

Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua

Efficiency's evaluation of an electrocoagulation cell at scale laboratory for water treatment

Edwar Aguilar¹

RECIBIDO: 28/03/2015 - APROBADO:17/04/2015

RESUMEN

La contaminación causada por el uso del agua en muchas de las actividades del ser humano nos lleva a la necesidad de utilizar nuevas tecnologías para remoción de contaminantes de las aguas residuales; una de ellas es la electrocoagulación. En este estudio se planteó construir un reactor de electrocoagulación para evaluar la eficiencia en la remoción de la DQO (demanda química de oxígeno) de aguas residuales provenientes de la industria de pintura, así como determinar las mejores condiciones de pH, conductividad, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento. En base a los resultados obtenidos al realizar el tratamiento del efluente con electrocoagulación, se determinó una eficiencia promedio del 87 % en la remoción de la DQO. Estos valores óptimos de operación se obtuvieron con una intensidad de corriente $I = 5$ amperios, con el pH natural del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, con lo cual se cumple la normativa ambiental vigente en el país. Otro aspecto importante observado en este estudio fue la calidad del lodo producido en el tratamiento, de aspecto mucho más compacto que un lodo fisicoquímico o biológico.

Palabras clave: Electrocoagulación, electrodos, tratamiento de agua.

ABSTRACT

The pollution caused by the use of water in many activities of human beings, has taken us to the need of using new technologies to the removal of contaminants from wastewater, one of them is the electrocoagulation. In this research we suggest the construction of an electrocoagulation reactor to evaluate the efficiency in the removal of COD (Chemical Oxygen Demand) from wastewater coming from the painting industry; it also wants to determine the best conditions of pH, conductivity, electric intensity and time of treatment. Based on the results we've gotten in the treatment of effluent with electrocoagulation, we determined an average efficiency in the 87 % of COD removal. This optimum ranges were gotten with an electrical intensity of $I = 5$ amperes, with the natural pH of the effluent in 7,12 and a 15 minutes treatment time, with which we accomplish the environmental compliance of the country. Other important aspect we've seen in this research was the quality of the sludge produced in the treatment, with much more compact appearance than a physicochemical or biological sludge.

Keywords: Electrocoagulation, electrodes, water treatment.

¹ Docente e investigador del Instituto de Investigación Científica IDIC Universidad de Lima.
E-mail: edwaraguilar@yahoo.es; eaguilaa@ulima.edu.pe.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo del ser humano. Es utilizada en muchos procesos industriales produciendo aguas residuales contaminadas que la mayoría de veces son descargadas a los cuerpos de agua y redes de alcantarillado sin ningún tipo de tratamiento, incumpliendo la normativa ambiental vigente.

Actualmente en el país está vigente la norma D.S. N° 021-2009-VIVIENDA Valores máximos admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas (VMA), la cual reglamenta y controla las descargas de aguas residuales de origen industrial en el sistema de alcantarillado de SEDAPAL, a fin de evitar el deterioro de las instalaciones, asegurar su adecuado funcionamiento, garantizando la sostenibilidad de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, por lo cual las industrias que incumplan esta norma están sujetas a pagos y multas por la contaminación que ocasionen.

Existen muchas tecnologías para el tratamiento de efluentes. El fisicoquímico y el biológico son los más usados en el país, el primero utiliza coagulantes químicos y polímeros sintéticos para la remoción de los contaminantes, mientras que el tratamiento biológico depende de microorganismos, los cuales son muy sensibles y necesitan condiciones óptimas para obtener una buena eficiencia.

Ante la necesidad de proveer agua para la población y la industria, es necesario investigar con nuevas tecnologías que permitan la conservación y recuperación del agua utilizada en los procesos industriales, ya sea para su reuso o para su descarga sin ocasionar daños al medio ambiente.

II. MARCO TEÓRICO

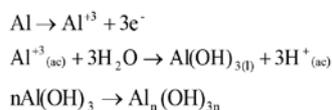
Una de estas tecnologías es la electrocoagulación, que es un proceso electroquímico donde se utiliza la corriente eléctrica para eliminar contaminantes que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados en un medio acuoso. La corriente eléctrica se hace pasar a través de electrodos generalmente de aluminio y hierro, los cuales pueden trabajar como ánodo o cátodo respectivamente, generando coagulantes por la disolución de iones en los electrodos. En el ánodo es donde se generan los iones metálicos, el cual es conocido como electrodo de sacrificio, ya que la placa se disuelve progresivamente. En cambio, en el cátodo hay una liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso que permiten la flotación de las partículas coaguladas (Arango, 2005).

Existen muchos factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación, entre los más importantes podemos indicar: pH, intensidad de corriente, conductividad y temperatura, de los cuales depende en mucha medida la eficiencia del tratamiento (Restrepo, Arango y Garcés, 2006).

Al utilizar electrodos de aluminio y hierro en el proceso de electrocoagulación; estos liberan iones Al^{+3} o Fe^{+2} que actúan como coagulantes muy eficientes para la floculación y aglomeración de partículas coloidales. Estos iones al hidrolizarse forman cadenas largas de Al-O-Al-OH, las cuales pueden adsorber químicamente una gran cantidad de contaminantes. (Piña et al., 2011).

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 alguna especie monomérica 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 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 (Restrepo et al., 2006).

Los reactores de electrocoagulación puede ser de tipo Bach o rectores de sistema continuo, el Bach es una cubeta donde los electrodos de aluminio y hierro se colocan en forma de placas paralelas conectadas en serie a una fuente de poder que le suministra corriente eléctrica (Mollah et al., 2004).

La selección de uno de estos tipos depende de las características del contaminante, así como del volumen del agua residual a tratar. Analizando el reactor tipo Bach, encontramos que este debe operar con un volumen determinado de agua residual para tratar en un ciclo (Restrepo et al, 2006). Los reactores de sistema continuo se utilizan generalmente para tratar mayores volúmenes de agua. En el caso de estudios en laboratorio, se prefiere reactores Bach ya que permiten controlar mejor las condiciones que intervienen en el proceso de electrocoagulación.

El volumen de la celda ocupada por los electrodos es la zona de reacción, donde se realizan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación. Después de estas reacciones se generan lodos que pueden depositarse en la parte superior cuando su densidad es baja o precipitarse cuando su densidad es alta (Arango y Garcés, 2007).

El tratamiento de aguas con el proceso de electrocoagulación ofrece muchas ventajas con respecto a otros tipos de tratamientos convencionales como el fisicoquímico o biológico (lodos activados). Según lo indicado por Restrepo en el 2006, las más importantes que podemos destacar son:

- Tiene una alta efectividad en la remoción de contaminantes.
- Es de fácil operación y mantenimiento, no utiliza coagulantes químicos.
- Su tiempo de retención es mucho menor que un tratamiento convencional.

- Los lodos obtenidos son muchos más compactos y en menor cantidad, lo que permite un menor costo en su tratamiento o disposición final.
- El costo de energía es mucho menor que otros procesos convencionales, ya que no usa polímeros.
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química
- y contienen menos agua ligada.

Como toda tecnología presenta algunas desventajas que se indican a continuación:

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos tienen altas concentraciones de hierro y aluminio.
- Su costo es alto en donde no hay acceso a la energía eléctrica.
- Los lodos presentan altas concentraciones de hierro y aluminio.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Para las pruebas de laboratorio se fabricó un reactor Batch, en material de acrílico transparente para una mejor visualización de las reacciones que se producen en el tratamiento. Las dimensiones del reactor fueron 15 cm x 20 cm x 20 cm de ancho, largo y altura, respectivamente con la capacidad de tratar un volumen de 4.5 l de agua residual. Los materiales utilizados como electrodos fueron aluminio y hierro colocados a lo largo de la celda, como se aprecia en la Figura N° 1, de forma cuadrada de 10 cm de lado y un espesor de 1 mm.

La celda se construyó con el criterio de fabricarla totalmente desarmable, para eso se utilizaron varios soportes de acrílico para los electrodos, de tal manera que se pudiera variar los espaciamientos entre las placas y realizar una mejor limpieza de la celda después de cada prueba. Adicionalmente se instaló un tomador de muestras a una altura prudente que nos permita sacar el efluente tratado y realizar los análisis respectivos.

La fuente de poder utilizada para las pruebas definitivas nos permitió regular la cantidad de corriente suministrada a la celda para el proceso de electrocoagulación. Esta tenía una capacidad de suministrar hasta 12 amperios y un voltaje de 0 a 32 V, con medidores digitales de amperaje y voltaje para una fácil lectura de los valores, siendo verificados estas lecturas con una pinza amperimétrica, voltímetro y un cronómetro para las mediciones de tiempo.

La Figura N° 1 presenta un diagrama del equipo de electrocoagulación que incluye sus elementos principales, así como las conexiones de los electrodos al cátodo y ánodo.

En una primera etapa se realizaron pruebas preliminares con agua residual sintética preparada en laboratorio utilizando arcilla roja, con una turbiedad de 660 UNT. Esto permitió obtener las mejores condiciones de operación, evaluar el espaciamiento entre las placas y la transferencia de corriente de la fuente de poder a la celda. Para las pruebas definitivas de laboratorio se utilizó agua residual proveniente de la industria de pinturas y pegamentos, la cual fue monitoreada en la misma planta de tratamiento de la empresa, realizando los análisis de sus parámetros fisicoquímico y biológico.

La industria encargada de la producción de pinturas y pegamentos generan aguas residuales que contienen sustancias contaminantes, tanto orgánicas como inorgánicas. Esto se debe a la utilización -en sus procesos- de materiales como pigmentos, aglutinantes, solventes y aditivos menores, provocando altas concentraciones de DQO, DBO y sólidos suspendidos totales. Estos parámetros deben ser removidos para no superar la normativa ambiental vigente y no ocasionar problemas a las plantas de tratamiento convencionales que en la mayoría de los casos son de tipo biológico, generando problemas en su operación y eficiencia.

Entre los principales parámetros evaluados fue la DQO, con un valor inicial de 3920 mg/l, que evidencia un alto grado de contaminación. Además se midieron los valores iniciales de pH y conductividad, los cuales se aprecian en la Tabla N° 1.

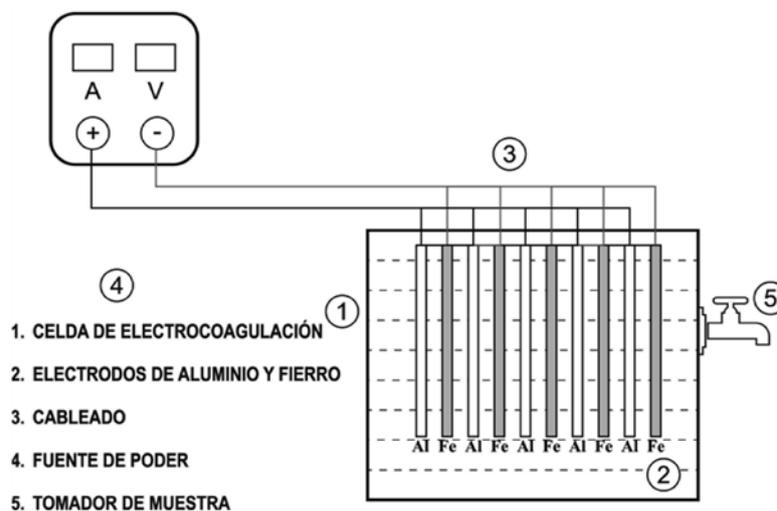


Figura N° 1. Diagrama del equipo de electrocoagulación. Fuente: Elaboración propia

Luego de esto se procedió a realizar pruebas definitivas con el efluente industrial, evaluando el porcentaje de remoción de la DQO. Esto se determinó midiendo este parámetro antes y después de cada tratamiento, utilizando el método colorimétrico según lo establecido por el Standard Methods. Las pruebas se hicieron con intensidades de corriente de 3, 5 y 8 amperios respectivamente, así como diferentes valores de pH, el natural, en medio básico y en medio ácido. Durante el proceso se realizaron mediciones de la variación del pH, conductividad y temperatura, ya que son factores importantes en el proceso de electrocoagulación, siendo medidos con un multiparámetro OAKTON PCS 35.

Adicionalmente a esto, se observaron las principales características del lodo residual obtenido mediante este proceso, comparándolo con un lodo residual de un proceso fisicoquímico, para lo cual se realizaron algunas pruebas de jarras en laboratorio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla N° 1 se aprecian los valores de los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua residual antes de ser tratada con la celda de electrocoagulación, observándose que los valores de pH y conductividad tienen valores aceptables, ya que influyen en el proceso de electrocoagulación.

Tabla N° 1: Análisis fisicoquímico y biológico del efluente	
Parámetro	Valor
Conductividad (μ S/cm)	2 930
Color (U.C.)	16 300
DQO (mg/L)	3 920
DBO ₅ (mg/L)	1250
pH	7.12
Sólidos totales (mg/L)	1 298
Turbiedad (U.N.T.)	1 919
Coliformes fecales (NMP/100ml)	20x10 ³

Fuente: Elaboración propia

En la Figura N° 2 podemos apreciar la disminución de la DQO en función del tiempo. Se observa que a los 10 minutos de tratamiento ya está por debajo de 1000 mg/l, esto a una intensidad de corriente de 8 y 5 amperios, con el pH natural del agua residual. También se observa que a un pH 4 y pH 10 existe una disminución significativa de la DQO.

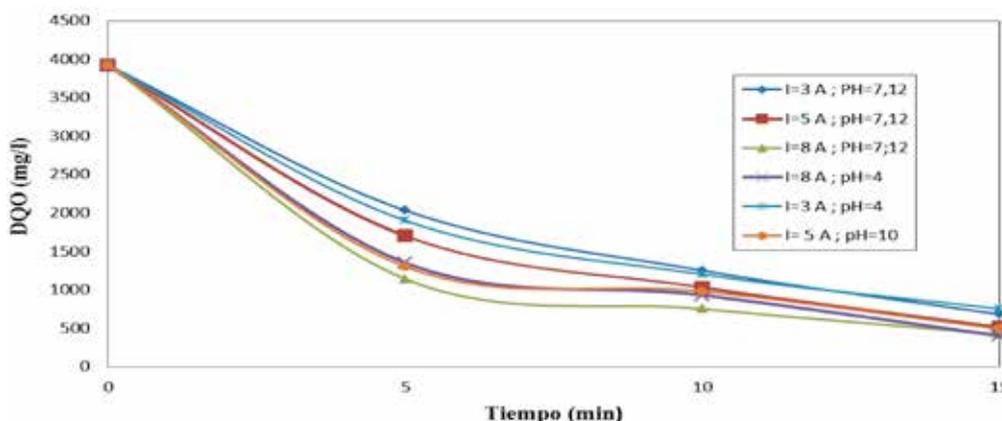


Figura N° 2. Variación de la DQO en función del tiempo, a diferentes combinaciones de tratamiento.

Fuente: Elaboración propia

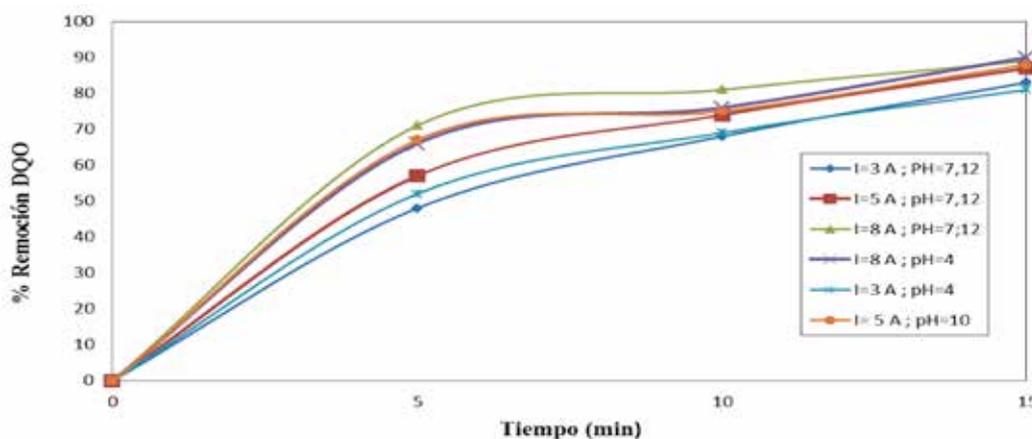


Figura N° 3. Porcentajes de remoción de DQO a diferentes combinaciones de tratamiento.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura N° 3 se muestra el porcentaje de remoción de DQO para las diferentes combinaciones de tratamientos considerados en la metodología experimental, es decir con pruebas a diferentes intensidades de corriente y variando el pH. Se puede apreciar que el mejor rendimiento se obtuvo con una intensidad de corriente de 5 y 8 amperios, con el pH=7.12, que es el pH natural del efluente y un pH=4, obteniéndose en promedio una eficiencia del 90 %. En las gráficas se observa que la eficiencia aumenta con el incremento de la intensidad de corriente y cómo influye el pH en este tipo de tratamiento.

A continuación se presenta la Figura N° 4 y 5, donde se aprecia el reactor de electrocoagulación terminado el tratamiento, observándose además la buena calidad de lodo que se forma en la parte superior, siendo este mucho más compacto que un lodo convencional. En la figura 5, se muestra el efluente inicial y el efluente tratado con electrocoagulación, con sus respectivos valores de operación obtenidos en las pruebas de laboratorio, que fueron $I=5A$, $pH=7.12$ y $Tiempo = 15 \text{ min}$.



Figura N° 4. Efluente al final del tratamiento.

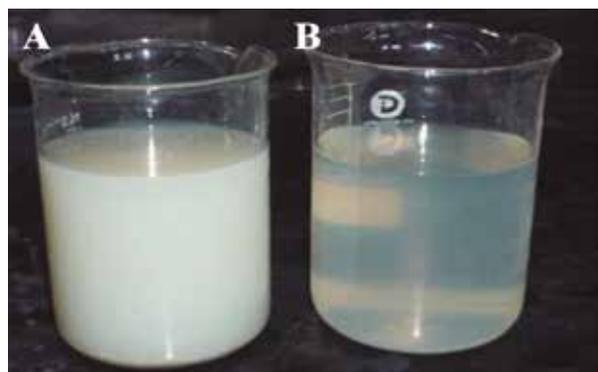


Figura N° 5. Efluente inicial B. Efluente final.

IV. CONCLUSIONES

En esta investigación se demostró que el tratamiento de aguas residuales industriales con electrocoagulación es un proceso efectivo para la remoción de contaminantes, siendo una alternativa viable para su aplicación en el país.

Las pruebas realizadas en laboratorio nos permiten concluir que las mejores condiciones para obtener una alta eficiencia en la remoción de la DQO presentes en este tipo de agua residual industrial son a un pH natural del efluente de 7.12, una intensidad de corriente de 5 amperios y un tiempo de tratamiento de 15 minutos. Estas condiciones de operación permiten obtener en promedio un porcentaje de remoción del 87%, con lo cual se cumple la normativa ambiental vigente en el país.

Es importante señalar que al utilizar intensidades de corriente de 8 amperios con un pH=7.12 y pH=4 se observó una remoción superior y siendo esta mínima se descartó, ya que influiría en un aumento de costos por el gasto de energía y aditivos para disminuir el pH.

Otro aspecto importante de este estudio fue la calidad de los lodos producidos en el tratamiento. Se confirma lo dicho en la bibliografía: que son muchos más compactos y secos que un lodo fisicoquímico o biológico y permiten así su mejor disposición.

V. AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Investigación Científica de la Universidad de Lima, por ser la institución que promovió el desarrollo integral de este proyecto; al Laboratorio de Investigación del Agua de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, por prestar sus instalaciones para realizar pruebas de laboratorio; y a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por la publicación de la presente.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arango, A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49-56.
2. Arango, A. y Garcés, L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56-67.
3. Mollah, M., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J. y Cocke, D. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 114(1-3), 199-210.
4. Piña, M.; Martín, A., González, C.A., Prieto, F., Guevara, A. y García, J.E. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2), 257-271.
5. Restrepo, A., Arango, A. y Garcés, L. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, 1 (2), 58-77.