



# Análisis de costos de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea\*

Álvaro Arango Ruíz<sup>1</sup> / Luis Fernando Garcés Giraldo<sup>2</sup> /  
Sara Molina Gallo<sup>3</sup> / Jaime Sebastián Piedrahita Arias<sup>3</sup>.

Línea de investigación: Tratamiento de aguas. Grupo de Investigación GAMA y Semillero SIGMA.

**Cost analysis of the electrocoagulation  
of wastewater from dairy industries**

**Análise de custos do eletro-coagulação  
de águas residuais da indústria láctea**

## RESUMEN

**Introducción.** Las aguas residuales de la industria láctea se caracterizan por tener una gran carga orgánica representada en DQO y grasas. Estos contaminantes generan un impacto importante sobre el medio ambiente, especialmente en el recurso hídrico. La electrocoagulación es un proceso que se ha venido desarrollando en los últimos años y que se presenta como alternativa de tratamiento para las aguas residuales de esta industria, ofreciendo múltiples ventajas comparativas con las tecnologías tradicionales.

---

\* Investigación financiada con apoyo del Fondo de Fomento a la Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista.

<sup>1</sup> Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana, profesor de la Facultad de Ingenierías de la Corporación Universitaria Lasallista/Coordinador del Semillero de Investigación en Gestión y Medio Ambiente – SIGMA y miembro del Grupo de Investigación GAMA/ <sup>2</sup> Ingeniero Sanitario, Magíster en Ingeniería Ambiental, Especialista en Cuencas Hidrográficas, y Especialista en Ingeniería Ambiental. Decano Facultad de Ingenierías, Corporación Universitaria Lasallista. Director Grupo de Investigación GAMA/ <sup>3</sup> Estudiantes de Ingeniería Ambiental de la Corporación Universitaria Lasallista. Semillero de investigación SIGMA.

Correspondencia: Álvaro Arango Ruíz. e-mail: alarango@lasallista.edu.co

Fecha de recibo: 12/04/2008; fecha de aprobación: 08/08/2008

**Objetivo.** Estimar los costos de montaje y operación de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea y compararlos con los costos de un proceso de coagulación química.

**Materiales y métodos.** Las aguas residuales de la industria láctea fueron tratadas por electrocoagulación utilizando un proceso batch, con la finalidad de encontrar las mejores condiciones para la remoción de sus contaminantes DQO y grasas, posteriormente, con estos resultados se trataron las aguas en continuo a las variables de respuesta medidas, que fueron porcentajes de remoción de DQO, grasas y aceites. El proceso fue escalado y se realizó un análisis tanto de los costos operativos como de montaje, que luego se compararon con los costos de la coagulación química.

**Resultados.** Los costos operativos para la electrocoagulación son el 80,75% de los costos operativos de la coagulación química y los costos de montaje de la electrocoagulación son la mitad de los costos para el montaje de la coagulación química. **Conclusión.** La electrocoagulación se vislumbra como un tratamiento eficiente, tanto desde lo técnico como desde lo económico para la remoción de contaminantes de las aguas residuales de la industria láctea.

**Palabras clave:** Electrocoagulación. Electrodo de hierro. Electroquímica. Aguas residuales. Industria láctea. Costos.

## ABSTRACT

**Introduction.** Waste Waters from the Dairy industries are highly loaded with organic matter (DQO- Chemical Oxygen Demand in Spanish- and fat). These pollutants have a considerable impact on the environment, especially on water. Electrocoagulation is a process that has been developed recently and is an alternative for treating waste waters from the dairy industries, offering advantages in comparison to the traditional technologies.

**Objective.** To calculate the costs of implementing and operating electrocoagulation in a dairy industry, and comparing them with those from chemical coagulation.

**Materials and methods.** The waste water from a dairy industry was treated by using electrocoagulation, using a batch process in order to find better conditions to remove its DQO and fat pollutants. Later, the waters were treated continuously, according to the response variables measured (percentages of removal of DQO, oils and fat), with these results. The process was escalated and the costs of implementation and operation were compared to those from chemical coagulation.

**Results.** The operative costs of electrocoagulation are 80,75% of the operative costs of chemical electrocoagulation, and the implementation costs of electrocoagulation are half the costs of chemical electrocoagulation. **Conclusion.** Electrocoagulation shows itself as an efficient treatment both technical and economically, for removing pollutants from waste water in dairy industries.

**Key words.** Electrocoagulation. Iron electrode. Electrochemistry. Waste water. Dairy industries. Costs.

## RESUMO

**Introdução.** As águas residuais da indústria láctea se caracterizam por ter um grande ônus orgânica representada em DQO e gordurosas, estes contaminantes geram um impacto impor-

tante sobre el medio ambiente especialmente en el recurso hídrico. La electrocoagulación es un proceso que se viene desarrollando en los últimos años y que se presenta como alternativa de tratamiento para las aguas residuales de esta industria, ofreciendo múltiples ventajas comparativas con las tecnologías tradicionales.

**Objetivo.** Estimar los costos de montaje y operación de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea y compararlos con los costos de un proceso de coagulación química.

**Materiales e métodos.** Las aguas residuales de la industria láctea fueron tratadas por electrocoagulación utilizando un proceso batch con la finalidad de encontrar las mejores condiciones para la remoción de sus contaminantes DQO y grasas, posteriormente con estos resultados se trataron las aguas en continuo a las variables de respuesta medidas fueron porcentajes de remoción de DQO y grasas y aceites. El proceso fue escalado y se realizó un análisis tanto de los costos operativos y de montaje que se compararon con los costos de la coagulación química.

**Resultados.** Los costos operativos para la electrocoagulación son el 80,75% de los costos operativos de la coagulación química y los costos de montaje de la electrocoagulación es la mitad de los costos para el montaje de la coagulación química. Conclusión. La electrocoagulación se vislumbra como un tratamiento eficiente tanto técnica como económicamente para la remoción de contaminantes de las aguas residuales de la industria láctea.

**Palabras clave:** Electrocoagulación. Electrodo de hierro. Electroquímica. Aguas residuales. Industria láctea. Costos.

## INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales son la emisión más contaminante que procede de la industria láctea. Se componen principalmente de azúcares disueltos, proteínas, grasas, residuos de aditivos y de agentes limpiadores y desinfectantes que son utilizados en los procesos de lavado y los circuitos de limpieza (CIP). Estos componentes, que se encuentran en estado coloidal o disueltos, tienen un gran potencial orgánico, provocando una contaminación biodegradable. Es por esto que los parámetros más importantes en la caracterización de sus contaminantes son la demanda biológica de oxígeno DBO, que usualmente se encuentra entre 0,8 y 2,5 kilogramos por tonelada; la demanda química de oxígeno DQO que alcanza a ser 1,5 veces la DBO, sólidos suspendidos del orden de 100 a 1000 mg/L y nitrógeno, que es el 6% del valor de la DBO<sup>1</sup>.

Las aguas residuales de la industria láctea también están cargadas de residuos que obstruyen las tuberías y que constituyen un excelente medio de cultivo para los microorganismos, generando acidez y fermentación. A su vez estas fermentaciones, que usualmente se dan a gran velocidad, promueven el desarrollo y crecimiento de colonias de microorganismos que alteran el buen funcionamiento de la planta de tratamiento<sup>1</sup>.

Los tratamientos que se aplican a los efluentes de desecho en la industria láctea son usualmente los tratamientos convencionales aplicados a las aguas residuales

domésticas para la remoción de contaminantes y depuración. Entre ellos que encontramos los fisicoquímicos -denominados tratamientos primarios- como son la precipitación, la coagulación, la floculación y la filtración, que son útiles para eliminar sólidos suspendidos, coloides y algunos sólidos inorgánicos disueltos, y los biológicos, que pueden ser aerobios o anaerobios. Se denominan tratamientos secundarios, y eliminan los contaminantes orgánicos.

En algunos casos se hace necesario utilizar procesos terciarios para completar el tratamiento. Estos procesos son muy específicos y eliminan, en muchos casos, la totalidad de compuestos químicos residuales que no alcanzan a ser eliminados por procesos primarios o secundarios. Los procesos terciarios más comunes son la adsorción, el intercambio iónico, la ultrafiltración y la ósmosis inversa<sup>2</sup>.

Una tecnología que ha sido investigada en las últimas décadas para el tratamiento de las aguas residuales es la electrocoagulación. Esta tecnología permite la remoción de contaminantes que se encuentran emulsionados, suspendidos o disueltos, haciendo pasar corriente eléctrica por el medio acuoso. La corriente eléctrica desestabiliza las partículas, haciéndolas precipitar para luego ser removidas por algún método de separación secundario<sup>3,4</sup>. La electrocoagulación ha venido perfilándose como una tecnología alternativa, con un amplio potencial en sus aplicaciones<sup>5-10</sup> y en sus ventajas comparativas con otras tecnologías. Estas ventajas posicionan a la electrocoagulación como una opción deseable en el mercado de ofertas de tratamiento para las aguas residuales<sup>11-13</sup>.

La investigación y estudio detallado de la electrocoagulación han aportado un acervo de información que permite establecer la gran cantidad de ventajas al decidirse por su aplicación, las cuales pueden resumirse en aspectos tan representativos como la purificación y el reciclaje del agua y la posibilidad de ahorro de ella en sitios con poca disponibilidad. Además, la disminución de la contaminación en los arroyos, ríos y mares, lugares en donde los contaminantes se presentan en altos niveles. Por otra parte la supresión del almacenaje y el mismo uso de productos químicos<sup>14</sup>. Finalmente, se puede señalar que el factor económico es trascendental por cuanto los costos de operación son menores si son comparados con aquellos procesos de la coagulación química<sup>15</sup>.

Tomando más datos sobre su aplicación y los factores que intervienen en ella, se ha concluido que la electrocoagulación es un proceso relativamente simple y ventajoso técnica, económica y ambientalmente, contribuyendo a conservar la calidad ambiental de diversas maneras<sup>15</sup>. El efecto de la electrocoagulación se concentra en la remoción de una amplia gama de contaminantes, entre ellos material orgánico e inorgánico, DBO y metales de aguas residuales de diferentes fuentes e industrias. En particular el tratamiento de aguas residuales con contenidos de grasas y aceites emulsificados, puede realizarse de manera eficiente utilizando ésta técnica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo utilizando aguas residuales de una industria láctea de Medellín. Las muestras se recolectaron del tanque de homogenización por ser éste el más representativo en cuanto a las características fisicoquímicas del agua residual láctea, ya éste toma las aguas del tanque de descarga de las aguas residuales de la empresa y las mezclas. A éstas se les analizaron: pH, DQO, conductividad eléctrica, grasas y aceites, en los laboratorios de la Corporación Universitaria Lasallista.

Los análisis se realizaron el mismo día del muestreo y de acuerdo con los procedimientos de *Standard Methods* para caracterización de aguas residuales<sup>16</sup>. La experimentación se llevó a cabo en una celda con capacidad de dos litros y que fue diseñada especialmente para esta investigación teniendo en cuenta las características del agua residual. Igualmente se diseñó y construyó una fuente de voltaje con la capacidad de suministrar hasta 25 A, de acuerdo a las necesidades de la electrocoagulación.

Se realizó una prueba de tamizado consistente en la observación del comportamiento de diferentes variables fisicoquímicas en el medio acuoso. De esta forma se recolectó información a priori que permitió determinar los valores de corriente eléctrica, distancia entre electrodos, tiempo de exposición al tratamiento, pH y material de los electrodos que llevaron a tratamientos de electrocoagulación más eficientes para ser tenidos en cuenta en el diseño experimental.

Las variables que se consideraron como factores para el diseño experimental fueron: densidad de corriente eléctrica ( $A/m^2$ ), pH inicial del agua residual y tiempo de tratamiento (min), manteniendo como electrodo de sacrificio al hierro (ánodo) como cátodo el aluminio y una distancia entre electrodos de 10mm<sup>17</sup>.

El diseño experimental fue factorial de tres factores, así: pH con niveles 4, 7, 8, densidad de corriente con los niveles 32,43 y 43,23  $A/m^2$  y tiempo con niveles de 5, 10 y 15 minutos.

Para cada uno de los experimentos se realizaron cuatro repeticiones. Las variables de respuesta fueron el porcentaje de remoción de DQO y el de grasas y aceites.

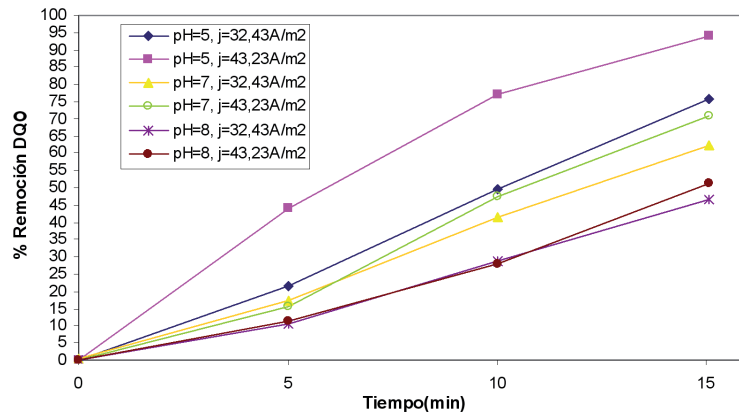
Una vez obtenidas las condiciones para las cuales se dan las mejores remociones de los contaminantes se realizó un escalado del proceso y se estimaron los costos de montaje y operación de una planta para la electrocoagulación. Finalmente, estos costos fueron comparados con el proceso de coagulación química.

## RESULTADOS

La Gráfica I muestra los resultados de remoción de DQO para las diferentes combinaciones de tratamientos según el diseño experimental. En esta Gráfica se

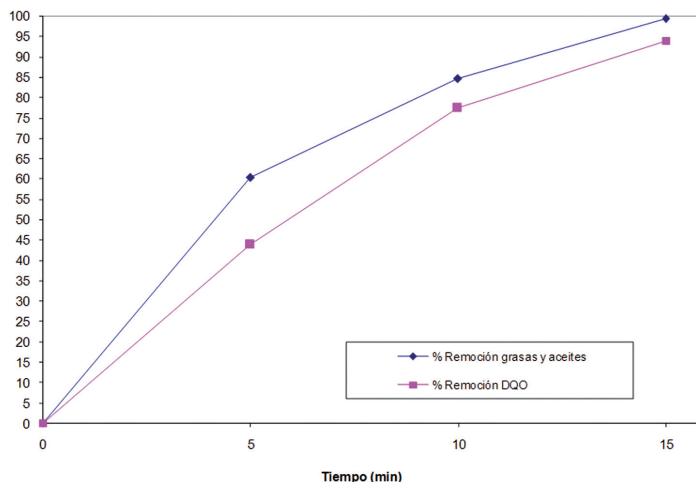
puede observar que el porcentaje de remoción de DQO aumenta a medida que se disminuye el pH y se aumentan tanto la densidad de corriente como el tiempo, obteniendo la mejor remoción de DQO del 93,99%, para pH de 5, densidad de corriente de 43,23 A/m<sup>2</sup> y en un tiempo de 15 minutos.

**Gráfica 1. Porcentaje de remoción de DQO para los diferentes tratamientos**



La Gráfica 2 muestra los porcentajes de remoción de DQO y de grasas y aceites para la combinación del ensayo que arrojó las remociones más altas de DQO, esto es pH de 5 y densidad de corriente de 43,23 A/m<sup>2</sup>. Estas dos curvas guardan una proporcionalidad debido a que las grasas y aceites hacen parte de la materia orgánica cuantificada como DQO. La curva de remoción de grasas y aceites está por encima de la remoción de DQO para todos los tiempos, lo que indica una alta eficiencia de la electrocoagulación en la eliminación de estas sustancias.

**Gráfica 2. Porcentajes de remoción de DQO y de grasas y aceites para la combinación del ensayo**



Se muestra en la Foto 1 la apariencia del agua residual durante el proceso de electrocoagulación. Puede observarse el resultado final, luego de 15 minutos de tratamiento (recipiente de la derecha). El agua presenta un aspecto cristalino, con las partículas de lodo viajando a la superficie.

**Foto 1. Apariencia del agua residual durante el proceso de electrocoagulación: sin tratamiento (izquierda) y con tratamiento a los 10 (medio) y 15 minutos (derecha).**



**Escalado del proceso de electrocoagulación.** Para determinar los costos del proceso de electrocoagulación y su posterior comparación con los costos de la coagulación química, fue necesario realizar un escalado del proceso de electrocoagulación. Para ello se realizaron varias pruebas en flujo continuo, teniendo como base los tratamientos que produjeron las mayores remociones de DQO de las pruebas bach.

Con los resultados del proceso a flujo continuo se realizó el escalado del proceso, esto es, se determinó la corriente eléctrica necesaria para tratar  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ , manteniendo la densidad de corriente eléctrica del proceso a escala de laboratorio especificada en la Tabla 1, al igual que el porcentaje de remoción de DQO.

El escalado se realizó considerando la proporcionalidad directa de los factores  $I_i/Q_i$  y  $I_f/Q_f$  según la ecuación:

$$\frac{I_i}{Q_i} = \frac{I_f}{Q_f}$$

Con:

$I_i$ : corriente eléctrica del proceso a nivel de laboratorio.

$I_f$ : corriente eléctrica del proceso escalado.

$Q_i$ : flujo ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) del proceso a nivel de laboratorio.

$Q_f$ : flujo ( $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ) del proceso escalado.

Tabla I. Resultados de pruebas de electrocoagulación a flujo continuo

pH	Corriente (A)	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	Flujo (m <sup>3</sup> /h)	% Remoción de DQO	Lodo producido (g/l)
5	4	43,23	0,010 0,013	94,1 75,5	185,02 130,02
	3	32,43	0,010 0,013	74,7 51,6	130,02 110,02
7	4	43,23	0,010 0,013	70,3 47,1	125,02 90,01
	3	32,43	0,010 0,013	59,6 38,4	118,02 80,01
8	4	43,23	0,010	49,4	103,01

Con el valor de  $I_f$  se estimó el voltaje a la entrada de la fuente (corriente alterna) necesaria para el proceso de acuerdo con la ecuación:

$$V = 0,143 I + 0,5509.$$

**DONDE:**

$V$ : voltaje corriente alterna (a la entrada de la fuente de voltaje) en V.

$I$ : corriente eléctrica en A.

Esta correlación se estableció midiendo el voltaje de corriente alterna a la entrada de la fuente de voltaje (voltaje corriente alterna) para diferentes intensidades de corriente eléctrica. En la Tabla 2 se presentan los resultados del escalado.

Tabla 2. Escalado del proceso de electrocoagulación.

pH	Corriente (A) (A/m <sup>2</sup> )	Flujo (m <sup>3</sup> /h)	% Remoción de DQO	Corriente $I_f$ (A)	Voltaje CA (V)
5	43,23	0,010 0,013	94,0 75,5	399,9 300,0	57,74 43,46
	32,43	0,010 0,013	74,7 51,6	299,9 225,0	43,44 32,73
7	43,23	0,010 0,013	70,3 47,1	399,9 300,0	57,74 43,46
	32,43	0,010 0,013	59,6 38,4	299,9 225,0	43,44 32,73
8	43,23	0,010	49,4	399,9	57,74

La Tabla 3 presenta las características, requerimientos de insumos y producción de lodos para la electrocoagulación de 1 m<sup>3</sup>/h de aguas residuales de la industria láctea para diferentes porcentajes de remoción de DQO.

**Tabla 3. Requerimientos para la electrocoagulación de 1 m<sup>3</sup>/h de aguas residuales de la industria láctea y producción de lodos**

pH	Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	% Remoción de DQO	Masa de Fe gastado (g/m <sup>3</sup> )*	KWh /m <sup>3</sup> consumido	Ácido para bajar pH desde 10.5 (g/m <sup>3</sup> )	Lodo húmedo (Kg/m <sup>3</sup> )
5	43,23	94,1 75,5	277,73 208,36	23,09 13,04	15,75	185,02 130,02
	32,43	74,7 51,6	208,30 156,27	13,03 7,36		130,02 110,02
7	43,23	70,3 47,1	277,73 208,36	23,09 13,04	15,50	125,02 90,01
	32,43	59,6 38,4	208,30 156,27	7,36 13,03		118,02 80,01
8	43,23	49,4	277,73	23,09	15,44	103,01

\* Calculada de acuerdo con la ecuación de Faraday.

**Costos operativos para el proceso de electrocoagulación.** La Tabla 4 presenta los costos de reactivos y energía para la electrocoagulación.

**Tabla 4. Costos de los insumos**

Insumo	Costo en pesos
Energía eléctrica \$/Kw-h zona industrial Medellín	256,42
Hierro \$/ kg	1.913,4
Ácido sulfúrico \$/g	3,747

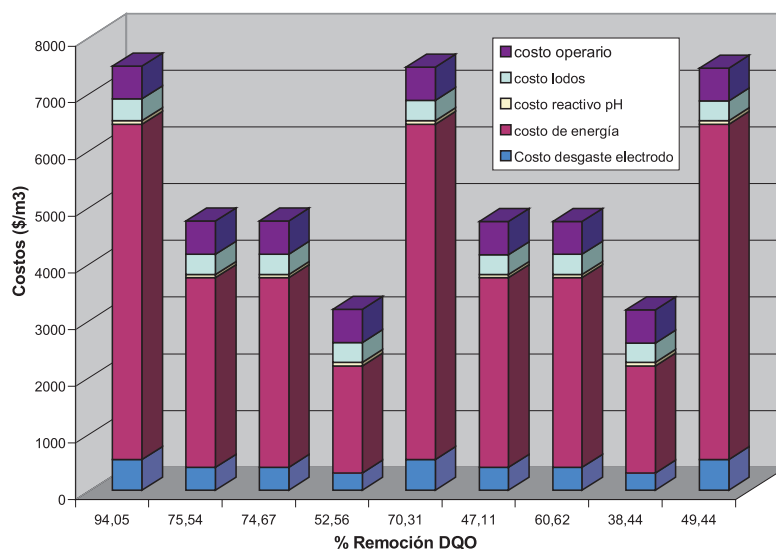
La Tabla 5 muestra los costos de operación para tratar 1 m<sup>3</sup>/h de aguas residuales. Se presentan en forma discriminada y los totales para los porcentajes de remoción de DQO establecidos en la Tabla 1.

La Gráfica 3 presenta los costos operativos totales para los diferentes porcentajes de remoción de DQO. Adicionalmente se muestran los costos correspondientes a los insumos y a la mano de obra, permitiendo analizar el comportamiento de los costos a diferentes remociones de DQO y sus respectivos pH.

Tabla 5. Costos de operación para el proceso de electrocoagulación

pH	% Remoción de DQO	Costo de Fe gastado (\$/m <sup>3</sup> )	Costo de energía eléctrica (\$/m <sup>3</sup> )	Costo de tratam. y disp. de lodo (\$/m <sup>3</sup> )	Voltaje CA (V)	Costo operario (\$/m <sup>3</sup> )	Costos operativos totales (\$/m <sup>3</sup> )
5	94,1	531,42	5.921,04	59,00	381,28	583	7.475,15
	75,5	398,69	3.343,17	59,00	361,58	583	4.744,99
	74,7	398,56	3.341,18	59,00	361,58	583	4.742,88
	52,6	299,01	1.888,48	59,00	354,41	583	3.183,57
7	70,3	531,42	5.921,04	58,10	359,79	583	7.452,75
	47,1	398,69	3.343,17	58,10	347,24	583	4.729,75
	60,6	398,56	3.341,18	58,10	357,28	583	4.737,68
	38,4	299,01	1.888,48	58,10	343,66	583	3.171,92
8	49,4	531,42	5.921,04	57,87	351,90	583	7.444,64

Gráfica 3. Costos de operación para la electrocoagulación a diferentes porcentajes de remoción de DQO



De los resultados obtenidos se puede observar que el mayor costo de operación (7.475,15 \$/m<sup>3</sup>) se tiene para la remoción de 94,1% de DQO y pH de 5 (correspondiente a la más alta remoción). En general, a este pH se obtuvieron los menores costos si se consideran los porcentajes de remoción de DQO alcanzados. Para los pH de 7 y 8 se observan los mayores costos considerando, igualmente, los porcentajes de remoción de DQO obtenidos.

El menor costo de operación (3.183,57\$/m<sup>3</sup>) se encontró para una pH de 5 y una remoción de DQO de 52,56%, ya que para un pH de 7 se presenta un proceso

con un costo similar al anterior (3.171,92\$/m<sup>3</sup>) pero alcanzando sólo un 38,4% de remoción.

De estos resultados se observa que el costo de la energía eléctrica es el más representativo, ya que constituye entre el 60 y el 80% de los costos totales de operación. Esto dependiendo, obviamente, del porcentaje de remoción, mientras que los costos por desgaste de electrodo no alcanzan a ser del 10% y los costos asociados al tratamiento de los lodos son cercanos al 7%.

**Costos de montaje para el proceso de electrocoagulación.** En la Tabla 6 se muestran los costos más significativos del montaje de una planta de tratamiento por electrocoagulación de las aguas residuales de la industria láctea, considerando un caudal de 1 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 6. Costos de montaje para la electrocoagulación**

Concepto	Costo (\$)
Fuente de voltaje (para 400 A)	14'332.500
Celda electroquímica	9'000.000
Bomba	2'800.000
Tubería y accesorios	1'000.000
Centrífuga	111'026.700
Subtotal	138'159.200
Total (considerando el factor diseño, planos, montaje e instalación: 1,5)	207'238.800

**Costos de operación para el tratamiento por coagulación química.** Los costos de operación se calcularon para una remoción de DQO del 50% en agua residual de la industria láctea. En la Tabla 7 se muestran los costos de operación en forma disgregada y el total para tratar 1 m<sup>3</sup>/h.

**Tabla 7. Costos de operación para coagulación química**

Concepto	Costo \$/m <sup>3</sup>
Tratamiento de lodo	114,79
Operarios ( un operario)	1.750,00
Reactivos	2.078,00
<b>Total</b>	<b>3.942,30</b>

**Costos de montaje para el proceso de coagulación química.** En la Tabla 8 se presentan los costos mas relevantes asociados al montaje de una planta de coagulación química, considerando 1 m<sup>3</sup>/h de aguas residuales de la industria láctea.

El costo de operación del tratamiento de las aguas residuales lácteas por coagulación química, proceso en el que se obtiene una remoción de DQO del 50%, es comparable con el costo de operación obtenido para una remoción del 52,6 % de DQO a un pH de 5, siendo este último ligeramente más bajo -3.942,30 \$/m<sup>3</sup> para

**Tabla 8. Costos de montaje para la coagulación química**

Concepto	Costo (\$)
Celda de flotación	50'000.000
Bomba	2'800.000
Tubería y accesorios	1'500.000
Centrífuga (1m <sup>3</sup> /h)	111'026.700
Total	138'159.200
Total (considerando factor diseño, planos, montaje e instalación: 1.8)	297'588.060

coagulación química, contra 3.183,57\$/m<sup>3</sup> para la electrocoagulación. Para mayores remociones, utilizando electrocoagulación se tienen mayores costos que en la coagulación química, como se puede observar comparando los resultados presentados en las Tablas 5 y 7.

## DISCUSIÓN

Los costos de operación de la electrocoagulación equivalentemente comparables con los costos de la coagulación química (que tiene un porcentaje de remoción de DQO del 50%) son los obtenidos a pH de 5 y una remoción de DQO de 52,6 %. En ambos casos se consideró un caudal de aguas residuales a tratar de 1m<sup>3</sup>/h. En este caso los costos operativos para la electrocoagulación son 3183,57 \$/m<sup>3</sup>, mientras que para la coagulación química son de 3942,30 \$/m<sup>3</sup>. Los costos operativos de la electrocoagulación son equivalentes al 80,75% de los costos de la coagulación química.

Los costos operativos para la mayor remoción de DQO por electrocoagulación (94,1% a pH de 5) son de 7475,15 \$/m<sup>3</sup>, que son prácticamente 1,9 veces los costos para la coagulación química (con remoción de DQO del 50%).

Los costos de montaje de una planta para el proceso de coagulación química son de \$ 297'588.060 mientras que para el montaje de la planta de electrocoagulación son de \$ 207'238.800. Los últimos son el 69,64% de los primeros.

Los resultados de esta investigación permiten concluir que la electrocoagulación es técnicamente viable como tratamiento de las aguas residuales en la industria láctea y sugieren que es económicamente viable.

## REFERENCIAS

1. REYMOND A., Antonio y FERRER O., Armando. La gestión medioambiental en la industria láctea. En: Tecnología Química. Vol. 27, No. 2 (2007); p.48 - 54
2. WILDBRETT, Gerhard. Limpieza y desinfección en la industria alimentaria. Zaragoza: Acribia, 2000. 349 p.

3. HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W. and MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. In: *Chemosphere*. Vol. 59, No. 3 (2005); p. 355–367.
4. IBANEZ, Jorge G; TAKLMOTO, Martha M. and VASQUEZ, Ruben C. Laboratory Experiments on electrochemical remediation of the environment: electrocoagulation of Oily Wastewater. In: *Journal of Chemical Education*. Vol. 72, No. 11. (nov. 1975); p. 1050-1052.
5. ADHOUM, Nafaâ and MONSER, Lotfi. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. In: *Chemical Engineering and Processing*. Vol. 43, No. 10 (2004); p. 1281-1287.
6. ADHOUM, Nafaâ et al. Treatment of electroplating wastewater containing  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Cr(VI)}$  by electrocoagulation. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 112, No. 3 (2004); p. 207-213.
7. BERGMANN, H. et. al. Electrochemical treatment of cooling lubricants. In: *Chemical Engineering and Processing*. Vol. 42, No. 2 (feb. 2003); p. 105-119.
8. BRILLAS, Enric and CASADO, Juan. Aniline degradation by Electro-Fenton-and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater reactor for wastewater treatment. In: *Chemosphere*. Vol. 47, No. 3 (apr. 2002); p. 241–248.
9. CHEN, Guohua; CHEN, Xueming, and YUE ,Po Lock. Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. In: *Journal of environmental engineering*. Vol. 126, No. 9 (Sept. 2000); p. 858-863.
10. GE, Jiantuan et al. New bipolar electrocoagulation – electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. In: *Separation and Purification Technology*. Vol. 36, No. 1 (2004); p. 33–39.
11. RAJESHWAR, Krishnan and IBANEZ, Jorge. *Environmental electrochemistry: Fundamentals and Applications*. San Diego California; U.S.A.: Academic Press limited, 1997. 776 p.
12. MOLLAH, Mohammad et al. Fundamentals, Present and future perspectives of electrocoagulation. In: *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 114, No. 1-3 (2004); p. 199-210.
13. JIANG, Jia-Qian. et al. Laboratory study of electrocoagulation–flotation for water treatment. In: *Water Research*. Vol. 36, No. 3 (apr. 2002); p. 4064–4078.
14. POWELL WATER SYSTEMS INC. *Powell Electrocoagulation: Sustainable Technology For the Future*. Colorado: Powell Water Systems. 2001; p. 2-27

15. MOLLAH, M.Yousuf A., et al. Electrocoagulation (EC) science and applications. En: Science and applications. In: Journal of Hazardous Materials. Vol. 84, No. 1 (jun. 2001); p. 29–41.
16. CLESCERI, Leonore S. and EATON, Andrew. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 18 ed. Washington: EPA-AWWA-WPCF, 1992. 3-115p.
17. ARANGO, Álvaro y GARCÉS, Luis Fernando. Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea por electrocoagulación. En: GARCÉS, Luis. Fotocatálisis y Electrocoagulación para el Tratamiento de Aguas Residuales: Investigaciones y aplicaciones. Medellín: Corporación Universitaria Lasallista, 2007. p.165-174.