

EVALUACIÓN DEL PROCESO ELECTROFLOX EN EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DE UNA EMPRESA DE PRODUCTOS DE CUIDADO ORAL,
DEL HOGAR Y PERSONAL

KELLY ANDREA TIMANA RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
CALI, COLOMBIA

2016

EVALUACIÓN DEL PROCESO ELECTROFLOX EN EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES DE UNA EMPRESA DE PRODUCTOS DE CUIDADO ORAL,
DEL HOGAR Y PERSONAL

KELLY ANDREA TIMANA RODRIGUEZ

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TITULO DE MAGISTER
EN INGENIRIA QUIMICA CON ENFASIS EN INGENIERIA QUIMICA

DIRECTOR

FIDERMAN MACHUCA. Ph.D

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

CALI, COLOMBIA

2016

DEDICATORIA

Dedico este nuevo triunfo a Dios primero que todo, por ser el hacedor de cada paso, de cada logro y de cada momento, por ser el creador de oportunidades y el realizador de sueños, porque en algún momento creí imposible realizarlo y fue Dios quien me enseñó que los sueños se pueden cumplir, que cada meta que quieres lograr la puedes alcanzar y cuyo propósito es tan perfecto que permite que cada paso sea especial.

A mi familia, en especial a mi abuela, por ser la compañía en todos los momentos de mi vida emocional y profesional, es a ella a quien le debo lo que soy como persona, de quien he aprendido perseverancia, consistencia, dedicación y disciplina, mi porque, mi todo, por la que hago cada cosa y mi motivo para levantarme cada mañana para ser mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros de trabajo que fueron los autores y las personas claves que con su dedicación y paciencia me aportaron su conocimiento y sus consejos.

A Diana Cobo y Lina María por su apoyo incondicional en el laboratorio.

A mi Jefe que me apoyó en todo el proceso de mi tesis y me permitió ver las dificultades y obstáculos como oportunidades para continuar.

A mi profesor Fiderman por su tiempo, paciencia y soporte guiándome para lograr este nuevo triunfo.

A mi familia por ser el apoyo incondicional, por enseñarme que nada es imposible alcanzar en la vida y que todo lo que hagamos con amor algún día se verá recompensado.

A mi novio por su apoyo y motivación, por su amor incondicional en las buenas y en las malas.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	viii
INTRODUCCION	9
1. MARCO TEORICO	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.1.1. Coagulación – Floculación	10
1.1.2. Electrocoagulación	11
1.1.3. Tratamientos Biológicos.....	12
1.1.4. Oxidación Avanzada.....	12
2. MARCO CONCEPTUAL	15
2.1 FISICOQUÍMICOS (COAGULACIÓN- FLOCULACIÓN)	15
2.2 BIOLÓGICOS	19
2.3 ELECTROQUÍMICO	20
2.4 OXIDACIÓN AVANZADA	26
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	29
3.1 EQUIPOS.....	29
3.2 ANÁLISIS QUÍMICOS	29
3.3 PROCEDIMIENTOS.....	30
4. RESULTADOS Y ANALISIS	32
4.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO INDUSTRIAL 32	
4.2 ENSAYOS PRELIMINARES	32
4.3 EFICIENCIA DEL PROCESO ELECTROFLOX PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD DE VERTIMIENTOS	37
5. CONCLUSIONES	40
BIBLIOGRAFIA	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Equipos usados en pruebas experimentales.....	29
Tabla 2. Equipos usados en análisis de parámetros DQO y pH	29
Tabla 3. Caracterización agua residual industrial.....	32
Tabla 4. Porcentajes de remoción en pruebas preliminares utilizando tratamiento Electrofloxx	33
Tabla 5. Análisis de varianza para resultados por tratamiento Electrofloxx	34
Tabla 5. Porcentaje de remoción de DQO para el proceso fisicoquímico actual vs Electrofloxx	36
Tabla 6. Valores de caracterización de agua residual con los exigidos por la normatividad ambiental	37
Tabla 7. Porcentaje de remoción y concentración de DQO para muestras de aguas residuales de la compañía manufacturera de productos de aseo personal y del hogar.....	38
Tabla 8. Relación del parámetro DQO y DBO para las aguas residuales 2012, 2013, 2014 y 2015.	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Poliacrilamida y sus derivados para la síntesis de floculantes.	18
Figura 2. Procesos involucrados en reactor de electrocoagulación.	21
Figura 3. Reacciones químicas en la electrodisolución.	25
Figura 4. Relación del efecto de los factores principales sobre el porcentaje de remoción DQO	35
Figura 5. Histórico de DQO del efluente arrojados por tratamiento fisicoquímico actualmente usado en la compañía.	38

RESUMEN

La nueva normatividad de vertimientos reglamentada por el **Decreto 3930 de 2010**, y la cual actualiza el **Decreto 1594 de 1984** (vigente desde hace 30 años) ha llevado a la industria a buscar métodos y tecnologías que permitan su cumplimiento. Actualmente se conocen múltiples tecnologías y tratamientos que permiten el cumplimiento de la misma, unas más económicas y eficientes que otras, dependiendo del vertimiento de dicha industria. Electrofloxx es un tratamiento que combina electrodisolución, floculación y oxidación, ha sido aplicado en tratamientos de lixiviados, vinazas producida en destilerías de alcohol y plantas productoras de levadura, aguas contaminadas con tintas y drenajes ácidos de minas de carbón. A diferencia de los tratamientos de oxidación conocidos, el tratamiento Electrofloxx no busca degradar la materia orgánica contenida en el agua residual, sino que aplica la oxidación como tratamiento final para eliminar la carga orgánica e inorgánica residual, por lo que el consumo de agentes oxidantes se reduce al mínimo (Martinez, Cabrales, & Palomino, 2011)

En el presente estudio se llevó a cabo la evaluación de la eficiencia de dicha tecnología a nivel de laboratorio para aguas residuales provenientes de una empresa manufacturera de productos de aseo personal y del hogar. Las pruebas preliminares fueron realizadas basadas en un diseño 2^4 implicando 4 factores tales como densidad de corriente (1,6 mA/cm²), carga eléctrica (500, 2000 C/L), pH de coagulación (9, 12) y concentración de peróxido (500, 1500 ppm), siendo la variable de respuesta la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO), y los factores carga de corriente y densidad de corriente significativos para dicha variable.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencio una remoción mayor por parte del tratamiento Electrofloxx, que el tratamiento fisicoquímico actualmente utilizado para las aguas residuales en algunos casos, sin embargo no se logró alcanzar valores cercanos a los establecidos por la normatividad 500 ppm y 250 ppm, para DQO y DBO respectivamente. Por lo anterior para dar cumplimiento a la normatividad, se requiere de una tecnología adicional, que junto con Electrofloxx permita alcanzar dichos valores.

INTRODUCCION

En busca de mejores condiciones para el medio ambiente, las exigencia en normatividad de vertimientos busca reducir y controlar las sustancias contaminantes que llegan a los ríos, embalses, lagunas, cuerpos de agua naturales o artificiales de agua dulce, y al sistema de alcantarillado público, para de esta forma, aportar al mejoramiento de la calidad del agua y trabajar en la recuperación ambiental de las arterias fluviales del país.

La nueva norma de vertimientos responde a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país y su control se realizará a partir de la medición de la cantidad de sustancias descargadas, que es lo que impacta en la calidad del agua, y no el proceso de tratamiento (Vallejo, 2016).

Por lo anterior han surgido numerosas tecnologías en busca del cumplimiento de la norma, según los contaminantes que se tengan en el vertimiento. Algunos de ellos basados en tratamientos físicos, químicos y biológicos, tales como coagulación, floculación, electrocoagulación, tratamientos aerobios o anaerobios, entre otras, destacadas por sus ventajas económicas, de espacio o de eficiencia, pero todas creadas con el objetivo de eliminar contaminantes encontradas en vertimientos .

Electroflox es uno de los desarrollos que implica tres etapas: electrodisolución metálica, floculación y oxidación sencilla, ha sido aplicado en tratamientos de lixiviados procedentes de vertederos de residuos sólidos urbanos, vinazas producida en destilerías de alcohol y plantas productoras de levaduras, aguas contaminadas con tintas y drenajes ácidos de minas de carbón.

El objetivo principal del siguiente estudio busca evaluar le eficiencia de esta tecnología a nivel de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria manufacturera de productos de aseo personal y del hogar, evaluando el cumplimiento de la normatividad ambiental actual vigente para los parámetros de DQO y DBO.

1. MARCO TEORICO

1.1 ANTECEDENTES

El interés por el medio ambiente y sus recursos naturales han llevado a la búsqueda de potenciales tecnologías que permitan conservarlos e incluso recuperarlos, al igual que la creación de leyes que los protejan. La industria en particular requiere para la mayoría de sus procesos altas cantidades de recursos naturales, dentro del principal es el agua, lo que hace importante escoger tecnologías o procesos adecuados para su tratamiento y posterior vertimiento en alcantarillado o ríos según sea el caso.

Las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales conocidas se dividen en físicos, químicos y biológicos, dependiendo de la secuencia de estos procesos pueden considerarse como preliminares, primarios, secundarios o terciarios.

Los tratamientos físicos son basados en la aplicación de las fuerzas físicas para eliminar contaminantes, como tamices, desengrasado, sedimentación, flotación (natural o provocada con aire), filtración, evaporación, desorción, entre otras. Las anteriores son complementadas con tratamientos químicos, que eliminan contaminantes mediante la adición de productos químicos o por reacciones químicas, dentro de las cuales se conocen coagulación-floculación, oxidación-reducción, reducción electrolítica, intercambio iónico, ósmosis inversa entre otros.

1.1.1. Coagulación – Floculación

Coagulación - Floculación es el proceso más convencional, utilizado en el tratamiento de aguas residuales, en los cuales componentes de hierro o aluminio y polímeros son adicionados para desestabilizar el material coloidal produciendo pequeñas partículas que se aglomeren y producen el floculo (Aygün & Yilmaz, 2010). Estudios han demostrado que estos métodos pueden ser usados efectivamente para remoción de surfactantes que poseen las aguas industriales de empresas productoras de detergentes, al igual que remoción de turbiedad y materia orgánica (Gomez, 2005), sin embargo el grado de remoción de la materia orgánica en este proceso está sujeto al tipo y dosis del coagulante así como el pH del medio.

El alto costo de operación por el uso de sustancias químicas y el costo de disposición de la cantidad de lodos generados son considerados como la desventaja más importante del tratamiento químico. Por lo anterior los investigadores se han enfocado en nuevas alternativas para reducir el uso de químicos por mejorar el nivel de descarga, con la adición de sustancias naturales de bajo costo (Aygün & Yilmaz, 2010).

1.1.2. Electrocoagulación

Entre los procesos electroquímicos se destaca la electrocoagulación, que ha sido investigada en las últimas décadas, porque permite remover contaminantes que se encuentran emulsionados, suspendidos o disueltos, haciendo pasar corriente eléctrica por el medio acuoso. La corriente eléctrica desestabiliza las partículas, haciéndolas precipitar para luego ser removidas por algún método de separación secundario (Holt & Barton, 2005). La electrocoagulación ha venido perfilándose como una tecnología alternativa, con un amplio potencial en sus aplicaciones y en sus ventajas contra otras tecnologías disponibles (GE, 2004) (Chen, Chen, & Yue, 2000). La electrocoagulación se concentra en la remoción de una amplia gama de contaminantes, entre ellos material orgánico e inorgánico, DBO y metales de aguas residuales de diferentes fuentes e industrias (Arango Ruiz & Garces Giraldo, 2008). Este método electroquímico ha sido aplicado para aguas que contienen residuos de alimentos, aceites, color, partículas suspendidas, químicos, materia orgánica de rellenos sanitarios, efluentes con detergentes sintéticos, residuos mineros y soluciones que contienen metales pesados (Siringi, Home, Chacha, & Koehn, 2012).

Por el contrario de la coagulación química, la Electrocoagulación (EC) incrementa el pH de la solución cuando es ácido, neutro o ligeramente alcalino y decrece cuando es altamente alcalino. Este cambio de pH durante el tratamiento de EC afecta las especies de hidróxido aluminio o hierro según sea el caso. A pH muy ácidos (pH 2) la alcalinidad producida durante la EC no es suficiente para incrementar el pH de la solución, mientras a pH inicial de 3 o más alto el pH aumenta durante el tratamiento. Cuando el pH es muy alcalino (pH mayor a 9) el pH decrece (Vepsäläinen, 2012).

1.1.3. Tratamientos Biológicos

Los tratamientos biológicos se dividen entre aerobios como lodos activados, filtros percoladores, discos biológicos y lagunas de oxidación; y anaerobios como tanques sépticos, filtros anaerobios, UASB (Manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente) y lagunas anaerobias. Estos tratamientos son utilizados como tratamientos secundarios, y remueven materia orgánica biodegradable disuelta o suspendida. En algunos estudios han considerado su combinación para remover sustancias como sulfuros en altas concentraciones en industrias como de papel y pulpa, melazas basadas en fermentación, refinerías de aceite entre otras (Mahendra & Drew), además de tratamientos aerobios combinados con métodos fisicoquímicos como pre tratamiento en industrias de alimentos que contienen elevada carga orgánica, la combinación se hace necesaria debido a que los procesos biológicos convencionales en algunos casos no proveen buenos resultados en la remoción de contaminantes o no se logra alcanzar el grado de pureza requerido bajo norma.

1.1.4. Oxidación Avanzada

Existen otros procesos que hacen parte de los procesos fisicoquímicos, que prometen ser uno de los métodos más eficientes para la remoción de contaminantes no biodegradables contenidos en aguas superficiales o subterráneas, dentro de los más comunes son fotocátalisis con TiO_2 , Foto-Fenton, $\text{UV/H}_2\text{O}_2$, O_3 y electro oxidación. Estos se basan en la generación de radicales hidroxilo, los cuales se caracterizan por ser agentes con un alto potencial de oxidación además de no ser selectivos, logrando tener gran cantidad de contaminantes (García, Gortares, & Drogui, 2011) . El estudio de los procesos de oxidación avanzada (PAO's) se ha incrementado en las últimas dos décadas debido a que son una alternativa eficiente para disminuir la cantidad de materia orgánica y se basa, principalmente, en el uso de agentes oxidantes, tales como el peróxido de hidrógeno, la generación de radicales hidroxil ($\cdot\text{OH}$), entre otros, los cuales facilitan la degradación de materia orgánica y se pueden obtener por diferentes métodos químicos y electroquímicos (Hernandez, Martinez, Barrera, & Pavón, 2011). Los radicales hidroxilos son efectivos destruyendo material orgánica porque reaccionan rápidamente y no selectivamente con compuestos orgánicos, casi todos ricos en electrones tales como colorantes, aceites y tenso activos (AS, 2008).

En algunos casos presenta desventaja de tipo económico con respecto a procesos como los biológicos, sin embargo estos pueden mejorar la biodegradabilidad de aguas residuales utilizándolo como post tratamiento respectivamente (García et al., 2011). En algunas investigaciones se han hecho combinaciones de biológicos con estos procesos como complementarios para tratar ciertas aguas residuales difíciles o imposibles de remover por procesos convencionales fisicoquímicos/biológicos (Gocate & Pandit, 2004), otras aplicaciones se han hecho en industria papelera donde se ha logrado eliminar cerca del 55% de DQO y un 86% de color, destacándose el uso de pre tratamiento electroquímico por su reducción en el requerimiento de volumen a tratar para un sistema biológico. De acuerdo con estudios, los efluentes susceptibles de ser tratados por este tipo de procesos pueden proceder de diferentes sectores industriales del tipo: Química fina (herbicidas, pesticidas, pinturas etc.), Química (resinas, detergentes, plásticos, colorantes), petroquímica, industria textil, industria papelera, farmaquímica (vitaminas, antibióticos, hormona), agroalimentaria y lixiviados.

Las reacciones de FENTON ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) ofrecen la misma clase de ventajas que los métodos de dióxido de titanio/UV y $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$. Sin embargo la desventaja de este método es que trabaja solamente en soluciones ácidas (Banyaladzi & Ramirez, 2011).

La electrocoagulación es un proceso económico avanzado que ha mostrado ser efectivo para la remoción de sólidos suspendidos, descontaminación de metales pesados y romper emulsiones (Lai & Lin, 2003), basado en el uso de electrodos de ciertos materiales que han sido los más usados para el sistema EC, estos son aluminio o hierro, debido a que son económicos, fácilmente disponible, eficaces, y no tóxicos (Kumar, Chauhari, Khilar, & Mahajan, 2004) (Martinez et al., 2011).

En busca de tratamientos novedosos y que permitan tratar efluentes con sustancias difíciles de eliminar por medio de tecnologías convencionales, se han investigado procesos combinados tales como Electroflux (electrodisolución, floculación química y oxidación avanzada), que ha sido aplicado en tratamientos de lixiviados procedentes de vertederos de residuos sólidos urbanos, vinazas producida en destilerías de alcohol y plantas productoras de levaduras, aguas contaminadas con tintas y drenajes ácidos de minas de carbón.

Este proceso comprende las etapas de alimentar una celda electrolítica provista de electrodos en el interior del medio líquido contaminado, aplicar una corriente directa constante a través de dichos electrodos seguido de una floculación de los sólidos presentes

en dicho medio por adición de agentes coadyuvantes, remover sólidos y por ultimo oxidar el sobrenadante por medio de agentes oxidantes. A diferencia de los tratamientos de oxidación conocidos, el tratamiento Electrofloxx no busca degradar la materia orgánica contenida en el agua residual, sino que aplica la oxidación como tratamiento final para eliminar la carga orgánica e inorgánica residual, por lo que el consumo de agentes oxidantes se reduce al mínimo (Gomez, 2005) .

2. MARCO CONCEPTUAL

La ciencia y arte del agua residual se comenzó a diseñar desde hace más de cien años. Durante este tiempo, la tecnología aplicada ha tenido grandes evoluciones que contribuyen a la disminución de las enfermedades y la protección al medio ambiente.

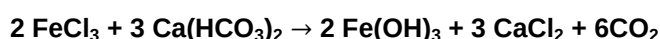
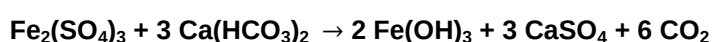
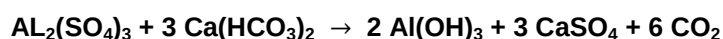
La descarga de residuos a cuerpos de agua, produce efectos nocivos en ella y en la comunidad, debido al contenido de materia orgánica que presentan estos efluentes, para lo anterior a través de la historia se ha creado diferentes tipos de tratamientos de aguas.

2.1 FISICOQUÍMICOS (COAGULACIÓN- FLOCULACIÓN)

Los procesos fisicoquímicos, juegan un papel importante en el tratamiento de aguas residuales, solos o en combinación con los métodos mecánicos, químicos o biológicos. La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. Para obtener buena coagulación, se debe alimentar al agua la dosis óptima de coagulante y se debe mezclar adecuadamente con ella. La dosis óptima variara dependiendo de la naturaleza del agua y de su composición general. No es posible calcular matemáticamente la dosis óptima de coagulante, solo mediante prueba de jarras que es usada generalmente para la determinación periódica de la dosis óptima.

En la práctica se emplean coagulantes muy diversos, entre ellos tenemos: sulfato de aluminio, sulfato ferroso y sulfato férrico

Las sales de Aluminio (Al) y el hierro (Fe) son las más comúnmente utilizada de coagulantes inorgánicos pre-polimerizados. En agua esas sales metálicas producen alta carga de iones en forma de hidróxidos inorgánicos que neutralicen las partículas suspendidas en agua. Polímeros cortos los cuales forman microfloculos son también producidos. Las siguientes son las ecuaciones que demuestran el proceso anterior:



La efectividad de los coagulantes de hierro y aluminio está basada en su habilidad para formar complejos polinucleares multi-cargados con características de adsorción mejoradas. A un pH entre 6,5 – 8,0, ocurre hidrólisis extrema. Los productos de esta hidrólisis pueden interactuar químicamente con sustancias disueltas en el agua cruda que conduce a la precipitación de hidróxido cuando el pH es inferior a 6,0.

Otros agentes que también se emplean para coagular y que se les llama auxiliares de la coagulación son: la cal o hidróxido de calcio y el carbonato de sodio. Estos compuestos favorecen la coagulación al ajustar el valor del pH a un valor óptimo para la formación del polímero que atrapa las partículas o para incrementar la alcalinidad del agua y favorecer la aparición del coagulo.

La desestabilización por parte de un coagulante, se puede llevar a cabo por uno o en combinación con uno o más mecanismos:

1. Compresión o desestabilización de la doble capa eléctrica (fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión).
2. Adsorción y neutralización de carga (especificidad y solubilidad de las especies formadas, características eléctricas de la doble capa y efecto de la deposición del hidróxido de aluminio o de hierro sobre las partículas coloidales u otras suspendidas).
3. Adsorción y puente entre partículas.
4. Enredo de precipitado (mediante el uso de dosis de exceso de coagulante, "floculación barrido" en el cual se excede el producto de solubilidad de hidróxidos metálicos $Al(OH)_3$ o $Fe(OH)_3$ en las soluciones de sales metálicas) (Gomez, 2005).

Existen ciertos parámetros que pueden llegar a influir radicalmente en la coagulación:

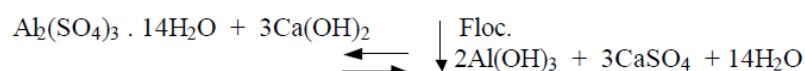
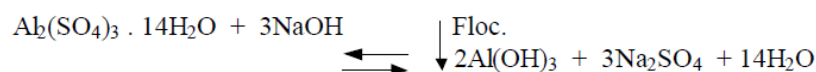
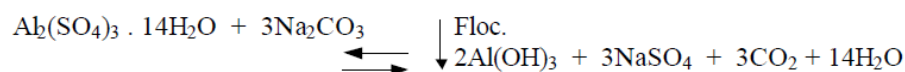
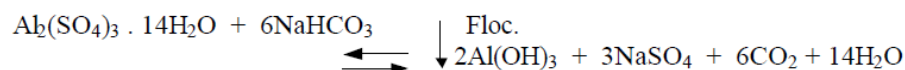
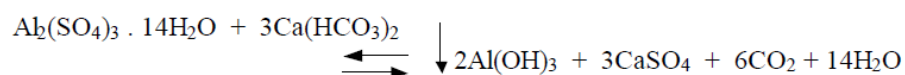
- Dosis de coagulante.

La concentración de coagulante requerida es proporcional con la materia orgánica presente en el agua. Este debe añadirse en suficiente cantidad para desestabilizar la materia orgánica.

Una coagulación no apropiada podría causar turbiedad, deposición y recubrimiento en las tuberías.

- pH

Dependiendo de la alcalinidad del agua, la cual está directamente relacionada con el pH, se pueden obtener diferentes tipos de reacciones químicas, entre ellas se tienen:



- Temperatura

Bajas temperaturas afectan no solo la coagulación sino también la floculación por alteración de la solubilidad del coagulante, incrementando la viscosidad del agua y retardando la cinética de las reacciones de hidrólisis y particularmente la floculación.

- Mezclado

Un mezclado rápido después de la coagulación es un parámetro de diseño muy importante. El coagulante debe ser uniformemente mezclado en el agua residual. Por lo que la intensidad del mezclado y el tiempo tienen un efecto significativo involucrado en los siguientes procesos de coagulación. Complejos de aluminio o hierro solubles en agua y corta duración e hidróxidos del metal son formados entre la hidrólisis del coagulante en agua y la formación del floculo los cuales llevan una carga positiva. Esos dos últimos tipos de hidróxidos (los cuales solo existen por un corto periodo de tiempo) son los únicos capaces de desestabilizar la dispersión y adsorción de la materia orgánica sobre la superficie del agua.

El enlace entre los sólidos suspendidos y el complejo del hidróxido del metal, debe ser establecido entre ese periodo corto. Una rápida mezcla del coagulante asegurara una

hidrólisis rápida del coagulante entre los sólidos suspendidos y los complejos de hidróxido y retardada el desarrollo de grandes floculos los cuales son inactivos en la desestabilización de la dispersión y remoción de los contaminantes (Sahu & Chaudhari, 2013).

Después de la desestabilización, la floculación promueve la agregación y formación de floculos, si se agrega un floculante apropiado.

Los floculantes consisten de polímeros sintéticos de muy alto peso molecular, que tienen una estructura morfológica muy especial, que causa que los coágulos formados se adhieran a los ramales de estas moléculas gigantes, por mecanismos de fuerzas de adhesión físicas, así como por fuerzas de atracción electrostática y de otro tipo (fuerzas de London, de Van Der Waals, etc.).

Los floculantes pueden ser polímeros inorgánicos o polímeros orgánicos sintéticos o naturales. Los más usados actualmente son los sintéticos por la cantidad mínima de lodo que puede llegar a generar (Lenntech BVLENNTTECH). Estos se clasifican en aniónicos, catiónicos o no iónicos, dentro de los cuales los más usados son las poliacrilamidas, ácido poli acrílico y varios polímeros catiónicos.

Las poliacrilamidas por si solas son esencialmente no-iónicas, el carácter iónico es variado por copolimerización con otros monómeros. Las poliacrilamidas aniónicas pueden ser preparadas por copolimerización de ácido acrílico y acrilamida o por una hidrólisis parcial de poliacrilamida, las poliacrilamidas catiónicas son preparadas por copolimerización de acrilamida con amonio cuaternario derivado de acrilamida.

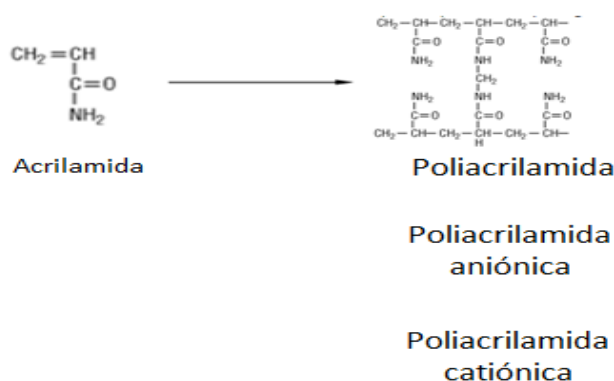


Figura 1. Poliacrilamida y sus derivados para la síntesis de floculantes.

Al igual que en la coagulación existen varios factores que afectan la floculación, dentro de los cuales están los siguientes: Efecto de la dosis del polímero, peso molecular del polímero, temperatura, pH y agitación.

2.2 BIOLÓGICOS

Los tratamientos biológicos se dividen entre aerobios como lodos activados, filtros percoladores, discos biológicos y lagunas de oxidación; y anaerobios como tanques sépticos, filtros anaerobios, UASB (Manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente) y lagunas anaerobias.

Los lodos activados consisten en una suspensión de microorganismos, vivos y muertos, activados por oxígeno y capaces de estabilizar la materia orgánica presente en el agua residual.

En los cultivos fijos, la masa microbiana no se encuentra libre dentro de un reactor agitado, sino adherida a una superficie, por donde va escurriendo el agua residual. La masa microbiana toma el oxígeno del ambiente y los nutrientes del agua. Entre los cultivos fijos, los más conocidos son los filtros percoladores y los biofiltros o filtros rotatorios de contacto.

Las lagunas de estabilización son muy empleadas por su capacidad para lograr buena reducción de DBO₅, además del retiro de nitrógeno y fósforo, reducción de metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos y destrucción de patógenos. Dentro de las lagunas de estabilización existen tres tipos:

- **Lagunas aeróbicas:** Soportan cargas orgánicas bajas, tienen una mezcla adecuada para prevenir estratificación y contienen oxígeno disuelto, en todo instante y en todo el volumen del líquido.
- **Lagunas facultativas:** Operan con una carga orgánica media. En las capas superiores hay un proceso aeróbico. En las capas inferiores se tiene un proceso anaeróbico, donde se produce simultáneamente fermentación ácida y metánica.
- **Lagunas anaeróbicas:** reciben altas cargas que producen condiciones anaerobias estrictas en todo el volumen de la laguna.

Los tanques sépticos: Son estructuras para el tratamiento primario de aguas residuales de vivienda, conjuntos habitacionales pequeños, escuelas, comercios, hospitales y servicios

sanitarios de algunas industrias, ubicadas en zonas urbanas o rurales que carecen de alcantarillado.

2.3 ELECTROQUÍMICO

Las reacciones electroquímicas son las de reducción-oxidación conocidas como Redox, las cuales se basan en transferencia de electrones entre un conjunto de especies químicas, en las cuales se presentará una especie oxidante y una reductora, que a su vez alcanzaran una forma reducida y una forma oxidada respectivamente (Hernandez et al.,2011). Cuando la especie reductora cede sus electrones se convierte en una especie oxidada mientras la que capta los electrones se convierte en una especie reducida.

La mayoría de los compuestos inorgánicos cuando se disuelven en agua o en otros líquidos se ionizan, es decir, sus moléculas son dissociadas en componentes cargados positiva y negativamente, lo cual tiene la propiedad de conducir una corriente eléctrica (Hernandez et al.,2011) (AS, 2008). Si en una solución de un electrolito o un compuesto ionizable, se instalan un par de electrodos y una fuente de corriente directa se conecta entre ellos, los iones positivos se mueven hacia el electrodo negativo y los iones negativos hacia los positivos (oxidarse o reducirse) y se transforman en moléculas o átomos neutros.

Por lo tanto, en las reacciones electroquímicas se da básicamente, un intercambio entre los electrones de los electrodos y los iones o moléculas de la solución, mediante la aplicación de una diferencia de potencial, que genera una corriente donde los electrones fluyen desde el punto más negativo hasta el más positivo. Este tipo de reacciones se clasifican según el lugar donde ocurran, ya sea en el seno de la solución, que son las llamadas homogéneas o en la superficie del electrodo, llamadas heterogéneas.

- **Electrocoagulación**

La electrocoagulación es un método electroquímico usado para el tratamiento de aguas residuales para remoción de un amplio número de contaminantes (Holt & Barton, 2005), este método ha logrado ser comercializado pero ha sido poco estudiado, a pesar de tener un gran potencial para eliminar las desventajas de los tratamientos clásicos para aguas residuales. La electrocoagulación es un proceso que implica varios fenómenos químicos y físicos, usa electrodos para proveer iones al agua residual que se desea tratar.

En el sistema de electrocoagulación se dan múltiples reacciones simultáneas en el ánodo y

cátodo. Estos mecanismos se pueden dividir en los principales mecanismos que causan desestabilización de contaminantes y reacciones secundarias, como la formación de hidrogeno.

En los entornos y condiciones acuosas típicas del proceso EC, el hierro puede estar disuelto en forma divalente Fe(II) y trivalente Fe(III), mientras el aluminio se disuelve solamente en Al (III).

El proceso de electrocoagulación involucra tres estados:

1. Formación de coagulantes por electro oxidación del “electrodo sacrificado”.
2. Desestabilización de los contaminantes, partículas en suspensión y ruptura de emulsiones.
3. Agregación de la fase desestabilizada para formar el floculo.

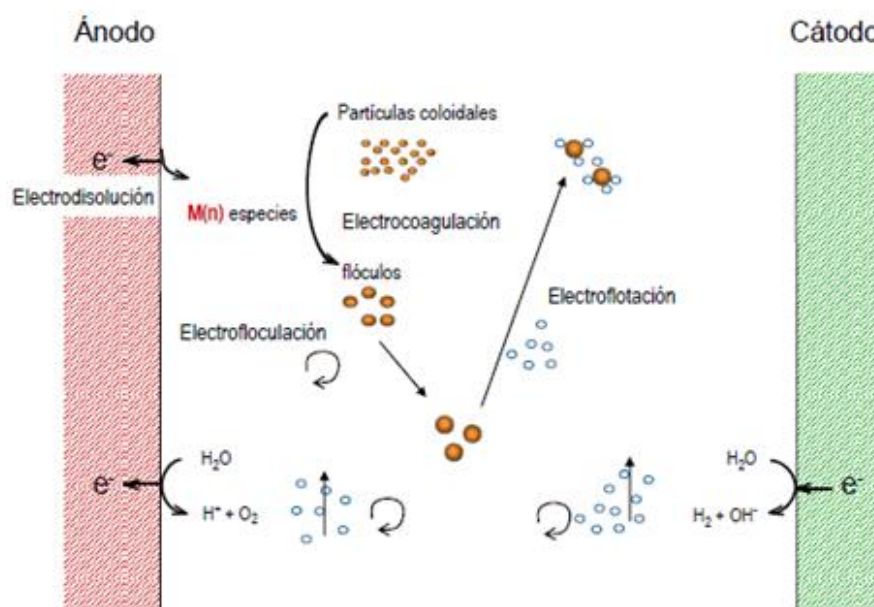


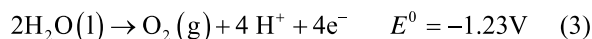
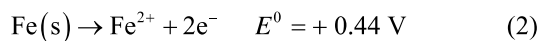
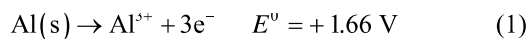
Figura 2. Procesos involucrados en reactor de electrocoagulación.

La función principal de ánodo de sacrificio es generar hidróxidos poliméricos, los cuales actúan como excelentes agentes coagulantes.

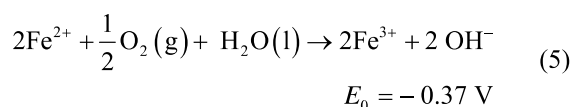
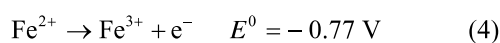
Las condiciones de operación de la electrocoagulación dependen principalmente de la química del medio acuoso, principalmente la conductividad y pH. Otras también importantes características son el tamaño de partícula, tipo de electrodos, tiempo de retención entre los electrodos, espacio y concentración de químicos (Satish, 2013).

Durante la EC, las principales reacciones que toman lugar en los electrodos son las siguientes:

Ánodo



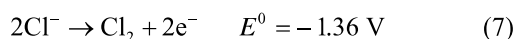
El Fe(II) puede ser oxidado a Fe(III) por el oxígeno atmosférico o la oxidación del ánodo, estas reacciones pueden ser las siguientes:



Cátodo



Cuando cloruros están presentes y el potencial del ánodo es suficientemente alto, las siguientes reacciones pueden tener lugar en el proceso de EC:



Los cationes de metales generados electroquímicamente reaccionarían espontáneamente, formando varias especies monoméricas tales como Al(OH)^{2+} , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ y Al(OH)^{4-} y especies poliméricas tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4-}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{4-}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ las cuales se transformarían finalmente en Al(OH)_3 . Los iones férricos generados electroquímicamente pueden formar iones monoméricas, hidroxicomplejos férricos con OH^- , y especies poliméricas. Esas especies son: FeOH^{2+} , Fe(OH)_2^+ , $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4-}$, Fe(OH)_4^- , $\text{Fe(H}_2\text{O)}_5\text{OH}^{2+}$, $\text{Fe(H}_2\text{O)}_4(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe(H}_2\text{O)}_8(\text{OH})_2^{4-}$ y $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O)}_6(\text{OH})_4^{2+}$ los cuales reaccionan para formar Fe(OH)_3 . La formación de estos complejos depende fuertemente del pH de la solución (Kuokkanen, Kuokkanen, Ramo, &

Lassi, 2013).

La electrocoagulación es utilizada en la remoción de contaminantes de muy diversas aguas residuales, tales como las de la industria de galvanoplastia, electro-plateado metálico, fábricas de envasados, industria del papel (desperdicios de molinos de papel), peleterías, molinos de acero, efluentes con contenido de cromo, plomo o mercurio y efluentes con contenido de aceites como los generados por talleres de maquinaria, refinerías, talleres de reparación de autos, transporte, almacenamiento y distribución de aceites, efluentes de la industria alimentaria, lavanderías e industria textil, y finalmente ha sido utilizada en la remoción de los contaminantes de las aguas para consumo humano y residuales domésticas. (Kuokkanen et al., 2013)

- **Factores que afectan la electrocoagulación**

Densidad de corriente.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio o hierro liberados por los respectivos electrodos. Cuando se aplica una mayor densidad de corriente se incrementa la velocidad de electrodisolución de los iones producidos, la dosis de coagulante en el agua residual y la velocidad de electrolisis del agua en el cátodo, por lo que la producción de hidrógeno en este aumentara y mejorara el efecto de flotación. El aumento de velocidad de la electrólisis del agua en el cátodo, conduce a la producción de más iones hidroxilo que aumenta el pH (Golder, Samanta, & Ray, 2007). Sin embargo cuando se usa una corriente demasiado grande, hay una transformación de energía eléctrica en energía calórica que calienta el agua. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia.

La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación como pH y temperatura.

Conductividad

Cuanto mayor sea la conductividad del medio, mayor es la corriente que pasa a través de ella, para una caída de potencial dado. La conductividad se ajusta normalmente mediante el uso de una solución de NaCl de una concentración dada. La adición de NaCl en el agua residual tiene un efecto adicional positivo sobre la pasivación del ánodo, un fenómeno

ampliamente observado en muchas aplicaciones de electrocoagulación, el cual tiene un impacto negativo sobre la eficiencia del proceso.

La pasivación es en esencia, la formación de una capa aislante, normalmente un óxido, en la superficie del electrodo que impide aún más electrodisolución del metal y la transferencia de electrones, limitando coagulante a la solución. Con el tiempo el espesor de esta capa aumenta reduciendo la eficiencia del proceso de electrocoagulación como un todo. El cloruro de sodio (NaCl) ataca químicamente este óxido de metal que conduce a su descomposición y por lo tanto haciendo más fácil su remoción por medios mecánicos. La adición de Cl^- también disminuirá el efecto negativo de CO_3^{2-} y SO_4^{2-} cuya presencia permite la sedimentación de Ca^{2+} y Mg^{2+} y la formación de una capa de óxido que causara una disminución en la eficiencia eléctrica (Holt & Barton, 2005).

El uso de nuevos materiales, diferentes tipos de electrodos, arreglos y estrategias operacionales de los reactores más sofisticados (como inversiones periódicas de polaridad de los electrodos) también han llevado a una reducción significativa en el impacto de pasivación, lo anterior sigue siendo visto, como una limitación potencial para aplicaciones donde un bajo costo es requerido, en instalación de tratamiento de agua de bajo mantenimiento (Holt & Barton, 2005).

pH

El efecto del pH en la electrocoagulación se refleja en la eficiencia de la corriente y se relaciona con la disolución del hidróxido del metal, se ha encontrado que el rendimiento del proceso depende de la naturaleza del contaminante y la mejor remoción se ha observado para valores de pH cercanos a 7. No obstante a pH neutral el consumo de energía es alto, debido a que hay variación de la conductividad. Cuando la conductividad es alta, el efecto del pH no es significativo. El pH después de la electrocoagulación podría incrementarse para aguas residuales ácidas pero decrecer para aguas alcalinas. El incremento de pH a condiciones ácidas ha sido atribuido a la reacción del hidrógeno en el cátodo dada por $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$.

pH	Ánodo	Catodo
Agua y pH<5	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2 \text{e}^-$ $2\text{Fe}^{+2} \rightarrow 2\text{Fe}^{+3} + 2 \text{e}^-$ El hierro tambien experimenta hidrolisis $\text{Fe} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2(\text{aq}) + 2\text{H}^{+1} + 2\text{e}^{-1}$ $\text{Fe} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3(\text{aq}) + 3\text{H}^{+1} + 3\text{e}^{-1}$	$2\text{H}^{+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})}\uparrow$
5 < pH < 7	$\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3(\text{s})$ Generación de hidrogeno e hidroxido de Fe (III) inicia con un floculo precipitado de color amarillento.	$2\text{H}^{+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})}\uparrow$
6 < pH < 8	$\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3(\text{s})$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2(\text{s})$ Continúa la generacion de hidrogeno y la precipitacion de hidroxido de Fe (II) como floculo de color verde oscuro. El pH minimo para la solubilidad de Fe(OH) está entre 7-8. Los oxidos son hidroxidos deshidratados. $2\text{Fe}(\text{OH})_3 \leftrightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ $\text{Fe}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$ $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{Fe}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}^{+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_{2(\text{g})}\uparrow$
pH > 8	$\text{Fe} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2(\text{aq}) + \text{H}_{2(\text{g})}\uparrow$ $\text{Fe} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3(\text{aq}) + 1 \frac{1}{2} \text{H}_{2(\text{g})}\uparrow$ Continúa la generacion de lodos y oxidacion. Los oxidos de hierro son hidroxidos de hierro deshidratados, y algunas de estas oxidaciones ocurren en la superficie del lodo flotante. Lo anterior puede ocurrir durante la filtracion y preparacion de la muestra.	

Figura 3. Reacciones químicas en la electrodisolución.

Temperatura

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima, para luego decrecer.

Ventajas de EC

- Equipos simples y fáciles de operar.
- EC requiere baja inversión inicial y bajo costo de operación.
- El proceso electrolítico en la celda de EC son controlados eléctricamente y sin movimiento requieren poco mantenimiento.
- Producción baja de lodo.
- EC produce efluentes con menos solidos disueltos totales en comparación a los tratamientos químicos.

- EC puede remover partículas coloidales más pequeñas, porque el campo eléctrico aplicado los pone en movimiento más rápido, lo que facilita la coagulación.
- Las burbujas de gas producidas durante la electrólisis, pueden llevar el contaminante a la parte superior de la solución, donde puede ser más fácilmente concentrada y retirada.

Desventajas

- En los sistemas de EC, se puede presentar la formación impermeable de óxidos en forma de película en el cátodo, por lo que la eficiencia de la celda de electrocoagulación.
- Se requiere alta conductividad en las aguas residuales.
- Debido a la oxidación, ánodo de sacrificio se puede disolver en el agua residual por lo que es requerido cambiarlo.
- El uso de electricidad puede ser costosa en algunos casos.

2.4 OXIDACIÓN AVANZADA

Los Procesos de Oxidación Avanzada han sido aplicados con éxito en el tratamiento de afluentes industriales con distintas problemáticas, entre las que se encuentran una elevada carga orgánica, una variabilidad importante en lo que respecta al caudal y composición o la presencia de compuestos tóxicos y/o difícilmente biodegradables. En estos casos, los procesos biológicos convencionales resultan inviables y, alternativamente, se precisa de procesos fisicoquímicos enérgicos entre los cuales se encuentran los PAO's (procesos de Oxidación Avanzada).

Las PAO's (procesos de Oxidación Avanzada) se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes debido a que involucran la generación y uso de especies transitorias con un elevado poder oxidante como el radical hidroxilo ($\text{HO}\bullet$). Este radical puede ser generado por varios medios y es altamente efectivo para la oxidación de materia orgánica, en especial aquella que no es biodegradable (Forero, Ortiz, & Rios, 2005). Los radicales hidroxilos se generan in situ por la aplicación directa o por la combinación de agentes oxidantes como el ozono, el peróxido de hidrógeno, la radiación ultravioleta o las sales férrico/ferrosas. Entre la gran variedad de tecnologías disponibles las más comunes son la combinación UV y peróxido ($\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$), el reactivo Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$), el foto-Fenton, que es una combinación de las anteriores, o

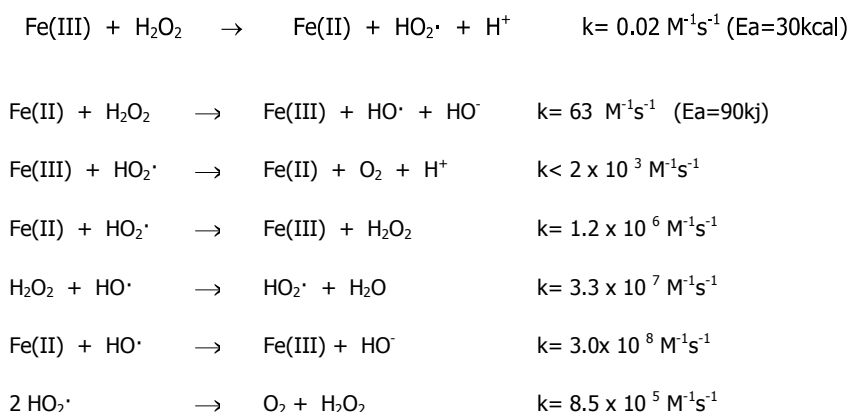
la fotocatálisis (UV/TiO₂). La continua innovación de estas tecnologías está propiciando nuevos desarrollos como la aplicación de microondas, de ultrasonidos o de nuevos catalizadores. Entre las ventajas de la oxidación avanzada se encuentran la potencialidad de eliminar altas cargas y la capacidad de actuar sobre matrices complejas de distintos contaminantes debido al carácter no selectivo de los radicales hidroxilo.

Son procesos basados en la destrucción de contaminantes y no en un mero cambio de fase (como es el caso del carbón activo) y si bien pueden producir lodos, lo hacen en una menor cantidad que los procesos biológicos convencionales. Permiten además la transformación de contaminantes tóxicos en otros productos menos refractarios que pueden ser tratados por oxidación biológica. Son procesos de gran versatilidad, en ocasiones muy sencillos de operar y que en su mayoría se dan a temperatura ambiente (Sanz, 2011).

- Proceso Fenton

El procesos Fenton y las reacciones relacionadas, abarcan reacciones de peróxidos (usualmente H₂O₂) con iones de hierro para formar especies activas de oxígeno que oxidan compuestos orgánicos e inorgánicos. La combinación entre peróxido de hidrógeno y sales de Fe(II), se conoce con el nombre de Reactivo de Fenton. En estas soluciones el Fe(II) descompone al H₂O₂ generando especies oxidantes poderosas como el radical OH[•]. Por analogía, la combinación entre peróxido de hidrógeno y sales de otros cationes de metales de transición, recibe el nombre de sistema tipo-Fenton. El ejemplo más común es aquel en que se utiliza Fe(III) como catalizador. En este caso también se da la formación de especies oxidantes por descomposición de HO₂[•].

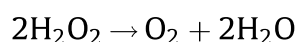
El mecanismo Fenton tradicionalmente aceptado, es representado por las siguientes formulas:



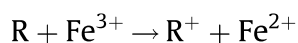
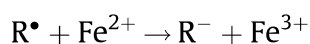
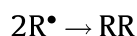
La ecuación (1) es reconocida como reacción Fenton e implica la oxidación del ion férrico o ferroso para descomponer H_2O_2 en radicales hidroxilos. Esta ecuación es considerada usualmente como el núcleo de la química Fenton.

Los iones férricos generados pueden ser reducidos por reacción con hidróxido de hidrogeno en exceso para formar otra vez iones ferrosos y más radicales como se muestra en la ecuación (2). Esta reacción es llamada Fenton-Like Reaction, es más lenta que la reacción Fenton, y permite la regeneración del Fe(II) en un mecanismo efectivo cíclico.

En ausencia de moléculas orgánicas para ser oxidadas, el peróxido de hidrogeno es descompuesto a oxígeno molecular y agua de acuerdo a la siguiente ecuación.



Los radicales hidroxilos pueden atacar radicales orgánicos producidos por orgánicos, presentes en el agua residual. Esos radicales forman dímeros o reaccionan con iones férricos o ferrosos, según se muestra en las siguientes ecuaciones:



Para la oxidación Fenton en el tratamiento de aguas residuales, se debe seguir las siguientes condiciones óptimas, tales como: pH, concentración de iones de hierro y concentración de peróxido de hidrogeno, concentración inicial de contaminantes, temperatura de oxidación y la coagulación química (Koby, Can, & Bayramoglu, 2003)

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 EQUIPOS

Para el desarrollo de las pruebas fueron utilizados los equipos relacionados en la Tabla 1.

Tabla 1. Equipos usados en pruebas experimentales

Equipo	Aplicación
Planchas de calentamiento y agitación Corning PC-420D	Coagulación y floculación del agua residual
Micropipeta S-Brand	Adición de soluciones
Fuente de poder: Programmable PFD de BK precision	Electrodisolución

Para el análisis de los parámetros de DQO y pH fueron usados los equipos relacionados en la Tabla 2.

Tabla 2. Equipos usados en análisis de parámetros DQO y pH

Parámetro	Método	Equipo
pH	Potenciométrico	Multiparámetro 18.50.01
DQO	Digestión cerrada y titulometría	Reactor DRB 200 de HACH

3.2 ANÁLISIS QUÍMICOS

Para la determinación de los parámetros de la demanda química y biológica de oxígeno (DQO, DBO) se tomó como referencia la 22^a edición del *standard methods for the examination of water and waste water* (Rice, Baird, Eaton, & Clesceri, 2012)

La medición de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó de acuerdo con el método de reflujo cerrado (Rice et al., 2012) el cual consiste en añadir la muestra a evaluar, a una mezcla de solución digestora de Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y una

solución reactiva de Sulfato de plata (Ag_2SO_4), llevado posteriormente a un reactor de DQO a 150 °C por un tiempo de 2 horas y posteriormente titulada.

La medición de la demanda biológica de oxígeno (DBO) se realizó de acuerdo con el método de reflujo cerrado BDO_5 (Rice et al., 2012), el cual consistió en llenar con muestra diluida y sembrada, hasta el tope en una botella hermética de tamaño específico incubándolo a la temperatura especificada durante 5 días.

3.3 PROCEDIMIENTOS

Las muestras de aguas fueron recogidas del tanque ecualizador de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa fabricante de productos de cuidado del hogar, cuidado personal y cuidado oral, a donde llegan todas las aguas pertenecientes a estos procesos.

El desarrollo de las pruebas a nivel de laboratorio para el proceso de Electroflux, se realizaron en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Química de la universidad del Valle.

Se realizaron las pruebas preliminares basadas en un diseño 2^4 implicando 4 factores tales como Densidad de corriente, Carga eléctrica, pH de coagulación y Concentración de peróxido. Los niveles de cada variable fueron 1 mA/cm^2 , y 6 mA/cm^2 ; 500 y 2000 C/L; 9 y 12 y 500 y 1500 ppm, respectivamente.

El proceso de electrodisolución inicialmente comenzó llevando la muestra a temperatura ambiente, seguido por disminución de pH con H_2SO_4 50% alrededor de 3. Después de tener lista la muestra se procedió a realizar el proceso de inmersión de las placas a las cuales se le aplicaron diferentes valores de corrientes de acuerdo al modelo establecido, ya explicado anteriormente. Para todas las pruebas se utilizó un volumen de muestra de 0,450 L, un tiempo determinado por la carga y corriente eléctrica respectivamente y un cambio de polaridad cada tres minutos

Para el proceso de coagulación, se aumentó el pH con Hidróxido de Calcio al 10% de acuerdo a los valores establecidos para el modelo 9 o 12 según haya sido el caso, seguido por la adición de 2,25 mL de Poliacrilamida aniónica (PAM) para obtener de esta manera la clarificación del agua tratada, es de tener en cuenta que la adición de estos reactivos se realizó en presencia de agitación constante y cada vez que se adicionaba uno de ellos se

detenía la agitación para evitar que el floculo formado se llegara a deshacer por el movimiento de la agitación, y sedimentara el lodo.

Finalmente el proceso de oxidación se llevó a cabo tomando 100 mL del clarificado o sobrenadante de la etapa anterior, a la cual se le añadieron volúmenes suficientes de H_2O_2 50% suficientes para obtener las concentraciones de 500 y 1500 ppm, esto se realizó en presencia de agitación y finalmente se detuvo para dejar sedimentar.

Una vez finalizado todo el proceso, las muestras fueron conservadas fueron preservadas y manejadas de acuerdo con el *standard methods for the examination of water and waste water 1060 C* (Rice et al., 2012), para determinar DQO y DBO en el laboratorio de aguas de la compañía en la cual se realizó el estudio.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL DEL PROCESO INDUSTRIAL

Los datos mostrados a continuación en la Tabla 3, fueron tomados de la caracterización realizada para la declaratoria anual que se realiza en la empresa manufacturera de productos de aseo personal y del hogar como control ante el ente regulador.

Tabla 3. Caracterización agua residual industrial

PARAMETRO	UNIDADES	Resultados Efluente PTAR Jornada 1	Resultados Efluente PTAR Jornada 2
pH Max		8.6	8.7
pH Min		8.4	8.5
DQO	mg/l O2	964.8	1106.1
DBO	mg/l O2	612.1	458.1
SST	mg/l	85	71
SSED	ml/l	1	0.5
GRASAS Y ACEITES	mg/l	10	3
FENOLES	mg/l	<0,009	0.084
DETERGENTES	mg/l	30	16.5
HIDROCARBUROS TOTALES	mg/l	8.25	11.6
CLORUROS	mg/l	460	440
SULFATOS	mg/l	935	964

***PTAR= planta de tratamiento de aguas residuales**

Como se observa en la Tabla 3, los valores de los parámetros presentan variaciones incluso durante el mismo día, esto se debe a la diferencia en la cantidad de agua residual y su composición química arrojada por cada proceso. Por lo anterior el agua residual almacenada en el tanque ecualizador no posee características específicas y la eficiencia del proceso fisicoquímico actualmente utilizado en la planta de tratamiento depende de estas.

4.2 ENSAYOS PRELIMINARES

Los ensayos preliminares se realizaron con el fin de analizar la influencia de los parámetros tales como densidad de corriente, carga eléctrica, concentración de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) y pH de coagulación sobre la variable respuesta porcentaje de remoción en la demanda química de oxígeno (DQO), de esta forma encontrar los rangos más apropiados para ser usados en la tratamiento con electrodisolución, floculación y oxidación

(Electroflox).

Los niveles de cada variable analizada fueron 1 mA/cm², y 6 mA/cm²; 500 y 2000 C/L; 9 y 12 y 500 y 1500 ppm, respectivamente, los análisis se realizaron por triplicado. Los parámetros fijados para cada una de las pruebas preliminares y sus respectivos resultados se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentajes de remoción en pruebas preliminares utilizando tratamiento Electroflux

Densidad de corriente (mA/cm2)	Carga electrica (C/L)	pH	Peroxido (ppm)	Promedio % Remocion DQO	Promedio DQO (ppm)
6	500	12,03	500	48	3840
6	500	12,03	1500	35	4800
6	500	9,57	500	29	5169
6	500	9,57	1500	44	4126
6	2000	12,04	500	72	2089
6	2000	12,04	1500	69	2490
6	2000	9,04	500	71	2154
6	2000	9,04	1500	62	2475
1	500	12	500	51	3728
1	500	12	1500	43	4187
1	500	9,4	500	41	3155
1	500	9,4	1500	54	4015
1	2000	12,01	500	58	3097
1	2000	12,01	1500	53	3499
1	2000	9,55	500	57	3155
1	2000	9,55	1500	46	4015

Los resultados fueron analizados con la ayuda del programa estadístico Statgraphics 5.1 mediante el uso de herramientas, como el análisis de varianza (ANOVA) y gráfica de superficie de respuesta y la correlación de estos, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la variable respuesta y establecer cuáles de los factores inciden significativamente sobre ella para posteriormente establecer las mejores condiciones para obtener óptimos resultados.

En un análisis de varianza (ANOVA) el valor que nos sirve de referencia a la hora de aceptar o rechazar la hipótesis nula es el nivel de significación. Si el nivel de significación

es **mayor** que 0,05, aceptaremos la hipótesis nula de independencia entre las variables (no existen efectos diferenciales entre los tratamientos). Si el nivel de significación es **menor** que 0,05 rechazaremos la hipótesis nula y aceptaremos la hipótesis alternativa, es decir, concluiremos que existe una relación de dependencia entre las variables, y en este caso podremos decir que los distintos niveles del factor sí influyen sobre los valores de la variable cuantitativa. El nivel de significación como se expuso en el capítulo anterior es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula siendo cierta.

Tabla 5. Análisis de varianza para resultados por tratamiento Electroflux

	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Media Cuadrática</i>	<i>Sig.</i>
Densidad de corriente	,029	1	,029	,125
Carga de corriente	,281	1	,281	,000
H ₂ O ₂	,058	1	,058	,031
pH	,018	1	,018	,968
Densidad de corriente * Carga de corriente	,160	1	,160	,001
Densidad de corriente * H ₂ O ₂	,000	1	,000	,925
Densidad de corriente * pH	,001	1	,001	,800
Carga de corriente * H ₂ O ₂	,028	1	,028	,131
Carga de corriente * pH	,019	1	,019	,210
H ₂ O ₂ * pH	,041	1	,041	,066
Densidad de corriente * Carga de corriente * H ₂ O ₂	,008	1	,008	,402
Densidad de corriente * Carga de corriente * pH	,015	1	,015	,261
Densidad de corriente * pH	,005	1	,005	,947
Carga de corriente * H ₂ O ₂ * pH	,026	1	,026	,145
Densidad de corriente * Carga de corriente * H ₂ O ₂ * pH	,002	1	,002	,699

De acuerdo con el análisis de varianza, los factores estadísticamente significativos que influyeron sobre la variable respuesta (porcentaje de remoción en DQO) fueron carga de corriente, la relación de este factor con la densidad de corriente y la concentración de peróxido de hidrogeno (H₂O₂), siendo los dos primeros más significativo que el ultimo.

Los resultados fueron también analizados mediante la respectiva gráfica del efecto de los factores sobre el porcentaje de remoción de DQO (Figura 4). De acuerdo con el grafico de la relación de factores en los niveles, se observó que el nivel con mayor porcentaje de reducción en demanda química orgánica (DQO) fue 6 mA/cm² para la densidad de corriente, 2000 C/L para la carga eléctrica y 500 ppm para la concentración de peróxido de hidrogeno, para el caso del pH no fue significativa la reducción, ya que solo se modificó en un 0,02 %

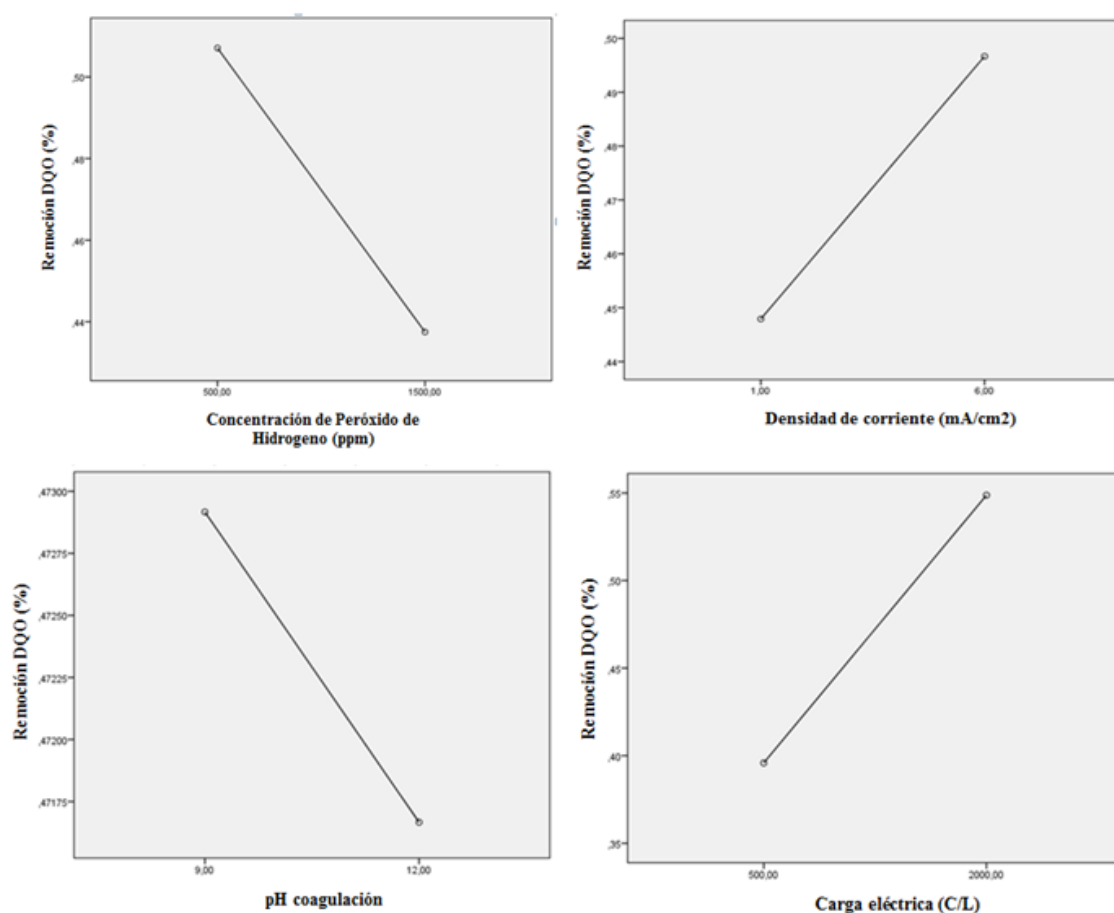


Figura 4. Relación del efecto de los factores principales sobre el porcentaje de remoción DQO

Con la gráfica del efecto de los factores sobre el porcentaje de remoción de DQO, se corrobora los factores significativos carga eléctrica, densidad de corriente y concentración de peróxido de hidrogeno para el tratamiento y su influencia directamente proporcional sobre la variable respuesta para los dos primeros factores.

Al comparar los porcentajes de remoción obtenidos por el tratamiento Electrofloxx y el fisicoquímico actualmente usado en la compañía, se puede observar que el primero muestra una mayor eficiencia para la mayoría de casos estudiados, Tabla 5.

Tabla 5. Porcentaje de remoción de DQO para el proceso fisicoquímico actual vs Electrofloxx

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Carga eléctrica (C/L)	pH	Peroxido (ppm)	Promedio % Remoción DQO Electrofloxx	% Remoción en DQO Fisicoquímico Actual
6	500	12,03	500	48	33
6	500	12,03	1500	35	33
6	500	9,57	500	29	33
6	500	9,57	1500	44	33
6	2000	12,04	500	72	33
6	2000	12,04	1500	69	33
6	2000	9,04	500	71	33
6	2000	9,04	1500	62	33
1	500	12	500	51	33
1	500	12	1500	43	33
1	500	9,4	500	41	33
1	500	9,4	1500	54	33
1	2000	12,01	500	58	33
1	2000	12,01	1500	53	33
1	2000	9,55	500	57	33
1	2000	9,55	1500	46	33

Lo anterior se debe a la mayor eficiencia que presenta la electrocoagulación con respecto a la coagulación, donde los cationes generados presentan mayor porcentaje de remoción frente a los provenientes de productos químicos tradicionales como el sulfato de aluminio o hierro (Acosta, Coy, Bourdon, & Cuervo, 2013), los cuales se involucran en los procesos electroquímicos que se producen simultáneamente tal como oxidación, reducción, ataque electroquímicos y electrolisis, permitiendo todas estas reacciones oxidar y reducir las impurezas de las aguas residuales (Oña & Falconi, 2013).

4.3 EFICIENCIA DEL PROCESO ELECTROFLOX PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD DE VERTIMIENTOS

La nueva normatividad está enfocada en valores de concentración para los parámetros (Tabla 6), a diferencia de la anterior, que para algunos casos tales como DQO y DBO solo estaba dirigido a alcanzar porcentaje de remoción de estos contaminantes.

Tabla 6. Valores de caracterización de agua residual con los exigidos por la normatividad ambiental

PARAMETRO	UNIDADES	Concentracion fabricacion de jabones, detergentes y productos cosmeticos	Resultados Efluente Tratamiento Fisicoquimico PTAR Jornada 1	Resultados Efluente Tratamiento Fisicoquimico PTAR Jornada 2	Cumplimiento Normatividad Resol 631/152
pH Max		9	8.6	8.7	CUMPLE
pH Min		5	8.4	8.5	CUMPLE
DQO	mg/l O2	500	964.8	1106.1	NO CUMPLE
DBO	mg/l O2	250	612.1	458.1	NO CUMPLE
SST	mg/l	80	85	71	CUMPLE
SSSED	ml/l	1	1	0.5	CUMPLE
GRASAS Y ACEITES	mg/l	15	10	3	CUMPLE
FENOLES	mg/l	0.2	<0,009	0.084	CUMPLE
DETERGENTES	mg/l	10	30	16.5	NO CUMPLE
HIDROCARBUROS TOTAL	mg/l	10	8.25	11.6	NO CUMPLE
CLORUROS	mg/l	250	460	440	NO CUMPLE
FLUORUROS	mg/l				
SULTATOS	mg/l	400	935	964	NO CUMPLE
SULFUROS	mg/l	1			

Las aguas industriales resultantes de los procesos de la empresa de productos de aseo para el hogar y cuidado personal, tratada por medio de un proceso fisicoquímico, cumple en su totalidad con la normatividad anterior, pero no para la nueva (Tabla 6). Por lo anterior en busca de soluciones para cumplimiento total de la normatividad, se evaluó la tecnología Electroflux con el objetivo de encontrar en ella resultados óptimos de variables tales como DQO y DBO para el cumplimiento de la misma, sin embargo de acuerdo con los resultados arrojados (Tabla 7), ninguna prueba arrojó valores de 500 ppm para el caso de parámetros tales como DQO tal como lo establece la norma.

Tabla 7. Porcentaje de remoción y concentración de DQO para muestras de aguas residuales de la compañía manufacturera de productos de aseo personal y del hogar.

Densidad de corriente (mA/cm2)	Carga electrica (C/L)	pH	Peroxido (ppm)	Promedio % Remocion DQO Electroflux	Promedio DQO (ppm) Electroflux	Normatividad Nueva DQO
6	500	12,03	500	48	3840	500
6	500	12,03	1500	35	4800	500
6	500	9,57	500	29	5169	500
6	500	9,57	1500	44	4126	500
6	2000	12,04	500	72	2089	500
6	2000	12,04	1500	69	2490	500
6	2000	9,04	500	71	2154	500
6	2000	9,04	1500	62	2475	500
1	500	12	500	51	3728	500
1	500	12	1500	43	4187	500
1	500	9,4	500	41	3155	500
1	500	9,4	1500	54	4015	500
1	2000	12,01	500	58	3097	500
1	2000	12,01	1500	53	3499	500
1	2000	9,55	500	57	3155	500
1	2000	9,55	1500	46	4015	500

Aunque la tecnología Electroflux (EF) no arrojó valores cercanos al solicitado por la norma, mostró buenos porcentajes de remoción del 72% en algunos casos y en otros de 85% cuando se trató una muestra con una DQO de aproximadamente 28000 ppm en comparación al proceso fisicoquímico actualmente usado (Tabla 5), lo anterior implicaría una mejora para el tratamiento, que permitiría lograr junto con otras tecnologías los valores establecidos, teniendo en cuenta que actualmente la planta arroja valores en DQO que oscilan entre 1000 y 25000 ppm, (Figura 5)

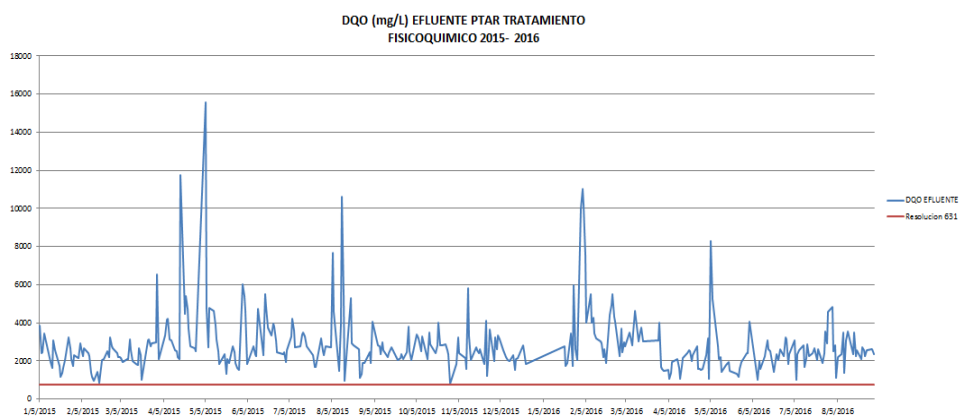


Figura 5. Histórico de DQO del efluente arrojados por tratamiento fisicoquímico actualmente usado en la compañía.

De acuerdo a los comportamientos observados en los resultados de las variables DQO y DBO para las aguas residuales industriales de la compañía, la relación entre DQO y DBO₅ es del 50%, lo que indica que la mitad de la carga contaminante total, es netamente orgánica, de acuerdo a los históricos de la base de datos de la compañía en estudio entre los periodos 2012 y 2015.

Tabla 8. Relación del parámetro DQO y DBO para las aguas residuales 2012, 2013, 2014 y 2015.

ANALISIS	Entrada PTAR				
	2012	2013	2014	2015	
DBO	1262	1243	1321	365.1	Promedio
DQO	3011.4	2046.6	2006	951.7	
Relación DQO/DBO (%)	42	61	66	38	

ANALISIS	Salida PTAR				
	2012	2013	2014	2015	
DBO	484	746.65	535.1	185.7	Promedio
DQO	1182.1	1303.2	1035	514.95	
Relación DQO/DBO (%)	41	57	52	36	

5. CONCLUSIONES

- El tratamiento Electrofloxx aplicado a las aguas residuales resultantes de los procesos de manufactura de productos de aseo personal y del hogar, mostro mejor eficiencia que el tratamiento fisicoquímico actualmente utilizado.
- Con el tratamiento Electrofloxx, no es posible obtener resultados con valores cercanos o iguales a los solicitados por la nueva normatividad ambiental para el caso de las aguas residuales resultantes del proceso de manufactura de productos de aseo personal y del hogar.
- La variación en la composición de las aguas residuales resultantes de la compañía, no permite establecer unas variables fijas del proceso Electrofloxx.
- El proceso Electrofloxx puede servir como mejoramiento al proceso actualmente usado y como complemento de otros procesos adicionales que se implementen para el cumplimiento de la normatividad.

BIBLIOGRAFIA

- Acosta, G. E., Coy, C. A., Bourdon, A., & Cuervo, E. (2013). LA ELECTROCOAGULACION COMO UN TRATAMIENTO EFICIENTE PARA LA REMOCION DE METALES PESADOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES. *Facultad de Ciencias Básicas*, 306-317.
- Arango Ruiz, A., & Garces Giraldo, L. (2008). *Análisis de costos de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea*.
- AS, S. (2008). Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for waste water treatment Mini Review. *Journal Global NEST*.
- Aygun, A., & Yilmaz, T. (2010). Improvement of Coagulation-Flocculation Process for Treatment of Detergent Wastewater Using Coagulant Aids. *International Journal of Chemical and Enviromental Engineering*.
- Aygun, A., & Yilmaz, T. (2010). Improvement of coagulation-Floculation process for treatment of detergent wastewater using coagulant aids. *International Journal Of Chemical and Enviromental engineering*.
- Banyaladzi, D., & Ramirez, L. (2011). *Chemical Pre-Treatment of Anionic Surfactants Contaminated Waste Water at Enaspol uising H2O2/UV Light Waste Water Pre-Treatment Method*. Mexico.
- Chen, G., Chen, X., & Yue, P. (2000). Electrocoagulation anda electroflotation of restaurant wastewater . *Journal of enviromental engineering*.
- Forero, J., Ortiz, O., & Rios, F. (2005). Aplicacion de procesos de oxidacion avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refineria. *CIENCIA FUTURO Y TECNOLOGIA*.
- García, C., Gortares, P., & Drogui, P. (2011). *Tratamientos biológicos y de oxidación avanzada combinados para una solucion a la biotecnología ambiental*.
- GE, J. (2004). *New bipolar electrocoagulation- electroflotation process for the treament of laundry waste water*. Separation and Purification Technology.
- Gocate, & Pandit. (2004). *A review of imperative technologies for wastewater treatment II: hydrid methods*. Advances Enviromental Reserch.
- Golder, A., Samanta, A., & Ray, S. (2007). Trivalent chromium removal by electrocoagulation and characterization of the process sludge. *Journal Chemical Technology Biotechnology*, 496-503.

- Gomez, N. (2005). *Remocion de materia organica por coagulación-floculación*. Universidad Nacional de Manizales.
- Hernandez, Martinez, Barrera, & Pavón. (2011). *Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos*.
- Holt, P., & Barton, G. (2005). *The future for electrocoagulation as a localised water treament technology*. Chemosphere.
- Koby, M., Can, O., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 163-178.
- Kumar, P., Chauhari, S., Khilar, K., & Mahajan, P. (2004). Removal of Arsenic from Water by Electrocoagulation. *Chemosphere*, 1245-1252.
- Kuokkanen, V., Kuokkanen, T., Ramo, J., & Lassi, U. (2013). Recent Applications of Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater. *Green and Sustainable Chemistry*, 89-121.
- Lai, C., & Lin, S. (2003). Treatment of chemical/mechanical polishing wastewater by electrocoagulation system performances and sludge settling characteristics. *Chemosphere*, 235-242.
- Lenntech BVLENNTech. (n.d.). Retrieved DICIEMBRE 12, 2016, from <http://www.lenntech.es/coagulantes-y-floculantes.htm>
- Mahendra, J., & Drew, J. (n.d.). *Encyclopedia of bioprocess technology, fermentation biocatalysis and bioseparation*. New York: Flickinger MC, Drew SW.
- Martinez, F., Cabrales, N., & Palomino, C. (2011). *Tratamiento de aguas residuales mediante electrodisolución, floculación y oxidación*. Cali.
- Oña, B. G., & Falconi, D. R. (2013). *Tratamiento avanzado de aguas residuales del proceso de lavado y tinturado de jeans en la empresa "Mundo Color" mediante electrocoagulación*. RIOBAMBA-ECUADOR.
- Paphanel, B., & Ramirez, L. (n.d.). *Chemical Pre-Treatment of Anionic Surfactants Contaminated Waste Water at Enaspol using H₂O₂/UV Light*.
- Rice, E., Baird, R., Eaton, A., & Clesceri, L. (2012). *Standard methods for examination of water and wastewater*. Washington: American public Health association.
- Sahu, O., & Chaudhari, P. (2013). Review on chemical treatment of Industrial Waste Water. *Scientific Environmental Manage*, 241-257.
- Sanz, J. (2011). Alternativas operacionales en tecnologías de Oxidación Avanzada para el tratamiento de efluentes de alta carga contaminante.

- Satish, I. (2013). Electrocoagulation: A Novel Waste Water Treatment Method. *International Journal Of Modern Engineering Research*, 93-100.
- Siringi, O., Home, P., Chacha, J., & Koehn, E. (2012). is electrocoagulation (EC) a solution to the treatment of wastewater and proving clean water for daily use. *RPN Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Vallejo, G. (2016, Febrero Martes). *Noticias Ambientales*. Retrieved Octubre Domingo, 2016, from Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible:
<http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/noticias/1700-minambiente-presenta-nueva-norma-de-vertimientos-que-permitira-mejorar-la-calidad-agua-del-pais>
- Vepsäläinen, M. (2012). *Electrocoagulation in the treatment of industrial water and wastewater*. VTT Science.