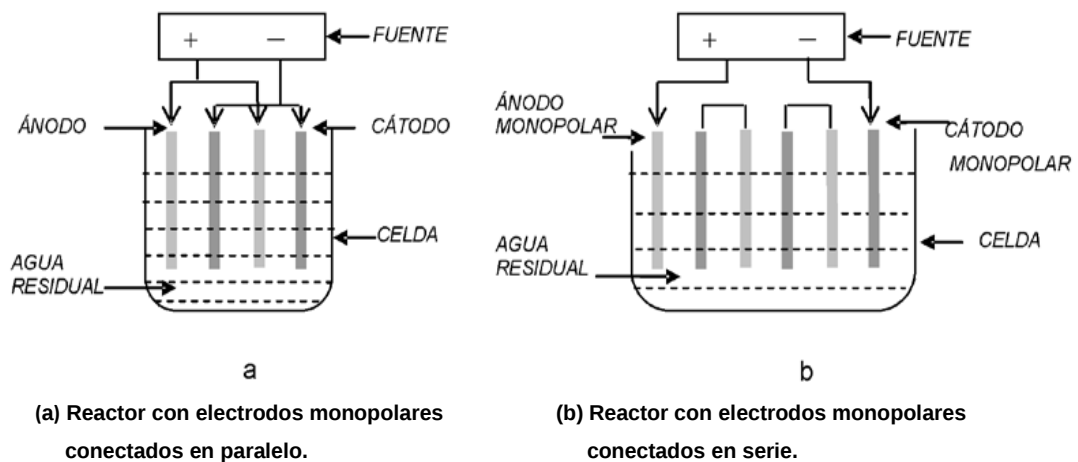


Figura 2. Reactores para electrocoagulación tipo batch.

Existen otros tipos de reactores para la electrocoagulación. Uno de ellos es el tipo filtro prensa, 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 (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 sean relativamente simples. [15] [16]

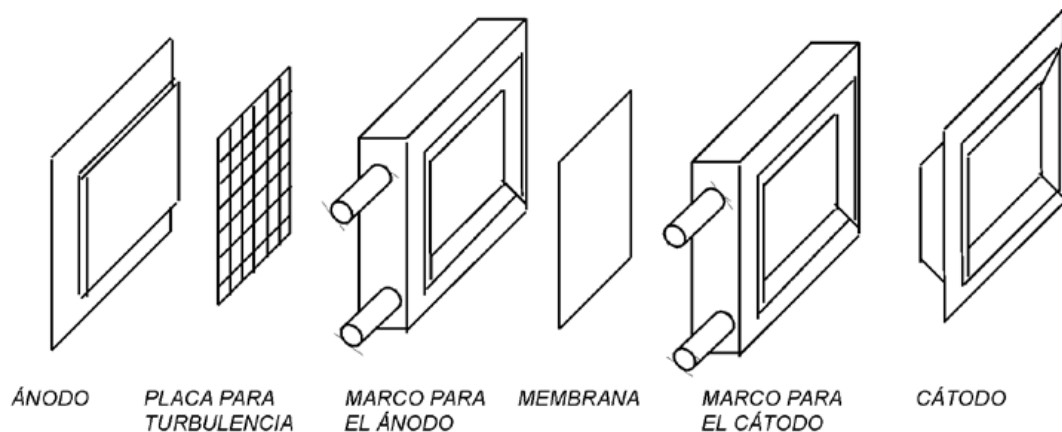


Figura 3. Reactor tipo filtro prensa

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.

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. Éste permite aumentar el área específica superficial, mejorando la eficiencia del proceso. [15]

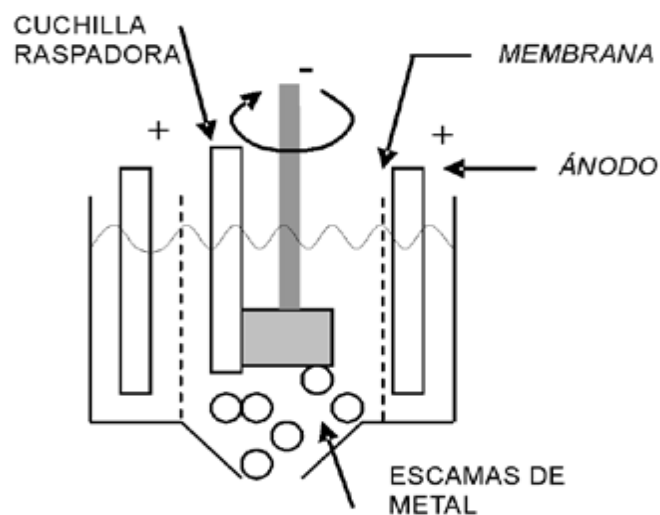


Figura 4. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo.

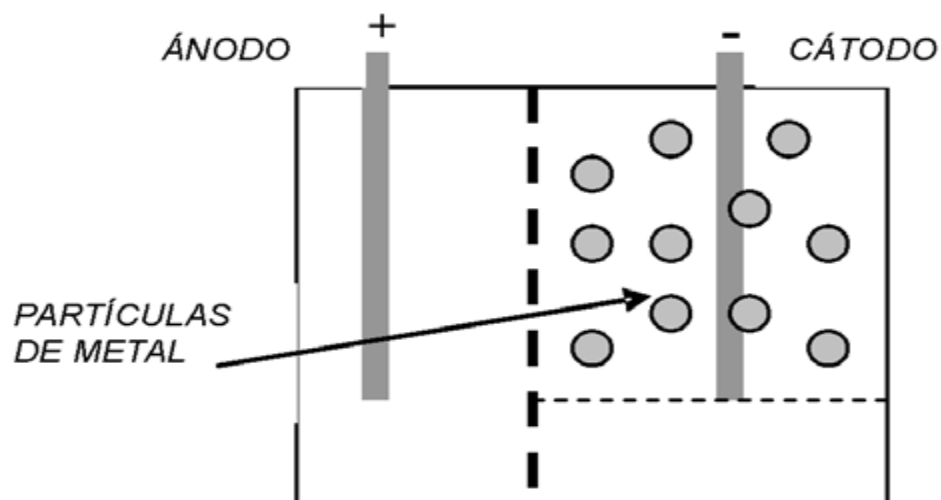


Figura 5. Reactor de lecho fluidizado.

Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables, por ejemplo como el acero que se utiliza en los reactores para la recuperación de metales. Los electrodos más 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. [14] [15]

La literatura no revela ningún avance sistemático para el diseño y operación de reactores para la electrocoagulación y no hay ningún diseño predominante usado hasta el momento, además las publicaciones hechas hasta el momento se refieren a operaciones en batch. También hay que considerar que hay poca asesoría disponible para realizar un diseño preliminar. Igualmente se debe tener en cuenta que el desempeño de este tipo de reactores depende de los electrodos y el arreglo empleado, y varía de acuerdo al tipo de material y geometría de los electrodos. [14]

2.7 Factores que afectan la electrocoagulación

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación y algunos de estos tienen mayor influencia sobre el proceso. A continuación se discuten aquellos que se relacionan más directamente con la efectividad del mismo. [14]

pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido, se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. [14]

El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, cuyo efecto es atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. [14]. 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, e incluso este rango puede ser amplio.[14]

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, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil a un pH de 7. [14]

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, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH. [14]

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. [14]

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente. Para algunas conductividades del medio acuoso el consumo de energía se incrementa proporcionalmente con los aumentos de conductividad, lo que conlleva a un consumo mayor de 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. [14]

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos. En general, un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante. 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. [14]

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. [14]

Conductividad

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, y manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. [14]

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl_2 genera un aumento en la conductividad del agua residual. Además 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 éstos, 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%. [14]

Temperatura

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° 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. [14]

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 comparativamente con un tratamiento por coagulación química, incluso se puede 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. [14]

Se ha estimado que los costos de operación para tratar por electrocoagulación 5 GPM (galones por minuto), de agua residual con contenidos de TSS (tiempo sin salinidad), grasas y aceites, y algunos metales como níquel y zinc, es de US\$ 1.500, mientras que los costos para tratar la misma agua residual por medio de coagulación química es del orden de US\$ 45.000, para un ahorro anual del orden de US\$ 43.500 cuando se aplica electrocoagulación en lugar de coagulación química. Estos costos no incluyen transporte y disposición de lodos ni mano de obra. 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. [14]

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 US\$ 0.1 por kg de DQO removido y cuando el electrodo de sacrificio es de aluminio, su costo de operación es del orden de US\$ 0.3 por kg de DQO removido. Los costos del electrodo de sacrificio son alrededor del 50% de los costos totales para el hierro, y del 80% para el aluminio. [14]

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 Am^{-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 de alrededor de 100 Am^{-2} . [14]

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 US\$ 107.000 para tratar 1,5 GPM, y de US\$112.000 para tratar 3GPM. [14]

2.8 Análisis comparativo

A continuación se describe (Tabla 8 y 9), un análisis comparativo entre de la electrocoagulación vs tratamiento biológico. [17]

Tabla 8. Comparación General entre el método de electrocoagulación y el tratamiento biológico.

DETALLE	ELECTROCOAGULACION	BIOLOGICO
Superficie	Representa entre [50–60]% de un sistema biológico.	Requiere de gran superficie.
Tiempo de residencia de la reacción	Necesita de 10 a 60 segundos en la celda de electrocoagulación.	Tiempo mínimo de 24 horas. En el estanque de aereación
Obras civiles	Son unidades compactas que no requieren obras civiles.	Requieren de grandes obras civiles.
Costos de inversión	Representa el 50% de la inversión del sistema biológico.	Requieren una gran inversión en equipos y obras civiles.
Costos de operación (Energía)	Entre [0.5 – 0.8] Kwh/m ³ .	De 5 a 10% menor que el sistema de electrocoagulación.
Químicos	Sólo para ajustes de pH.	Los puede utilizar para la etapa de desinfección (*), (**)
Lodos	Su generación es menor, con una humedad entre [96-97] %	Mayor generación de lodos con una humedad entre [98-99]%

(*) Cloración/Decloración (**) Puede ser Cloración o Luz Ultravioleta.

Fuente: [17]

Tabla 9. Comparación Técnica y Económica

DETALLE	ELECTROCOAGULACION	BIOLOGICO
Relación de energía	0.020 -0.032] US\$ / m ³	Uso de Ozono(**)
Relación de energía	No usa químicos	[0.008-0.009] US\$ / m ³ (*) (Desinfección)
Tiempo de residencia de la reacción	[10-60] seg. En la celda de EC	24 hrs. En el estanque de aireación
Tiempo de residencia de sedimentación	15-20 min. En el estanque de sedimentación	3-4 hrs. En el estanque de sedimentación
Desinfección	Uso de ozono(**)	3-4 hrs. En el estanque de sedimentación

(*) Cloración/Decloración (**) Puede ser Cloración o Luz Ultravioleta.

Fuente: [17]