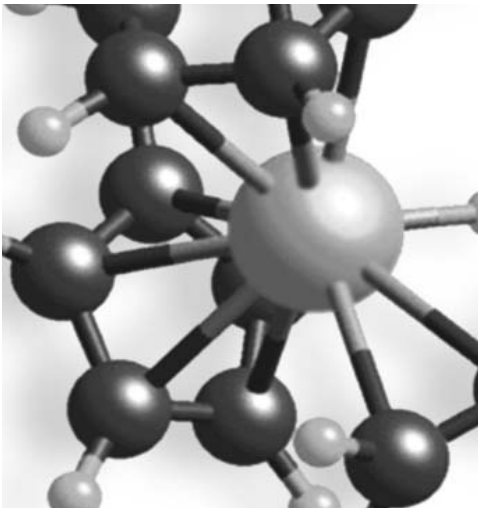


Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea



Alvaro Arango Ruiz

Ingeniero Sanitario. Especialista en Ingeniería Ambiental. Magíster en Ingeniería Ambiental. Director grupo de investigación GAMA. Decano Facultad de Ingenierías. Corporación Universitaria Lasallista.

Luis Fernando Garcés Giraldo

Ingeniero Químico. Especialista en Ingeniería Ambiental. Candidato a Maestría en Ingeniería Ambiental. Profesor de la Facultad de Ingenierías. Investigador grupo GAMA. Corporación Universitaria Lasallista.

Recepción: 16 de julio de 2007 | Aceptación: 15 de septiembre de 2007

Resumen

El sistema de electrocoagulación juega un papel muy importante en la efectividad de remoción de contaminantes. Algunos aspectos de diseño a tener en cuenta están relacionados con la celda, los electrodos, los materiales de este, la geometría y la disposición de los electrodos son fundamentales para que la aplicación de la electrocoagulación tenga resultados óptimos. Con base en la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de una industria láctea, se diseñó un sistema de electrocoagulación para estudiar el comportamiento de los diferentes parámetros involucrados en la remoción de contaminantes. La investigación permitió establecer la geometría tanto de la celda como de los electrodos, materiales y tipo de conexión, adicionalmente determinar los parámetros eléctricos de la fuente de voltaje.

Palabras Clave

Electrocoagulación
Celda tipo bach
Electrodo de hierro
Electroquímica

Designing an electrocoagulation cell to treat wastewater in dairy industries

Abstract

The electrocoagulation system plays a primary role for an effective removal of pollutants. Several design aspects to be considered have to do with the cell, the electrodes, its materials, geometry, and electrode arrangement. They are essential for electrocoagulation to deliver optimal results. Based on a wastewater's physico-chemical characterization in dairy industry, an electrocoagulation system was designed. The system was intended to study the behavior of the various parameters involved in the pollutants removal. The research helped to establish electrodes geometry, materials and the type of plug, as well as to define the voltage source's electrical settings.

Key Words

Electrocoagulation
Batch cell
Iron electrode
Electrochemistry

Introducción



La electroquímica es una tecnología que en las últimas décadas ha tenido muchas aplicaciones industriales y se ha desarrollado rápidamente ofreciendo varias alternativas que compiten ventajosamente con distintos procesos.

Efluentes líquidos de diferentes procesos industriales se han tratado por electrocoagulación (Koby, 2003 y Ping, 2005), obteniendo resultados alentadores en la remoción de contaminantes, hecho que ha despertado el interés de la industria por investigar e implementar esta tecnología en el tratamiento de sus aguas residuales (Holt, 1999).

Tradicionalmente los contaminantes presentes en las aguas residuales han sido eliminados por coagulación química, mediante la adición de agentes químicos que propician la neutralización de las cargas de partículas que se encuentran suspendidas o en forma coloidal, dando como resultado la disminución de las repulsiones entre partículas, que son aglomeradas para su posterior precipitación.

La electrocoagulación es una alternativa a la coagulación química. En los procesos electrolíticos

el coagulante se forma por las reacciones de oxidorreducción que ocurren entre los electrodos y el medio acuoso y son promovidas por la corriente eléctrica (Mollah, 2001).

La celda electroquímica o reactor para la electrocoagulación puede ser tipo batch o continuo. En su forma más simple el reactor batch es una cubeta en la cual, los electrodos se disponen en forma de placas paralelas conectados en serie a una fuente de voltaje (Mollah, 2001). El volumen de la celda ocupada por los electrodos se define como zona de reacción, en esta se dan los procesos de desestabilización de partículas, coagulación y sedimentación. Los lodos formados pueden depositarse en la parte superior de la celda cuando su densidad es baja o precipitar cuando su densidad es alta, para luego ser removidos.

El reactor tipo batch tiene importancia a nivel de laboratorio ya que permite el estudio del proceso y los parámetros a ser controlados.

1. Materiales y métodos

Para el diseño y construcción de la celda de electrocoagulación se utilizó un agua residual de una industria láctea. Se tomaron tres muestras del tanque de homogenización de las aguas residuales

de esta industria, se midieron el pH, la conductividad, DQO y grasas y aceites tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Características fisicoquímicas del agua residual

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
pH	10.02	11.49	10.92
Conductividad(μ S/cm)	1925	2980	2450
DQO (p.p.m)	5697	6306	6175
Grasas y aceites (p.p.m)	581	782	678

Estas características jugaron un papel fundamental durante el desarrollo de la investigación ya que de éstas dependieron los parámetros de diseño del sistema de electrocoagulación, dichos parámetros fueron:

- Distancia entre electrodos.
- Selección del electrodo de sacrificio
- Configuración de la celda de electrocoagulación.
- Parámetros eléctricos como voltaje y amperaje de la fuente.
- Dimensiones y número de electrodos.

2. Resultados y discusión

2.1 Determinación de la distancia apropiada entre electrodos. Durante las pruebas exploratorias se observó que para separaciones entre electrodos inferiores a 10 mm los tratamientos se hacen prolongados, adicionalmente se presentaron atascamientos por deposición de lodo sobre la superficie de los electrodos, impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecen la coagulación dando como resultado bajas remociones de DQO como se muestra en la Figura 1.

Para distancias entre electrodos mayores a 10 mm no se presentaron cambios importantes en el proceso, en comparación con los resultados obtenidos a 10 mm. Lo anterior sugiere que por

aspectos técnicos la separación entre electrodos que permite un proceso de electrocoagulación con buenas remociones de DQO y grasas y aceites es de 10 mm (Figura 2).

2.2 Determinación de los niveles para los factores pH, densidad de corriente y tiempo.

Durante las pruebas exploratorias se probó electrodo de sacrificio tanto de hierro como de aluminio, se varió el pH y la densidad de corriente para las cuales se midieron las remociones de DQO y de grasas y aceites a 5, 10, 15 y 20 minutos. Los resultados se presentan en la Figura 1, en la cual se observa que la eficiencia en la remoción incrementa con el aumento de la distancia entre electrodos, el aumento de densidad de corriente y el tiempo.

Los resultados presentados en la figura 2 muestran que se pueden conseguir eficiencias altas en la remoción de DQO a densidades de corriente inferiores a las trabajadas en los tratamientos mostrados en la Figura 1, esto cuando se disminuye el pH.

Analizando los tiempos del proceso de electrocoagulación, tanto de los resultados presentados en la Figura 1 como en la 2, se puede ver que entre los 15 y los 20 minutos las pendientes de las curvas tienen una tendencia a disminuir, lo cual sugiere que los tratamientos tienen su mayor efectividad en los primeros 15 minutos.

Figura 1. Remociones de DQO para pH de 8,50, diferentes densidades de corriente y distancias entre electrodos y electrodo de sacrificio de hierro

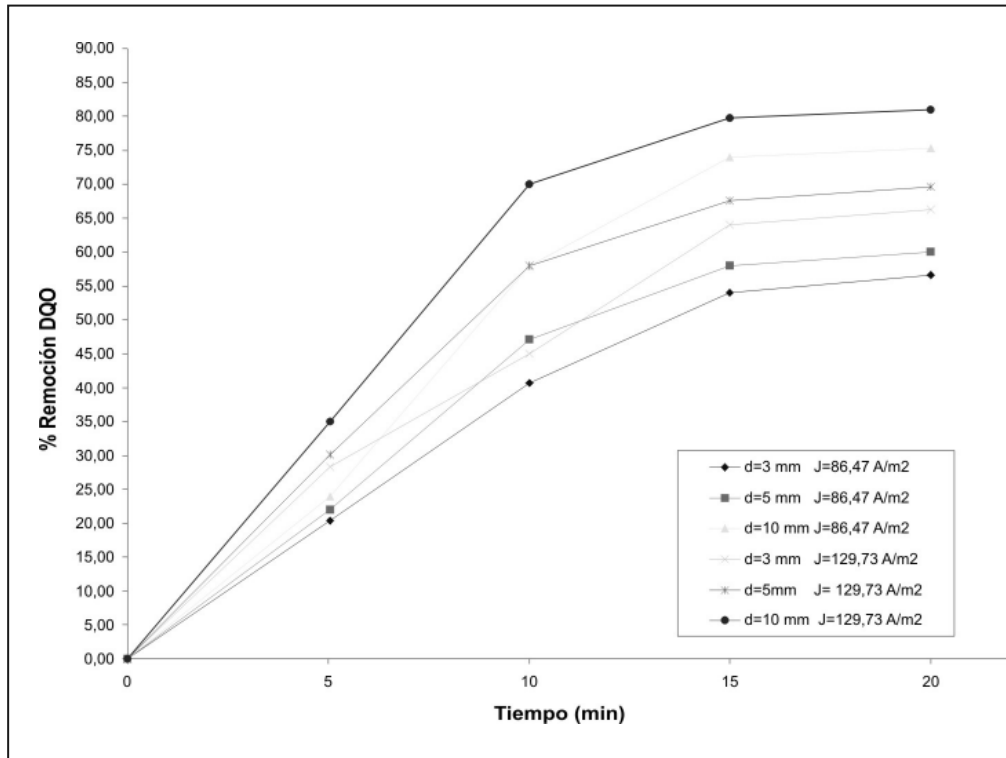
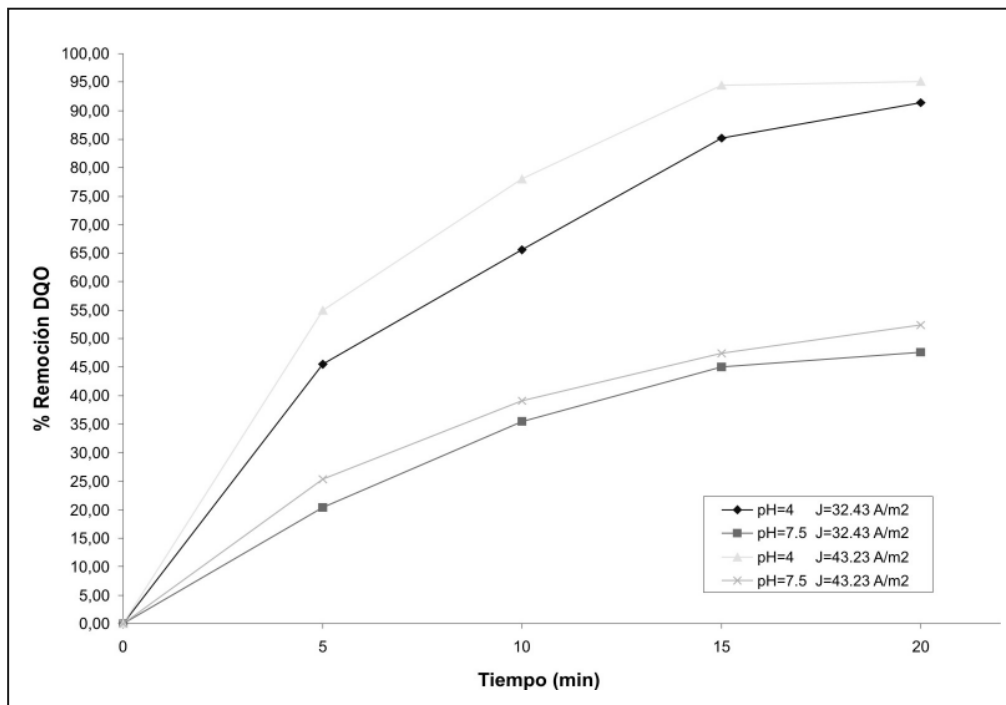
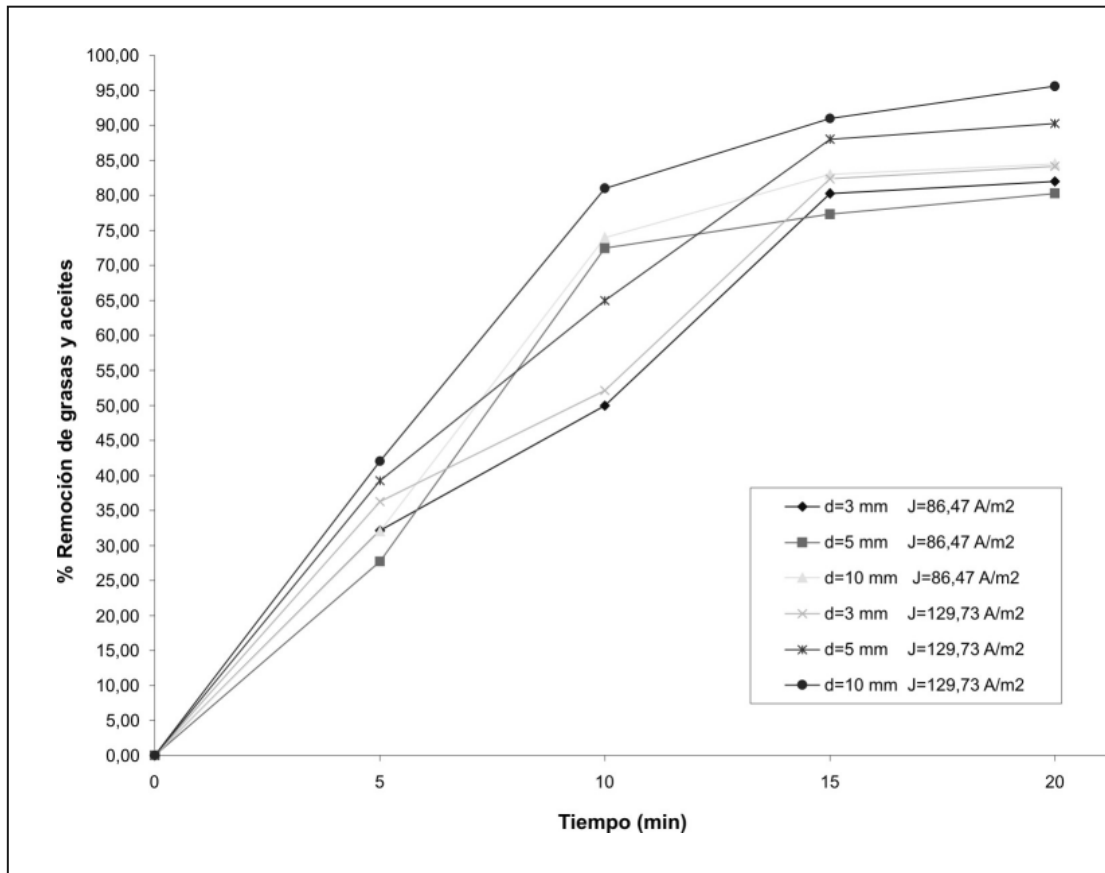


Figura 2. Remoción DQO para separación entre electrodos de 10 mm con electrodo de sacrificio de hierro



La Figura 3 muestra los porcentajes de remoción de grasas y aceites a densidades de corriente de 86,47 y 129,73 A/m² para distancias entre electrodos (d) de 3, 5 y 10 mm y pH de 8,5.

Figura 3. Remociones de grasas y aceites para pH de 8,50, diferentes densidades de corriente y distancias entre electrodos y electrodo de sacrificio de hierro



Aunque el comportamiento de las diferentes curvas es disímil en comparación al presentado por la remoción de DQO mostrado en la Figura 1, se observa la tendencia de un aumento del porcentaje de remoción con el aumento de la densidad de corriente y de la distancia entre los electrodos.

Las remociones tanto de grasas y aceites como las de DQO obtenidas con electrodo de hierro son altas y ante el hecho que los costos del hierro son menores al del aluminio se realizó un sondeo realizando pruebas con electrodo de sacrificio de aluminio a las condiciones de densidad de corriente y pH para las cuales se dieron las mejores remociones con electrodo de hierro y sólo midiendo DQO a los 20 minutos.

Los datos aparecen en la Tabla 2, en la cual se puede observar que las remociones son menores para el proceso manteniendo electrodo de sacrificio de aluminio.

El análisis de los resultados obtenidos con estas variaciones, muestra que se obtienen mejores remociones manteniendo electrodo de sacrificio de hierro (electrodo que se desgasta) a pH bajos y adicionalmente con 15 minutos de tratamiento son suficientes.

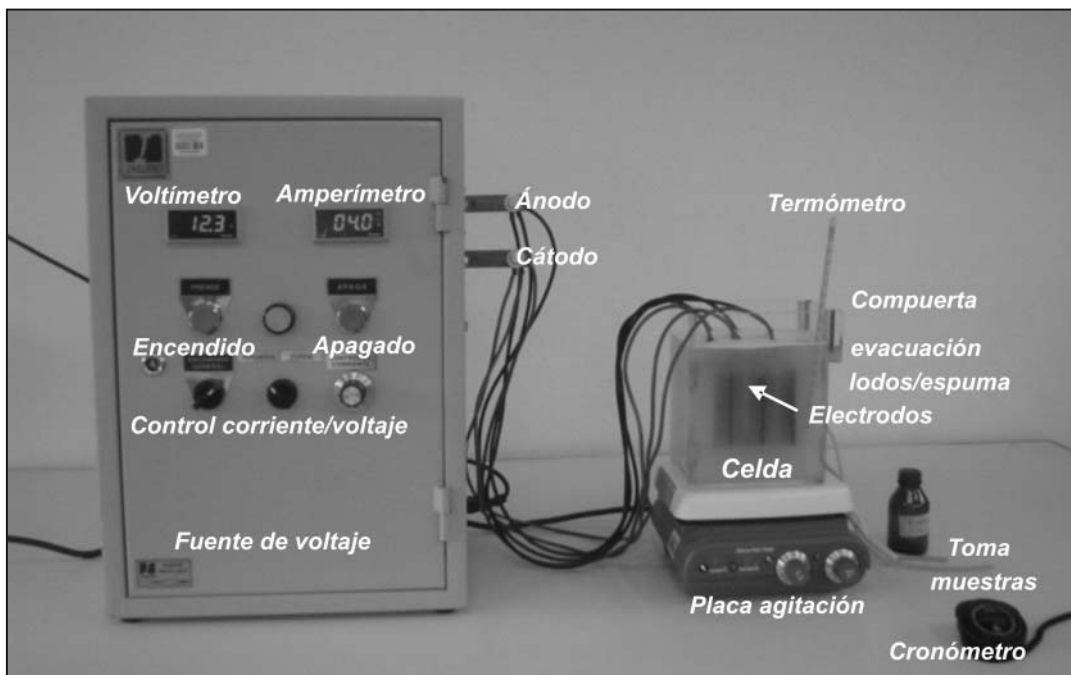
2.3 Diseño, construcción y montaje del sistema de electrocoagulación. El sistema (Fotografía 1) opera como reactor *batch* a escala prototipo, con capacidad para tratar dos litros de aguas residuales.

Consta de una celda electrolítica de dos litros en la cual están sumergidos los electrodos, estos electrodos son placas rectangulares metálicas de hierro y aluminio dispuestas en paralelo y conectadas a una fuente de voltaje de corriente directa que proporciona la corriente eléctrica requerida para la electrocoagulación. La fuente de voltaje posee controles de corriente y voltaje regulables e independientes.

Tabla 2. Valores de los porcentajes de remoción de DQO utilizando electrodo de sacrificio tanto de aluminio como de hierro y medidos a 20 minutos

pH	% Remoción de DQO			
	densidad de corriente 32,43 A/m ²		densidad de corriente 43,23 A/m ²	
	electrodo de Al	electrodo de Fe	electrodo de Al	electrodo de Fe
4	82,01	91,4	85,58	95,10
7,5	42,79	47,60	46,36	52,40

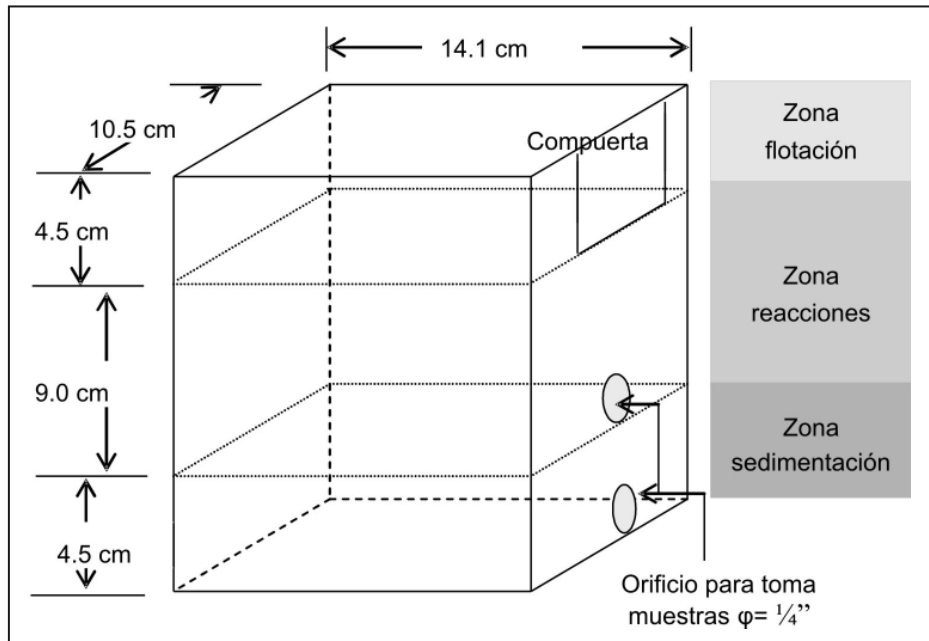
Fotografía 1. Montaje del sistema para electrocoagulación



La celda reposa sobre una placa de agitación magnética con la finalidad de proporcionar agitación al agua residual. Como instrumentos complementarios están el termómetro para hacer seguimiento a la temperatura durante el proceso y el cronómetro.

2.4 Celda de electrocoagulación. La celda para electrocoagulación se diseñó considerando una distribución volumétrica que contempla tres

regiones: una región superior para el depósito de los lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas, llamada zona de flotación, una región media de reacciones electroquímicas, llamada zona de reacción en donde se encuentran los electrodos y una región inferior, llamada zona de sedimentación donde se depositan los lodos de precipitación o lodos más densos. Esto se puede observar en la Figura 4.

Figura 4. Dimensiones de la celda para electrocoagulación

La zona de flotación y la de sedimentación equivalen cada una a $\frac{1}{4}$ del volumen total de la celda (2.7 l), y la zona de reacción equivale a $\frac{2}{4}$ partes. La celda fue provista de una compuerta para evacuar la espuma producida por las burbujas de hidrógeno generado en las reacciones electrolíticas, además de dos llaves para tomar las muestras a ser analizadas, una de esas llaves está

ubicada en la zona de reacciones y la otra en la zona de sedimentación.

En las Figuras 5 y 6 se muestran los detalles de la compuerta para espumas y la ubicación de los orificios para la toma de las muestras y finalmente en la Fotografía 2 se observa la celda terminada.

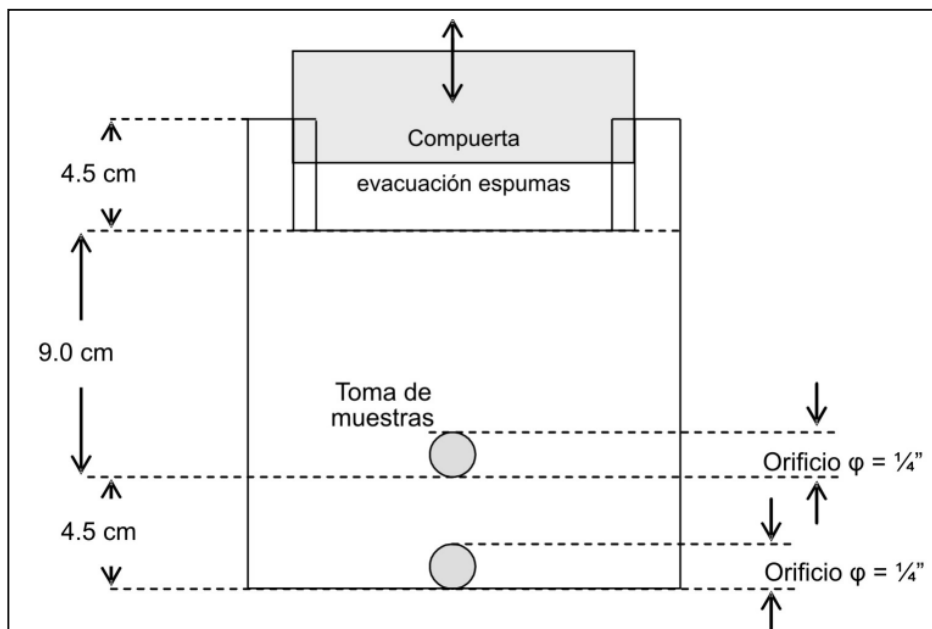
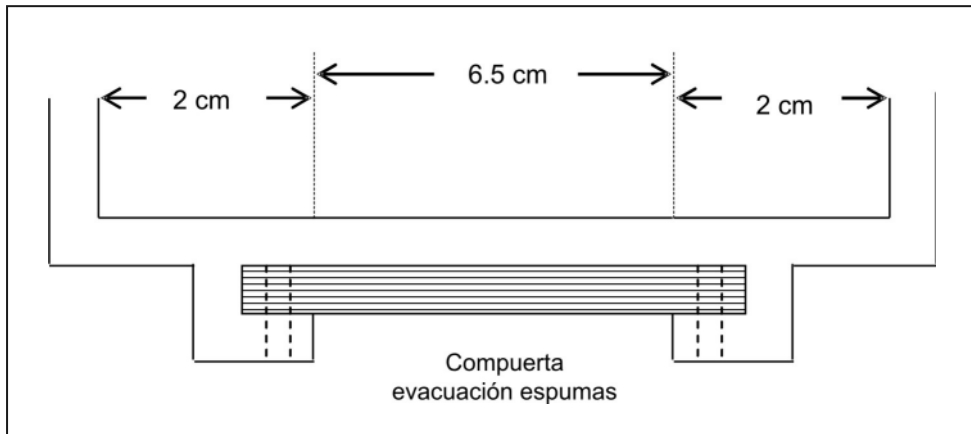
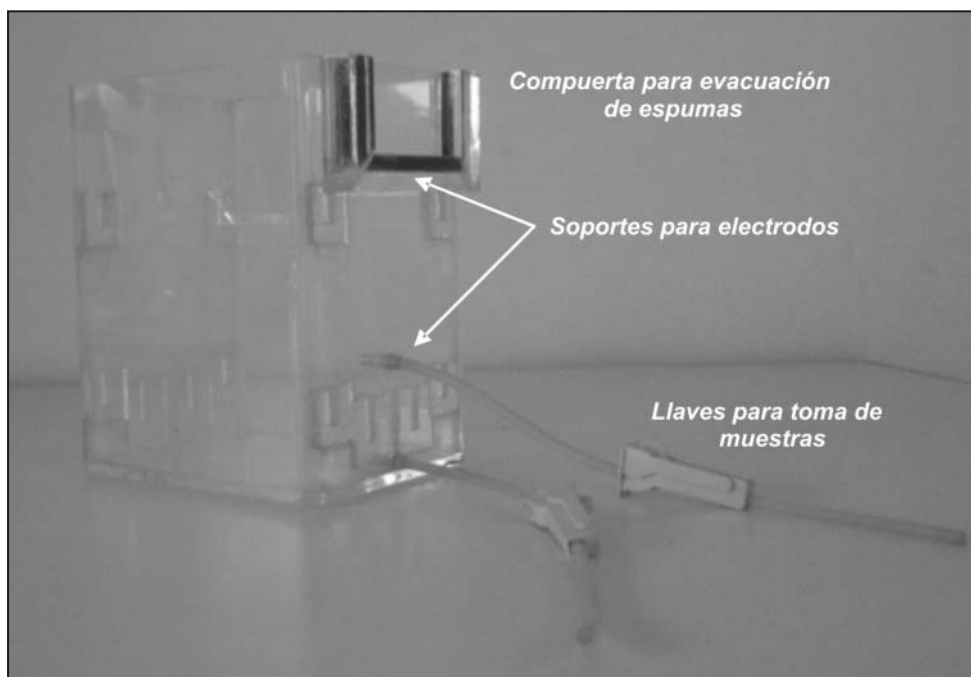
Figura 5. Detalle cara toma de muestras y evacuación de lodos

Figura 6. Vista superior del sistema de evacuación de lodos**Fotografía 2.** Celda electroquímica

2.4 Selección del material de los electrodos, número de electrodos y dimensiones. Se probaron electrodos de hierro y aluminio por las siguientes razones:

- Disponibilidad de los metales.
- Son materiales relativamente baratos.
- Amplia información bibliográfica en la que se reportan buenas remociones de contaminantes con estos materiales en la electrocoagulación,

adicionalmente son los metales más utilizados en el proceso (Kobya, 2003 y Chen, 2002).

Los electrodos se diseñaron como placas rectangulares dispuestas en serie. Comercialmente estos metales se encuentran disponibles como láminas de 3 mm de espesor. Se estableció una distancia de 2 cm entre el arreglo de placas y cada una de las caras laterales de la celda, para permitir de esta forma el flujo del agua residual durante la

electrólisis. Una distancia de 1.25 cm entre la cara frontal y los electrodos, igualmente 1.25 cm entre estos y la cara posterior de la celda.

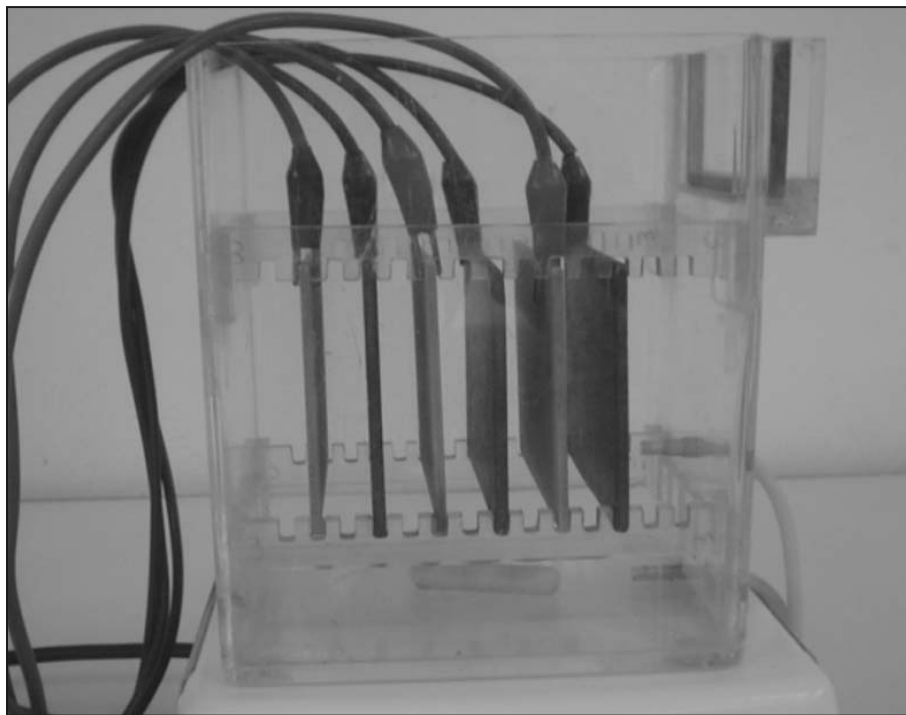
El número de electrodos se determinó suponiendo una separación máxima entre electrodos de 14 mm más 3 mm del espesor de cada placa, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{ancho de celda}) - 2 * (\text{dist. electrodos a cara lateral})}{(\text{dist. máxima entre electrodos} + \text{espesor de placa})}$$

Entonces:
$$\text{Número de electrodos} = \frac{140 - 2 * 20}{(14 + 3)} = 5.88 \approx 6$$

De esta forma se tienen tres placas de un metal conectadas al ánodo y las otras tres placas del otro metal conectadas al cátodo, todo esto formando un arreglo intercalado y en paralelo de electrodos como se puede observar en la Fotografía 3. Adicionalmente los electrodos deben tener una altura igual a la altura de la zona de reacción en la celda, esto es 9 cm.

Fotografía 3. Disposición de los electrodos en la celda



2.5 Fuente de voltaje. Para el diseño de la fuente se establecieron los rangos de corriente eléctrica y voltaje de trabajo con base en una densidad de corriente de 50 a 110 A/m² rango promedio reportado en la bibliografía con buenos resultados en la remociones de contaminantes, adicionalmente teniendo en cuenta la conductividad de las aguas residuales a tratar y de acuerdo con

las características fisicoquímicas del muestreo preliminar (Tabla 1) y con la ayuda de la Ecuación (1), que permite realizar un estimativo de estos parámetros eléctricos. Así se llegó a los resultados mostrados en la Tabla 3.

El voltaje total requerido en la celda de electrocoagulación se calculó de acuerdo a la

forma de conexión de los electrodos, de forma bipolar, en la cual el voltaje total que entrega la fuente se calcula.

En el caso de la conexión monopolar el voltaje total será igual al voltaje entre los electrodos (U_0). En el caso de la conexión bipolar el voltaje se calcula como (Chen, 2002):

$$U = (N - 1) U_0 \quad \text{Ecuación 1}$$

Con:

U_0 : voltaje entre los electrodos

N : número de electrodos.

U : voltaje total.

Con estos valores como parámetros mínimos requeridos en la experimentación, se construyó una fuente con corriente máxima de 25 A y voltaje de 16 V. Obteniendo de esta manera, un equipo con mayor posibilidad de movilidad por rangos más amplios de voltaje y amperaje.

La fuente tiene dos controles, uno para variar el voltaje y otro para variar la corriente eléctrica, la medición de la corriente eléctrica se realiza con un amperímetro digital cuya escala es de 0.1 A y el voltaje se mide en un voltímetro digital con escala de 0.1V, todo el equipo tiene conexión a 110 V ac monofásico.

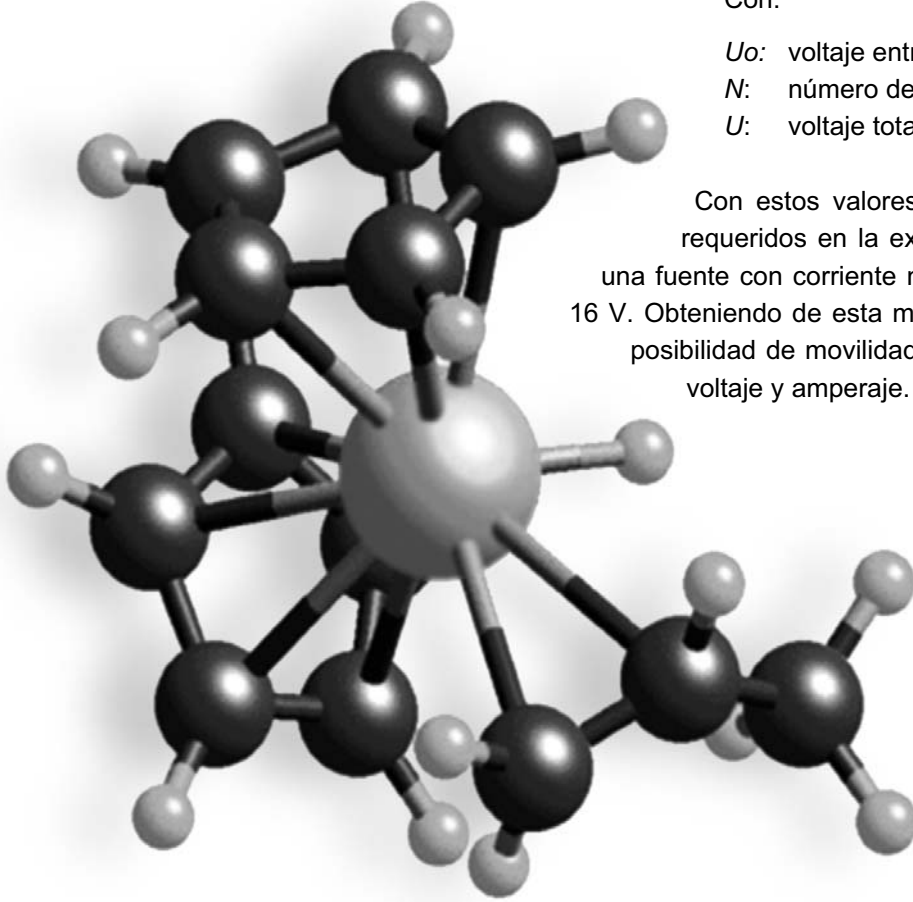


Tabla 3. Valores estimados para los parámetros eléctricos de la fuente de voltaje

Conductividad Agua residual ($\mu\text{S/cm}$)		Área de los electrodos (m^2)	Voltaje estimado (V)	Amperaje estimado (A)
Muestreo 1	1925	0.0925	12	5
Muestreo 2	2980			
Muestreo 3	2450			

Conclusión

El sistema de electrocoagulación que permitirá el estudio del comportamiento de las aguas residuales de la industria láctea está conformado por una fuente de voltaje que entrega una corriente eléctrica de 25 A al medio acuoso, una celda con capacidad para contener dos litros de agua residual que contempla tres zonas: reacciones electroquímicas, sedimentación y flotación y seis electrodos: tres de hierro y tres de aluminio dispuestos en forma alternada y conexión en paralelo y separados por 10 mm.

Bibliografía

Adhoum, Nafaâ *et al.* 2004. "Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr(VI) by electrocoagulation". In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol.112. No. 3. (aug. 2004). pp. 207-213.

Bayramoglu, Mahmut, *et al.* 2004. "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater". In: *Separation and Purification Technology*. Vol. 37. No. 2. (jun. 2004). pp. 117-125.

Brillas, Enric and Casado, Juan. 2002. "Aniline degradation by Electro-Fenton- and peroxicoagulation processes using a flow reactor for wastewater reactor for wastewater treatment". In: *Chemosphere*. Vol. 47, No. 3 (apr. 2002). pp. 241-248.

Chen, Guohua. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. In: *Separation and Purification Technology*. Vol. 38. No. 1. (jul. 2004). pp. 11-41.

Chen, Xueming, Chen, Guohua, and Yue, Po Lock. 2002. "Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation". In: *Chemical Engineering Science*. Vol. 57. No. 13 (jul. 2002). pp. 2449 - 2455.

Ge, Jiantuan *et al.* 2004. "New bipolar electrocoagulation- electroflotation process for the treatment of laundry wastewater". In: *Separation and Purification Technology*. Vol. 36. No. 1 (apr. 2004). pp. 33-39.

Holt, Peter K.; Barton, Geoffrey W. and Mitchell, Cynthia A. 2005. "The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology". In: *Chemosphere*. Vol. 59. No. 3 (apr. 2005). pp. 355-367.

_____. 1999. "Electrocoagulation as a Wastewater Treatment". In: *Annual Australian Environmental Engineering Research*. (3: 1999: Castlemaine, Victoria). Proceedings The Third Annual Australian Environmental Engineering Research Event. Castlemaine, Victoria: The Event, 1999.

Jiang, Jia-Qian. *et al.* 2002. "Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment". In: *Water Research*. Vol. 36.No. 16 (sep. 2002). pp. 4064- 4078.

Kim, Tak-Hyun *et al.* 2002. Pilot scale treatment of textile wastewater by combined process: fluidized biofilm process-chemical coagulation- electrochemical oxidation". In:

Water Research. Vol. 36. No. 16 (sep. 2002). pp. 3979–3988.

Kobyas, Mehmet, CAN, Orhan Taner and Bayramoglu, Mahmut. 2003. "Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes". In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 100. Nos. 1-3 (jun. 2003). pp.163-178.

_____. 2003. "Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes". In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 100. Nos. 1-3 (jun. 2003). pp. 163-178.

Mejía Zapata, Claudia Isabel y Osorio Echeverri, Victor Manuel. 2003. "Decoloración de aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación". En: *Revista Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia*. Medellín. No. 29 (jun. 2003). pp.115-118.

Mollah, M. Yousuf A. *et al.* 2001. "Electrocoagulation (EC)- Science and applications". In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 84. No. 1 (jun. 2001). pp. 29-41.

Ping, Gao, *et al.* 2005. "Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electro flotation without a filter". In: *Separation and Purification Technology*. Vol. 43. No. 2 (may. 2005). pp. 117-123.

Rajeshwar, Krishnan and Ibáñez, Jorge. 1997. *Environmental electrochemistry: Fundamentals and Applications in pollution abatement*. San Diego, California: Academic Press. 776 p.