

UNA ALTERNATIVA LIMPIA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES GALVÁNICAS: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Álvaro Chávez Porras¹
Diana Lucía Cristancho Montenegro²
Édgar Alexander Ospina Granados³

Recibido: 26/09/2008

Aceptado: 07/05/2009

RESUMEN

Este estudio presenta una revisión bibliográfica sobre las aguas residuales generadas por industrias galvánicas y una posibilidad de tratamiento para disminuir los contaminantes propios de estos efluentes. La actividad produce fundamentalmente efluentes líquidos con alta carga contaminante en volúmenes relativamente pequeños, como también efluentes con cargas contaminantes diluidas en grandes volúmenes; adicionalmente a esto, la generación de desechos sólidos o semisólidos es el principal problema en importancia después de los vertidos líquidos. Se concluye que las aguas residuales pueden alcanzar un alto nivel tóxico para el medio ambiente y el hombre; se generan, así, alternativas para su tratamiento y la posible recuperación de los metales pesados, específicamente para estas industrias que son las grandes generadoras de los contaminantes, donde los tratamientos convencionales no logran eliminarlos en sus procesos, lo que requiere una combinación de alternativas tecnológicas para tratar las aguas residuales. Se considera el proceso de electrocoagulación como efectivo para eliminar contaminantes del agua residual, que permite recuperar parte de las aguas para reúso.

Palabras clave: galvánicas, aguas residuales industriales, contaminación ambiental, metales pesados, electrocoagulación.

-
- 1 Ingeniero industrial y doctor en Ingeniería Civil. Docente y Coordinador de la especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11 N° 101 -80, Teléfono 2757300, Fax 6370557, Bogotá, Colombia. alvaro.chavez@umng.edu.co
 - 2 Ingeniera civil Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11 N° 101 -80, Teléfono 2757300, Fax 6370557, Bogotá, Colombia. diana.cristancho@umng.edu.co
 - 3 Ingeniero ambiental y especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada, Carrera 11 N° 101 -80, Teléfono 2757300, Fax 6370557, Bogotá, Colombia. alexander.ospina@umng.edu.co

A CLEAN ALTERNATIVE FOR GALVANIC WASTEWATER TREATMENT: LITERATURE REVIEW

ABSTRACT

This study presents a literature review on wastewater produced in galvanic industry, and a possible treatment alternative in order to decrease contaminants of such effluents. This industry basically generates liquid wastes with a big contaminating load in relatively small volumes. Additionally, generation of solid and semi-solid wastes is the second main problem after discharge of liquids. It is concluded that wastewaters can reach a high level of toxicity for both environment and man. Then, some alternatives are proposed for treatment and possible recovery of heavy metals, especially for this industry which are important producers of contaminants, since conventional treatments are not totally effective for their elimination during the processes. This requires a combination of technological alternatives for treating wastewaters. Electrocoagulation has been considered as an effective method for eliminating wastewater contaminants and it allows recovering water for reuse purposes.

Key words: Galvanic, industrial wastewater, environmental contamination, heavy metals, electrocoagulation.

INTRODUCCIÓN

Toda actividad humana tiene un impacto dentro y fuera de su entorno; las que producen contaminación no sólo alteran el equilibrio ecológico y causan la mortandad de algunas especies animales y vegetales o la proliferación descontrolada de otras, sino que pueden destruir en forma definitiva la vida. En casi todos los países industrializados se ha tomado conciencia de este reto que obliga a detener la destrucción de nuestro hábitat. Es así que las actividades de los diferentes sectores industriales se ven en la obligación de evitar o minimizar los impactos negativos al ambiente, ya sea a través de la implementación de prácticas de prevención de la contaminación o del tratamiento de los efluentes antes de ser vertidos al medio ambiente.

La problemática de las aguas residuales industriales ha sido una constante preocupación, y en la historia de la humanidad han sido muchas las personas que en sus discursos la han planteado como un problema, tocado por filósofos, economistas y pensadores de todas las tendencias y estilos. Sin embargo, el tema logra tomar importancia tan sólo en las últimas décadas de final de siglo, con la filosofía del desarrollo sostenible, la producción limpia y las buenas prácticas empresariales; éste ha logrado posicionarse en el interés de los gobiernos, organizaciones no gubernamentales, empresariado y en general de toda la sociedad (Chávez, 2007).

En los procesos desarrollados por la industria galvánica se generan efluentes, principalmente inorgánicos, que por sus características de toxicidad resultan nocivos para el hombre y su entorno, principalmente por la presencia de metales pesados como el níquel. (Astdr, 2003).

En este artículo se presenta una revisión bibliográfica sobre las aguas residuales industriales galvánicas, las cuales, se concluye, logran alcanzar un alto nivel tóxico para el medio ambiente, pero se pueden generar alternativas para su tratamiento y la posible recuperación de los metales pesados,

donde los tratamientos convencionales no logran ser efectivos; se considera el proceso de electrocoagulación como cierto y práctico para eliminarlos y recuperar, así, parte de las aguas para su nueva utilización.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

La galvanoplastia es una técnica que consiste en la electrodeposición de un recubrimiento metálico sobre una superficie que puede ser o no metálica. Se recomienda por costos o por razones estructurales modificar las características del material base, principalmente resistencia a la corrosión, dureza, apariencia, conductividad eléctrica y rozamiento (DAMA, 2005).

El procedimiento superficial en galvanoplastia se basa en procesos de deposición electrolítica de metales, la cual puede obtenerse a partir de baños o electrolitos de diferente composición. El proceso de recubrimiento se realiza por inmersión en un baño electrolítico, de manera que los iones metálicos presentes en soluciones ácidas, alcalinas o neutras, se reducen en las piezas a recubrir. Las propiedades específicas de los recubrimientos dependen de los componentes del electrolito utilizado, y se pueden aplicar cubiertas de cromo, cobre, zinc, níquel, cadmio, plomo, plata, estaño u oro, así como aleaciones de latones, bronce, zinc aleado y oro aleado. Los más usados son el zinc, el oro, el níquel, el cobre y el cromo. A los distintos tipos de recubrimientos electrolíticos le siguen una serie de tratamientos, no pertenecientes a la galvanotecnia propiamente dicha, para mejorar las propiedades anticorrosivas y funcionales del revestimiento correspondiente, como son el cromatizado o pasivado crómico, el sellado y el lacado. Entre cada operación se tienen tanques con agua para lavar las piezas, así se evita contaminar la solución de la siguiente etapa; las aguas de enjuague son descartadas periódicamente, y debido a que tienen contenido de metales pesados, ácidos, álcalis

y otras sustancias peligrosas, deben ser llevadas a una planta depuradora antes de ser vertidas al alcantarillado (De Lima et al, 2007).

En Bogotá, existen aproximadamente 400 plantas galvánicas, el 13% se dedica a procesos de anodizado y preparación de superficies, los restantes realizan procesos de recubrimientos, entre ellos, el cromado (DAMA, 2005). En Colombia estos recubrimientos se emplean principalmente en autopartes, herramientas agrícolas, grifería, muebles, artefactos a gas, entre otros (Water Treatment Handbook, 1991).

Industria de recubrimiento metálico

Un proceso de recubrimiento metálico consta de diferentes etapas de preparación de la superficie (Milanez et al., 2005). La instalación industrial está compuesta de cubas, las cuales almacenan baños de preparación y de recubrimiento seguido de tanques de enjuague. Esta incluye las siguientes etapas:

- **Desengrase / enjuague.** Las piezas que poseen grasa se someten a un proceso de desengrase en soluciones alcalinas o agentes desengrasantes ácidos. No se suelen usar desengrasantes orgánicos. Posteriormente las piezas se enjuagan en una cuba con agua para evitar el arrastre de las soluciones de desengrase a la etapa siguiente (Kirk; 1991,1999).
- **Decapado ácido / enjuague.** El decapado sirve para eliminar el óxido y la calamina presentes comúnmente en la superficie metálica y obtener de esta forma una superficie limpia. Normalmente se usa el ácido clorhídrico o sulfúrico o bien una mezcla de ambos. Para materiales especiales es posible la utilización de ácido sulfámico, fluobórico, etc. (Metcalf y Eddy, 1991). La concentración de los decapados es normalmente del 50% de ácido debidamente inhibido para evitar un excesivo ataque al material de la pieza. Al ir aumentando la

concentración de impurezas en el baño, la eficacia del decapado decrece. Para mantener la concentración del baño dentro de los límites adecuados para su uso, éste tiene que ser reemplazado mediante reposición de ácido nuevo en cantidades variables en función del nivel de contaminación e incluso con este aporte el baño llega a agotarse y se convierte en un residuo a eliminar. Después del decapado las piezas se enjuagan en una cuba con agua para evitar el arrastre de ácido a las siguientes etapas del proceso (Lima y Ojima, 1991).

- **Baño de recubrimiento metálico.** El tratamiento con sales tiene por objeto darle un acabado decorativo a las piezas, mejorar las propiedades químicas de éstas para protegerlas contra la corrosión o cambiar alguna propiedad superficial como dureza, conductividad, entre otras. Hay diferentes acabados de recubrimiento; entre otros podemos citar, latón, oro, níquel, cromo, galvanizado, etc. (Fundes, 1999).
- **Enjuague estanco.** Después del tratamiento con las sales en el baño de recubrimiento las piezas se enjuagan en una cuba de agua para limpiarlas de residuos procedentes del baño anterior y utilizarlo para reponer pérdidas de nivel en el caso de que baje el nivel de los baños de recubrimiento (Merck, 2005).
- **Enjuague.** Después de que las piezas pasan por el enjuague estanco, las piezas todavía tienen residuos de las sales de recubrimiento; para dejar la pieza totalmente libre de residuos se enjuagan en una cuba de agua corriente (DAMA, 2001).
- **Secado.** Las piezas después de tener el acabado final normalmente se lanan y secan para proseguir a su embalaje y disposición final (Lira, 1999).

La figura 1 muestra la secuencia típica de una instalación de este tipo. La tabla 1 muestra los

diferentes tipos de baño de recubrimientos y sus características. La principal aplicación del cobre es como subcapa para el niquelado de metales; rara vez se utiliza como acabado final, salvo en electrónica. Materiales base de hierro, aluminio y zámak se les debe dar una capa previa de cobre cianurado antes de ser llevados a baños posteriores para facilitar la adherencia del recubrimiento siguiente. En los baños cianurados de cinc electrolítico la pureza del recubrimiento es muy buena con una deposición más densa, uniforme y regular. Los recubrimientos de latón son eminentemente decorativos y su aplicación técnica es mínima, salvo como subcapa para los recubrimientos de acero con caucho y gomas en los que, gracias al latonado, la adherencia del caucho es muy buena (Canepa *et al.*, 1984).

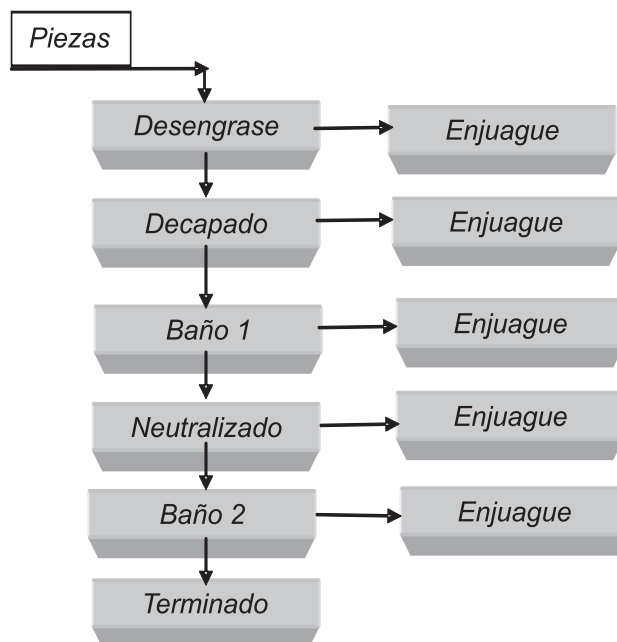


Figura 1. Diagrama de flujo de proceso de recubrimiento metálico

Fuente: Autor

En la tabla 1 se pueden observar los diferentes tipos de metales y su posible composición de acuerdo con el pH y la temperatura donde se encuentren.

Tabla 1. Baños electrolíticos. Características de los baños de recubrimiento

Metal depositado	Tipo	Composición (g/L)	Temperatura	pH
Cadmio	Alcalino	Óxido de cadmio: 37,5 Cianuro de sodio: 100 Sulfato de níquel: 2	Ambiente	13
Cobre	Alcalino	Cianuro de sodio: 37,5 Cianuro de cobre: 30 Sal de Rochelle: 50 Carbonato de sodio: 38	50 C	12-13
Cobre	Ácido	Sulfato de cobre: 200 Ácido sulfúrico: 27,5mL/L	Ambiente	4,4,5
Cromo	Ácido	Ácido crómico: 250 Ácido sulfúrico: 2,5	40-50C	2,5-3,0
Estaño	Ácido	Sulfato estañoso: 60 Ácido sulfúrico: 75 Sulfato de sodio: 100 Gelatina: 2 Naftol: 1	Ambiente	2,5

Metal depositado	Tipo	Composición (g/L)	Temperatura	pH
Latón	Alcalino	Cianuro de cobre: 30 Óxido de cinc: 7,7 Cianuro de sodio: 11 Hidróxido de amonio: 3	Ambiente	10,5-11,5
Níquel	Ácido	Sulfato de níquel: 300 Cloruro de níquel: 60 Ácido bórico: 5 Sacarina: 1,5 Tiourea: 0,1 Lauril sulfon sod: 0,5	45-50C	4,2-4,8
Cinc	Alcalino	Óxido de cinc: 60 Cianuro de sodio: 22,5 Hidróxido de sodio: 52,2 Trióxido de molibdeno: 0,5 Sulfuro de sodio: 3,5 Gelatina: 2	Ambiente	13
Cinc	Ácido	Cloruro de cinc: 3 5 Cloruro de potasio: 180 Ácido bórico: 25 Abrillantadores: 30mL/L	Ambiente	5,7

Fuente: Canepa et al (1984); Dijkema et al (2000).

Para DAMA (2005), el acabado de latón al igual que el del cobre, se mancha en contacto con el aire atmosférico; este problema hace que las piezas latonadas necesiten un paso adicional o tratamientos previos, los cuales pueden ser:

- Cromatizado: se emplean capas de conversión crómicas que depositan una finísima película protectora. No se recomienda cuando la superficie latonada se recubre con hule (Passos y Camara, 2003).
- Inhibición: tratando las superficies con soluciones de sustancias como el benzotriazol, que forman una película pasiva por reacción con el cobre (Soares, 2002).
- Lacado. Las lacas más efectivas contra el moteado del latón son las de poliuretano las cuales presentan, incluso, gran resistencia al rayado; una cocción de la superficie lacada en aire, preferiblemente seco produce un endurecimiento de la misma (Timoney y Lee, 2001).

Problemática medioambiental

La actividad de tratamiento de superficies produce fundamentalmente efluentes líquidos de dos tipos; por un lado, aparecen cargas contaminantes altas, en volúmenes relativamente pequeños, de los efluentes generados en los baños de proceso, y por otro, efluentes con cargas contaminantes diluidas en grandes volúmenes de agua, de los efluentes procedentes de los enjuagues o lavados (Apha, 1995). La generación de desechos sólidos o semi-sólidos es el siguiente problema en importancia después de los vertidos líquidos. Los principales residuos resultantes de la actividad son: soluciones viciadas, lodos con contenido en metales pesados procedentes del tratamiento de las aguas residuales, metales base, desechos de reactivos empleados en las distintas operaciones, aceites y grasas procedentes de la separación de aceites de los baños de desengrase, filtros y cartuchos impregnados por electrolito y envases y embalajes usados (Wittcott y Reuben, 1997).

Las materias primas utilizadas por el sector condicionan las características de las corrientes residuales generadas a consecuencia de la actividad industrial. La renovación frecuente de los baños de recubrimiento (que se deben gestionar como residuos industriales líquidos) y el hecho de que las etapas de lavado y enjuagado entre estos baños han comportado, históricamente, un alto consumo de agua y una alta generación de vertimientos, son algunos de los rasgos característicos desde el punto de vista de impacto ambiental del sector (Flick, 1991).

Según la Water Environment Federation (1994) los problemas que se pueden generar en el proceso son:

- Consumo de oxígeno en las corrientes de agua, DQO, que afecta la vida acuática
- Contenido de sustancias tóxicas (cromo, níquel, cianuros, entre otros).
- Altos contenidos de sólidos en suspensión
- Sólidos disueltos.
- Grasas y aceites.
- Valores extremos de pH

Estos procesos de galvanoplastia generan aguas residuales, cuyo tratamiento, por ser contaminadas con metales pesados, es estudiado ampliamente; existen diversas metodologías tales como biotecnológicas, de adsorción, intercambio iónico y otras; no obstante, algunos métodos como la bioadsorción no pueden ser aplicados para soluciones que contienen altos contenidos metálicos en solución, además de presentar problemáticas para la separación de las fases acuosa y sólida (Purakin y Paknikar, 1999).

Las características tóxicas se deben a las concentraciones normalmente elevadas, según la normativa, en cianuros y metales pesados; además, la elevada acidez o alcalinidad confieren al desecho un fuerte poder corrosivo. El riesgo de contaminación depende de las sustancias químicas presentes, de su concentración y volumen, de las posibilidades

de contacto humano, y de su comportamiento en el medio ambiente después de su disposición (Sun, 2000). En general, esta agua se puede encontrar numerosa, de naturaleza, concentración y tamaño diferente (Canepa *et al.*, 1984; Sun, 2004).

El gran volumen de agua residual posee cantidad apreciable de materias tóxicas como los cianuros, el cromo, el níquel, el arsénico, entre otros. Toda el agua que interviene en el proceso, salvo la empleada como vapor, se vierte al alcantarillado (American Water Works Association, 1990).

La industria de recubrimiento metálico consume gran cantidad de agua en sus procesos. El uso de esta agua se da principalmente en preparación de baños, torres de enfriamiento, caldera, lavados, retrolavados, etc. (Cerveró, 2001).

En general, los tipos de vertimiento que se pueden dar en una instalación son:

- *Vertidos discontinuos diluidos.* Estos vertidos son los procedentes de sumergir las piezas en cubas de agua estanca con el fin de diluir al máximo la película de baño que las piezas llevan adherida en todo momento. El agua contenida en algunas de estas cubas se renueva periódicamente (Hibbitt y Kamp-Roelands, 2002).
- *Vertidos discontinuos concentrados.* Son, en su mayor parte, los procedentes de los baños de desengrases, neutralizados y pasivados agotados. Se dice que un baño se agota, cuando deja de ejercer la función para la cual se preparó. En el caso de los baños de desengrase esto ocurre fundamentalmente por acumulación de aceites libres y emulsionados. En el caso de los baños ácidos de pasivado y neutralizado ocurre por acumulación de metal disuelto, así como de sus sales. Estos baños, una vez agotados, son renovados con una periodicidad que oscila entre una semana y tres meses, en función del tipo de baño (Corbett y Pan, 2002).
- *Vertidos continuos.* Son vertidos que se generan en el proceso, ya que utiliza una entrada cons-

tante de agua limpia a los enjuagues corrientes durante la jornada de trabajo, para evitar contaminar el baño siguiente con los productos químicos del baño anterior. Esta es la mayor fuente de consumo de agua en una empresa de recubrimiento metálico (Fepam, 2002).

Tratamiento de las aguas residuales mediante “electrocoagulación”

El fundamento teórico de la electrocoagulación consiste en que la precipitación se lleva a cabo al mismo tiempo que la desestabilización; en cambio, la coagulación química consiste en la formación de lodos debido a la unión que forma masas de tamaño considerable, para luego separarlas del agua mediante la adición de más químicos como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, entre otros (Water Environment Federation, 1994). Las masas se forman por el contacto, éste se logra principalmente por el movimiento del líquido, debido a fenómenos eléctricos, como la presencia de iones de carga opuesta a la acción de hidrógenos y otros (Teixeira, 1993). Es importante mencionar que el agua sometida a una electrólisis se ve favorecida por la presencia de sales en disolución, que posibilitan la conducción de electricidad y que están presentes en todas las aguas residuales e industriales.

Para Bernardes et al. (2000), debido a esto se produce un desprendimiento de hidrógeno y oxígeno gaseoso en sus respectivos electrodos, estos gases al ascender a la superficie provocan tres fenómenos:

- Separación rápida del electrodo, que evita que se ensucie (Eckenfelder, 1989).
- Arrastre de sólidos desestabilizados a la superficie, los cuales forman una nata que posibilita una extracción por sedimentación clásica o por flotación (Cerqueira, 1999).
- Debido a las burbujas de gas se producen corrientes ascendentes y descendentes de la solución que ocasionan una mejor superficie

de contacto y provocan un aumento en la eficiencia de desestabilización. Esta agitación "espontánea" evita la agitación "mecánica" (Tauk-Tornisielo, et al, 1995).

Alcances técnicos de la electrocoagulación

El proceso puede ser definido como la desestabilización de especies químicas suspendidas o disueltas presentes en una solución, producto de la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a través de un sistema cátodo-ánodo inmerso en la solución de agua a tratar. A consecuencia y en el transcurso de dicho proceso, las especies catiónicas producidas en el ánodo entran a la solución, reaccionan con las demás especies, forman óxidos metálicos y precipitan los respectivos hidróxidos. A diferencia de la coagulación química, en la electrocoagulación, el catión proviene de la disolución del ánodo metálico, ya sea, hierro o aluminio (Davis, 1994).

En otras palabras, la electrocoagulación utiliza corriente directa para hacer que los iones de sacrificio de los electrodos eliminen contaminantes indeseados, sea mediante reacción química y precipitación o provocando que los materiales coloidales se aglomeren y sean eliminados por flotación electrolítica (Cetesb, 1992). La figura 2 muestra el proceso de electrocoagulación en un agua residual.

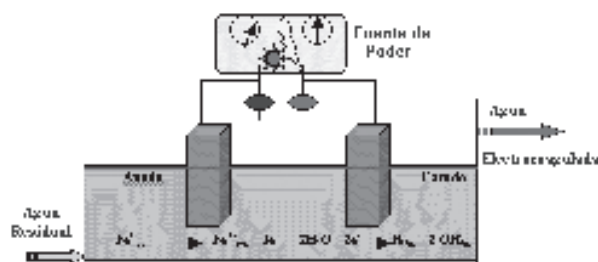


Figura 2. Proceso de Electrocoagulación en un Agua Residual.

Fuente: Ecosystem, 2002.

En este proceso una corriente eléctrica es inducida en el agua a través de placas metálicas paralelas

de materiales diversos que optimicen el proceso de remoción. Dos de los metales más utilizados son el hierro y el aluminio (Kirkwood y Longley, 1995). Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido; estos tienden a formar óxidos metálicos que atraen electromecánicamente a los contaminantes que han sido desestabilizados y estas partículas recientemente formadas se precipitan y son eliminadas (Eckenfelder y Cecil, 2003).

Aspectos técnicos de operación de la electrocoagulación

La tabla 2 muestra las condiciones de operación de la electrocoagulación.

Tabla 2. Condiciones de operación de la electrocoagulación

Consumos de energía:	Los consumos de energía varían entre 0.1 a 1.0 kWh/m ³ (dependiendo del tipo de agua a tratar).
Desgaste de electrodos:	El desgaste de material está directamente relacionado con la corriente aplicada al sistema (amperaje) y el tiempo del agua residual en la celda de electrocoagulación. Se estima un mínimo reemplazo de los electrodos de una a dos veces por año.
Condiciones de operación:	El sistema de electrocoagulación puede funcionar de forma automática, mediante controles electrónicos que regulan la corriente y el voltaje, de acuerdo con los cambios en la calidad del agua residual a tratar, dados por su resistividad.
Producción de lodos:	La producción o generación de lodos está directamente relacionado con el nivel de contaminación del agua residual y de las especies catiónicas (hierro) que se disuelven en el agua de acuerdo con la corriente aplicada a los electrodos. En todo caso la generación de lodos es menor que un sistema químico o biológico convencional. Se obtiene un lodo más compacto (dado el hierro o aluminio) con un nivel de humedad entre un 97 a 99%.

Fuente: Ecosystem, 2002.

Las condiciones de operación de un sistema de electrocoagulación son altamente dependientes de las condiciones químicas, del pH, del tamaño de partículas del agua a tratar y especialmente de su conductividad. El tratamiento general de las aguas residuales requiere aplicaciones bajas de voltaje, generalmente de <50 Volts, con amperaje variable, de acuerdo con las características químicas del agua (ATSDR, 2003).

Análisis comparativo de la electrocoagulación con los tratamientos biológicos y químicos

Haciendo un análisis comparativo acerca de las tecnologías como la electrocoagulación y los sistemas biológicos y químicos, se puede decir que el sistema de electrocoagulación aplicado a aguas residuales, en comparación con los sistemas biológicos convencionales, requiere de una menor superficie, entre un 50 a 60% menor (Patoczka et al., 1998).

Los tiempos de residencia de la electrocoagulación son de 10 a 60 segundos, en comparación con los sistemas biológicos que requieren entre 12 y 24 horas (Gordon y Geyer, 1988).

Son unidades compactas, fáciles de operar, con un consumo de energía y producción de lodo más compacto inferior a los sistemas biológicos y químicos convencionales (Souza, 2003; Pletcher, 1991).

Las celdas de electrocoagulación se instalan sobre terreno, por lo tanto, no requieren de obras civiles mayores, como los sistemas químicos y biológicos (Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial, 1994; Perry, 1999).

Los costos de inversión son 50% más bajos que los de los sistemas biológicos y químicos (Instituto Politécnico Nacional, 1997).

Los consumos de energía eléctrica por m³ de agua tratada, entre un 0.1 a 1 kWh/m³, son meno-

res a los sistemas de tratamiento convencionales (Sheppard, 1998).

No utilizan productos químicos, son unidades 100% automáticas, que se utilizan cuando se requieren, con tiempos de respuesta de 10 a 60 segundos, en su nivel de eficiencia (Sun Kou, 2004; DAMA, 2005).

Porcentaje de remoción con el sistema de electrocoagulación

Según Ecosystem (2002), por ejemplo, en el estado de California, se han instalado algunos sistemas de electrocoagulación para tratar este tipo de efluentes y como resultado se ha logrado mejorar la separación de agua y aceite, así como la recuperación de los metales que ahí se acumulan.

La tabla 3 presenta los porcentajes de remoción de los parámetros evaluados.

Tabla 3. Porcentajes de Remoción

Parámetros	% de remoción
DBO	> 90
DQO	> 90
Aceites y grasas	> 95
Nitrógeno total	> 80
Fósforo total	> 70
Sólidos suspendidos	> 95
Coliformes fecales	> 99% (*)
(*) Con la aplicación de ozono, cloro o luz ultravioleta (UV), a la salida de la planta de tratamiento de electrocoagulación se alcanzará una concentración de salida < 50 NMP/100 ml de coliformes totales.	

Fuente: Ecosystem, 2002.

CONCLUSIONES

El proceso de electrocoagulación es muy efectivo para eliminar contaminantes del agua residual de las industrias galvánicas. Las plantas

de tratamiento por electrocoagulación permiten que una industria recupere parte de sus aguas para reutilizarlas. Con esta acción se reduce notablemente el consumo de agua, se limpian las instalaciones y vías de desecho de aguas negras, ya que el proceso de electrocoagulación los precipita y los transforma en material inerte que se elimina por filtrado. Esto significa, con los no vertimientos, limpiar las aguas de arroyos, lagos, ríos o mares a los cuales generalmente se descargan.

Este sistema electroquímico ha demostrado que puede manejar una gran variedad de aguas de desecho, tales como: desperdicio de molinos de papel, de electro plateado metálico, de fábricas de envasado, de molinos de acero, de rastros, efluentes con contenidos de cromo, plomo y mercurio, así como las aguas negras domésticas. El hecho de remover estos contaminantes permite reutilizar el agua, generar un ahorro directo correspondiente al reaprovechamiento del agua, y de manera indirecta, mejorar la calidad de los desechos que se van al drenaje principal.

REFERENCIAS

- AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES (ATSDR). 2003. Reseña Toxicológica del Niquel (versión para comentario público) (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. En: http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15.html. Último acceso: febrero 2008
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, 1990. Water Quality And Treatment. Cuarta Edición, USA: Ed. Mcgraw-Hill. Pp. 709-745, 1113-1150.
- APHA, AWWA, WPCF, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. USA.
- BERNARDES, A. M.; NÍQUEL, C. L. V.; SCHIANETZ, K.; SOARES, M. R. K.; SANTOS, M. K. E SCHNELDER, V. E. 2000. Manual de Orientações Básicas para a Minimização de Efluentes e Resíduos Na Indústria Galvânica. Porto Alegre (Rs): Gwz / Senai.

- CANEPA, L.; PÉREZ, J. y RICHTER, C. 1984. "Evaluación De Plantas De Tratamiento De Aguas". Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Manual Dtiapa N° C-5, Tomo I, Lima -Perú.
- CERQUEIRA, L. (1999). Poluição Industrial - Risco De Contaminação Dos Solos Ameaça A Rspm. São Paulo. Revista Saneamento Ambiental, X (56): 22-25.
- CERVERÓ, M. (2001). Residuos con materiales procedentes de procesos galvánicos, Parte I: Procesos galvánicos. FEMEVAL. Econoticias 8, Madrid.
- CETESB (Companhia de Tecnologia E Saneamento Ambiental Do Estado De São Paulo). 1992. Resíduos Sólidos Industriais. 2ª Edição. São Paulo (Sp): Cetesb, 234 P. Il.
- CORBETT, C. J.; PAN, J. N. (2002). Evaluating environmental performance using statistical process control techniques. *European Journal of Operational Research*, 139: 68-83.
- CHÁVEZ, Á. 2007. Uso de lodo de estação de tratamento de água e agregado reciclado miúdo na fabricação de elementos de alvenaria. Tese de doutorado, UNICAMP, SP.
- DAMA, 2001. Ministerio de Medio Ambiente, Guía para la elaboración de un programa de minimización de residuos en las MIPYMES. Talleres Grafikar, Bogotá. Páginas 9-29.
- DAMA. 2005. Planes de acción para mejoramiento ambiental, Manual para empresarios de la PYME "Galvanoplastia" -ACERCAR.
- DAVIS M. (1994). Use Advanced Methods To Treat Wastewater. *Hydrocarbon Processing*, 73 (8): 43-46.
- DE LIMA, Graziela; GUESSER, W.L.; MASIERO, I. 2007. Influência do bismuto, níquel, estanho e alumínio na espessura da camada dos revestimentos galvanizados. *Matéria*, 12 (4) Rio de Janeiro, Brasil.
- DIJKEMA, G.P.J.; REUTR, M.A.; VERHOEF, E.V. (2000). A new paradigm for waste management, *Waste Management*, 20 (8): 633 - 368.
- ECKENFELDER, W.W.; CECIL, L.K. 2003. Applications Of New Concepts Of Physical-Chemical Wastewater Treatment. Vanderbilt University; Nashville, Tn: Pergamon Press, Inc.
- ECKENFELDER W.W. 1989. *Industrial Water Pollution Control*, 2nd Edition. USA. (Control de la contaminación industrial del agua. Jr. Mc Graw-Hill International Editions. E.U.A.).
- ECOSYSTEM. 2002. Boletín Electrónico.
- FEPAM. 2002. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br>>. Acceso en: 23 dic 2007.
- FLICK, Ernest W, 1991. *Water Treatment Chemicals. An Industrial Guide.* (Tratamiento químico del agua. Una guía industrial) Noyes Publications. E.U.A.
- FUNDES, 1999. Ministerio Del Medio Ambiente. Guía de buenas prácticas para el sector de la galvanoplastia. Ed. Bogotá, Colombia. Páginas 61-83.
- GORDON M. F., J. Ch. GEYER. 1988. *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales.* Limusa, México.
- HIBBITT, C.; KAMP - ROELANDS, N. (2002). Europe's (Mild) Greening of Corporate Environmental Management. *Corporate Environmental Strategy*, 9 (2): 172-182.
- INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 1997. Guías de producción más limpia. Producción más limpia en el sector de galvanoplastia. Centro Mexicano para la Producción más Limpia. Primera Edición, México.
- KIRK R, Othmer D. 1991. *Enciclopedia de tecnología química Vol. 3.* Pp.67-77, 289-307. USA.
- KIRK Othmer. 1999. *Enciclopedia de tecnología química. Vol IX. Higiene y Toxicología en la Industria.* UTEA. 1º Edición. México, páginas 353-361, 592-599
- KIRKWOOD y LONGLEY, A.J. 1995. *Clean Technology And The Environment.* Primera Edición, Ed Rc. USA. Pp.174 -274.
- LIMA, L. M. Q.; OJIMA, M. K. 1991. Tratamiento De Resíduos Sólidos Industriais. In Mandelli, S. M. De C. *Tratamiento De Resíduos Sólidos / Compêndio De Publicações.* Caxias Do Sul (Rs): Gráfica Da Universidade De Caxias Do Sul, Pp. 169-181.
- LIRA, G. 1999. Compendio para el manejo y monitoreo de residuos peligrosos en un laboratorio químico y bioquímico. Universidad Santiago de Chile, Chile. Páginas 71-103.
- MERCK COLOMBIA S.A, 2005. El A, B, C, de la seguridad en el laboratorio. 3º edición, Departamento L PRO. Bogotá, páginas 10-33.
- METCALF y EDDY. 1991. *Wastewater Engineering Treatment. Disposal, Reuse.* 3a. Edition. USA. (Ingeniería en el tratamiento de aguas residuales. Disposición y

- reuso. Mc Graw-Hill International Editions. 3a. Edición. E.U.A.).
- MILANEZ K. W.; KNISS C. T.; A. M.; BERNARDIN H.; G.; KUHNEN N. C. (2005). Caracterização de pigmentos inorgânicos à base de Fe, Zn e Cr utilizando resíduo de galvanoplastia como matéria-prima. *Cerâmica*, 51(318). São Paulo.
- PASSOS, L. A. N.; CAMARA M. R. G. 2003. O desempenho ambiental das empresas do setor químico londinense. In: Encontro Nacional Sobre Gestão Empresarial E Meio Ambiente. São Paulo. Anais. São Paulo. p. 52. 1 (CD-ROM).
- PATOCZKA, J., JOHNSON R. y SCHERI, J. 1998 Trace Heavy Metals Removal With Ferric Chloride, Water Environment Federation, Waste Technical Conference, Nashville.
- PERRY. 1999. Chemical Engineering's Handbook. 7 Ed, Mc Graw Hill.
- PLETCHER, D. 1991. Industrial Electrochemistry. Chapman And Hall.
- PURAKIN, P. y PAKNIKAR, K. 1999. Biosorption of Lead, Cadmium and Zinc by Citobacter Strain MCM B-181: Characterization Studies. *Biotechnol. Prog.* 15, 228-237.
- SHEPPARD T. 1998. Powell. Manual de Agua para Usos Industriales,. Ediciones Ciencia y Técnica, S.A. 1a. edición. Volúmenes 1 al 4. México.
- SOARES, M. R. K. 2002. Maiores galvanicas porte - Critérios [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <dcont@fepam.rs.gov.br> Acceso: 23 octubre 2007.
- SOUZA, R. R. 2003. Fatores de formação e desenvolvimento das estratégias ambientais nas empresas. (Doutorado em Administração)-Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SUBDIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA URBANA E INDUSTRIAL. 1994. Sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales y lodos producidos. Comisión Nacional del Agua, México.
- SUN KOU, M. R. 2000. Procesos para el tratamiento de las aguas residuales de una planta galvánica de cromo. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- SUN KOU, M. R. 2004. Procesos Para El Tratamiento De Las Aguas Residuales En Plantas Galvánicas y Metalúrgicas. Sección Química. Departamento De Ciencias. Facultad De Ciencias E Ingeniería . Pontificia Universidad Católica del Perú.
- TAUK-TORNISIELO, S. M.; GOBBI, N; FORESTI, C. E LIMA, S. T. 1995. Análise Ambiental - Estratégias E Ações. São Paulo (Sp): Fundação Salim Farah Maluf, T. A. Queiroz Editora, 381 P.II.
- TEIXEIRA, C. E., 1993. Ensaio De Tratabilidade De Residuo Sólido Industrial - Areia Fenólica: Isolamento, Identificação E Seleção De Fungos Filamentosos. Dissertação De Mestrado Apresentada À Faculdade De Engenharia Civil Da Universidade Estadual De Campinas. Campinas (Sp): Universidade Estadual de Campinas.
- TIMONEY, K.; LEE, P. (2001). Environmental management in resource-rich Alberta, Canada: first world jurisdiction, third world analogue? *Journal of Environmental Management*, 63: 387-405.
- WATER ENVIRONMENT FEDERATION. 1994. Pre-Treatment Of Industrial Wastes.. Manual Of Practice, Usa. Pp.110 -112, 181.
- WATER TREATMENT HANDBOOK, 1991. (Manual de Tratamiento de Agua. Degremont 6a. Edition Vol. I y II. E.U.A.).
- WITTCOTT, H.A.; REUBEN, B.G. 1997. Productos químicos orgánicos industriales, Vols. I y II, Editorial Limusa, México. Pág. 88.