



DISEÑO MECATRÓNICO PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN ENTORNOS DE INDUSTRIAS TEXTILES CON ÉNFASIS EN TINTORERÍAS

Henry William Peñuela Meneses, María Elena Leyes Sánchez

**Universidad Tecnológica de Pereira
Pereira, Colombia**

Resumen

El agua residual de la industria textil constituye uno de los factores con más altos niveles contaminantes sobre el agua empleada en los procesos de lavado, tintura, estampación y acabado en las tintorerías asentadas en el eje cafetero, más específicamente en el departamento de Risaralda.

El grupo de investigación MECABOT, desde las instituciones de educación superior, busca la implementación de los desarrollos tecnológicos e impacto social, con el interés principal de establecer aportes desde el componente mecatrónico a la sostenibilidad ambiental, enfocado en el entorno de acción dentro del sector productivo regional, buscando desde la academia proponer soluciones en ingeniería que contribuyan al óptimo acceso y utilización del recurso hídrico, así como la eliminación de residuos y aguas residuales.

Los sistemas que actualmente existen evidencian que no son óptimos, debido al vertimiento con colorantes y a la ineficiente utilización de las plantas de tratamiento de las aguas residuales industriales (PTARI). En la búsqueda de alternativas, se propone la creación de conciencia ambiental, permitiendo un trabajo conjunto entre los empresarios textiles, la comunidad y las entidades encargadas del control de estos vertimientos.

La mayoría de las actividades en lavanderías y tintorerías que generan vertimientos producen una acelerada demanda de agua, al aumentar la demanda global, el volumen de aguas residuales generadas y su nivel de contaminación se encuentra en constante incremento a nivel mundial,

donde la mayor parte de las aguas residuales industriales se vierte directamente al medio ambiente sin un tratamiento adecuado. Lo anterior tiene repercusiones negativas en la salud de las personas, la productividad económica, la calidad de los recursos ambientales y los ecosistemas.

En la actualidad, gracias a los adelantos tecnológicos se puede evidenciar que el coste de la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) se reduce de forma constante desde la existencia de sistemas como la electrocoagulación. Es por esto, que se hace conveniente enfocarse en establecer la factibilidad de aprovechar y validar un diseño de una PTARI con su estructura, tanques de almacenamiento, electrocoagulador, filtros, dosificaciones y un sistema de control automatizado, que permita verificar el comportamiento de la electrocoagulación para efluentes con tintura de la industria textil.

El proceso que se propone como solución mecatrónica consiste en una metodología de desestabilización de los contaminantes del agua que estén en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa de bajo voltaje y por la operación de electrodos metálicos de sacrificio, normalmente aluminio/hierro. En este proceso se genera una elevada carga de cationes que desestabilizan los contaminantes del agua residual, se forman hidróxidos complejos, estos tienen capacidad de adsorción produciendo agregados con los contaminantes.

Palabras clave: PTARI; tintorería; mecatrónica; industrias textiles

Abstract

Wastewater from the textile industry is one of the factors with the highest levels of contaminants in the water used in the washing, dyeing, printing and finishing processes in the dyeing plants located in the coffee region, more specifically in the department of Risaralda.

The MECABOT research group, from higher education institutions, seeks the implementation of technological developments and social impact, with the main interest of establishing contributions from the mechatronic component to environmental sustainability, focused on the environment of action within the regional productive sector, seeking from the academy to propose engineering solutions that contribute to the optimal access and use of water resources, as well as the elimination of waste and wastewater.

The systems that currently exist show that they are not optimal due to the dumping of dyes and the inefficient use of industrial wastewater treatment plants (PTARI). In the search for alternatives, the creation of environmental awareness is proposed, allowing a joint work between textile entrepreneurs, the community and the entities in charge of the control of these discharges.

Most of the activities in laundries and dry cleaners that generate discharges produce an accelerated demand for water. As global demand increases, the volume of wastewater generated and its level of contamination is constantly increasing worldwide, where most of the industrial wastewater is discharged directly into the environment without adequate treatment. This has negative



repercussions on people's health, economic productivity, the quality of environmental resources and ecosystems.

Nowadays, thanks to technological advances, it is evident that the cost of implementing an industrial wastewater treatment plant (WWTP) is steadily decreasing since the existence of systems such as electrocoagulation. For this reason, it is convenient to focus on establishing the feasibility of using and validating the design of a WWTP with its structure, storage tanks, electrocoagulator, filters, dosing and an automated control system, which allows verifying the behavior of electrocoagulation for effluents with dye from the textile industry.

he process proposed as a mechatronic solution consists of a methodology of destabilization of water pollutants whether they are in suspension, emulsified or dissolved, through the action of low voltage direct electric current and by the action of sacrificial metal electrodes, usually aluminum/iron. This process generates a high load of cations that destabilize the pollutants in the wastewater, complex hydroxides are formed, which have adsorption capacity producing aggregates with the pollutants.

Keywords: PTARI; dyeing; mechatronics; textile industries

1. Introducción

Desde el grupo de investigación MECABOT, se desea dar solución a los posibles retos que fundamenten aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento mecatrónico, realizando inclusión social de la academia al entorno regional, dando soluciones y propuestas de ingeniería que respondan a la eliminación adecuada de residuos y aguas residuales.

En el departamento de Risaralda, donde convergen diferentes sectores textiles del eje cafetero, se evidencia que los sistemas existentes no cumplen con los lineamientos emanados desde la Corporación Autónoma Regional de Risaralda, en lo relacionado con el vertimiento con colorantes y además con el conocimiento específico que las soluciones a través de la implementación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales son insuficientes o inapropiadas, así como el requerimiento por parte del ente de control, a la creación de conciencia ambiental y controlar los vertimientos de aguas residuales industriales provenientes de la industria textil, debido a la sensibilidad del tema para la comunidad y debe ser abordado por los empresarios.

La principal dificultad que argumenta el sector productivo, que para darle cumplimiento al Decreto 3930 de 2010, en virtud de la responsabilidad social y ambiental, traducido en el bienestar de la comunidad y el medio ambiente, es de índole financiero, al reconocer el elevado costo de la inversión inicial, así como la imposibilidad de no trasladar estos valores de actualización tecnológica e impactar la proyección económica del producto final, por la disposición de la infraestructura física para implementar la construcción de los sistemas de tratamiento.

El mundo se encuentra actualmente inmerso en la “cuarta revolución industrial”, caracterizada por un marcado avance científico y tecnológico, así como constantes cambios en los principios rectores de la sociedad. Las fuerzas del cambio y los impactos de esta nueva situación no se hacen esperar



en las organizaciones, incluyendo a las universidades, siendo necesario realizar una adecuada planeación y ajuste en la gestión de estas, guiando su actuación con propósitos de sostenibilidad e innovación.

A continuación, se realiza una propuesta a través de la validación en la industria de sistemas de tratamiento para efluentes de tintorerías, a partir del funcionamiento de sistemas de electro ionización y electrocoagulación.

2. Diseño mecatrónico de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARI) para la disposición de aguas provenientes de una tintorería industrial

El agua residual de la industria textil es altamente contaminante, sobre todo el agua empleada en procesos de lavado, tinte, estampación y acabado. Para la fabricación de una tonelada de producto textil se consume aproximadamente 200 toneladas (sin considerar el consumo de producción agrícola) de agua y del total de productos químicos utilizados, el 90% es vertido como desecho después de cumplir su misión.

Las características de las aguas residuales son irregulares y variables en su composición ya que dependen de la unidad de proceso y la operación que se efectuó. Además, las aguas residuales textiles se caracterizan por tener pH que varía de acuerdo con el proceso, altos valores de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno, altos niveles de color, turbiedad, una alta concentración de sólidos suspendidos y descargas a alta temperatura.

Los vertidos generados en este proceso son más abundantes en la etapa de lavado y aclarado, sobre todo si son tonos muy intensos. El grado de contaminación y volumen de vertido depende de varios factores:

- Tipo de baño.
- Grado de fijación del colorante
- Tendencia a usar colorantes con una mayor reactividad para ser más eficiente el proceso disminuyendo colorante hidrolizado, que termina en el efluente, además estos colorantes requieren cantidades menores de electrolito, menos número de enjuagues, siendo una ventaja adicional y determinante.
- Colorantes insolubles en agua la gama se extiende a los de tipo disperso, sulfuroso y tina.





Figura 1. Muestra de Colorantes en vertimientos en la zona textil de Dosquebradas -Risaralda

- **Sistema de electrocoagulación para remoción de contaminantes de la industria textil**

El fundamento teórico de la electrocoagulación, producido en el proceso de la electrólisis, consiste en que la precipitación se lleva a cabo al mismo tiempo que la desestabilización de coloides; en cambio la coagulación química, consiste en la formación de lodos debido a la unión de coloides formando masas de tamaño considerable, para luego separarlas del agua mediante la adición de más químicos como: el sulfato de aluminio, cloruro férrico, entre otros que hace la función de floculante.

Las masas de coloides se forman por el contacto entre los coloides, éste se logra principalmente por el movimiento del líquido, debido a fenómenos eléctricos, como la presencia de iones de carga opuesta a la de los coloides, acción del catión y otros.

Es importante mencionar, que el agua al ser sometida a la electrólisis, que favorece la presencia de sales en disolución, como el cloruro de sodio, posibilita la conducción de electricidad y están presentes en la mayoría de las aguas residuales de la industria textil, en donde se emplean colorantes que requieren de electrolito para la reacción química entre colorante y fibra. Debido a esto, se produce un desprendimiento de hidrógeno y oxígeno gaseoso en sus respectivos electrodos.

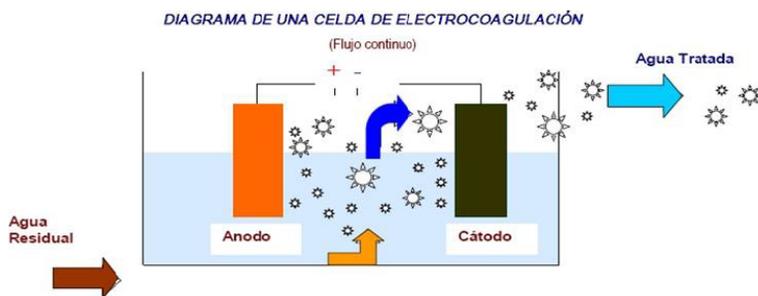


Figura 2. Diagrama de una celda de electrocoagulación.

Estos gases al ascender a la superficie provocan tres fenómenos: Separación rápida de coloides del electrodo, evitando que se ensucie (limpieza), arrastre de coloides desestabilizados a la superficie formando una nata, posibilitando no sólo una extracción por sedimentación clásica, sino también, por flotación. Debido a las burbujas de gas se producen corrientes ascendentes y descendientes de la solución ocasionando una mejor superficie de contacto, provocando así un



aumento en la eficiencia de desestabilización. Esta agitación espontánea evita la agitación mecánica, la cual es muy útil para la formación de los flóculos.

En la floculación con la adición de sustancias para estos procesos, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado, garantizando un posible proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas domésticas, industriales y de la minería. Los compuestos que pueden estar presentes en el agua son: Sólidos en suspensión, Partículas coloidales (menos de 1 micra), gobernadas por el movimiento browniano y sustancias disueltas (menos que varios nanómetros).



Figura 2. Muestra de compuestos como resultado del proceso de floculación.

3. Tópicos para la implementación del prototipo.

Los tópicos para el diseño del modelo mecatrónico son los siguientes:

- La eficiencia del proceso de electrocoagulación depende de varios parámetros operativos, como la conductividad de la solución, la disposición del electrodo, la forma del electrodo, el tipo de fuente de alimentación, el pH de la solución, la densidad de corriente, la distancia entre los electrodos, la velocidad de agitación, el tiempo de electrólisis inicial de concentración de contaminantes, tiempo de retención y pasivación del electrodo.
- La conductividad de la solución es un parámetro muy importante en el proceso de electrólisis, ya que la eficiencia de eliminación del contaminante y el costo operativo están directamente relacionados con la conductividad de la solución.
- La solución debe tener una conductividad mínima para el flujo de la corriente eléctrica. La conductividad de las aguas residuales de baja conductividad se ajusta añadiendo una cantidad suficiente de sales como cloruro de sodio o sulfato de sodio. Hay un aumento en la densidad de corriente con un aumento en la conductividad de la solución a voltaje de celda constante o una reducción en el voltaje de celda a densidad de corriente constante. El consumo de energía se reduce con una solución de alta conductividad.
- El material del electrodo y el modo de conexión de los electrodos juegan un papel importante en el análisis de costes del proceso de electrocoagulación. Se conoce que para el tratamiento de aguas residuales textiles se plantean varios modos de conexión de



electrodos en función del pH de las aguas residuales, la densidad de corriente y el tiempo de funcionamiento. Son esos tres modos:

- Electrodo monopolar en conexiones paralelas (MP-P)
 - Electrodo monopolar en conexión en serie (MP-S)
 - Electrodo bipolar en conexiones en serie (BP-S)
- La forma de los electrodos afecta la eficiencia de eliminación de contaminantes en el proceso de electrocoagulación. Se espera que los electrodos del tipo de orificios perforados den como resultado una mayor eficiencia de eliminación en comparación con los electrodos planos.
 - El tipo de fuente de alimentación para el proceso de electrocoagulación, se necesita una generación in situ de iones de hidróxido de metal por oxidación electrolítica del ánodo sacrificado. Estos iones de hidróxido de metal actúan como coagulantes y eliminan los contaminantes de la solución por sedimentación. La mayoría de los estudios reportados en la literatura han utilizado corriente continua (DC) en el proceso de electrocoagulación. El uso de CC conduce a la formación de corrosión en el ánodo debido a la oxidación. También se forma una capa de oxidación en el cátodo que reduce el flujo de corriente entre el cátodo y el ánodo y, por lo tanto, reduce la eficiencia de eliminación de contaminantes.
 - El pH de la solución es un parámetro operativo importante en la electrocoagulación. La máxima eficiencia de eliminación de contaminantes se obtiene a un pH de solución óptimo para un contaminante en particular. La precipitación de un contaminante comienza a un pH particular. La eficiencia de eliminación de contaminantes disminuye al aumentar o disminuir el pH de la solución desde el pH óptimo.
 - La densidad de corriente es un parámetro muy importante en la electrocoagulación, ya que determina la tasa de dosificación del coagulante, la tasa de producción de burbujas, el tamaño y el crecimiento de los flóculos, lo que puede afectar la eficiencia de la electrocoagulación. Con un aumento en la densidad de corriente, aumenta la velocidad de disolución del ánodo. Esto conduce a un aumento en el número de flóculos de hidróxido de metal que resulta en un aumento en la eficiencia de eliminación de contaminantes. Un aumento en la densidad de corriente por encima de la densidad de corriente óptima no da como resultado un aumento en la eficiencia de eliminación de contaminantes ya que se dispone de un número suficiente de flóculos de hidróxido metálico para la sedimentación del contaminante.
 - La distancia entre los electrodos en la electrocoagulación ya que el campo electrostático depende de la distancia entre el ánodo y el cátodo, referencia la máxima eficiencia de eliminación de contaminantes a partir, del manteniéndose a una distancia óptima entre los electrodos.
 - El efecto de la velocidad de agitación ayuda a mantener condiciones uniformes y evita la formación de gradientes de concentración en la celda de electrólisis. Además, la agitación en la celda de electrólisis imparte velocidad para el movimiento de los iones generados.



Con un aumento en la velocidad de agitación hasta la velocidad de agitación óptima, hay un aumento en la eficiencia de eliminación de contaminantes. Esto se debe, a que con un aumento en la movilidad de los iones generados, los flóculos se forman mucho antes, lo que resulta en un aumento en la eficiencia de eliminación de contaminantes durante un tiempo de electrólisis particular.

- La eficiencia de eliminación de contaminantes también es función del tiempo de electrólisis. La eficiencia de eliminación de contaminantes aumenta con el aumento del tiempo de electrólisis. Pero más allá del tiempo óptimo de electrólisis, la eficiencia de eliminación de contaminantes se vuelve constante y no aumenta con una extensión en el tiempo de electrólisis. Los hidróxidos metálicos se forman mediante la disolución del ánodo. Para una densidad de corriente fija, el número de hidróxido metálico generado aumenta con un aumento en el tiempo de electrólisis.
- Una vez completado el proceso de electrocoagulación durante un tiempo de electrólisis particular, la solución se mantiene durante un período fijo (tiempo de retención) para permitir la sedimentación de las especies coaguladas. A medida que aumenta el tiempo de retención, crece la eficiencia de eliminación de contaminantes.
- La pasivación del electrodo es la acumulación de una capa inhibidora (generalmente un óxido) en la superficie del electrodo. La pasivación no es deseable para la disolución del ánodo y la operación de electrocoagulación. El control principal de la pasivación es el modo de funcionamiento galvanostático. La corriente y el potencial dependen de la resistencia general del sistema.

4. Modelo mecatrónico de la PTARI para industrias textiles.

A continuación, se presenta el modelo de PTARI, donde se muestra la disposición de las aguas residuales industriales generadas en el proceso, que son tratadas mediante el procedimiento de coagulación, sedimentación y floculación generando lodos, llamados lodos fisicoquímicos.



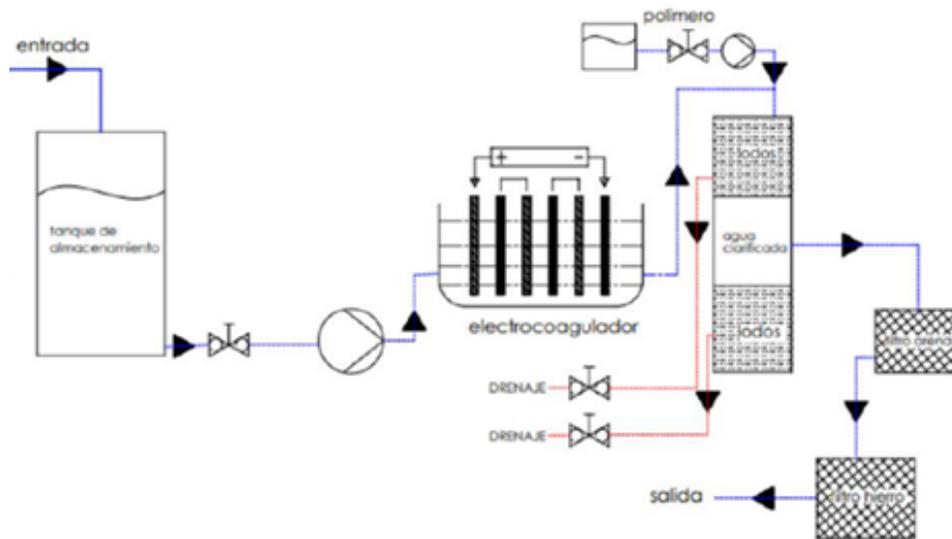


Figura 3. Modelo definitivo de la PTARI.

En este modelo se presenta: un tanque de almacenamiento, como el depósito que se utiliza para manipular y almacenar diferentes sustancias como por ejemplo gases, líquidos, productos de origen químico y petróleos, entre otros. El sistema de flotación por aire disuelto, siendo un tipo de equipo de separación sólido-líquido comúnmente utilizado, que puede eliminar eficazmente la materia suspendida, la grasa y las sustancias de caucho en las aguas residuales, y es el equipo principal del tratamiento preliminar de aguas residuales, filtro removedor de hierro, filtro removedor de arena, sistema de control, carga orgánica del agua por corriente eléctrica a partir de la electrólisis y polímeros como macromoléculas que son llamadas monómeros.

5. Conclusiones

- Para este modelo, se realiza un análisis de costos involucrando en el proceso electrocoagulación, el costo del consumo de energía, el costo del electrodo disuelto y el costo de la adición de cualquier químico externo (para aumentar la conductividad de la solución o variar el pH de la solución) y el costo operativo. La electrocoagulación es el proceso más económico contrastado con el método convencional. Se encuentra que el costo operativo de la electrocoagulación es de \$ 6205 por m³ de efluente de curtiduría tratado, en comparación con el costo de \$ 12775 por m³ del efluente tratado para los métodos convencionales, además, se confirma que el costo operativo de la coagulación química es 3,2 veces mayor que el tratamiento formulado.
- Debido a la continua violación de la reglamentación amparada en el Decreto 3930 de 2010, entidades de control ambiental han endurecido sus controles y multas, comprometiendo hasta la misma disponibilidad de funcionamiento de la empresa.



- Este tipo de implementaciones genera apropiación social del conocimiento, a partir de formular nuevas opciones para que la industria regional, siendo un modelo de acceso libre con características de viabilidad técnica y económica para empresas locales realicen PTARI, obteniendo a largo plazo una definitiva reducción de impuestos debido a su producción más limpia.

6. Referencias

- Navarro, F. M. (2008) Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional, Ediciones de la universidad de Castilla - La Mancha.
- Ministerio de ambiente, Decreto número 3930 de 2010.
- Valenzuela, J.A.(2008) Aplicación de electrocoagulación y electro floculación para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización.
- Publisher, J. (2018) «Fashion Technology & Textile Engineering,»

Sobre los autores

- **Henry William Peñuela Meneses.** Ingeniero Electricista, Máster en Instrumentación Física. Profesor Facultad de Tecnología. Integrante del Grupo de Investigación MECABOT, Semillero de Investigación MECABOTICA. Universidad Tecnológica de Pereira tesla@utp.edu.co
- **María Elena Leyes Sánchez.** Ingeniero Electricista, Doctor© en Ciencias de la educación, Máster en Instrumentación Física. Profesor Facultad de Tecnología y Facultad de Ciencias Básicas. Integrante del Grupo de Investigación MECABOT, Semillero de Investigación MECABOTICA. Universidad Tecnológica de Pereira. mleyes@utp.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2021 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)

