

REVISIÓN E IDENTIFICACIÓN DE TRATAMIENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE RECIRCULACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

José A. Ríos^{*†}, Jorge I. Posada O.^{*}, Juan F. Uribe G.^{**}

**Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de Investigación Ambiental Cir. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia.*

Recibido 15 Agosto 2011; aceptado 28 Octubre 2011
Disponible en línea: 16 Diciembre de 2011

Resumen: En el presente artículo se determinó el potencial de recirculación de aguas residuales de sectores industriales tales como alimentos y bebidas, textil y confecciones, pulpa y papel, productos químicos, metales y galvanoplastia y lavanderías, ubicadas en el área metropolitana de la ciudad de Medellín (Colombia), los cuales fueron sectorizados bajo el Código Industrial Internacional Uniforme (CIIU). Para la estimación del potencial fueron analizados varios parámetros, entre los que están la calidad del abastecimiento de aguas, procesos internos tanto productivos como secundarios y el tratamiento de efluentes. A partir de esta información y estudios realizados a nivel mundial se definió la técnica más apropiada para la recirculación de las aguas residuales, alcanzando potenciales desde 65 hasta 95%, *Copyright © 2011 UPB.*

Palabras clave: Recirculación, Tratamiento de Aguas, Aguas Residuales, Membrana.

Abstract: In this article was determined the potential for recycling wastewater industries such as food and beverages, textiles and clothing, pulp and paper, chemicals, metals and electroplating and laundries, located in the metropolitan area of Medellin (Colombia), which were sectorized under the International Standard Industrial Code (CIIU). To estimate the potential were analyzed various parameters, which were the quality of water supply, internal processes that are both productive and secondary treatment of effluent. From this information and global studies defined the most appropriate technique for the recycling of wastewater, potentially reaching 65 to 95%.

Keywords: Recirculation, water treatment, wastewater, membrane.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad del uso del agua en los diferentes procesos industriales se encuentra asociada con la adición de contaminantes en el paso de esta por cada uno de los procesos, que incluidos con las aguas residuales domésticas de la propia empresa, aumentan su carga de desechos. La experiencia sobre el empleo de agua industrial recirculada es

aún muy restringida en Colombia. Un enfoque preventivo para controlar la contaminación causada por estos efluentes, debe necesariamente comenzar en la industria con el cambio de procesos productivos por tecnologías limpias, minimizar descargas, reutilizar el agua y tratar en forma separada los efluentes con las tecnologías apropiadas que les permitan cumplir con la

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. (+574) 4488388 ext 14029.
E-mail: jose.rios@upb.edu.co (Jose A. Rios).

regulación ambiental establecida de cada país, y en los casos que esta calidad lo permita, recirculándola dentro de la misma industria. El reuso de aguas industriales se presenta como un recurso hídrico disponible para combatir la demanda de agua en la industria y juega un papel importante en la planificación y la gestión integrada del recurso hídrico ([Manga et al, 2001](#)). Con el fin de reducir los vertimientos en el sector industrial se emplea como una alternativa la recirculación de las aguas residuales, técnica que consiste básicamente en reutilizar las aguas de desecho de algunas actividades o procesos, ya sea directamente o mediante un tratamiento previo que permita mejorar sus condiciones hasta el punto que puedan ser utilizadas en otras actividades que lo permitan, o incluso llegar a retornarlas para reutilizarse nuevamente en el proceso productivo ([Koning, 2008](#)).

La recirculación del agua es una técnica utilizada en muchos países incluidos Estados Unidos, México, Alemania, los países del Mediterráneo y de Oriente Medio, Sudáfrica, Australia, Japón, China y Singapur. En este aumento han tenido que ver los modernos procesos de tratamiento de las aguas residuales que experimentaron un significativo avance durante el siglo XX. Tales procesos permiten en la actualidad eliminar materiales biodegradables, patógenos, nutrientes y toda clase de sólidos, lo que conlleva a que el agua tratada pueda tener así una amplia gama de aplicaciones ([Lazarova, et al, 2003](#)).

Actualmente en algunos países, las técnicas de recirculación, tanto a escala agrícola como industrial, están permitiendo disminuir la demanda de agua. Es el caso de España, donde cada año se reusan alrededor de 200 millones de m³, de los cuales el 4% se hace en el ámbito industrial. Se espera que este valor alcance los 1200 millones de m³/año para el 2012, equivalente a un incremento potencial del 600% ([Castillo, et al, 2007](#)). Recircular el agua ha sido un caso exitoso en varias industrias utilizándose en diferentes aplicaciones industriales tales como agua de refrigeración y agua de procesos ([Maeda et al, 2005](#)).

Las tendencias en la reutilización de las aguas residuales se dirigen a tres líneas de actuación, las cuales son: tipos de usos, seguridad y tecnologías aplicadas; están relacionadas entre sí. La tecnología a utilizar depende del tipo de uso del agua regenerada y de los criterios de calidad,

físico-química y sanitaria, que requiera cada aplicación ([Delgado, 2008](#)). Con respecto a la seguridad en el empleo de las aguas residuales, una vez regeneradas, se dispone de una gran variedad de guías para los diferentes usos ya establecidos, sin embargo, no existe uniformidad de criterios y cada país o estado propone una norma para un uso concreto que, en muchas ocasiones, difiere mucho de otro país para el mismo fin. Las tendencias en este campo van encaminadas al establecimiento de una guía unificada basada en criterios de análisis de riesgo real, en los usos convencionales de este tipo de recurso hídrico ([Anderson, et al, 2001](#)). En lo que se refiere a tecnologías para la regeneración de aguas residuales industriales, los tratamientos avanzados permiten calidades de agua suficientes para diferentes aplicaciones como la recirculación. Los efluentes obtenidos de los tratamientos convencionales no suelen alcanzar la calidad adecuada para la mayor parte de las aplicaciones, por lo que necesitan de un tratamiento terciario o de una nueva tecnología que resulte más eficiente en conjunto para alcanzar la calidad precisa. La utilización de membranas de micro, ultra y nanofiltración en el tratamiento de efluentes, es una tecnología que logra una alta calidad en el agua para su posterior recirculación ([Karim y Hani, 2002](#)).

Las tecnologías de membrana para regeneración de aguas residuales se emplean únicamente en aquellos casos en que el empleo del agua regenerada justifica el precio final, o bien en aquellos casos donde hay un elevado contenido de compuestos contaminantes en el agua residual. Las tecnologías de membrana además, cumplen con la eliminación de compuestos particulados, remoción de microorganismos y al mismo tiempo la desalinización del efluente ([Tang y Chen, 2002](#)). En los últimos años han aparecido innovaciones en los procesos de filtración que incluyen el empleo de membranas sumergidas en bioreactores en sistemas de alta presión ([Durham et al, 2001](#)).

Debido a su versatilidad y a su amplia variedad de aplicaciones, las tecnologías de membrana son procesos claves en las aplicaciones de recirculación de aguas residuales industriales, las cuatro tecnologías principales de flujo transversal impulsadas por presión utilizadas en la actualidad son: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, todas estas utilizan la presión como fuerza motriz ([Cartwright, 2006](#)). Los

diferentes sistemas integrados de membranas, están siendo evaluados en diversas instalaciones encargadas del estudio de las tecnologías aplicadas a la regeneración de aguas residuales depuradas, con objeto de optimizar las instalaciones definitivas de obtención de agua regenerada para los procesos de recirculación industriales ([Redondo, 2002](#)).

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Integración de la información

Como primera instancia se consulto, reviso y analizo literatura sobre las técnicas de recirculación de aguas a nivel internacional, nacional y local. La obtención de la información estuvo enfocada básicamente en el sector industrial. Para la integración de la información de los índices internacionales sobre sistemas de recirculación aplicados se empleó base de datos, internet, bibliotecas y centros de documentación, publicaciones en revistas internacionales, ponencias y seminarios.

La metodología utilizada a nivel local consistió básicamente en recolectar información durante visitas técnicas realizadas a diversos tipos de empresas; además de información secundaria, principalmente aquella que se encontraba en publicaciones gubernamentales y entidades relacionadas con el manejo de recursos naturales.

2.2. Clasificación de la información

Con base en la información recopilada, esta fue clasificada bajo los siguientes parámetros:

2.2.1. Recirculación de agua a nivel internacional, índices de consumo y capacidad para reuso.

2.2.2. Recirculación de agua a nivel local y potencial de los sectores industriales para su posterior reuso.

2.2.3. Procesos implementados a nivel internacional para la recirculación de aguas industriales.

2.2.4 Sectores industriales en el ámbito local con potencialidad de recirculación de aguas residuales.

2.2.5 Posibles tratamientos para regeneración de agua en las industrias locales.

2.3. Identificación de los sectores industriales locales para la determinación del potencial de recirculación

Los consumos de agua a nivel industrial son variados, tanto en cantidad como en calidad, esta variedad en el empleo del agua exigió hacer una división del sector industrial en diferentes subsectores, para lo cual se utilizó el Código Industrial Internacional Uniforme (CIIU), y según esta clasificación se identificaron 6 sectores repartidos en 9 industrias.

2.3.1. Sector de Alimentos y bebidas.

Empresa procesadora de café e industria cervecera.

2.3.2 Sector textil y confecciones.

Empresa fabricante de fibras sintéticas y artificiales.

2.3.3. Sector de pulpa y papel.

Empresa fabricante de cartón corrugado y empresa productora de papeles finos de impresión y escritura.

2.3.4. Sector de productos químicos.

Empresa fabricante de materias colorantes orgánicas, extractos para tintas y materias curtientes orgánicas y empresa fabricante de pigmentos inorgánicos.

2.3.5 Sector de metales y galvanoplastia.

Industria metalmeccánica dedicada específicamente a la elaboración de parrillería y sistemas de exhibición.

2.3.6. Sector de lavandería y tintorerías.

Empresa dedicada al procesamiento y lavandería de prendas confeccionadas.

2.4. Visitas técnicas realizadas a las industria de los sectores identificados

Se realizaron visitas técnicas de reconocimiento a las industrias (ver sección 2.3) que accedieron a colaborar con el proyecto, durante las cuales se

recopiló información sobre el abastecimiento de agua, procesos para el tratamiento de las aguas residuales, capacidad de operación de la planta de tratamiento de aguas, descarga y caracterización del agua residual tratada para la posterior determinación del potencial de recirculación.

2.5. Viabilidad del potencial de recirculación de aguas en los sectores industriales analizados

Partiendo del análisis realizado a los parámetros encontrados durante las visitas técnicas a las diferentes industrias, se desarrollaron propuestas de tratamiento para la recirculación de aguas residuales industriales, en las que se tuvo en cuenta el abastecimiento de agua, la calidad mínima requerida del agua para los procesos productivos y secundarios, los tratamientos de aguas residuales que emplea cada una de las empresas y la caracterización de los efluentes, todo esto permitiendo finalmente, comparar cada uno de los parámetros mencionados de las empresas visitadas frente a las empresas que presentan un desarrollo en la implementación de las técnicas de recirculación para la determinación de su potencial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Empresa procesadora de café

Durante la visita técnica realizada, se encontró que la actividad productiva se basa en los procesos de tostado, secado, aglomerado, extracción y empaque; para la producción de 6000 toneladas de café al año, aproximadamente.

El abastecimiento de agua a la empresa es suministrado por las Empresas Públicas de Medellín (EPM). Las aguas residuales industriales que resultan de la empresa, son principalmente provenientes del proceso de extracción de café, el cual es necesario hacer pasar por procesos de prensado y filtro prensado. El agua que resulta de estos procesos pasa a un tanque donde se hace control de pH, luego a un tanque de flotación para neutralizar y finalmente se realiza una retención de sólidos para su descarga en el alcantarillado. El resultado del tratamiento genera una caracterización de aguas residuales la cual se presenta en la [Tabla 1](#).

Tabla 1. Composición fisicoquímica del efluente de la empresa procesadora de café.

Parámetro	Efluente
pH	7.5
T (°C)	30
DBO ₅ (mg/L)	120
DQO (mg/L)	276
SST (mg/L)	46
Grasas y Aceites (mg/L)	26.8
Caudal (L/s)	5.01

La empresa posee una caldera de presión media para la generación de energía. Los patrones de calidad recomendados de agua para generación de vapor, se presentan en la [Tabla 2](#).

Tabla 2. Parámetros de agua para empleo en calderas

Parámetro	Caldera de media presión (145 - 725.20 psi)
pH	6 - 9
SST(mg/L)	5
SDT (mg/L)	500
Dureza (mg/L)	1
DBO (mg/L)	---
DQO (mg/L)	5

Fuente: manual de orientaciones para el sector industrial. Conservación y reuso de guas. San pablo (2004). p. 27.

El agua que resulta del proceso del café no puede emplearse en la caldera porque debe removerse la dureza, debido a que el servicio de agua que la empresa posee maneja valores de dureza aproximadamente de 14.3 mg/L ([Reporte calidad de aguas, 2011](#)), el esquema de tratamiento para el agua de caldera consiste en procesos de ablandamiento de aguas empleando filtros con resinas de intercambio iónico, los cuáles no posee la empresa.

De acuerdo con el análisis de las aguas se propone un sistema de membrana de ósmosis inversa para la recirculación del efluente, el cual se ha demostrado que para aguas residuales de empresas de alimentos y bebidas promueve remociones de carga contaminante de aproximadamente del 90%. En este proceso se

puede eliminar del agua de alimentación de la caldera, componentes indeseables para su normal desempeño. La bondad de este tratamiento genera porcentaje de remoción del 99% de los iones de sulfato, el 96% de hierro, el 93% de bicarbonato, un 90% de sodio, magnesio e iones de sulfuro, el 86% de potasio, 73% de fosfato, 85% de iones de calcio, 90% DQO y 95% DBO (Hafez et al, 2007). Con este proceso se asegura la disminución de la dureza del agua de alimentación hasta los niveles recomendados para el empleo de esta en la caldera, además de la remoción de casi la totalidad de toda la carga biológica. Bajo este análisis se puede considerar un potencial de recirculación entre el 85 y 90% de las aguas residuales industriales.

3.2. Industria cervecera

En la visita realizada, se encontró que la actividad principal de la empresa es la elaboración y comercialización de cerveza, la cual posee una producción promedio de 200000 hectolitros por mes. El abastecimiento de agua se hace desde la quebrada Doña María (Antioquia, Colombia), de la cual se captan 645 L/s, de los cuales 145 litros se tratan para utilizarlos en el proceso productivo y los 500 litros restantes se llevan a una turbina para generar energía eléctrica.

Las aguas residuales que genera la empresa, procedente de los procesos productivos, son sometidas a un tratamiento para la remoción de sólidos gruesos y neutralización del pH, los controles de temperatura se realizan directamente en las áreas de producción. La calidad del agua después de estos tratamientos se presenta a continuación.

Tabla 3. Composición fisicoquímica del efluente de la empresa fabricante de cerveza

Parámetro	Efluente
pH	7
T (°C)	29
DBO ₅ (mg/L)	134
DQO (mg/L)	345
SST (mg/L)	64.4
Grasas y Aceites (mg/L)	31.7
Caudal (L/s)	2.5

Las oportunidades que se encuentran disponibles para el tratamiento de aguas residuales para su

posterior recirculación en industrias cerveceras, se fragmentan en dos opciones, las cuales son, emplear el agua en el proceso productivo de la elaboración de la cerveza o aprovechar el agua en procesos en que esta no entre en contactos con la elaboración de la cerveza, por ejemplo, servicios de refrigeración y procesos de lavado de envases y equipos, el efluente regenerado debe cumplir los parámetro que se presentan en la [Tabla 4](#), entre los parámetros presentados, el más importante para el recirculación de agua es la demanda química de oxígeno (DQO), ésta es una medida del oxígeno disuelto el cual es equivalente al contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible a la oxidación por un oxidante fuerte ([Braeken et al, 2006](#)).

Tabla 4. Normas de calidad de agua de lavado, enfriamiento y valor objetivo para el agua potable

Parámetro	Agua para lavado	Agua para enfriamiento	Agua de bebida
DQO(mg/L)	0-2	0-2	0-2
Na ⁺ (mg/L)	0-200	/	20
Cl ⁻ (mg/L)	50-250	/	25
pH	6.5-9.5	6.5-9.5	6.5-9.5

Fuente: [Braeken](#), L., B. Van der bruggen y C. Vandecasteele. Regeneration of brewery waste water using nanofiltration, En: Water Research, (2004). p. 3076.

Comparando las tablas 3 y 4, se aprecia que la DQO que posee las aguas residuales industriales después de los tratamientos que se le realizan, tienen un valor considerablemente alto para su posterior recirculación en los procesos de producción, enfriamiento y lavado; debido a esto se debe tratar este efluente para alcanzar los intervalos de DQO presentados en la [Tabla 4](#).

Experimentaciones realizadas con efluentes de industrias cerveceras con índices de DQO entre 2000 y 6000 mg/L, SST entre 2900 y 3000 mg/L y DBO entre 1200 y 3600 mg/L ([Geoffrey et al, 2011](#)), los cuales son en gran medida superiores a los índices reportados por la empresa. Para esta caracterización de aguas residuales se recomienda implementar un sistema de nanofiltración donde experimentadores han obtenido remociones de DQO, DBO, SST, Na⁺, Cl⁻ aproximadamente de 100%, 98%, 95%, 55% y 70% respectivamente,

los cuales son suficientes para que las aguas queden libres de cualquier carga biológica, pero sin alcanzar la calidad para el empleo de esta como agua de regeneración en los procesos de lavado, enfriamiento y producción, debido a los índices resultantes de Na^+ y Cl^- , los cuales no cumplen los parámetros presentados en la tabla 4. (Braeken et al, 2006).

La ósmosis inversa suele combinarse con otras técnicas de separación física, así como el tratamiento biológico y físico-químico, para producir efluentes adecuados para su recirculación, por ejemplo, una combinación de nanofiltración y ósmosis inversa han producido agua de alta calidad (Geoffrey et al, 2011). La ósmosis inversa es el proceso de membrana más ajustado a la separación líquido / líquido y por lo tanto produce la mejor calidad de agua de cualquier proceso de membrana impulsado por presión. Las membranas de ósmosis inversa se caracterizan por la gran remoción de iones de Na^+ y Cl^- en rangos del 95 a 99,5%, esto genera un efluente perfectamente adecuado para la recirculación del efluente en aguas de procesos, omitiendo la necesidad de un método de pretratamiento químico (Seneviratne 2007). El potencial de recirculación de los efluentes de la fabricadora de cerveza pueden alcanzar valores entre 85 y 90% para el empleo del agua regenerada para lavado (equipos y envases), sistema de enfriamiento y proceso productivo de la cerveza, debido a que la remoción de DQO, DBO, SST, Na^+ y Cl^- , como se pudo apreciar es prácticamente del 99% con el sistema combinado de tratamiento propuesto de nanofiltración y ósmosis inversa.

3.3. Empresa fabricadora de cartón corrugado

Esta empresa corresponde al sector de fabricación de pasta a partir de desechos de papel, cartón u otras fibras celulósicas. La actividad principal de la empresa es la producción y comercialización de papel y cajas de cartón corrugado. La empresa utiliza como fuente de abastecimiento de agua la quebrada Dosquebradas, y se realiza un tratamiento preliminar empleando un desarenador y una serie de rejillas en el punto de captación para la eliminación de sólidos y material flotante. El agua captada se destina para los siguientes usos: producción de vapor en todas las plantas, proceso y mantenimiento en planta de pulpa y

papel, planta de corrugado y planta recuperadora de soda. Las características de las aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento se presentan en la [Tabla 5](#).

Tabla 5. Composición fisicoquímica del efluente de la empresa fabricadora de cartón corrugado

Parámetro	Efluente
pH	7.34
T (°C)	31
DBO ₅ (mg/L)	876.41
DQO (mg/L)	1575.3
SST (mg/L)	415.4
Grasas y Aceites (mg/L)	7.8
Caudal (L/s)	14.02

Los parámetros más importantes que deben cumplir las aguas de procesos para industrias de pulpa y papel se presentan a continuación.

Tabla 6. Calidad de agua para procesos para industria de pulpa y papel

Parámetro	Valor
DBO (mg/L)	<60
DQO (mg/L)	<400
SST (mg/L)	<150
pH	6-9

Fuente: Khansorthong S. y M. Hunsom. Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique, (2009). p. 230.

Se puede observar claramente que las aguas residuales que maneja la empresa poseen una caracterización tal, la cual imposibilita que estos efluentes puedan ser recirculados para su posterior integración al proceso productivo.

En estudios realizados con efluentes de caracterización similar en carga contaminante a los presentados por la empresa, algunos investigadores han empleado un sistema combinado de un reactor semicontinuo integrado a un proceso de electrocoagulación con electrodos de $\text{Ti/Co/SnO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_5$, donde se obtuvieron remociones aproximadas del 90% en los parámetros de DQO, DBO y SST de los efluentes tratados (Khansorthong y Humson 2009). Los resultados de la experimentación se presentan a continuación:

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas después del tratamiento en un reactor semicontinuo con electrocoagulación

Propiedades	Antes	Después
DBO (mg/L)	810 - 1095	74
DQO (mg/L)	490 - 1114	127
SST (mg/L)	40 - 260	5
pH	6.6 - 10	8.05

Fuente: Khansorthong S. y M. Hunsom. Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique, (2009). p. 230.

Cabe resaltar que la turbidez del efluente disminuyó drásticamente después del proceso de electrocoagulación, que se vio reflejada en las muy bajas concentraciones de nitratos, nitritos, fosfatos, y los iones de sulfato después del tratamiento ([Shen et al, 2005](#)).

Los resultados obtenidos son satisfactorios para todos los parámetros, cumpliendo con los valores de calidad para el empleo del agua en industria de pulpa y papel. La DBO queda por encima de los valores presentados en la tabla 5, pero cabe resaltar que el margen entre el valor apropiado y el valor obtenido en la experimentación fue de 14 mg/L, el cual se considera despreciable para su posterior recirculación como agua de proceso.

A partir de los resultados obtenidos en la experimentación presentada, se propone el sistema combinado de electrocoagulación en un reactor semicontinuo para los efluentes de la empresa, donde se considera que implementando este procedimiento se puede obtener un potencial de recirculación entre el 80 y 90% de sus efluentes para el proceso productivo de la empresa.

3.4. Empresa fabricante de papeles finos para impresión y escritura

La actividad principal es la fabricación de toallas para uso industrial y papeles finos de impresión y escritura. La empresa realiza captación de agua para uso industrial y doméstico de las quebradas Santa Rosa y Los Medios, en cantidad de 217 L/s. Para el procesamiento de sus efluentes cuenta con tres tratamientos primarios, las cuales reciben cada uno las aguas residuales de sus tres líneas de producción y un tratamiento secundario a la mezcla de todas las líneas. En resumen este

consta de un tanque de igualación, tres celdas de flotación, filtros de arena, filtro prensas, tratamiento biológico empleando un sistema de lodos activados y posteriormente un sedimentador. Después del tratamiento que se le da a cada uno de los efluentes, estos quedan caracterizados con los siguientes valores.

Tabla 8. Composición fisicoquímica del efluente de la empresa fabricante de papeles para impresión y escritura

Parámetros biológicos salida ptar				
PTAR	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Grasasy Aceites (mg/L)	ST (mg/L)
PTAR 1	15.97	47.2	2.2	136
PTAR 2	29.26	80.6	2.5	260
PTAR 3	40.94	124.1	2	709
Parámetros físicos salida ptar				
PTAR	SST (mg/L)	T (°C)	pH	Q (L/s)
PTAR 1	18.7	27	7.6	30.18
PTAR 2	25.2	27.65	8.1	21.76
PTAR 3	13.8	24	7.30	13.83

Para obtener los valores apropiados de los parámetros de aguas de proceso para industrias papeleras, los cuales se encuentran consignados en la [Tabla 6](#), y determinar el potencial de recirculación de los efluentes de la empresa, se propone un sistema combinado de microfiltración y ósmosis inversa, el cual se presenta a continuación.

Durante el desarrollo investigativo del tratamiento combinado que se propone, y en el que se basará para la determinación del potencial de recirculación, se trataron aguas residuales con las siguientes características.

Tabla 9. Composición fisicoquímica del efluente tratado en el estudio

Parámetros	Valores
DQO (mg/L)	1089
ST (mg/L)	2420
SST(mg/L)	345
pH	7.44

[Pizzichini M.](#), C. Russo y C. Di meo. Purification of pulp and paper wastewater, with membrane technology, for water reuse in a closed loop, En: Desalination (2004). p.353.

Realizando una comparación del efluente tratado en el estudio realizado frente a la caracterización de las aguas residuales de cada una de las líneas de producción reportadas por la empresa, se observa que el efluente presentado en la [Tabla 9](#) muestra valores superiores a los de la empresa visitada.

Los experimentos realizados se centraron en la definición de un nuevo proceso de membranas con alta productividad, bajo consumo de energía y bajos niveles de ensuciamiento, adecuado para el suministro de agua tratada reutilizable en el proceso de fabricación del papel. Las pruebas demostraron que para la purificación de las aguas residuales tratadas se requiere de dos etapas de filtración, en primer lugar la microfiltración para eliminar los sólidos en suspensión y el segundo paso, empleando ósmosis inversa para eliminar las sales solubles y disminuir la carga biológica. Esta combinación permite la recirculación de más del 80% de aguas residuales, para la integración de ésta al proceso productivo de papel ([Pizzichini et al, 2005](#)). Los porcentajes de remoción que se alcanzaron en el desarrollo de la experimentación se presentan a continuación:

Tabla 10. Resultados del tratamiento de efluentes con el sistema combinado microfiltración y ósmosis inversa

Parámetros	Remoción (%)
DQO (mg/L)	97.2
ST (mg/L)	98.6
SST(mg/L)	98.7
pH	---

Fuente: [Pizzichini M., C. Russo y C. Di meo.](#) Purification of pulp and paper wastewater, with membrane technology, for water reuse in a closed loop, En: Desalination (2004). p.356.

Con los resultados expuestos, se propone la adopción de este sistema de filtración (microfiltración y ósmosis inversa) para el tratamiento de los efluentes de la empresa, con el fin de regenerar sus efluentes para el empleo de éstos en su proceso productivo, alcanzando porcentajes de recirculación entre el 90 y 95%. Se recalca que no se tuvo en cuenta los valores de DBO, debido a que los efluentes de la empresa cumplen con los valores permisibles para su

posterior empleo en los procesos productivos que se puede observar en la [Tabla 6](#).

3.5. Empresa de procesamiento y lavandería de prendas confeccionadas

Para el acabado textil y uso en oficinas la empresa utiliza agua suministrada por Empresas Públicas de Medellín, las aguas residuales domésticas generadas provienen de las unidades sanitarias ubicadas en las oficinas y en la planta, las cuales son conducidas directamente a la red de alcantarillado.

Como aguas residuales industriales se tienen aquellas provenientes de los procesos de lavado de prendas, las cuales son conducidas hasta un tanque homogenizador de 300 m³ y un tanque desarenador, en donde se disminuye la temperatura, se controla el pH y se disminuye la concentración de sólidos suspendidos por sedimentación, posteriormente se realiza un proceso de floculación y separación de lodos, y el agua clarificada es llevada a tres filtros de arena y antracita y uno de carbón activado. Los lodos son llevados a un filtro prensa. El efluente del sistema se descarga al sistema de alcantarillado de Empresas públicas de Medellín.

La calidad del agua vertida por la empresa se presenta en la [Tabla 11](#).

Tabla 11. Características fisicoquímicas de las aguas residuales industriales

Parámetro	Efluente
pH	6.3
T (°C)	27
DBO ₅ (mg/L)	13.16
DQO (mg/L)	43
SST (mg/L)	17
Grasas y Aceites (mg/L)	2.5
Caudal (L/s)	18.35

El sistema que se propone para la recirculación consiste en una separación inicial de fibras. La corriente de agua residual se lleva a un proceso con un reactor de membrana (MBR). El permeado se lleva a un proceso de ultrafiltración (UF) y este se trata posteriormente en una etapa de nanofiltración (NF) para alcanzar los requerimientos de agua de proceso de lavado la

cual se presenta en la [Tabla 12](#). Debido a la eficiencia del MBR se consigue una reducción del 75%. ([Gehlert y Wienands, 2007](#))

Tabla 12. Parámetros de calidad para el agua utilizada en tinturas

Parámetro	Efluente
pH	8,02
T (°C)	25
DBO ₅ (mg/L)	3.5
SST (mg/L)	120
Turbidez (NTU)	35
Color (mg Pt-Co/L)	200

Fuente: [Crespi](#), M. Reutilización de los Efluentes Textiles en Europa. En: Bol.Intexter. (2001). p. 14.

Según los valores de los parámetros del efluente vertido por la empresa, en comparación con los parámetros de calidad del agua utilizada en tinturas, se podría reutilizar las aguas residuales industriales con un potencial de reutilización del 70 al 75%, si se mantiene un control adecuado de la instalación para que la eliminación de la materia orgánica, DQO y DBO sea elevada ([Crespi, 1989](#)).

3.6. Empresa fabricante de fibras sintéticas y artificiales

La empresa se abastece de la quebrada El Salado (Antioquia, Colombia) con un caudal real captado de 8.33 L/s aproximadamente para uso doméstico e industrial. La empresa genera aguas residuales industriales y domésticas, para lo cual dispone de una planta de tratamiento de aguas residuales. El manejo de las aguas residuales consta de varias unidades preliminares que permiten la eliminación de sólidos gruesos y sedimentables provenientes del proceso del lavado de envases fabricados de polietileno (PET), la caracterización se presenta continuación.

Tabla 13. Efluente de empresa fabricante de fibras sintéticas y artificiales

Parámetro	Efluente
pH	6.1
T (°C)	28.5
DBO ₅ (mg/L)	295.46
DQO (mg/L)	712.9
SST (mg/L)	64.4
Grasas y Aceites (mg/L)	42.6
Caudal (L/s)	2.27

En el proceso de reciclaje de PET se procesan residuos de poliéster, fibra y pasta, envases de PET post consumo y postindustrial; polietileno de alta y baja densidad y propileno, los cuales después del proceso se convierten nuevamente en granulo de poliéster o escamas y gránulos de PET. En este proceso de reciclaje del PET se consume gran cantidad de agua en las etapas de lavado de las botellas trituradas por medio de una lavadora de fricción y en el proceso de separación por centrifugación, donde por medio de una corriente de agua se separan definitivamente todas las partículas impregnadas en las fibras de PET triturada. El lavado de botellas es un punto del proceso en el que se producen importantes consumos de agua, las lavadoras industriales suelen consumir entre 0.5-0.8 hL agua/ hL de capacidad de envase ([Vest, 2003](#)).

Se propone la filtración e intercambio iónico como método de tratamiento para la recirculación de aguas residuales para el lavado de botellas PET, el reciclado en circuito cerrado de las aguas de lavado de botellas PET de una planta de tratamiento de superficies, consiste en la reutilización de las mismas por paso a través de resinas de intercambio iónico, que las desmineraliza y convierte en aptas para su nuevo empleo ([Vest, 2003](#)).

De acuerdo a los tratamientos de implementación de los mismos el potencial de reuso de aguas residuales para lavado y enjuague se puede considerar en un rango entre 65-75% de las aguas vertidas, considerando las características de las mismas.

3.7. Industria metalmecánica y galvanoplastia

La empresa se encuentra conectada a los servicios de acueducto y alcantarillado de EPM. La industria hace parte de la cadena productiva metalmecánica y comprende todos aquellos procesos de recubrimiento vía electrolítica sobre diferentes superficies asociadas a motivos decorativos y de protección contra la corrosión. Hay varios aspectos críticos en el control del proceso y generación de residuos, dentro de los cuales se destaca el consumo de agua en los baños del proceso, en las etapas de lavado y enjuague. En el enjuague se puede utilizar cerca del 95% de toda el agua del proceso de recubrimiento, el aspecto más importante de la conservación del agua es el control de la contaminación mediante buenas prácticas de comportamiento y algunas inversiones, lográndose alcanzar ahorros desde el 15 hasta el 30%. El volumen total de las aguas residuales descargadas por la industria de galvanoplastia no puede ser calculado exactamente, pero el volumen estimado es igual o mayor a 3000 m³/mes con base en el número total de compañías ([Morales y Acosta, 2010](#)).

Uno de los tratamientos para las aguas residuales generadas en el galvanizado, tiene que ver con el empleo del principio de la electroquímica, según métodos tradicionales como: electrocoagulación, electroflotación y electrodecantación ([Mollah et al., 2001](#)). Estas técnicas ofrecen ser una alternativa eficiente para la remoción de sustancias presentes en los efluentes industriales. Estos métodos poseen ventajas económicas y ambientales sobre los métodos tradicionales de remoción con empleo de productos químicos. Entre las ventajas de los métodos electroquímicos se encuentran los beneficios ambientales, la eficiencia de energía, la seguridad, la facilidad de automatización del proceso y los bajos costos ([Holt et al., 2005](#)).

En la empresa se generan aguas residuales industriales del proceso de galvanoplastia que son tratadas inicialmente en un tanque de neutralización para regular pH, y posteriormente en una planta de tratamiento para reducir concentraciones de sustancias de interés sanitario, antes de ser descargadas en el alcantarillado público. Las características fisicoquímicas de las aguas residuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 14. Composición fisicoquímica del efluente de la empresa metalmecánica y galvanoplastia

Parámetro	Efluente
pH	6.5
T (°C)	25
DBO ₅ (mg/L)	143.39
DQO (mg/L)	311.5
SST (mg/L)	710
Grasas y Aceites (mg/L)	9.3
Caudal (L/s)	3.01

De acuerdo a las características de las aguas residuales generadas en la empresa y a los requerimientos del proceso productivo, se plantea un modelo para el ahorro y uso eficiente del agua, basado en las tecnologías de tratamiento existentes para su posterior recirculación.

Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de contaminantes de diversas aguas residuales. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas ([Jiang et al., 2002](#)). se han instalado algunos sistemas de electrocoagulación para tratar los efluentes de la industria galvanoplastia y como resultado se ha logrado mejorar la separación de agua y aceite, así como la recuperación de los metales que ahí se acumulan, acondicionando los parámetros de las aguas residuales para su posterior circulación ([Adhoum, 2004](#)). En la [Tabla 15](#) se presentan los porcentajes de remoción de los parámetros evaluados, posteriormente al tratamiento de electrocoagulación.

Tabla 15. Porcentajes de remoción de los parámetros evaluados, posteriormente al tratamiento de electrocoagulación

Parámetro	Remoción(%)
DBO ₅	> 90
DQO	> 90
SST	> 95
Grasas y Aceites	> 70
Nitrógeno y fosforo total	> 85

Fuente: [Adhoum](#) N. et al. Treatment of electroplating wastewater containing Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr (VI) by Electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials.(2004). p.207.

De acuerdo a los métodos y tecnologías de tratamiento implementadas y estudiadas y con base a los porcentajes de remoción de los parámetros fisicoquímicos y la calidad de agua vertida por la empresa, se puede considerar que el proceso de electrocoagulación es el más 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 un potencial del 70-80% del agua vertida.

3.8. Empresa fabricante de materias colorantes orgánicas y empresa fabricante de pigmentos inorgánicos

La empresa corresponde al sector de fabricación de materias colorantes orgánicas, extractos tintóreos y materias curtientes orgánicas, es una industria que tiene como actividad principal la producción de resinas, pinturas, tintas y dispersiones, auxiliares químicos, colorantes para alimentos y mezclas de colorantes industriales . Los principales procesos que generan aguas residuales industriales son los colorantes para alimentos, auxiliares textiles, pinturas, mezclas industriales, resinas acrílicas, tintas y dispersoras, además de ello el lavado de equipos y planta en general.

Tabla16. Composición fisicoquímica del efluente de la empresa fabricante de materias colorantes orgánicas

Parámetro	Efluente
pH	6.8
T (°C)	28.3
DBO ₅ (mg/L)	12
DQO (mg/L)	18.6
SST (mg/L)	25
Grasas y Aceites (mg/L)	9

Por su parte la empresa se basa en la fabricación de pigmentos inorgánicos, el cual está establecido en tres líneas principales: azul ultramar, colores de cromo y óxidos de hierro. Las aguas residuales industriales se generan en las operaciones de preparación, lavado y filtración en cada una de las líneas de producción. Cada línea cuenta con un sistema de tratamiento que consiste en un decantador y filtro prensa, en el área de colores de cromo, antes del proceso de sedimentación y filtración se tiene implementado un sistema de recuperación de cromo hexavalente, el efluente de cada uno de los decantadores, se unen en un pozo y son conducidas hasta la planta de neutralización, donde se les adiciona soda cáustica diluida hasta ajustar el pH, para luego ser vertida. Los parámetros de los efluentes se presentan a continuación.

Tabla17. Composición fisicoquímica del efluente de la empresa fabricante de pigmentos inorgánicos

Parámetro	Efluente
pH	6.9
T (°C)	26.3
DBO ₅ (mg/L)	2
DQO (mg/L)	24.4
SST (mg/L)	10
Caudal (L/s)	0.21

En los últimos años la oxidación electroquímica se ha convertido en una alternativa para el tratamiento de aguas residuales industriales provenientes de la elaboración de pinturas y pigmentos, sustituyendo a los procesos tradicionales. Los procesos electroquímicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales utilizan electricidad para producir una reacción

química destinada a la eliminación o destrucción del contaminante presente en el agua. Básicamente el sistema electroquímico está formado por un ánodo, donde ocurre la oxidación, un cátodo, donde tiene lugar la reducción y una fuente de corriente continua encargada de suministrar la electricidad. Los parámetros claves a la hora de aplicar un proceso electrolítico son diseño del reactor, naturaleza de los electrodos, y diferencia de potencial y/o corriente de trabajo ([Bahadir, 2004](#)).

Los valores de los parámetros de efluentes tratados por el método electroquímico propuesto se presenta en la [Tabla 18](#), se tiene en consideración que el parámetro de la DBO no fue analizado debido que los valores presentado por ambas empresas en sus efluentes se encuentra dentro de los límites permisibles, para su recirculación.

Tabla 18. Parámetros tratados por el método electroquímico en efluentes residuales de industrias de elaboración de pinturas

Parámetro	Efluente
pH	9.12
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	444.1
DBO ₅ (mg/L)	2
DQO (mg/L)	7469
SST (mg/L)	2770
Turbiedad (NTU)	3378

Fuente: [Bahadir, K.](#) et al. Optimization of electrochemical treatment of industrial paint wastewater with response surface methodology. En: *Journal of Hazardous Materials*. (2007).

Realizando un paralelo entre los parámetros físico-químicos del estudio realizado, en relación a las aguas vertidas por las empresas visitadas, se puede considerar el método electroquímico como una opción de implementación viable para el tratamiento de las aguas residuales para su posterior reutilización en el proceso de lavado de equipos.

Esta tecnología ha sido ensayada con éxito en más de 75 efluentes distintos con resultados excelentes en la disminución de parámetros globales de contaminación con un aumento en biodegradabilidad y a unos costos razonables, lo que hace al procedimiento una técnica con un

gran potencial de recuperación de las aguas residuales en un rango de 75-85%. Se trata por tanto, de una tecnología que viene a cubrir el gran vacío existente entre los efluentes claramente aptos para el tratamiento biológico ([Bahadir, 2004](#)).

4. CONCLUSIONES

Se realizaron 9 visitas técnicas a empresas pertenecientes a los sectores de elaboración de pinturas, procesamiento de café, industria galvanoplastia, elaboración de bebidas, transformación de fibras textiles y lavandería industrial, donde a partir de las características y los parámetros de calidad de las aguas vertidas, se determinó la tecnología más adecuada para la posterior reutilización.

Los procesos de tratamiento de aguas residuales se deben implementar teniendo en cuenta las características del influente a tratar, para mejorar la eficiencia en la depuración, ya que cada proceso de tratamiento unitario presenta mejor rendimiento si se tienen en cuenta los componentes del agua residual y el grado de depuración que se quiere lograr.

En países industrializados, de acuerdo a la normatividad sobre reutilización en diversas actividades, se han desarrollado sistemas de distribución de efluentes, lo cual ha generado grandes beneficios a nivel económico por el menor costo del agua residual tratada y a nivel ambiental por la reducción del impacto generado en las descargas del efluente a cuerpos receptores.

La recirculación de agua se ha convertido en una buena alternativa en áreas geográficas donde hay escasez del recurso hídrico y su aprovechamiento pasa de ser una opción a convertirse en una verdadera necesidad, por eso la implementación de sistemas de reuso que contribuyan a reducir el impacto ecológico causado por el vertimiento de altos volúmenes de cargas contaminantes a los cuerpos receptores de agua y a disminuir la cantidad de agua tomada de los afluentes, principalmente los de agua potable, debe ser de primera opción en cuanto a conservación del medio ambiente.

La electrocoagulación es en la actualidad una tecnología emergente que se presenta como alternativa para el tratamiento de aguas residuales industriales para su posterior reutilización,

ofreciendo un potencial muy grande en la remoción de muy diversos contaminantes contenidos en las aguas residuales de diferentes fuentes.

El potencial de reutilización de aguas residuales industriales depende de una variedad de factores y es diferente de una industria a otra. Las industrias que consumen un volumen mayor de agua, poseen mayor potencial de reutilización interno.

El grado de tratamiento requerido de las aguas residuales industriales para su posterior reutilización varía en función de la aplicación específica y los parámetros de calidad del agua necesaria para determinado proceso.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a las empresas que colaboraron con la información suministrada para el desarrollo del proyecto.

A todas las personas que de una manera u otra colaboraron con el desarrollo del proyecto, especialmente al Ph.D. Hader H. Álzate G. y los estudiantes de ingeniería eléctrica, ingeniería agroindustrial y publicidad de la Universidad Pontificia Bolivariana Jorge I. Lara L., Alexis R. Quiñonez P. y Diana C. Zuluaga H.

REFERENCIAS

Adhoum, N., et al. (2004). Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr(VI) by Electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials. **112**: 207-213

Anderson, J., et al. (2001) Climbing the ladder: a step by step approach to international guidelines for water recycling. En: Water Science & Technology **43**:1-8.

Bahadir, K., N. Aktas y A. Tanyolac (2007). Optimization of electrochemical treatment of industrial paint wastewater with response surface methodology. En: Journal of Hazardous Materials. **1**: 84.

Braeken, L., B. Van der bruggen y C. Vandecasteele (2004). Regeneration of brewery waste water using nanofiltration. En: Water Research. **38**: 3075-3082.

Cartwright, L. (2006). Tratamiento y reuso del Agua en aplicaciones comerciales e industriales. En: Agua Latinoamericana .p.3.

Castillo, A. (2007). Criterios para la evaluación sanitaria de proyectos de reutilización directa de aguas residuales urbanas depuradas.

Crespi, M. (1989). Reutilización de los Efluentes textiles en europa. En: Bol.Intexter. **96**: 14.

Delgado, S., et al. (2008) La reutilización del agua depurada en Canarias. ¿Expansión o estancamiento?. En: Anuario del instituto de estudios Canario. p.819.

Durham, B., M. Bourbigot y T. Pankratz (2001). Membranes as pretreatment to desalination in wastewater reuse. Operating experience in the municipal and industrial sectors. En: Desalination. **138**: 83-90.

Gehlert G. y H. Wienands, (2007). Reutilización de aguas residuales en procesos industriales. En: Ingeniería Química. **443**: 70-83.

Geoffrey, S., et al. (2011). The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. En: Desalination. **273**: 235-247.

Hafez, A., M. Khedr y H. Gadallah (2007). Wastewater treatment and water reuse of food processing industries. Part II: Techno-economic study of a membrane separation technique. En: Desalination. **214**: 261-272.

Holt, P., G. Barton y C. Mitchell (2005). The future for Electrocoagulation as a localized water treatment technology; En: Chemosphere. **59**:355-367.

Jiang, J., Et al. (2002). Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment. En: Water research. **36**: 4064– 4078.

Karim, A. y T. Hani (2002). Desalination techniques for industrial wastewater reuse En: Desalination. **152**: 325-332.

Koning, J., et al. (2008). Characterisation and assessment of water treatment technologies for reuse. En: Desalination. **218**: 92-104.

Lazarova, V., et al. (2003). Using recycled water for non-potable, urban uses: a review with

particular reference to toilet flushing. En: *Water Science and Technology: Water Supply*. **3**: 69-77.

Maeda, M., et al. (2005). Area-wide use of reclaimed water in Tokyo, Japan. *Proceedings of the second international symposium of waste water Symposium preprint*. **1**: 55-62.

Manga, J., et al. (2001). Reuso de aguas residuales.

Mollah M., et al. (2001). Electrocoagulation (EC) – Science and application. En: *Journal of hazardous materials*. **84**: 29-41.

Morales, N. y B. Acosta (2010). Sistema de Electrocoagulación como Tratamiento de Aguas Residuales Galvánicas Ciencia e Ingeniería Neogranadina. **20**: 33-44.

Pizzichini, M., C. Russo y C. Di meo (2005). Purification of pulp and paper wastewater, with membrane technology, for water reuse in a closed loop. En: *Desalination*. **178**: 351-359.

Redondo, J., (2002). Optimizing membrane plant design for diverse applications. Three case histories including Integrated Membrane Systems (IMS). *Membranes En: Drinking and Industrial” Water Production Conference*.

Reporte de calidad de aguas, Empresas Publicas de Medellín (2011).

Seneviratne, M., (2007). *A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities*. Elsevier, Oxford.

Shen, Z., et al. (2005). Dual electrodesoxidation of dye wastewater with gas diffusion cathode, En: *Environmental Science Technology*. **39**: 1819-1826.

Sittichok, K. y M. Hunson (2009). Remediation of wastewater from pulp and paper mill industry by the electrochemical technique. En: *Chemical Engineering Journal*. **151**: 228-234.

Tang, C. y V. Chen (2002). Nanofiltration of textile wastewater for water reuse En: *Desalination*. **143**: 11-20

Vest, H. (2003). Production and Recycling of PET-Bottles. En: *Infogate*. p. 4-10

SOBRE LOS AUTORES

José A. Ríos.

Docente investigador de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana. Ingeniero Mecánico de la Universidad Pontificia Bolivariana. Áreas de interés investigativo: Ambiental, tratamiento de aguas.

Jorge I. Posada O.

Estudiante de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Juan F. Uribe G.

Estudiante de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana.