

TRATAMIENTOS DE VINAZA

APLICANDO PROCESOS FÍSICOS-QUÍMICOS Y ELECTROCOAGULACIÓN



compAs
Grupo de Capacitación e Investigación pedagógica

TRATAMIENTOS DE VINAZA

APLICANDO PROCESOS FÍSICOS-QUÍMICOS Y ELECTROCOAGULACIÓN

Primera Edición



TRATAMIENTOS DE VINAZA APLICANDO PROCESOS FÍSICOS-QUÍMICOS Y ELECTROCOAGULACIÓN

Autores

**Dra. Mirella Bermeo Garay Ing.
Luis Bonilla Abarca, MSc.
Ing. Ana Yagual Romero.
MSc. Desireé Alvarez Macias.**

**Primera edición,
noviembre 2017**

Queda rigurosamente prohibidos, bajo las sanciones de las leyes; la reproducción, almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios tanto electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien fotocopia, sin la AutORIZACIÓN de los titulares del copyright.



Libro sometido a revisión de pares académicos.

Edición
Diagramación
Diseño
Publicación

Maquetación.

Grupo Compás

Cámara Ecuatoriana del Libro - ISBN-E: 978-9942-770-12-7
Guayaquil - Ecuador

**TRATAMIENTO DE VINAZA
APLICANDO PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS
Y ELECTROCOAGULACIÓN**

Dra. Mirella Bermeo Garay
Mg. Luis Bonilla Abarca
Ing. Ana Paula Yagual Romero
MSc. Desireé Alvarez Macias



**TRATAMIENTOS DE VINAZA
APLICANDO PROCESOS FÍSICOS-QUÍMICOS Y ELECTROCOAGULACIÓN**

Autores
Dra. Mirella Bermeo Garay Ing.
Luis Bonilla Abarca, MSc.
Ing. Ana Yagual Romero

**Primera edición,
noviembre 2017**

Queda rigurosamente prohibidos, bajo las sanciones de las leyes; la reproducción, almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios tanto electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien fotocopia, sin la AutORIZACIÓN de los titulares del copyright.



Libro sometido a revisión de pares académicos.

Edición
Diagramación
Diseño
Publicación

Maquetación.

Grupo Compás

Cámara Ecuatoriana del Libro - ISBN-E: 978-9942-770-12-7
Guayaquil - Ecuador

**Tratamiento de Vinaza aplicando
procesos Físico - Químicos y Electrocoagulación**
Primera Edición: Noviembre 2017

Autores: Dra. Mirella Bermeo Garay, Mg. Luis Bonilla Abarca,
Ing. Ana Yagual Romero, MSc. Desireé Alvarez Macias

Diagramación: Ing. Arnaldo Rodriguez Mateo

Fotos, Imágenes: Artículos e Internet.

Email: mbermeog@yahoo.com, martha.bermeog@ug.edu.ec

Queda rigurosamente prohibidos, bajo las sanciones de las leyes; la reproducción, almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios tanto electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien fotocopia, sin la Autoresización de los titulares del copyright.

CONTENIDO

1. AGUAS RESIDUALES	13
1.1. Orígenes de las Aguas Residuales	13
1.1.1. Aguas residuales domésticas.	13
1.1.2. Aguas residuales industriales	14
1.1.3. Escorrentías de uso agrícola	14
1.1.4. Pluviales	15
1.2. Efluente de Destilería	16
1.3. Vinaza	17
1.3.1. ¿Qué son las vinazas?	17
1.3.2. Composición físico-química de la vinaza	17
1.3.3. Contaminación del agua ocasionada por la vinaza	19
1.4. Tratamiento de Aguas Residuales	19
1.5. Clasificación de Tratamiento de Aguas Residuales	20
1.5.1. Tratamiento Físico Químico	20
1.5.1.1. Coagulación	21
1.5.1.2. Floculación	22
1.5.2. Tratamiento Biológico	23
1.5.2.1. Adsorción Biológica	23
1.5.2.2. Desorción Biológica	23
1.5.2.3. Biodegradación	24
1.5.2.4. Lagunajes	24
1.5.2.5. Fangos Activados	24
1.5.2.6. Cultivos Fijos	24
1.5.3. Tratamiento Terciarios	24
1.5.3.1. Filtración	24
1.5.3.2. Desinfección Química	25
1.5.3.3. Remoción de Nutrientes	25
1.5.3.4. Precipitación	25
1.5.3.5. Adsorción	25
1.5.3.6. Oxidación y Reducción	25
1.5.4. Procesos de Oxidación Avanzada	26
1.5.4.1. Electroquímica	26
1.5.4.2. Electrólisis	30
1.5.5. Leyes de la Electrólisis o Faraday	35
1.5.5.1. Primera Ley de Faraday	35
1.5.5.2. Segunda Ley de Faraday	36
1.6. Reactores y modos de operación	36

1.6.1. Reactores por Lotes	36
1.6.2. Reactores en continuo	38
1.7. Electrocoagulación	38
1.7.1. Mecanismo de Remoción de Contaminantes	40
1.7.2. Factores que afectan la Electrocoagulación	40
1.7.3. Ventajas de la Electrocoagulación	42
1.7.4. Desventajas de Electrocoagulación	43
1.7.5. Reacciones de la Electrocoagulación	43
2. DISEÑO DEL EQUIPO PARA ELECTROCOAGULACIÓN	47
2.1. Materia prima	47
2.2. Electrodos	47
2.2.1. Cálculos del número de electrodos	48
2.3. Reactor de electrocoagulación	49
2.3.1. Cálculos del área y altura del reactor	50
2.4. Parámetros eléctricos	50
2.4.1. Fuente de poder	50
2.5. Placa de Agitación magnética	51
2.6. Materiales y accesorios para el equipo de electrocoagulación	52
2.7. Construcción y montaje	52
3. METODOLOGÍA	56
3.1. Técnica para la preparación del coagulante	57
3.2. Técnica para determinar la dosis óptima de coagulante por medio del test de Jarras	57
3.2.1. Tamaño del floc	58
3.2.2. Tiempo inicial de formación del floc	58
3.2.3. Determinaciones fisicoquímicas	58
3.2.4. Procedimiento del ensayo	60
3.3. Métodos analíticos	60
3.3.1. Método analítico para determinación de pH	60
3.3.2. Método analítico para la determinación de DQO	61
3.3.3. Método analítico para la determinación de color	62
3.4. Diseño experimental	62

3.5. Puesta en marcha del equipo de electrocoagulación	63
3.6. Fórmulas utilizadas para el cálculo de rendimientos	63
4. EXPERIMENTACIÓN	67
4.1. Caracterización de la vinaza	67
4.2. Test de Jarras	68
4.3. Ajuste de pH	70
4.4. Pruebas con el equipo de electrocoagulación	71
4.4.1. Prueba 1 con pH 6	71
4.4.2. Prueba 2 con pH 7	72
4.4.3. Prueba 3 con pH 8	73
4.5. Remoción de color con diferentes amperios	74
4.6. Remoción de DQO con diferentes amperios	75
4.7. Consumo de material y energía en las pruebas	75
4.8. Pruebas en línea final	77
5. ABREVIATURAS	81
6. GLOSARIO	83
7. BIBLIOGRAFÍA	85

INTRODUCCIÓN

Por medio de la destilación del fermento del jugo de caña o de melaza, se obtiene la vinaza con una producción aproximada de 13 litros por cada litro de alcohol etílico, la misma que contienen altas cargas orgánicas y nutrientes como nitrógeno, azufre, fósforo y potasio. Entre los compuestos orgánicos más importantes, están los alcoholes, ácidos orgánicos y aldehídos. Además, contiene compuestos fenólicos recalcitrantes, como las melanoidinas. Son ácidas con un pH entre 3 y 4. Este subproducto por su alta carga de contaminante, lo convierte en un verdadero peligro para la conservación del medio ambiente.

En los últimos años se han implementado tecnologías eficientes de remoción de contaminantes de diversos efluentes residuales como: los tratamientos biológicos aerobios o anaerobios, tratamientos físico-químicos y electrocoagulación como alternativa para el tratamiento de vinazas.

Entre los tratamientos electroquímicos se encuentra la electrocoagulación que se caracteriza por utilizar un equipo simple y fácil de operar, con un tiempo corto de proceso, no utiliza reactivos químicos y se aplica para la disminución de color, turbidez, DQO, DBO.

En este proceso el coagulante es formado in situ por disolución de los iones metálicos del electrodo de sacrificio (aluminio) en el ánodo; y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrogeno que ayudan a la flotación de los floculos. La corriente eléctrica genera la fuerza electromotriz que provoca algunas reacciones químicas dando como resultado la inestabilidad de las moléculas. La densidad de corriente determina la cantidad de iones liberados por los respectivos electrodos, esta se determina teniendo en cuenta los parámetros de operación como el pH y el tiempo. El agua residual de la investigación es específicamente la vinaza caracterizada por presentar color marrón muy oscuro que produce un impacto ambiental negativo.

AGUAS RESIDUALES

1





1. AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son aquellas que tiene composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original (Ministerio del Ambiente, 2012).

1.1. Orígenes de las Aguas Residuales

Se pueden considerar cuatro fuentes primordiales de aguas residuales (Ramalho, 2000):

1. Aguas residuales domésticas
2. Aguas residuales industriales
3. Escorrentías de uso agrícola
4. Pluviales

1.1.1. Aguas residuales domésticas.

Las aguas residuales son provenientes de tocadores, baños, regaderas o duchas, cocinas, etc.; que son desechados a las alcantarillas o cloacas. En muchas áreas, las aguas residuales también incluyen algunas aguas sucias provenientes de industrias y comercios. La división del agua casera drenada en aguas grises y aguas negras es más común en el mundo desarrollado, el agua negra es la que procede de inodoros y orinales y el agua gris, procedente de piletas y bañeras, puede ser usada en riego de plantas y reciclada en el uso de inodoros, donde se transforma en agua negra. Muchas aguas residuales también incluyen aguas superficiales procedentes de las lluvias (Ramalho, 2000).

Características de los caudales de origen doméstico

Según su origen, las aguas residuales son el resultado de la combinación de los residuos líquidos y sólidos utilizando como medio de transición el agua, que provienen de residencias, oficinas, edificaciones comerciales e instituciones. Aunque el precio del agua es uno de los factores de gran incidencia, la cantidad para el consumo doméstico no debería alcanzar valores arriba de 200 L/hab/d teniendo un promedio de 60 a 70 por 100 para lavandería, cocina, baño y aseo y de 30 a 40 por 100 para arrastre de sólidos y líquidos de origen antropogénico. En general, las aguas residuales de origen doméstico, son aquellas en que se utilizan con fines higiénicos (sanitarios, cocinas, lavanderías, etc.) (Sánchez Flores, 2016).

1.1.2. Aguas residuales industriales

En la mayoría de los procesos industriales se requiere grandes cantidades de agua por lo cual trae como consecuencia el agravante que después de ser usada en los procesos muchas de las cuales realizan la disposición final sin hacerle algún tratamiento de descontaminación, generando un grave problema ambiental que conlleva a la producción de malos olores, disposición inapropiada de contaminantes tóxicos y cancerígenos de tipo químico como compuestos aromáticos, colorantes, metales pesados, entre otros (Utadeo, 2013).



Figura 1. *Ejemplo de efluente industrial*

Fuente: <http://evaporadoresindustriales.grupovento.com/wp-content/uploads/2017/07/qu%C3%A9-son-efluentes-industriales.jpg>

1.1.3. Escorrentías de uso agrícola

El agua que proviene de campos agrícolas y es también agua de lluvia y nieve derretida se le llama escorrentía agrícola; La escorrentía agrícola es fuente de contaminación del agua de ríos y lagos, ya que tiene contaminantes de la erosión del suelo, alimentación de animales, labranza, desechos de origen animal, pesticidas y fertilizantes, además de la misma agua con la que se riega. La escorrentía Agrícola puede contaminar el agua potable, el agua de pozos, le da mal sabor y olor, se exponen también los peces a altas concentraciones de sustancias químicas (Dinámica en Soluciones, 2015).



Figura 2. *Ejemplo de efluente agroindustrial*

Fuente: https://inta.gob.ar/sites/default/files/efluentes_inta_9_de_julio.jpg

1.1.4. Pluviales

Aguas resultantes de la escorrentía superficial (Metcalf & Eddy, 1995), es decir, muchos contaminantes entran a los cuerpos hídricos a través de los desagües pluviales que recogen y transportan la escorrentía de las calles produciendo un impacto ambiental negativo con contaminantes como aceite de motor, pintura, residuos de animales, fertilizantes y pesticidas, los cuales son llevados por las lluvias a los desagües pluviales (Mywatershed Watch, 2017).



Figura 3. *Ejemplo de efluente pluvial*

Fuente: http://www.environmentandsociety.org/sites/default/files/thumbnails/image/distintos_canales_de_conduccion_aguas_lluvias-saul_orduz_1973.jpg

1.2. Efluente de Destilería

En muchos países de clima templado que utilizan cereales para la producción de alcohol, se denomina mosto o vinaza a la fracción agotada que emerge de la columna de destilación. También es conocido como vinaza el residuo producido en las destilerías vnicas. En el presente trabajo el término vinaza se refiere al residuo líquido final derivado de la fermentación alcohólica de las mieles de caña de azúcar.

Un estudio de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente plantea que una destilería suele producir 400 litros de alcohol a partir de 1000 Kg de melazas, y que esto genera aproximadamente el mismo volumen de residuos líquidos. Sin embargo, los datos publicados por diversos países indican que el volumen de estos efluentes es superior al que reflejan las cifras de la ONU. Por ejemplo, estudios realizados en Tailandia, la India y Brasil señalan que el volumen de efluente generado en una destilería es de 10 a 15 veces mayor que el del alcohol producido (Fitzgibbon, Nigam, Singh, & Marchant, 1995) (Brossard Pérez, 1996).



Figura 4. Ejemplo de efluente de destilería

Fuente: <http://img.lagaceta.com.ar/fotos/notas/2011/12/7/46848143-3853463.jpg>



1.3. Vinaza

La vinaza es un material líquido resultante de la producción de alcohol etílico, ya sea por destilación de la melaza fermentada o de la fermentación directa de los jugos de caña. Su origen son entonces, las plantas de caña de azúcar por lo que su composición elemental debe reflejar la del material de procedencia. Se trata de una material orgánico líquido que puede contener como impurezas sustancias procedentes del proceso de extracción de los jugos y de la fermentación. En ningún caso elementos extraños, tóxicos o metales pesados. Puesto que su origen es la planta de caña, la vinaza está compuesta por materiales orgánicos y nutrientes minerales que hacen de compuestos y constituyentes vegetales como aminoácidos, proteínas, lípidos, ácidos diversos, enzimas, bases, ácidos nucleicos, clorofila, lignina, quinonas, ceras, azúcares, hormonas, etc (Perez, 2006).

1.3.1. ¿Qué son las vinazas?

Las vinazas provienen de la caña de azúcar y se obtienen de la fermentación y destilación de las melazas; son el principal residuo orgánico en la obtención de alcohol. Es un líquido de color de café con bajo pH, olor dulce y alto contenido de materia orgánica disuelta y en suspensión. Por cada litro de alcohol producido se obtienen de 12 a 15 litros de vinaza aproximadamente (CONADESUCA, 2016).

1.3.2. Composición físico-química de la vinaza

La composición química de las vinazas es variable y depende de: el método de conducir la fermentación alcohólica, las especies de levaduras utilizadas, la relación fondaje-vinaza y de la materia prima utilizada en la destilación; la cual, puede proceder de 3 fuentes: melaza (concentrada), directamente del jugo de los molinos, y mixta (mezcla de jugo y melaza).

Las vinazas tienen un alto contenido de materia orgánica, minerales y elementos esenciales para las plantas, pero son extremadamente corrosivas debido a su pH ácido que fluctúa entre 4.9 y 5.4, por lo que no es recomendable almacenarla en contenedores o recipientes metálicos, sino en recipientes de plástico o estanques de concreto (CONADESUCA, 2016).

La vinaza resultante de la destilación de melaza fermentada, tiene una composición elemental interesante y contiene todos los componentes del vino que han sido arrastrados por el vapor de agua así como cantidades de azúcar residual y componentes volátiles. De manera general, los constituyentes son los siguientes: (Perez, 2006)

- Sustancias inorgánicas solubles de los iones K, Ca y SO_4^-
- Células muertas de levaduras
- Sustancias orgánicas resultantes de los procesos metabólicos de levaduras y

- microorganismos contaminantes
- Azúcar y alcohol residual
- Sustancias orgánicas insolubles
- Sustancias orgánicas solubles

Tabla 2. Composición fisicoquímica de la vinaza

PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	UNIDADES	RESULTADOS
Nitrógeno total amoniacal	mg/l	6,85
Temperatura	°C	58.6
Potencial de Hidrógeno	mg/l	4,85
Acidos Grasos Volátiles	mg/l	3740,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	42900,0
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	60327,0
Alcalinidad	mg/l	2934,0
Fosfatos	mg/l	86,00
Sulfatos	mg/l	2540,0
Potasio	mg/l	9500,0
Aceites y grasas	mg/l	4,00
Hierro	mg/l	50,90
Bario	mg/l	< 0,10
Flúor	mg/l	< 0,02
Zinc	mg/l	< 0,059
Cobre	mg/l	< 0,03
Magnesio	mg/l	< 23,20
Aluminio	mg/l	< 0,039
Molibdeno	mg/l	No detectable
Cobalto	mg/l	4,00
Níquel	mg/l	2,60
Vanadio	mg/l	< 0,10
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	19200
Pesticidas organofosforados	mg/l	< 0,00002
Coliformes Totales	NMP/100ml	< 1
Huevos Helmintos	unid/litro	Ausencia
Muestra Compuesto realizado por Laboratorios GQO en Agosto del 2011		
Informe de Ensayo para Soderal No. 12768		

Fuente: (Molina, 2012)

1.3.3. Contaminación del agua ocasionada por la vinaza

Durante la transformación de las melazas en alcohol, se obtiene vinaza, desecho altamente contaminante del agua por (Perez, 2006):

- Alto DBO por lo que se requiere alta cantidad de oxígeno para oxidarse.
- Volumen de producción elevados en las destilerías 11-15 lts vinaza/ lts alcohol.
- Alta acidez y corrosividad.
- Alto riesgo para la vida y reproducción de fauna y microflora acuática.
- Su almacenamiento en grandes reservorios emite gases de efecto invernadero.

1.4. Tratamiento de Aguas Residuales

Las aguas generadas de los procesos industriales requieren un tratamiento antes de su descarga. En la etapa inicial por lo general predomina los fenómenos físicos, que corresponden a las operaciones unitarias, luego se utiliza procesos químicos y biológicos, conocidos como procesos unitarios para eliminar los sólidos suspendidos, usualmente se realiza una combinación de procesos y operaciones unitarias. Las aplicaciones de los mismos darán lugar a los tratamientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios (Bermeo, 2017, pág. 45).

1.5. Clasificación de Tratamiento de Aguas Residuales

Tabla 1. *Tipos de Pretratamiento y Tratamiento de Aguas Residuales.*

PRETRATAMIENTO	
Cribado	
Dilaceración	
Desarenado	
Desengrasado	
Homogeneización	
TRATAMIENTO PRIMARIO	
Químico	Físico
Coagulación	Sedimentación
Neutralización	Floculación
	Flotación
	Filtración
TRATAMIENTO SECUNDARIO	
Lodos acivados	Estabilización por lagunaje
Aireación prolongada (Proceso de oxidación total)	Filtro biológicos
Estabilización por contacto	Biodiscos
Otras modificaciones de sistema convencional de lodos activados: aireación de fases, mezcla completa, aireación descendente, alta carga, aireación con oxígeno puro.	Tratamientos anaerobios
Lagunaje con aireación	
TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO	
Microtamizado	Osmosis inversa
Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas)	Electrocoagulación
Precipitación y coagulación	Cloración y ozonización
Adsorción (carbón activado)	Proceso de reducción de nutrientes
Intercambio iónico	Otros

Fuente: (Bermeo, 2017, pág. 49).

1.5.1. Tratamiento Físico Químico

El tratamiento físico químico del agua residual tiene como finalidad mediante la adición de ciertos productos químicos la alteración del estado físico de estas sustancias que permanecerían por tiempo indefinido de forma estable para convertirlas en partículas susceptibles de separación por sedimentación. Mediante este tratamiento puede llegar a eliminarse del 80 al 90% de la materia total suspendida, del 40 al 70% de la DBO₅ y del 30 al 40% de la DQO, en procesos tradicionales de depuración (Pinzon, 2010).



1.5.1.1. Coagulación

La coagulación es la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancias químicas que son los coagulantes. Esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible (Restrepo, 2006).

Factores que influyen en la Coagulación

Entre los factores que influyen en la Coagulación están los siguientes:

- Valencia: Entre mayor sea la valencia del ion, más efectivo resulta como coagulante.
- Capacidad de cambio: Es una medida de la tendencia a remplazar cationes de baja valencia por otros de mayor valencia, provocando la desestabilización y aglomeración de partículas en forma muy rápida.
- Tamaño de las partículas: Las partículas deben poseer el diámetro inferior a una micra. Las partículas con diámetro entre una y cinco micras, sirven como núcleos de floc, en cambio de diámetro superior a cinco micras, son demasiado grandes para ser incorporadas en el floc.
- Temperatura: La temperatura cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor.
- Concentración de iones H⁺ o pH: Para cada coagulante hay por lo menos una zona de pH óptima, en la cual una buena floculación ocurre en el tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante.
- Relación cantidad-tiempo: La cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del floc.
- Alcalinidad: La alcalinidad guarda la relación con el pH y por lo tanto el contenido de alcalinidad del agua es uno de los factores por considerar en la coagulación (Restrepo, 2006).

Clases de Coagulantes

Los coagulantes según (Restrepo, 2006) que se utilizan en la práctica son los siguientes:

- Sales de Aluminio: Forman un floc ligeramente pesado. Las más conocidas son: El Sulfato de Aluminio, $Al_2(SO_4)_3$, que en la práctica se le denomina como Alumbre; el Sulfato de Aluminio Amoniaco y el Aluminato Sódico. El primero es el que se usa con mayor frecuencia dado su bajo costo y manejo relativamente sencillo.
- Sales de Hierro: Se utiliza el Cloruro Férrico, $FeCl_3$, y los Sulfatos de Hierro Férrico y Ferroso, $Fe_2(SO_4)_3$ y $FeSO_4$. Forman un floc más pesado y de mayor

velocidad de asentamiento que las sales de aluminio.

- **Polímeros o polielectrolitos:** Son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulantes sino como ayudantes de coagulación. La dosificación de estas sustancias se lleva a cabo en concentraciones muy bajas, lo cual es una gran ventaja y compensa el costo del polímero. Están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas potables ya que se produce una menor cantidad de lodos, adicionalmente el lodo producido es más fácilmente tratable (Restrepo, 2006).

1.5.1.2. Floculación

La floculación es la unión entre los flóculos ya formados con el fin de aumentar su volumen y peso de forma que pueden decantar. Consiste en la captación mecánica de las partículas neutralizadas dando lugar a un entramado de sólidos de mayor volumen. De esta forma, se consigue un aumento considerable del tamaño y la densidad de las partículas coaguladas, aumentando por tanto la velocidad de sedimentación de los flóculos (Jaramillo, 2012).

Factores que influyen en la Floculación

- **Concentración y naturaleza de las partículas:** La velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.
- **Tiempo de detención:** La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras.
- **Gadiante de velocidad:** Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gadiante que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc. El gadiante a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados (Restrepo, 2006).

Diferencia entre floculante y coagulante

Es importante conocer en primera instancia las definiciones de lo que son sustancias floculantes y sus sustancias coagulantes (Barrera, 2014):

- **Floculantes:** Son polímeros generalmente orgánicos aplicados para promover la formación de flóculos en el agua, promueven la formación de los enlaces entre las partículas. Estos se dividen en tres grupos: catiónicos, aniónicos y no iónicos (Barrera, 2014).
- **Coagulantes:** son los iones positivos con alta valencia. Generalmente se

aplican el aluminio y hierro; aluminio como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, hierro como FeCl_3 o $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Se puede aplicar en forma relativamente barata el FeSO_4 , a condiciones de que se haya oxidado a Fe^{3+} durante la aireación (Barrera, 2014).

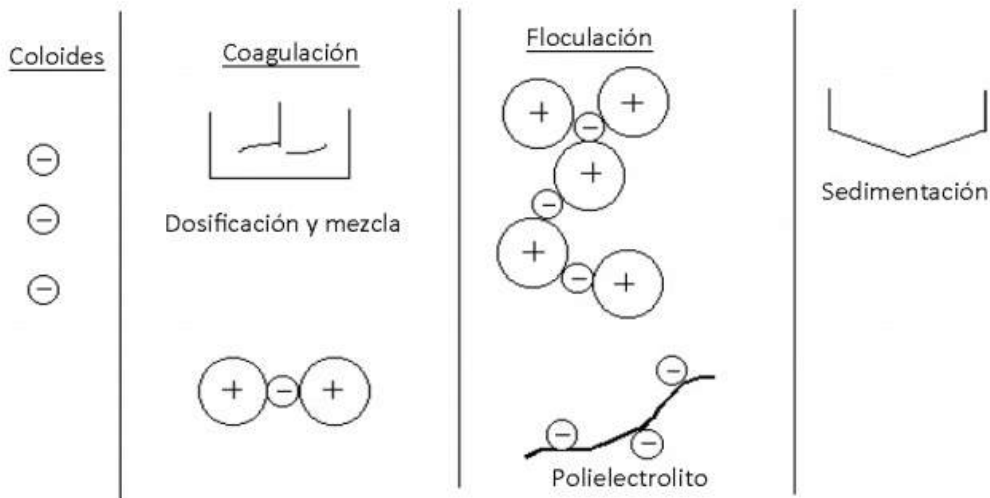


Figura 5. Esquema de las etapas de coagulación y floculación
Fuente: (Richert, 1992)

1.5.2. Tratamiento Biológico

Los tratamientos biológicos, en los que la depuración de la materia orgánica biodegradable del agua residual se efectúa por la actuación de microorganismos (fundamentalmente bacterias), que se mantienen en suspensión en el agua o bien se adhieren a un soporte sólido formando una capa de crecimiento (Huerga, 2005).

1.5.2.1. Adsorción Biológica

Adsorción limitada de materia orgánica no biodegradable sobre sólidos orgánicos. La adsorción de compuestos tóxicos sobre biomasa no parece ser importante, aunque si lo es la adsorción sobre sólidos en suspensión. Esto puede generar problemas de manejo de lodos (Huerga, 2005).

1.5.2.2. Desorción Biológica

Los compuestos orgánicos volátiles pueden resorberse por la agitación generada. Puede causar problemas de contaminación atmosférica (Huerga, 2005).

1.5.2.3. Biodegradación

Principal mecanismo de eliminación de materia orgánica para la mayor parte de aguas residuales. Para aguas residuales industriales debe producirse una aclimatación de los microorganismos al sustrato (Huerga, 2005).

1.5.2.4. Lagunajes

El tratamiento de lagunas proporciona el establecimiento necesario y fomenta la mejora biológica de almacenaje en charcos o lagunas artificiales (Huerga, 2005).

1.5.2.5. Fangos Activados

Las plantas de fangos activos usan una variedad de mecanismos y procesos para usar oxígeno disuelto y promover el crecimiento de organismos biológicos que remueven substancialmente materia orgánica. También puede atrapar partículas de material y puede, bajo condiciones ideales, convertir amoníaco en nitrito y nitrato, y en última instancia a gas nitrógeno (Huerga, 2005).

1.5.2.6. Cultivos Fijos

El abonamiento o cultivos fijos es también un proceso aeróbico que implica el mezclar de los sólidos de las aguas residuales con fuentes de carbón tales como aserrín, paja o virutas de madera. En presencia del oxígeno, las bacterias digieren los sólidos de las aguas residuales y la fuente aguada del carbón desprendiendo calor (Huerga, 2005).

1.5.3. Tratamiento Terciarios

El tratamiento terciario proporciona una etapa final para aumentar la calidad del efluente al estándar requerido antes de que éste sea descargado al sistema receptor (mar, río, lago, campo, etc.) Más de un proceso terciario del tratamiento puede ser usado en una planta de tratamiento (Huerga, 2005).

1.5.3.1. Filtración

Es una operación que consiste en hacer pasar un líquido que contiene materias en suspensión a través de un medio filtrante que permite el paso del líquido pero no el de las partículas sólidas, las cuales quedan retenidas en el medio filtrante. De este modo, las partículas que no han sedimentado en el decantador son retenidas en los filtros. La filtración de arena remueve gran parte de los residuos de materia suspendida. El carbón activado sobrante de la filtración remueve las toxinas residuales (Huerga, 2005).



1.5.3.2. Desinfección Química

El propósito de la desinfección en el tratamiento de las aguas residuales es reducir substancialmente el número de organismos vivos en el agua que se descargará nuevamente dentro del Ambiente. La efectividad de la desinfección depende de la calidad del agua que es tratada (por ejemplo: turbiedad, pH, etc.), del tipo de desinfección que es utilizada, de la dosis de desinfectante (concentración y tiempo), y de otras variables ambientales (Huerga, 2005).

1.5.3.3. Remoción de Nutrientes

Las aguas residuales pueden también contener altos niveles de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que eso en ciertas formas puede ser tóxico para peces e invertebrados en concentraciones muy bajas (por ejemplo amoníaco) o eso puede crear condiciones insanas en el Ambiente de recepción (Huerga, 2005).

1.5.3.4. Precipitación

Esta última etapa tiene como finalidad el separar los agregados formados del seno del agua. Las operaciones de precipitación y sedimentación química, llevadas a cabo de manera independiente o en combinación con reacciones de oxidación reducción, se utilizan ampliamente para la eliminación de metales (Huerga, 2005).

1.5.3.5. Adsorción

Se llama adsorción al fenómeno de acumulación de partículas sobre una superficie. La sustancia que se adsorbe es el adsorbato y el material sobre el cual lo hace es el adsorbente (Huerga, 2005).

1.5.3.6. Oxidación y Reducción

Las reacciones químicas de oxidación y reducción se emplean para reducir la toxicidad o la solubilidad, o para transformar una sustancia en otra más fácilmente manipulable. Como se ha visto con anterioridad esta operación mayoritariamente se combina con la precipitación química. Las reacciones químicas de reducción se emplean principalmente para el tratamiento de corrientes que contiene cromo hexavalente, mercurio y plomo. Los agentes reductores más comunes son el dióxido de azufre, sales de sulfitos y sales de hierro (Huerga, 2005).

Los tratamientos terciarios que se emplean en la remoción de colorantes generalmente no son suficientemente eficaces para reducir al mínimo el contenido de contaminantes más persistentes, por lo que se hace necesario introducir otros de tratamientos que logren este objetivo. Como los procesos de oxidación avanzada (Bermeo, 2017).

1.5.4. Procesos de Oxidación Avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA), son aplicados en agua residual que tiene baja biodegradabilidad y una alta estabilidad química como es el caso de los colorantes (Bermeo, 2017).

1.5.4.1. Electroquímica

La Ingeniería Electroquímica es una rama importante dentro de la química que tiene como objetivo principal el estudio, diseño y manipulación de los diferentes equipos y procesos donde se produce una interconversión o transformación entre energía química y eléctrica. Las reacciones químicas que ocurren en el interfaz de un electrodo puede ser un metal y un conductor iónico el electrolito es una solución o un sólido (Ibañez, 2014).

Esta disciplina apareció hace más de 50 años como nueva rama de la Ingeniería Química. Como consecuencia existe una amplia área de conocimientos que la conforman como fenómenos de transporte, la Ingeniería de reactores químicos, la ciencia de los materiales y la química. Las nuevas atenciones de la Ingeniería Electroquímica han combinado con el surgimiento de una mayor responsabilidad social buscando el mantenimiento del Medio Ambiente, lo que conlleva la cruda realidad de aplicar nuevas tecnologías de tratamiento más provechosos en cuanto a obtener excelentes resultados y a minorar costos (Ibañez, 2014).

Si una reacción química es conducida mediante una diferencia de potencial aplicada externamente, se hace referencia a una electrólisis. En cambio, si la caída de potencial eléctrico, es creada como consecuencia de la reacción química, se conoce como un “acumulador de energía eléctrica”, también llamado batería o celda galvánica. (Baeza, 2006)

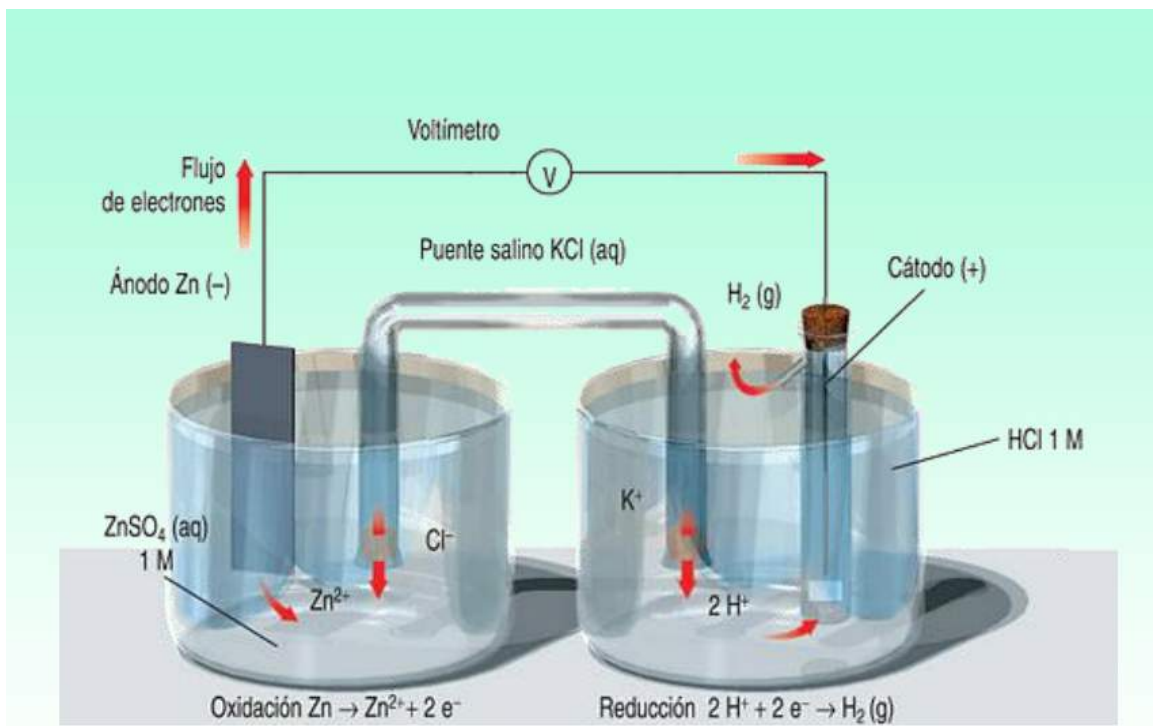


Figura 6. Proceso de Electroquímica
Fuente: (Baeza, 2006)

Reacciones redox

Las reacciones químicas donde se produce una transferencia de electrones entre moléculas se conocen como reacciones redox, y su importancia en la electroquímica es vital, pues mediante este tipo de reacciones se llevan a cabo los procesos que generan electricidad o en caso contrario, son producidos como consecuencia de ella.

En general, la electroquímica se encarga de estudiar las situaciones donde se dan reacciones de oxidación y reducción encontrándose separadas, físicamente o temporalmente, se encuentran en un entorno conectado a un circuito eléctrico. Esto último es motivo de estudio de la química analítica, en una subdisciplina conocida como análisis potenciométrico. En dichas reacciones la energía liberada de una reacción espontánea se convierte en electricidad o bien se puede aprovechar para inducir una reacción química no espontánea. (Baeza, 2006)

Ajuste de ecuaciones Redox

Las reacciones electroquímicas se pueden ajustar por el método ión-electrón donde la reacción global se divide en dos semirreacciones (una de oxidación y otra de reducción), se efectúa el ajuste de carga y elemento, agregando H^+ , OH^- , H_2O y/o electrones para compensar los cambios de oxidación. Antes de empezar a balancear se tiene que determinar en que

medio ocurre la reacción, debido a que se procede de una manera en particular para cada medio. (Baeza, 2006)

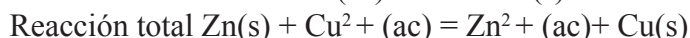
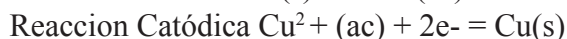
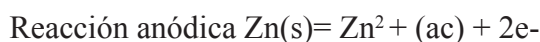
Celda Electroquímica

Es el dispositivo utilizado para la descomposición mediante corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrolitos. También se conoce como celda galvánica o voltaica, en honor de los científicos Luigi Galvani y Alessandro Volta, quienes fabricaron las primeras de este tipo a fines del S. XVIII.

Esquema de la Pila de Daniell. El puente salino (representado por el tubo en forma de U invertida) contiene una disolución de KCl permitiendo la interacción eléctrica entre el ánodo y el cátodo. Las puntas de éste deben estar tapadas con pedazos de algodón para evitar que la disolución de KCl contamine los otros contenedores. (Baeza, 2006)

Las celdas electroquímicas tienen dos electrodos: El Ánodo y el Cátodo. El ánodo se define como el electrodo en el que se lleva a cabo la oxidación y el cátodo donde se efectúa la reducción. Los electrodos pueden ser de cualquier material que sea un conductor eléctrico, como metales, semiconductores. También se usa mucho el grafito debido a su conductividad y a su bajo costo. Para completar el circuito eléctrico, las disoluciones se conectan mediante un conductor por el que pasan los cationes y aniones, conocido como puente de sal (o como puente salino). (Baeza, 2006)

Los cationes disueltos se mueven hacia el Cátodo y los aniones hacia el Ánodo. La corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo porque existe una diferencia de potencial eléctrico entre ambos electrolitos. Esa diferencia se mide con la ayuda de un voltímetro y es conocida como el voltaje de la celda. También se denomina fuerza electromotriz (fem) o bien como potencial de celda. En una celda galvánica donde el ánodo sea una barra de Zinc y el cátodo sea una barra de Cobre, ambas sumergidas en soluciones de sus respectivos sulfatos, y unidas por un puente salino se la conoce como Pila de Daniell. Sus semi-reacciones son estas:



La notación convencional para representar las celdas electroquímicas es un diagrama de celda. En condiciones normales, para la pila de Daniell el diagrama sería:



Este diagrama está definido por: ánodo --> cátodo Electrodo negativo/electrolito // Electrodo positivo (el / indica flujo de electrones y el // significa puente salino)

La línea vertical representa el límite entre dos fases. La doble línea vertical representa el

puente salino. Por convención, el ánodo se escribe primero a la izquierda y los demás componentes aparecen en el mismo orden en que se encuentran al moverse de ánodo a cátodo.

Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser del 70%. El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente (Baeza, 2006).

Aplicaciones

La descomposición electrolítica es la base de un gran número de procesos de extracción y fabricación muy importantes en la industria moderna. La sosa cáustica (un producto químico importante para la fabricación de papel, rayón y película fotográfica) se produce por la electrólisis de una disolución de sal común en agua. La reacción produce cloro y sodio.

El sodio reacciona a su vez con el agua de la pila electrolítica produciendo sosa cáustica. El cloro obtenido se utiliza en la fabricación de pasta de madera y papel. Una aplicación industrial importante de la electrólisis es el horno eléctrico, que se utiliza para fabricar aluminio, magnesio y sodio. En este horno, se calienta una carga de sales metálicas hasta que se funde y se ioniza. A continuación, se deposita el metal electrolíticamente. Los métodos electrolíticos se utilizan también para refinar el plomo, el estaño, el cobre, el oro y la plata. La ventaja de extraer o refinar metales por procesos electrolíticos es que el metal depositado es de gran pureza. La galvanotecnia, otra aplicación industrial electrolítica, se usa para depositar películas de metales preciosos en metales base. También se utiliza para depositar metales y aleaciones en piezas metálicas que precisen un recubrimiento resistente y duradero. La electroquímica ha avanzado recientemente desarrollando nuevas técnicas para colocar capas de material sobre los electrodos, aumentando así su eficacia y resistencia. Tras el descubrimiento de ciertos polímeros que conducen la electricidad, es posible fabricar electrodos de polímeros (Baeza, 2006).

1.5.4.2. Electrólisis

Electrólisis o Electrolisis proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad. Ciertas sustancias, (ácidos, hidróxidos, sales y algunos óxidos metálicos disueltos o fundidos) son conductores de electricidad al mismo tiempo que se descomponen al paso de la corriente eléctrica, a estas sustancias se les llama electrolitos. A tal fenómeno se le denomina electrólisis y constituye fundamentalmente un proceso de oxidación reducción que se desarrolla “no espontáneamente” es decir, un conjunto de transformaciones que implican un aumento de energía libre del sistema, y por ende, requiere para su realización el concurso de una fuerza externa de energía (Charlot, 2004).

La electrólisis es uno de los procesos electroquímicos más importantes, en el cual el flujo de una corriente eléctrica continua a través de una porción de materia, genera cambios químicos. En otras palabras, reacción química producida por medio de la corriente eléctrica dispuesta por electrodos, descomponiendo las sustancias químicas y deshaciéndolos en iones. Consta de un recipiente que contiene algún electrolito y dos electrodos que se sumergen en dicha sustancia, a través de los cuales fluye una corriente eléctrica, proveniente de una fuente de energía (Mondragón, 2005).

El electrodo negativo presenta un exceso de e^- , se comporta como reductor, pues cede dichos electrones a un ion positivo que carezca de ellos. Igualmente, el polo positivo de una celda electrolítica actúa como oxidante, capturando los e^- de exceso que posean los iones negativos. Los metales son considerados como conductores de primera, ya que poseen e^- libres que pueden moverse entre los átomos con facilidad (Mondragón, 2005).

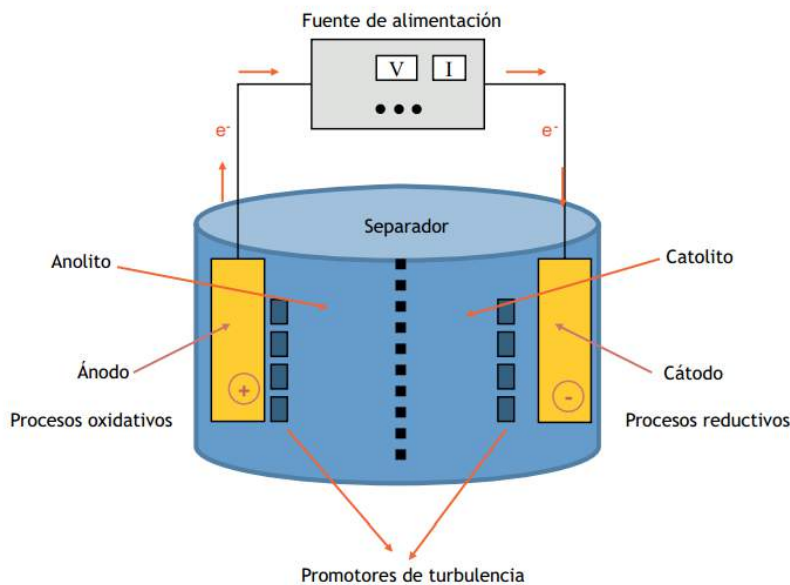


Figura 7. Componentes de los reactores electrolíticos
Fuente: (Barrera, 2014)

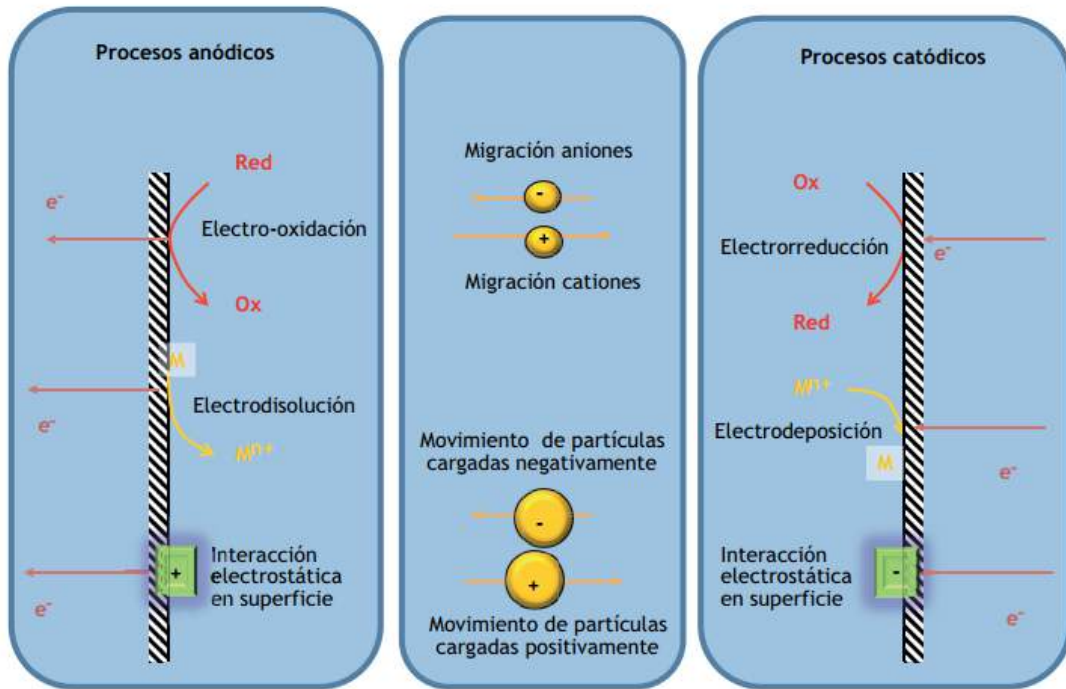
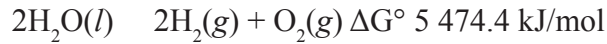


Figura 8. *Procesos que pueden desarrollarse en una celda electrolítica*
Fuente: (Barrera, 2014)

Al igual que en las pilas electroquímicas, una reacción de electrólisis puede ser considerada como el conjunto de dos medias reacciones, una oxidación anódica y una reducción catódica. Cuando conectamos los electrodos con una fuente de energía (generador de corriente directa), el electrodo que se une al borne positivo del generador es el ánodo de la electrólisis y el electrodo que se une al borne negativo del generador es el cátodo. Las reacciones que tienen lugar en los electrodos de la electrólisis están en general determinadas por leyes energéticas, así como en la pila, la reacción en cada electrodo es la que corresponde a una reacción que produzca la máxima disminución de energía libre, en la electrólisis se producirán las reacciones que correspondan a una reacción total que produzca el mínimo aumento de energía libre. En el caso de electrólisis de sales fundidas como el Cloruro de sodio (NaCl), en el cátodo solo puede verificarse una reacción que es la reducción de los iones Sodio (Na) pues el ión Cloro (Cl) solo puede oxidarse, y en el ánodo se produce la oxidación de los iones Cloro (Cl), pues el Sodio (Na) solo puede reducirse (Charlot, 2004).

Electrólisis del agua

El agua contenida en un vaso en condiciones atmosféricas (1 atm y 25°C) no se descompone de manera espontánea en hidrógeno y oxígeno gaseosos porque el cambio de energía libre estándar de la reacción es una cantidad positiva grande:

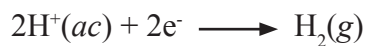


Sin embargo, esta reacción se puede inducir en una celda electrolítica que está formada por un par de electrodos de un metal inerte, como el platino, sumergidos en agua. Cuando los electrodos se conectan a la batería no sucede nada, porque en el agua pura no hay suficientes iones para que lleven una buena cantidad de corriente eléctrica. (Recuerde que a 25°C, en el agua pura los iones H^+ y OH^- alcanzan solamente una concentración de $1 \times 10^{-7} \text{ M}$.) Por otro lado, la reacción se llevará a cabo rápidamente en una disolución de H_2SO_4 0.1 M porque tiene suficiente cantidad de iones para conducir la electricidad. De inmediato empiezan a aparecer burbujas de gas en los dos electrodos.

A continuación se muestran las reacciones en los electrodos. El proceso que tiene lugar en el ánodo es



en tanto que en el cátodo tenemos



La reacción global está dada por





Electrólisis de disoluciones acuosas

Cuando se trata de electrólisis de disoluciones acuosas de diversos electrolitos, las reacciones que tienen lugar en el ánodo deben escogerse de acuerdo con los principios energéticos a que nos hemos referido antes, pues existe más de una oxidación posible en el ánodo más de una reducción posible en el cátodo, debido a que además de las especies iónicas producidas por los electrolitos están presentes las moléculas de agua y la misma puede oxidarse y reducirse de forma similar a la sales. Por ejemplo durante la electrólisis de la solución de Sulfuro de cobre (CuSO_4) (con electrodos de platino liso) sobre el cátodo se observa la separación del cobre metálico. En cambio sobre el ánodo dejan su carga las moléculas de agua y no los iones de Sulfuro (SO_4) (Charlot, 2004).

Producción de electrólisis

La electrólisis se produce en un aparato que recibe el nombre de celda eléctrica, la cual está formada por una cuba que contiene el electrolito y en el que están sumergidos los electrodos, generalmente metálicos, y que están conectados a un generador eléctrico. El electrodo conectado al polo positivo es el ánodo y el conectado al polo negativo es el cátodo. Esta celda es un circuito eléctrico cerrado, en el que se tienen, por una parte, los conductores metálicos y por otra parte, los conductores formados por las sales fundidas o por las disoluciones electrolíticas. La corriente consiste en un flujo de electrones en la parte metálica del circuito y un flujo de iones en la parte líquida (Charlot, 2004).

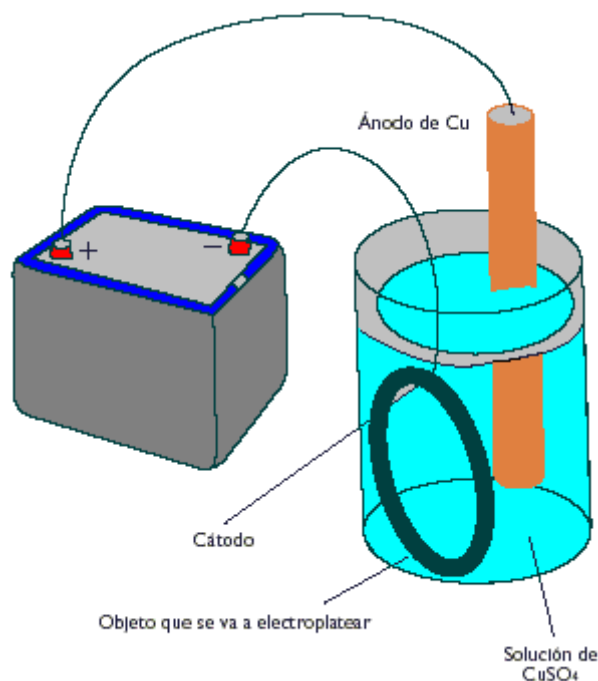


Figura 9. Representación de como generar electrólisis
Fuente: (Charlot, 2004)

El esquema de la electrólisis es como sigue:

Sobre el cátodo(-): $2\text{Cu} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cu}$

Sobre el ánodo(+): $3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_3\text{O}^+ + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$

Sobre el ánodo en este caso se separa el oxígeno, que se elimina como gas, y en la solución, en las proximidades del ánodo, se acumulan los iones hidrógeno (H⁺), que pueden estar presentes solo con una cantidad equivalente de algunos aniones. Tales aniones son sulfuros (SO₄²⁻), que se desplazan durante la electrólisis hacia el ánodo y se acumulan en las proximidades de este junto con los iones hidrógeno (H⁺). Por consiguiente, junto al ánodo, además del oxígeno se forma también el ácido sulfúrico (como iones correspondientes), es decir la solución se acidifica (Charlot, 2004).

Disoluciones acuosas

En general en el caso de disoluciones acuosas, debe tenerse presente que las moléculas de agua pueden oxidarse o reducirse de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

Oxidación: $3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_3\text{O}^+ + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^-$ E⁰ = 1.23V

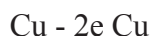
Reducción: $\text{H}_2\text{O} + 1\text{e}^- \rightarrow 1/2\text{H}_2 + \text{OH}^-$ E = - 0.82 V (a pH = 7)

Note que en aquellos casos en que las disoluciones tienen un pH diferente de cero (como esta segunda) los potenciales ya no son llamados E⁰ sino que han variado de acuerdo con los valores de (H₃O⁺) y (OH⁻) y deben ajustarse con la conocida ecuación de Nernst (Charlot, 2004).

Electrólisis y otros procesos de oxidación-reducción

En las electrólisis pueden tener lugar también otros procesos de oxidación-reducción sin que sobre el electrodo se deposite la fase sólida; así, los iones Hierro (Fe) e yodo (I) se oxidan a Hierro (Fe²⁺) e yodo (I₂), mientras que los Hierro (Fe²⁺) e yodo (I₂) se reducen sobre el cátodo a Hierro (Fe) e yodo (I), etc.

Si el ánodo no es de platino, sino de cualquier otro metal, también puede participar en los procesos de oxidación-reducción, que tienen lugar durante la electrólisis. Así, se había visto que durante la electrólisis de la solución Sulfato de Cobre (CuSO₄), utilizando un ánodo de platino, las moléculas de agua se oxidan sobre el mismo a Oxígeno (O₂). Si el ánodo de platino se sustituye por uno de cobre, sobre el mismo, durante la electrólisis, no se oxidarán ya las moléculas de agua, sino el material del propio electrodo, es decir cobre metálico, que pierde electrones más fácilmente todavía que las moléculas de agua. En consecuencia, el ánodo se disolverá con la formación de los iones Cobre (Cu):



Simultáneamente, sobre el cátodo se depositará una cantidad equivalente de cobre. En otras palabras tendrá lugar una especie de paso de cobre del ánodo al cátodo (Charlot, 2004).



Potencial de descomposición

Consideremos como ejemplo la electrólisis de la solución de Sulfato de cobre (CuSO_4) con electrodos de platino. Al pasar la corriente eléctrica por la solución, en los electrodos se liberan productos de la electrólisis, que estando presentes simultáneamente con los iones que les han dado origen, forman pares de oxidación-reducción. En el ejemplo en el cátodo se forma el par Cu/Cu y en el ánodo, $\text{O}_2 + \text{H}/\text{H}_2\text{O}$. Tan pronto comienza a fluir la corriente, la liberación de O_2 en el ánodo y la deposición de Cu en el cátodo convierten el aparato en una celda galvánica: $\text{Pt}/\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}, \text{H}^+/\text{O}_2/\text{Pt}$ que tiene su propia fuerza electromotriz (FEM). La dirección de esta F.E.M es contraria a la de la F.E.M externa, que se aplica en la electrólisis. El funcionamiento de la celda trata de que la corriente fluya en dirección opuesta a la corriente con la que se intenta realizar la electrólisis de la disolución. Para poder contrarrestar esta “fem de oposición”, la FEM aplicada deber ser mayor que la de la celda cuya reacción es opuesta a la reacción de la electrólisis deseada.

La tensión mínima que es necesario aplicar a los electrodos para provocar la electrólisis continua del electrolito dado, se denomina Potencial de Descomposición (E_d) (Charlot, 2004).

1.5.5. Leyes de la Electrólisis o Faraday

Michael Faraday, ejecutó varios estudios cuantitativos concerniente a la íntima relación que existe entre la cantidad de electricidad que atraviesa una solución. Estos postulados relacionan la cantidad de electricidad consumida o generada durante un proceso electroquímico con la masa de los reactivos presentes (Arbeláez, 2005).

1.5.5.1. Primera Ley de Faraday

Varios metales como el Na, Mg o Al se producen industrialmente por electrólisis de sus sales fundidas. En el proceso se consumen grandes cantidades de electricidad, que pueden relacionarse matemáticamente con la cantidad de producto formado sobre los electrodos de la celda electrolítica. Por ejemplo, en la electrólisis del NaCl, el ion sodio se reduce según la reacción: $\text{Na}^+ + 1\text{e}^- \rightarrow \text{Na}$. Así, un electrón es requerido para reducir un ion de sodio. Es decir, para reducir un mol de iones Na^+ , equivalente a 23 g, se necesita un mol de \bar{e} . La carga de un electrón es $1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$ y la carga de una mol de electrones es: $1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}/\text{e}^- \cdot 6,023 \cdot 10^{23}\text{e}^-/\text{mol} = 96.500 \text{ C/mol}$ (Mondragón, 2005).

La relación entre la cantidad de cargas invertidas en la producción de una determinada masa de producto se resume en la primera ley establece que: “la masa de producto obtenido o de reactivo consumido en un electrodo durante la electrólisis, es directamente proporcional a la cantidad de electricidad en culombios, que pasa a través del electrolito. La cantidad de masa depositada en un electrodo es proporcional a la cantidad de electricidad que ha

circulado por el electrodo (Mondragón, 2005).

$$\text{Masa desprendida} = k (\text{constante}) \cdot Q = k \cdot I \cdot t$$

Q: es la carga en culombios

I: la intensidad en amperios

t: el tiempo en segundos

1.5.5.2. Segunda Ley de Faraday

Establece que, si varias soluciones electrolíticas son atravesadas por la misma cantidad de electricidad, las masas, de las sustancias depositadas o liberadas en los electrodos son proporcionales a sus masas equivalentes de los electrolitos disueltos. Las dos leyes de Faraday se cumplen para los electrolitos tanto fundidos como en solución. Su validez no se altera por variaciones de temperatura, presión, naturaleza del solvente y del voltaje aplicado. (Mondragón, 2005)

$$\text{Masa desprendida} = k (\text{constante}) \cdot \text{peso atómico} / n^{\circ} \text{ oxidación}$$

1.6. Reactores y modos de operación

Un reactor de electrocoagulación puede construirse mediante una celda con un ánodo y un cátodo. Cuando se conectan a una fuente de poder, el material que está hecho el ánodo se corroe electroquímicamente debido a la oxidación, mientras que el cátodo es sujeto a una reducción y generación de H⁺ (micro burbujas) son los que suspenden los coágulos (Barrera, 2014).

1.6.1. Reactores por Lotes

Los reactores por lotes son aquellos que trabajan por cargas; es decir, se introduce la alimentación de los reactivos, posteriormente se lleva a cabo la conversión de los reactivos a productos y, finalmente, se descarga el reactor. El tiempo de residencia en el reactor depende de la velocidad de reacción. Existen dos tipos de reactores por lotes: sin recirculación y con recirculación. En este tipo de reactores, las concentraciones de los productos y los reactivos cambian con el tiempo. Los reactores por lotes, además de presentar un cambio de concentración respecto al tiempo, pueden presentar un perfil de temperatura respecto al tiempo. Este cambio no se presenta en los reactores con recirculación, ya que entre el reactor y el tanque receptor se coloca un intercambiador de calor para que el proceso se efectúe a una temperatura prácticamente constante (Barrera, 2014).

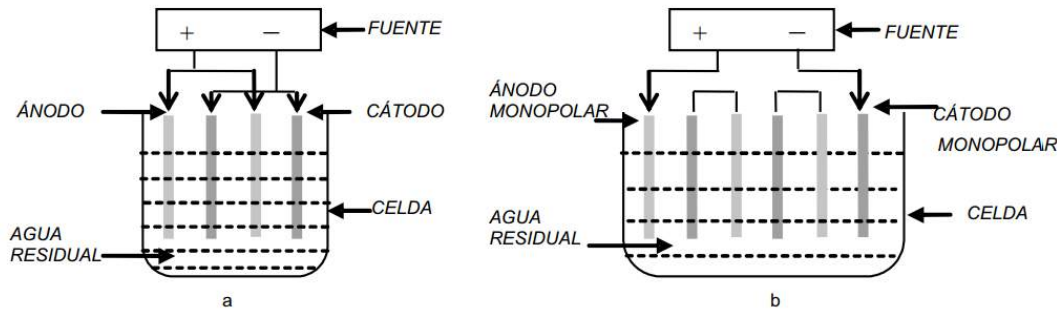


Figura 10. Reactores para electrocoagulación por lotes
 a) Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo
 b) Reactor con electrodos monopolares conectados en serie
 Fuente: (Restrepo, 2006)

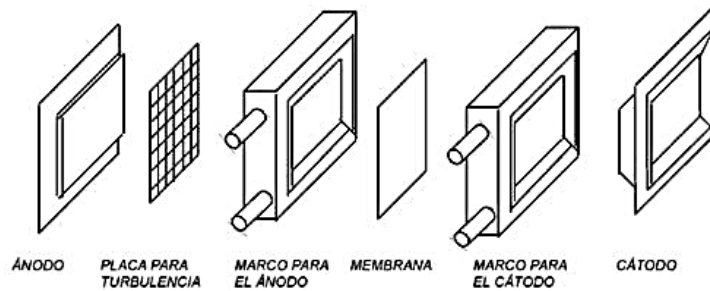


Figura 11. Reactores de filtro prensa
 Fuente: (Restrepo, 2006)

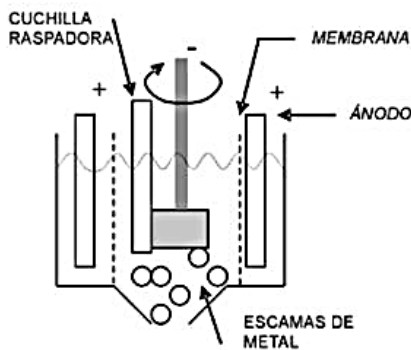


Figura 12. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo
 Fuente: (Restrepo, 2006)

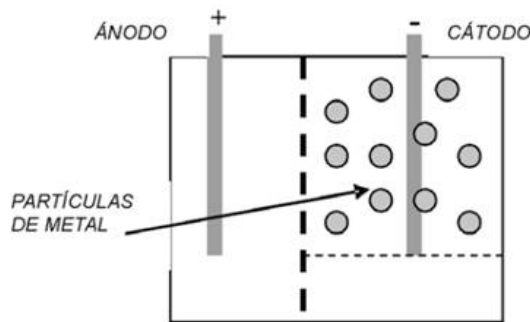


Figura 13. *Reactor de lecho fluidizado*
Fuente: (Restrepo, 2006)

1.6.2. Reactores en continuo

Se trata de un equipo compacto que opera en continuo mediante un reactor de especial diseño donde se hallan las placas o electrodos metálicos para producir la electrocoagulación. Consiste en un proceso de desestabilización de los contaminantes del agua ya estén en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa de bajo voltaje y por la acción de electrodos metálicos de sacrificio, normalmente aluminio/hierro (Condorchem Envitech, 2014).

En este proceso se genera una elevada carga de cationes que desestabilizan los contaminantes del agua residual, se forman hidróxidos complejos, estos tienen capacidad de adsorción produciendo agregados (flóculos) con los contaminantes. De otro lado, por la acción del gas formado se genera turbulencia y se empuja hacia la superficie los flóculos producidos (Condorchem Envitech, 2014).

1.7. Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificados. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes, bien sea suspendidos o emulsificados. Es así que los contaminantes presentes en el medio acuoso forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas (o solubles) que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario (Arango A. y., 2008).

En el proceso de electrocoagulación hay generación de coagulantes in situ por la disolución de iones de aluminio o de hierro de los electrodos de aluminio o hierro respectivamente. La generación de iones metálicos tienen lugar en el ánodo y en el cátodo hay liberación de burbujas de hidrógeno gaseoso las cuales ayudan a la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente (Arango A. y., 2008).

La electrocoagulación es utilizada en la remoción de contaminantes de muy diversas aguas residuales, tales como las de la industria de galvanoplastia, electro-plataado metálico, fábricas de envasados, industria del papel, industria alimentaria, industria textil, industria láctea y finalmente ha sido utilizada en la remoción de los contaminantes de las aguas para consumo humano y residuales domésticas (Arango A. y., 2008).

Una de las ventajas de los tratamientos de la electrocoagulación se debe a que es un tratamiento instantáneo que no requiere la adición de productos químicos, requiere obra civil en menor escala, es un sistema automático que necesita poco espacio y posibilita el tratamiento de múltiples contaminantes dentro de la propia fábrica, haciendo incluso posible en algunos casos la reutilización del agua tratada. Los costes de la operación en comparación a los tratamientos físico-químicos clásicos, son aproximadamente la mitad (Barrera, 2014).

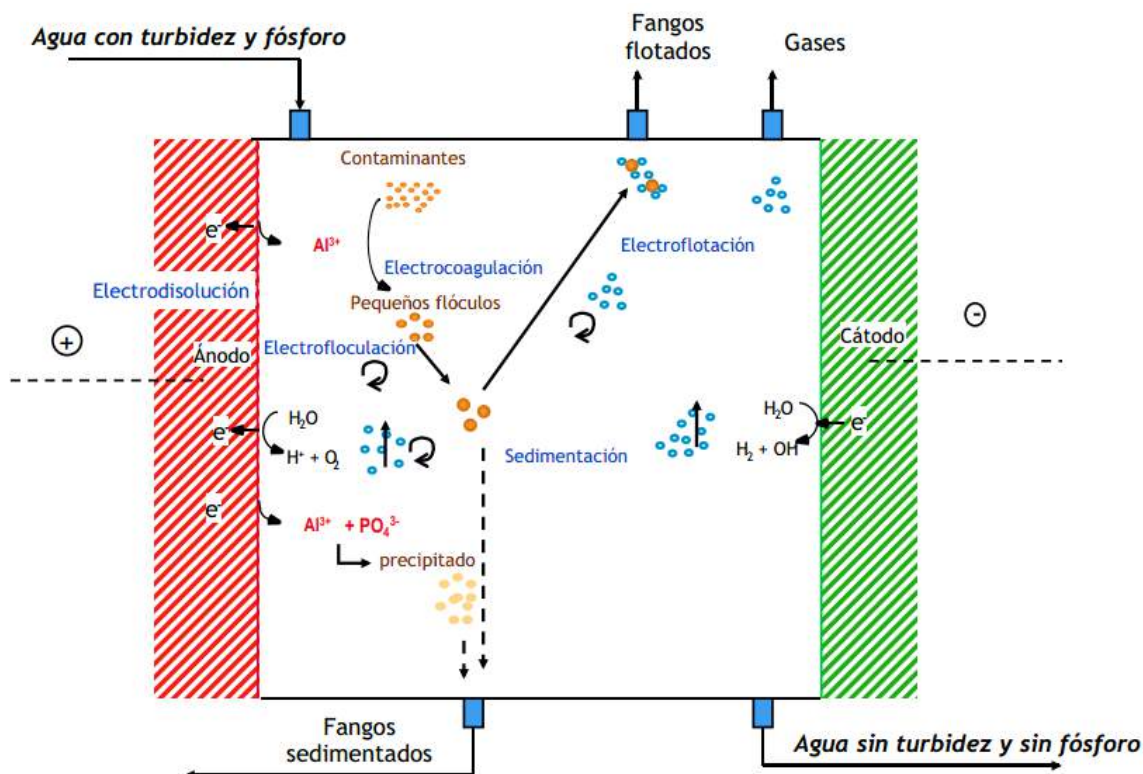


Figura 14. Esquema de los procesos de una agua tratada con electrocoagulación
Fuente: (Barrera, 2014)

1.7.1. Mecanismo de Remoción de Contaminantes

Un reactor de electrocoagulación es una celda electroquímica donde el ánodo metálico generalmente de aluminio y algunas veces de hierro se usa para dosificar al agua contaminada un agente coagulante. La electrocoagulación produce cationes metálicos in situ, en lugar de dosificarlos externamente (Barrera, 2014).

Simultáneamente, se generan gases electrolitos, especialmente hidrógeno, en el cátodo. La electrocoagulación tiene la capacidad de remover un amplio rango de contaminantes incluyendo sólidos suspendidos, metales pesados, colorantes, materia orgánica, gasas, aceites, iones, etc. Las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes influyen e interactúan en el sistema de remoción de contaminantes (Barrera, 2014).

En general, durante un tratamiento por electrocoagulación se presentan los siguientes procesos (Barrera, 2014):

- Reacciones electrolíticas en la superficie del electrodo.
- Formación de coagulantes en la fase acuosa por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.
- Desestabilización de los contaminantes y partículas suspendidas.
- Los coagulantes (Fe^{2+}) absorben a los contaminantes solubles o coloides y se remueven por sedimentación o por flotación.

1.7.2. Factores que afectan la Electrocoagulación

Densidad de Corriente o Carga

Como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio. La eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento en la densidad de corriente (Barrera, 2014).

Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierros Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos (Barrera, 2014).

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede ser mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la

remoción (Samaniego, 2015).

Presencia de Cloruro de Sodio

El cloruro de sodio se emplea usualmente para incrementar la conductividad del agua residual que se va a tratar. Además de esta contribución iónica, se encontró que los iones cloruro podrían reducir significativamente los efectos adversos de otros iones, como HCO_3^- , SO_4^{2-} ; ya que la existencia de los iones carbonato o sulfatos conducirían a la precipitación de los iones Ca^{2+} o Mg^{2+} que forman una capa aislante sobre la superficie de los electrodos; esta capa aislante incrementaría el potencial entre electrodos, y su resultado es un significativo decremento en la eficiencia de la corriente. Por lo tanto, se recomienda que las cantidades de aniones Cl^- presentes sean del 20% para asegurar una operación normal de electrocoagulación (Barrera, 2014).

Efecto pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo (Barrera, 2014).

En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. Se ha determinado en algunos casos que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH, e incluso este rango puede ser amplio. En términos generales las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7. Ejemplos de esta situación se pueden ver en la remoción de arsénico en aguas de consumo, donde el mayor porcentaje de remoción de arsénico se da en pH entre 6 y 8, y las mejores remociones de turbiedad y DQO en las aguas de la industria textil se dan en un pH de 7 (Barrera, 2014).

Conductividad

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado. La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl_2 genera un aumento en la conductividad del agua residual. Además se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^{2-} , pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{2+} y Mg^{2+} produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la

corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl alrededor del 20% (Samaniego, 2015).

Tipo de material de los electrodos

Los materiales que se suelen emplear en la electrocoagulación son aluminio y hierro. La configuración de los electrodos, generalmente es en forma de placas de aluminio o hierro; se ha encontrado que la principal aplicación de los electrodos de hierro es para el tratamiento de aguas, debido a su alta eficiencia en la autogeneración de agentes coagulantes (Chen, 2004).

Temperatura

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60°C, punto donde se hace máxima para luego decrecer (Samaniego, 2015).

1.7.3. Ventajas de la Electrocoagulación

- Este tratamiento electroquímico provoca una mejor y rápida ruptura de las emulsiones, para separación de aceites.
- Son compactos y fáciles de instalar, factores importantes. Las burbujas producidas durante la electrocoagulación tienen mayor estabilidad que las generadas en los tratamientos de efluentes con flotación de aire comprimido y de flujo de aire disuelto, por lo que conservan su gran superficie de contacto y, por tanto, aumenta la eficiencia de remoción.
- La cantidad de lodos generados son menores, lo que genera una menor problemática de disposición de estos lodos.
- El líquido separado por electrocoagulación puede ser reprocesado como subproducto, lo cual permite que el efluente tratado pueda ser reutilizado.
- Los equipos de electrocoagulación son compactos y fáciles de instalar, factores importantes cuando no se dispone de espacio suficiente.
- Este proceso es sencillo de automatizar debido a que el control de dosificación se realiza mediante el ajuste de corriente.
- Permite la reducción de una amplia variedad de contaminantes, como: metales pesados, gasa y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros.
- Sus costos de operación son relativamente bajos si se realiza un apropiado diseño del reactor, selección de los materiales para electrodos, y una optimización de los parámetros de funcionamiento. Este proceso requiere poca corriente eléctrica y bajos costos de mantenimiento (Arango, 2005).

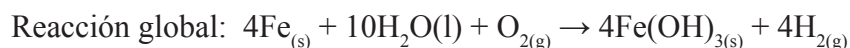
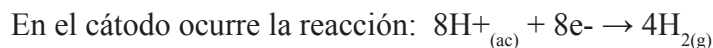
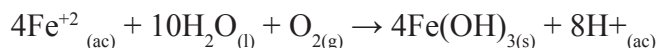
1.7.4. Desventajas de Electrocoagulación

Entre las desventajas de la electrocoagulación se encuentran requerimientos como el reemplazo periódico del electrodo de sacrificio, y que el agua tenga una conductividad mínima diferente de cero que varía según el diseño del reactor, lo que limita su uso en aguas con baja cantidad de sólidos totales disueltos (STD). También se encuentra la formación de una película de óxido impermeable en el cátodo que interfiere con el buen desempeño de la celda, este efecto se puede disminuir cambiando la polaridad de la celda, y lodos con una alta cantidad de concentración de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio usado (Arango, 2005).

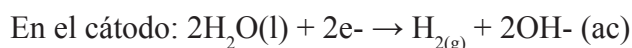
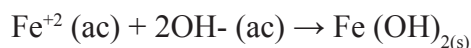
1.7.5. Reacciones de la Electrocoagulación

Los materiales más comúnmente utilizados como electrodos en la electrocoagulación son hierro y aluminio. Por esta razón se tratarán de manera especial las reacciones que se desarrollan manteniendo electrodos de estos dos metales en la celda. Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso Fe(OH)_2 o hidróxido férrico Fe(OH)_3 (Restrepo, 2006).

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico en el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso en el ánodo se dan las reacciones:



Luego de la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, especialmente aquellos con carga negativa, y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones elec-



trostáticas (Restrepo, 2006).

**DISEÑO DEL EQUIPO
PARA
ELECTROCOAGULACIÓN**

2

A photograph of a cardboard box, likely the packaging for the equipment mentioned in the title. The box is light brown and is partially open, showing some internal components and yellow cables. A large red circle with a white border is overlaid on the top of the box, containing the number '2' in a black serif font.



2. DISEÑO DEL EQUIPO PARA ELECTROCOAGULACIÓN

El tipo de reactor es batch, se basa en la concentración y característica del contaminante, así mismo de la cantidad de vinaza que se utilizará en el tratamiento.

Los principales factores considerados en el diseño del equipo fueron los siguientes:

- Caracterización de la vinaza
- Material de electrodos
- Distancia entre electrodos
- Selección de electrodo de sacrificio
- Configuración del reactor de electrocoagulación
- Parámetros eléctricos como voltaje y amperaje de la fuente

2.1. Materia prima

Se utilizó la vinaza procedente de la elaboración de alcohol etílico de una destilería que utiliza melaza como materia prima.

2.2. Electroodos

Los electrodos que se colocaron en el reactor, son láminas de aluminio y hierro no galvanizado. Las razones por las que fueron escogido estos electrodos son:

- Materiales de bajo costo
- Disponibilidad en el mercado
- Buenos conductores de electricidad
- Investigaciones en las que se presenta alta eficiencia de remoción de contaminantes con la utilización de estos materiales.

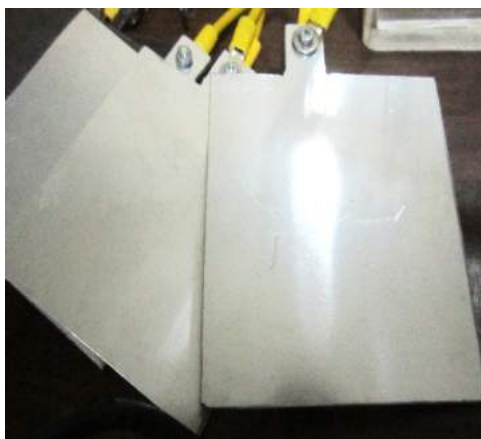


Figura 15. Láminas de aluminio
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

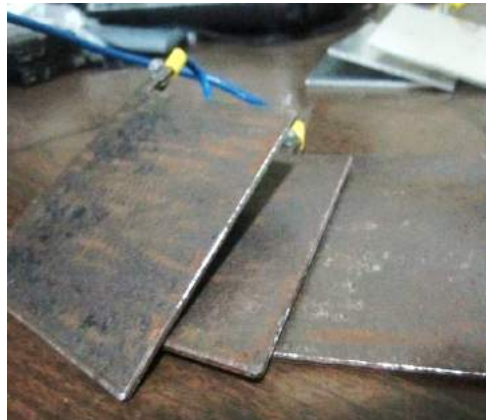


Figura16. Láminas de hierro
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

Los electrodos son de 10 cm x 10 cm y 3mm de espesor, diseñados en forma de placa rectangular, colocados en serie y ubicadas en el reactor.

2.2.1. Cálculos del número de electrodos

Se estableció una distancia de 2 cm entre arreglo de placas y cada una de las caras laterales de la celda, donde permite el flujo del agua residual durante la electrolisis. Una distancia de 1.25 cm entre la cara frontal y los electrodos, igualmente 1.25 cm entre estos y la cara posterior de la celda.

El número de electrodos se determinó suponiendo una separación máxima entre electrodos de 14 mm más 3 mm del espesor de cada placa, de acuerdo a lo siguiente:

$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{Ancho de la celda}) - 2 * (\text{Dist. electrodos a cara lateral})}{(\text{Dist. maxima entre electrodos} + \text{espesor de placa})}$$

Ec: (Ojeda E. H., 2010)

Entonces:

$$\text{Número de electrodos} = \frac{150 - 2(20 \text{ mm})}{14 + 3} = 6.47 \approx 6$$

De esta manera se tienen 3 placas de un metal conectadas al ánodo y las otras 3 placas del otro metal conectadas al cátodo, formando un arreglo paralelo e intercalado, adicionalmente los electrodos tienen una altura igual a la de la zona de reacción, de 10 cm.



2.3. REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN

El equipo se construye con el fin de estudiar de mejor manera los fenómenos que se desarrollan en el mismo, consiguiendo resultados de aplicación real y actual del agua residual de una destilería específicamente de la vinaza.

El reactor se diseñó con una capacidad de 3.5 litros con una distribución volumétrica de tres regiones:

- La región superior llamada zona de flotación es para el depósito de lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas.
- La región media llamada zona de reacción es donde ocurren las reacciones electroquímicas y donde se encuentran los electrodos.
- La región inferior llamada zona de sedimentación es donde se depositan los lodos de precipitación o lodos más densos.

El reactor está dividido en dos compartimientos de reacción, permitiendo el desplazamiento vertical del flujo de agua por todas las celdas, mejorando las condiciones de mezcla para la formación de floculos y coagulante, producto del efecto electrolítico.

La zona de flotación y la de sedimentación equivalen a $\frac{1}{4}$ del volumen total de la celda y la zona de reacción es las $\frac{2}{4}$ partes. La celda tiene una compuerta para evacuar la espuma producida por las burbujas de hidrogeno, además tiene dos llaves para tomar las muestras, una de las llaves está en la zona de reacción y la otra en la zona de sedimentación.

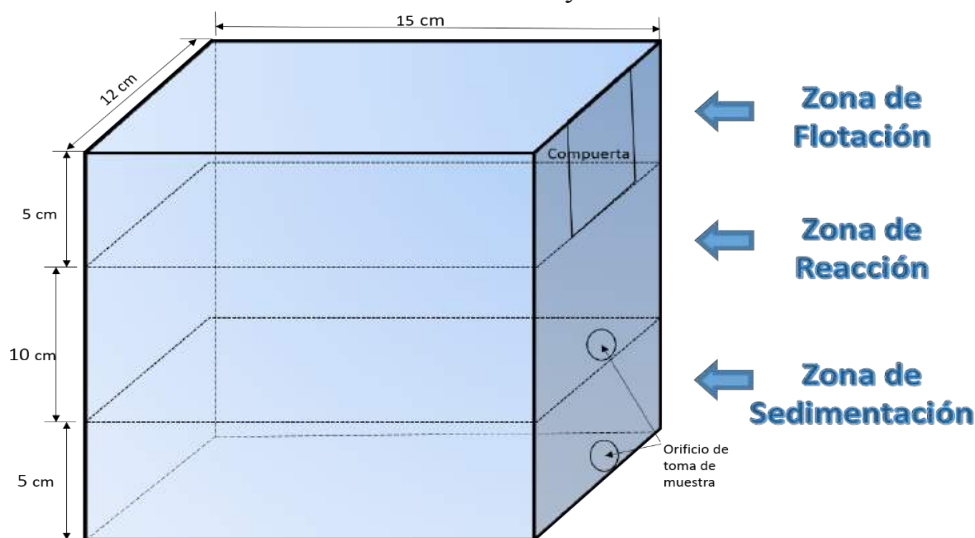


Figura 17. Las zonas del reactor de electrocoagulación
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

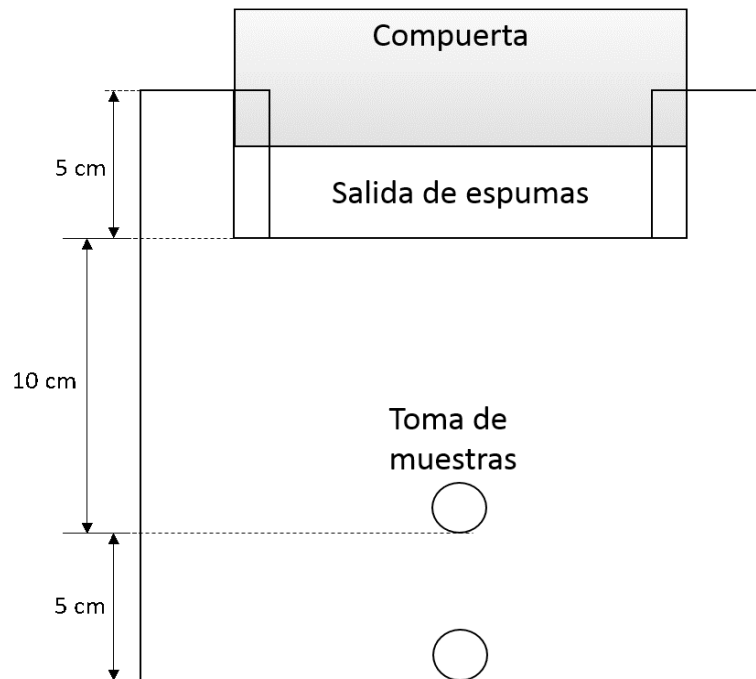


Figura 18. Toma de muestras y salida de los lodos
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

2.3.1. Cálculos del área y altura del reactor

$$V = A \times h$$

$$V/A = h$$

$$h = 3600 / (12 \times 15) = 20 \text{ cm}$$

2.4. Parámetros eléctricos

2.4.1. Fuente de poder

La fuente reguladora de corriente continua tiene la capacidad máxima de intensidad de corriente de 10 A y voltaje de 30V, es un dispositivo que convierte la tensión alterna de la red de suministro en tensión o corriente continua, a varias tensiones, la cual consta de fusibles para cuando haya una descarga eléctrica o corto circuito en el sistema no ocurra ningún daño, esta fuente tiene la capacidad de regular adaptarla a cualquier aparato que se lo conecte.

Características de la fuente de poder:

- Display de led digital

- Tensión de entrada de 110 V y 220 V de corriente alterna
- Tensión de salida de 0V a 30 V de corriente continua
- Peso de 6 lbs
- Dimensiones 13.4 x 7.5 x 8.6 pulgadas



Figura 19. Fuente reguladora de corriente
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

2.5. Placa de Agitación magnética

Es un dispositivo electrónico que se utiliza para mezclar de manera automatizada un solvente y uno o más solutos. Se compone de una barra magnética y una placa debajo de la cual se tiene un magneto rotatorio a fin de crear un campo magneto rotatorio. La barra de agitación se deja deslizar dentro del reactor donde está la muestra para agitarlo.

Procedimiento para su uso:

1. Colocar el reactor que se va a agitar sobre la placa de agitación.
2. Introducir la barra de agitación o barra magnética dentro del reactor.
3. Encender el aparato accionando el interruptor correspondiente.
4. Ajustar la velocidad comenzando siempre con la más baja para ir aumentándola progresivamente, hasta alcanzar la velocidad adecuada.
5. Finalizada la agitación, colocar el mando de velocidad en su posición inicial
6. Apagar el aparato utilizando el interruptor correspondiente.
7. Sacar la barra de agitación del interior del contenedor.



Figura 20. *Placa de agitación magnética*
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

2.6. Materiales y accesorios para el equipo de electrocoagulación

Para la construcción del equipo didáctico se consideran los materiales más apropiados cuya estructura molecular permita trabajar sin que intervenga en el proceso, que al final no se vean afectados los resultados.

- Materiales para el reactor: se eligió el polimetacrilato de metilo de 3 mm, resistente y transparente, que permitirá ir observando cómo se desarrolla el proceso de electrocoagulación y la variación de los parámetros. Este material no es conductor eléctrico por lo que se lo puede conseguir fácilmente en el mercado.
- Materiales de los electrodos: ya se ha mencionado anteriormente que se utilizará planchas de hierro y aluminio, por los rangos de pH estos actuarán sin problemas, su bajo costo y fácil acceso.

2.7. Construcción y montaje

- Construcción del Reactor: El polimetacrilato de metilo fue cortado según las dimensiones ya previstas para luego proceder a armarlo.



Figura 21. *Construcción de reactor para electrocoagulación*
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

- Construcción de los electrodos: se comenzó con el corte de las láminas según el tamaño deseado, introducirlas en los ejes del reactor y conectar los terminales a la fuente de energía.
- Para la construcción de la fuente de energía y de la placa de agitación magnética se investigó y eligió los equipos necesarios que cumplan con los requerimientos del proceso.

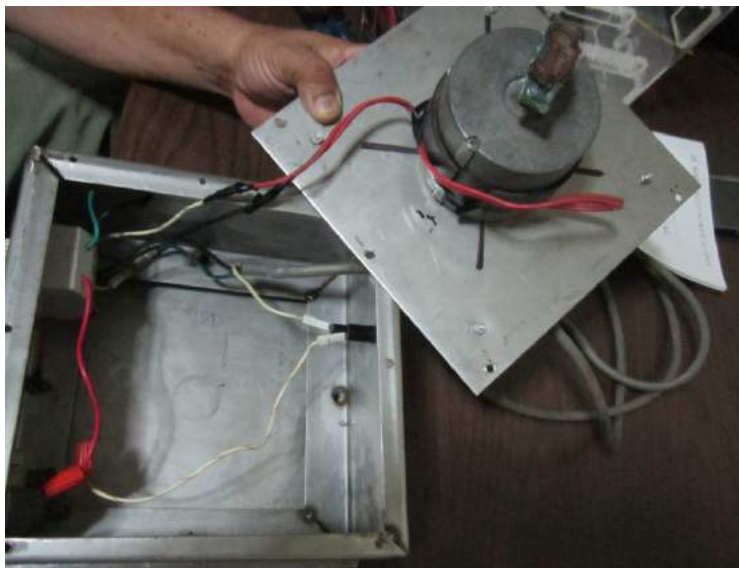


Figura 22. *Construcción de placa de agitación*
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

METODOLOGÍA

3



3. METODOLOGÍA

3.1. Técnica para la preparación del coagulante

El reactivo a utilizar es el cloruro férrico; comenzamos agregando 100 g de coagulante al agua destilada hasta completar un volumen de 1000 ml, obteniéndose una solución del 10% que servirá de solución patrón.

El ensayo del test de jarras se hace diluyendo 10 ml de la solución patrón hasta completar 100 ml con agua destilada. Queda una solución del 1% (10 g/l) que no se puede conservar por más de 24 horas pues corre el riesgo de hidrolizarse y perder buena parte de su capacidad de coagulación (Arboleda, 1992).

3.2. Técnica para determinar la dosis óptima de coagulante por medio del test de Jarras

Se coloca 500 ml de vinaza en cada una de las 6 jarras, se produce una agitación con una velocidad de 100 rpm. Luego, se inyecta el coagulante (cloruro férrico) con ayuda de una pipeta de 10 ml en diferentes proporciones, profundamente dentro del líquido junto con la paleta. No debe dejarse caer la solución del coagulante en la superficie del agua, pues esto desmejora la eficiencia de la mezcla rápida. El tiempo de mezclado suele ser entre 30 y 60 seg (Arboleda, 1992).

Estos sistemas consisten en simular en unos vasos de precipitación o jarras el proceso de coagulación que se produce en la planta de tratamiento y evaluar distintos parámetros durante o al final de los ensayos para caracterizar su funcionamiento. Las pruebas de jarras pueden utilizarse tanto para controlar la coagulación-floculación de una planta de tratamiento existente como para obtener los datos de diseño para el proyecto de nuevas unidades (Arboleda, 1992, pág. 164).

Con los sistemas de simulación se pueden determinar los siguientes parámetros (Arboleda, 1992, pág. 164):

- Determinación de dosis óptima mediante evaluación de:
 - o Evaluación cualitativas
 - * Tamaño del floc producido
 - * Tiempo inicial de formación del floc
 - o Evaluaciones cuantitativas
 - * Determinaciones físicas: Turbiedad y/o color residuales
 - * Determinaciones químicas: pH, alcalinidad, hierro y/o manganeso
- Determinación de la velocidad de sedimentación en las jarras
- Determinación de la influencia del pH en la coagulación
- Determinación de la eficiencia de la mezcla mediante ensayos de segregación
- Determinación de la influencia que la concentración de los coagulantes tiene

en la coagulación.

- Determinación del tiempo y gradientes óptimos de floculación.
- Comparación entre la prueba de jarras y el comportamiento de los floculadores
- Determinación de la eficiencia de los ayudantes de floculación.

3.2.1. Tamaño del floc

Se observa el tamaño del floc producido y se le evalúa cualitativamente según sus características. Puede expresarse su tamaño en mm con el índice de Willcomb. Se escoge como dosis óptima la de la jarra que produce una partícula más grande, de mayor velocidad de asentamiento aparente y que deje ver el agua más cristalina entre los flóculos (Arboleda, 1992).

Tabla 3. Índice de floculación de Willcomb

Número de índice	Descripción
0	Floc coloidal, Ningún signo de aglutinación
2	Visible, floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado.
4	Disperso, floc bien formado pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro, Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero completamente.
10	Excelente, floc que se deposita todo dejando el agua cristalina.

Fuente: (Arboleda, 1992)

3.2.2. Tiempo inicial de formación del floc

Determinar, en segundos, el tiempo que tarda en aparecer el primer inicio de formación de floc, es uno de los sistemas para calificar la velocidad de la reacción.

3.2.3. Determinaciones fisicoquímicas

Para poder realizar las determinaciones físico-químicas se deben extraer muestras del sobrenadante después de un período de decantación no inferior a 10 minutos para medirle la turbiedad residual a fin de hacer una exacta evaluación de la remoción de partículas que se obtuvo durante la sedimentación, la cual se puede considerar que está en función directa de la eficiencia de la aglutinación. La muestra extraída puede usarse también para hacer otras determinaciones tales como color, alcalinidad y pH.

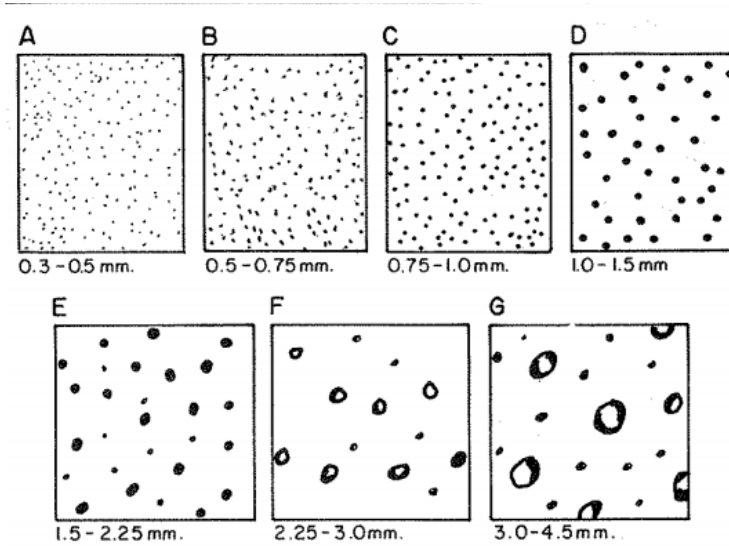


Figura 23. Comparador para estimar el tamaño del floc producido en la coagulación
Fuente: (Arboleda, 1992)

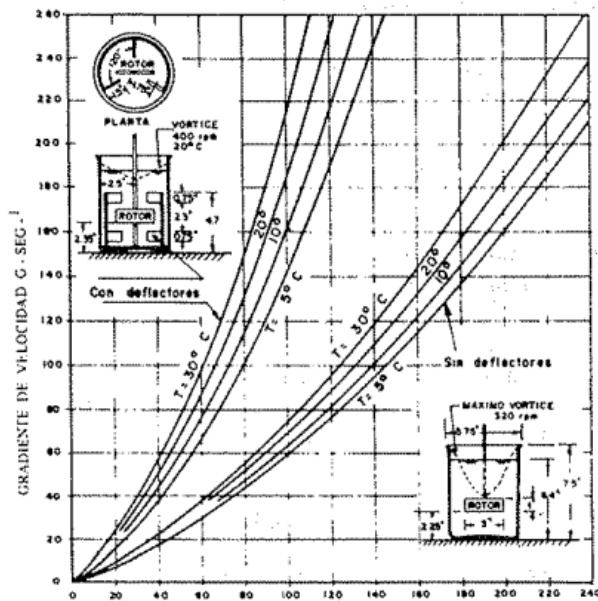


Figura 24. Gradiente de velocidad para un vaso precipitado de 2 litros con o sin deflectores
Fuente: (Arboleda, 1992)

3.2.4. Procedimiento del ensayo

1. Determinar la temperatura del agua cruda, el color, la turbiedad, el pH y la alcalinidad. También el hierro y/o el manganeso si son significativos.
2. Se efectúa la prueba de jarras descrito y se determina la dosis óptima de coagulantes.
3. Se coloca luego la misma cantidad de agua de la muestra en las 6 jarras y cada una de ellas se le agrega ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluido 0.1N, o hidróxido de sodio (NaOH) diluido 0.1N, para bajar o subir el pH, de forma que este varíe desde más o menos 4-5 en la primera, hasta 8-9 en la última.
El cálculo de la cantidad de ácido o álcali para llegar a un determinado pH, puede hacerse con el agua cruda (sin coagulante) o con el agua cruda más la dosis de coagulante determinada en el punto (2). En el primer caso se pone en una jarra una muestra del agua por estudiar, se le determina el pH y se titula con (H_2SO_4) o (NaOH), para encontrar el número de ml requeridos para hacer descender o ascender de 0.5 en 0.5 aproximadamente el pH del agua. Debe esperarse hasta que el pH sea estable. En el segundo caso, se hace el mismo tipo de titulación pero con el agua cruda más coagulantes, lo que permite ajustar el pH final en lugar del inicial, como en el primer caso. Este es el método recomendado por la Water Research Association de Inglaterra.
4. Conocidas las cantidades de ácido o álcali necesarias para obtener el pH deseado, se ajusta este en cada jarra, se espera unos minutos hasta que se estabilice el pH y se aplica la dosis de coagulante determinada en (2). Siempre debe hacerse primero el ajuste de pH y luego la coagulación.
5. Se disminuye luego la velocidad de rotación de las paletas a 30-40 rpm y se deja flocular el agua durante 15-30min.
6. Se retiran las paletas de los vasos y se deja sedimentar el agua por 10-15 min.
7. Se extrae luego el sobrenadante y se le determina el pH, la turbiedad, el color y la alcalinidad residuales.

3.3. Métodos analíticos

3.3.1. Método analítico para determinación de pH

Utilizar un pH-metro, por el método potenciométrico. Este método se basa en el hecho de que entre dos disoluciones con distinta $[H^+]$ se establece una diferencia de potencial.



Figura 25. *pH-metro*
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

3.3.2. Método analítico para la determinación de DQO

El análisis de DQO es el parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida, el método utilizado es el método espectrofotómetro HACH, High Rango (0-1500 mg/l) COD viales (HR).

Reactivo A

1. Medir 500 ml de agua destilada
2. Pesar 10.216 g de Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), secar a 103 °C por 2 horas
3. Agregar 167 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y 33.3 g de sulfato de mercurio $HgSO_4$
4. Diluir a 100 ml

Reactivo B

1. En una botella color ámbar colocar 250 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) en la campana de gases respectivamente.
2. Agregar 2.53 g de sulfato de plata (Ag_2SO_4) lentamente.
3. Cerrar bien la botella y agitar con cuidado.
4. Dejar 1 o 2 días hasta que disuelva.



Figura 26. Sulfato de Plata y sulfato de mercurio
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

Procedimiento para la prueba de DQO

1. En el frasco del colorímetro agregar 2.5 ml de vinaza diluida en el vial.
2. Agregar 1.5 ml del Reactivo A en el vial.
3. Agregar 3.5 ml del Reactivo B en el vial.
4. Enjuagar con agua destilada, secarlo y ponerlo en el reactor a 150°C por dos horas.
5. Esperar que se enfríe y leer en el espectrofotómetro HACH la cantidad de DQO de la muestra.

3.3.3. Método analítico para la determinación de color

El método utilizado es con el colorímetro HACH DR/800, en unidades de Pt/Co.

1. Preparar la muestra y la solución de blanco.
2. Presionar PRGM. La pantalla mostrará PRGM Utilizando el teclado numérico, ingresar el número de programa almacenado para el parámetro deseado.
3. La pantalla mostrará las unidades de medida, el parámetro y el icono ZERO.
4. Colocar el blanco de reactivo en el soporte de celdas. Tapar firmemente la celda de muestra con la tapa del instrumento.
5. Presionar ZERO. El cursor se moverá hacia la derecha y luego la pantalla mostrará un valor cero, la unidad de medida y el parámetro.
6. Colocar la muestra de prueba preparada en el soporte de celdas. Tapar firmemente la celda de muestra con la tapa del instrumento.
7. Presionar: READ. El cursor se moverá hacia la derecha, luego aparecerá el resultado del color.

3.4. Diseño experimental

Para establecer el diseño experimental se realizó la caracterización de la vinaza, se efectuó el test de jarras y se corrieron diferentes pruebas en el equipo de electrocoagulación, donde se observó el comportamiento de diferentes variables físico-químicas, y con esta información se determinaron valores de distancia entre electrodos, tiempo de tratamiento, cantidad

de corriente eléctrica.

3.5. Puesta en marcha del equipo de electrocoagulación

1. Introducir la muestra a estudiar en la celda de reacción (3.6 lt)
2. Caracterizar la muestra.
3. Introducir los electrodos en la celda de reacción.
4. Conectar la fuente de energía y el agitador magnético a la corriente.
5. Seleccionar el amperaje y voltaje con que se va a trabajar.
6. Empezar el monitoreo y toma de datos experimentales.
7. Recoger las muestras para determinación de los análisis de respuesta.
8. Apagar el agitador magnético junto con la fuente de poder.
9. Desmontar los electrodos.
10. Evacuar el lodo y el líquido resultante de la celda para su posterior limpieza y mantenimiento.

3.6. Fórmulas utilizadas para el cálculo de rendimientos

1. % Remoción de Demanda Química de Oxígeno total y soluble:
$$\% \text{ Remoción de DQO} = (\text{DQO entra} - \text{DQO sale}) / \text{DQO entra} \times 100$$
2. % Remoción Color:
$$\% \text{ Remoción de Color} = (\text{COLOR entra} - \text{COLOR sale}) / \text{COLOR entra} \times 100$$

EXPERIMENTACIÓN

4



4. EXPERIMENTACIÓN

4.1. Caracterización de la vinaza

Tabla 4. Datos de la caracterización de la vinaza

Parámetros	Expresado como	Unidad	Resultados	U(K=2)	Límites Máximos	Métodos
			1		Permisibles	
pH	-	-	4.75	-	-	pH-metro
Color real	Color real	Pt/Co	189200	-	Inapreciable en dilución 1/20	8025 HACP
Demanda Bioquímica de oxígeno	D.B.O. _s	mg/l	18560	-	100	DBO Trak
Demanda Química de oxígeno	D.Q.O.	mg/l	87783	-	200	5220D PEE/UCC/LA/03
Sólidos suspendidos	-	mg/l	460	46	130	2540 D PEE/UCC/LA/03
Aceites y grasas	Solubles hexano	mg/l	88	-	30	Infrarrojo
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	1.58	-	0.5	8028 HACH

Fuente: Análisis realizado en el Laboratorio de aguas de la Facultad de Ingeniería Química, 2017

En la Tabla 4 se observa que el color real es de 189200 Pt/Co, una DBO₅ de 18560 mg/l y DQO de 87783 mg/l, sólidos suspendidos 460 mg/l, aceites y grasas 88 mg/l, tensoactivos 1.58 mg/l y un pH ácido de 4.75, características que corresponden a una vinaza muy concentrada.

El análisis fue realizado en un laboratorio acreditado por el OAE (Organismo de Acreditación Ecuatoriana).

Esta agua residual sirvió para realizar las pruebas de tratabilidad como es el Test de Jarras.

4.2. TEST DE JARRAS

Determinación de la dosis óptima de coagulante (cloruro férrico) por medio del test de jarras para tres pruebas experimentales registradas en la tabla 5,6 y 7.

Tabla 5. Test de Jarras Prueba 1

AGUA CRUDA				DOSIFICACIÓN	OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEGMENTADA	AGUA FILTRADA			
				Mezcla rapida Velocidad: 100 rpm	Volúmenes de Jarras: 500 ml		Floculación Velocidad: 40 rpm	Marca papel: Whatman Número : 41			
JARRA No.	pH	Color	DQO	Coagulante Nombre: Cloruro Férrico	Tiempo de formación del floc	índice de Willcomb	pH	Turbiedad residual	pH	Color	DQO
1	4.75	189200	87783	5	10'22"	0	5	4,2	5	450	728
2	4.76	189200	87783	10	9'26"	2	5	4	5	365	489
3	4.77	189200	87783	15	8'55"	4	5	3,5	5	356	459
4	4.78	189200	87783	20	8'48"	10	5	3,2	5	352	420
5	4.79	189200	87783	25	7'43"	8	5	3	5	320	395
6	4.80	189200	87783	30	8'35"	6	5	3,1	5	339	410

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

Analizando la tabla 5 se determinó los resultados obtenidos de las diferentes jarras, la No. 4 de acuerdo al índice de Willcomb es la mejor con una concentración de color de 320 Pt/Co y DQO 395 mg/l a un pH de 5.

Tabla 6. Test de Jarras Prueba 2

AGUA CRUDA				DOSIFICACIÓN	OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEGMENTADA	AGUA FILTRADA			
				Mezcla rapida Velocidad: 100 rpm	Volúmenes de Jarras: 500 ml		Floculación Velocidad: 40 rpm	Marca papel: Whatman Número : 41			
JARRA No.	pH	Color	DQO	Coagulante Nombre: Cloruro Férrico	Tiempo de formación del floc	índice de Willcomb	pH	Turbiedad residual	pH	Color	DQO
1	4.75	189200	87783	5	10'22"	0	5	4,5	5	569	956
2	4.76	189200	87783	10	9'26"	2	5	4,2	5	489	842
3	4.77	189200	87783	15	8'55"	4	5	4	5	406	689
4	4.78	189200	87783	20	8'48"	10	5	3,2	5	355	435
5	4.79	189200	87783	25	7'43"	8	5	3,4	5	387	489
6	4.80	189200	87783	30	8'35"	6	5	3,7	5	401	564

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

Analizando la tabla 6 se determina que el mejor resultado se obtuvo en la jarra No. 4 de acuerdo al índice de Willcomb con un color de 355 Pt/Co y DQO 435 mg/l.



Tabla 7. Test de Jarras Prueba 3

AGUA CRUDA				DOSIFICACIÓN	OBSERVACIONES VISUALES		AGUA SEGMENTADA	AGUA FILTRADA			
				Mezcla rápida Velocidad: 100 rpm	Volúmenes de Jarras: 500 ml		Floculación Velocidad: 40 rpm	Marca papel: Whatman Número : 41			
JARRA No.	pH	Color	DQO	Coagulante Nombre: Cloruro Férrico	Tiempo de formación del floc	índice de Willcomb	pH	Turbiedad residual	pH	Color	DQO
1	4.75	189200	87783	5	10'22"	0	5	4,3	5	589	854
2	4.76	189200	87783	10	9'26"	2	5	4,2	5	485	698
3	4.77	189200	87783	15	8'55"	4	5	3,2	5	356	541
4	4.78	189200	87783	20	8'48"	10	5	2,5	5	275	398
5	4.79	189200	87783	25	7'43"	8	5	2,6	5	289	402
6	4.80	189200	87783	30	8'35"	6	5	2,8	5	295	423

Fuente: Autores

En la tabla 7 se logró el mismo resultado en la jarra No. 4 de acuerdo al índice de Willcomb con un color de 275 Pt/Co y DQO 398 mg/lt.

Cálculos estadísticos

Calculando la media (X) de los resultados de color y DQO de la tabla 5, 6 y 7.

$$(X)_{\text{Color}} = (352+355+275)/3 = 327$$

$$(X)_{\text{DQO}} = (420+435+398)/3 = 417$$



Figura 27. Resultados de test de jarras

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

4.3. Ajuste de pH

La vinaza fue ajustada al pH deseado (7-8) por adición de una disolución de hidróxido de potasio 1N.

Tabla 8. Ajuste de pH

K(OH) 1N	pH
1 ml	4.92
2 ml	5.14
3 ml	5.40
4 ml	5.70
5 ml	6.32
6 ml	7.47
7 ml	8.45

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

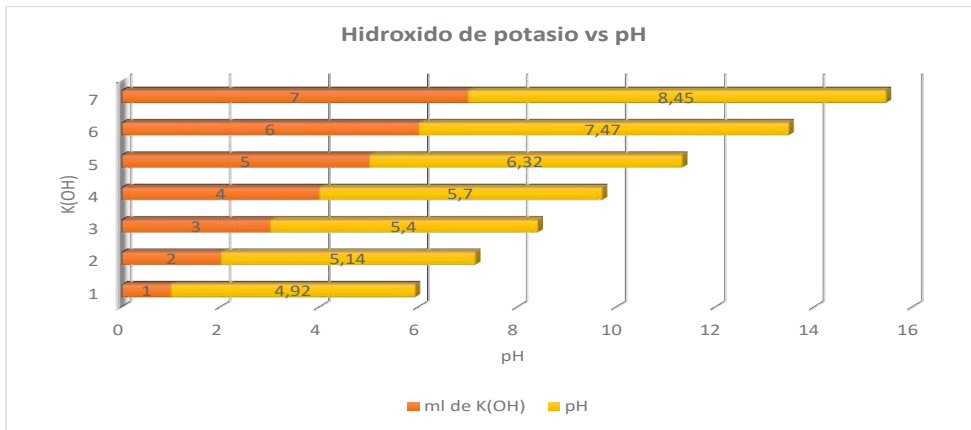


Figura 28. Ajuste de pH
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

4.4. PRUEBAS CON EL EQUIPO DE ELECTROCOAGULACIÓN

4.4.1. Prueba 1 con pH 6

Luego de ajustar al pH deseado se procede a realizar el proceso de electrocoagulación con los resultados obtenidos de la media de Color y DQO, utilizando 2 lts de volumen en cada prueba.

Tabla 9. Prueba 1 con pH 6

Tiempo (min)	pH	Amperaje	Voltaje	Densidad de Corriente A/cm ²	Color		DQO	
					Pt/Co	%Remoción	mg/lit	%Remoción
0	6	0	0	-	327	-	417	-
2	6	3	1	0,03	245	25,08	259	37,89
4	6	5	2	0,05	154	52,91	165	60,43
6	6	7	3	0,05	72	77,98	95	77,22
8	6	9	5	0,09	15	95,41	18	95,68
10	6	10	7	0,1	7	94,80	19	95,44

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

En la tabla 9 se puede observar que ajustando el pH a 6 con una densidad de corriente de 0.09 A/ cm² obtenemos un resultado de remoción de color 95.41% y DQO 95.68%, como se muestra a continuación en la figura 29.

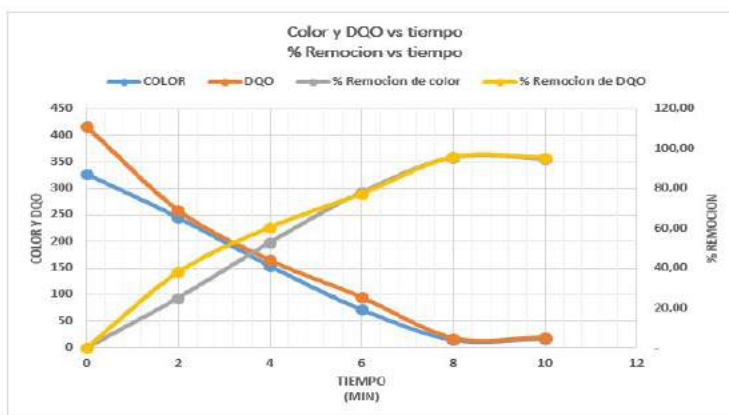


Figura 29. Prueba 1 pH 6 (0.09A/cm²)

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

4.4.2. Prueba 2 con pH 7

Tabla 10. Prueba 2 con pH 7

Tiempo (min)	pH	Amperaje	Voltaje	Densidad de Corriente A/cm ²	Color		DQO	
					Pt/Co	%Remoción	mg/l	%Remoción
0	7	0	0	-	327	-	417	-
2	7	3	1	0,03	265	18,96	259	37,89
4	7	5	2	0,05	100	69,42	152	63,55
6	7	7	3	0,05	45	86,24	75	82,01
8	7	9	5	0,09	8	97,55	12	97,12
10	7	10	7	0,1	9	97,25	15	96,40

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

En la tabla 10 se puede observar que ajustando el pH a 7 con una densidad de corriente de 0.09 A/ cm² obtenemos un resultado de remoción de color 97.55% y DQO 97.12%, observansose la represatción gráfica de la figura 30.

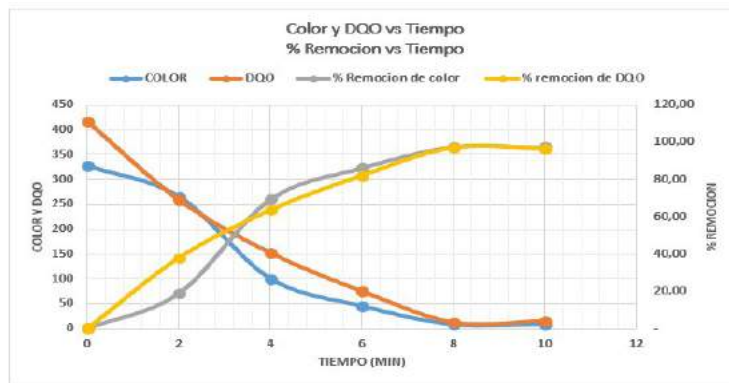


Figura 30. Prueba 2 pH 7 (0.09A/cm²)

Fuente: (Yagual Romero, 2017)



4.4.3. Prueba 3 con pH 8

Tabla 11. Prueba 1 con pH 8

Tiempo (min)	pH	Amperaje	Voltaje	Densidad de Corriente A/cm ²	Color		DQO	
					Pt/Co	%Remoción	mg/lit	%Remoción
0	8	0	0	-	327	-	417	-
2	8	3	1	0,03	100	69,42	250	40,05
4	8	5	2	0,05	56	82,87	98	76,50
6	8	7	3	0,05	29	91,13	45	89,21
8	8	9	5	0,09	5	98,47	9	97,84
10	8	10	7	0,1	7	97,86	10	97,60

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

En la tabla 11 se puede observar que ajustando el pH a 8 con una densidad de corriente de 0.09 A/cm² obtenemos el mejor resultado de remoción de color 98.47% y DQO 97.84%, observansose que se obtienen mejores resultados con pH 7 lo cual se puede corroborar en la represatción gráfica de la figura 31.

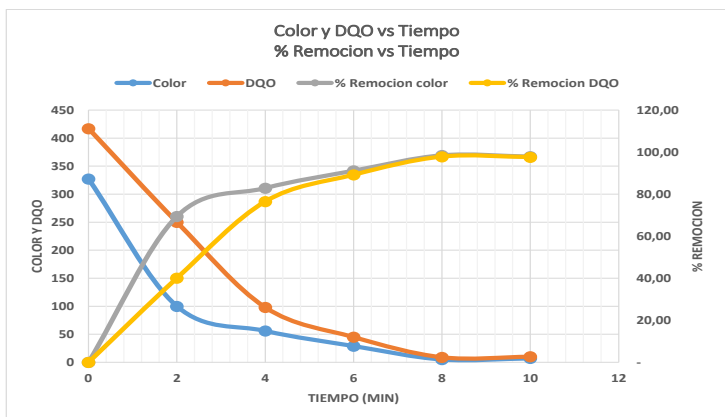


Figura 31. Prueba 3 pH (0.09A/cm²)

Fuente: (Yagual Romero, 2017)



Figura 32. Resultados con la electrocoagulación
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

4.5. Remoción de color con diferentes amperios

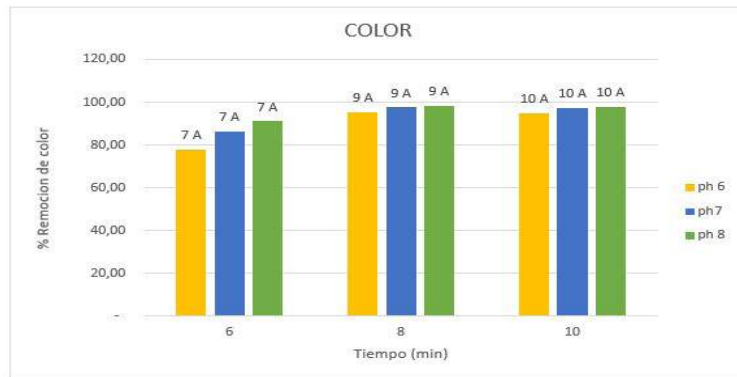


Figura 33. Remoción de color con diferentes amperios
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

En la figura 33 se puede observar la remoción de color con diferentes amperios, en el cual el de 7 amperios es baja la remoción de contaminantes mientras que con 9 y 10 amperios ajustando el pH obtenemos una alta remoción.



4.6. Remoción de DQO con diferentes amperios

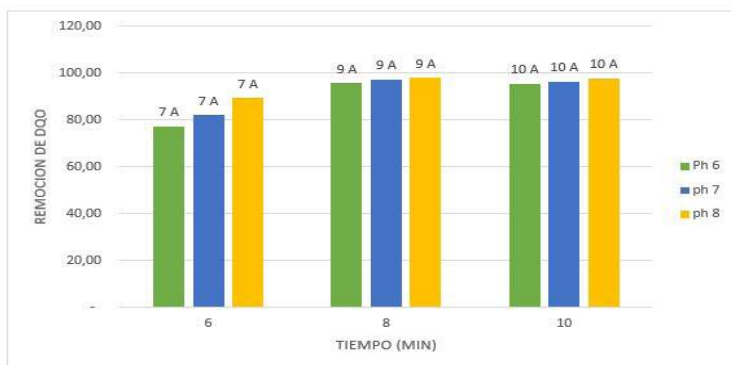


Figura 34. Remoción de DQO con diferentes amperios
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

En la figura 34 se puede observar la remoción de DQO con diferentes amperios, en el cual el de 7 amperios es baja la remoción de contaminantes mientras que con 9 y 10 amperios ajustando el pH obtenemos una alta remoción.

4.7. Consumo de material y energía en las pruebas

En base de que el mejor tratamiento se da aplicando 9 amperios por 8 minutos, se usara estos valores para obtener el gasto de material y energía en las pruebas.

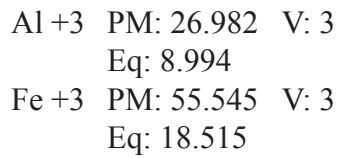
$$\# \text{ mol} = \frac{\text{intensidad} * \text{tiempo}}{\text{numero de cargas rotas} * \text{constante de Faraday}}$$

$$\# \text{ moles} = (9 \text{ A} * 8 \text{ min}) / (3 * 96500)$$

$$\# \text{ moles} = 0.00024870 \text{ Al}$$

$$M_{\text{Al}^{+3}} = 0.00024870 \text{ mol Al} \frac{26.987 \text{ g Al}}{1 \text{ mol Al}} = 0.006711 \text{ g Al}$$

Según las leyes de Faraday se obtiene que:



Entonces:

$$\frac{M_{\text{Fe}^{+3}}}{M_{\text{Al}^{+3}}} = \frac{8.994}{18.513}$$

$$\frac{M_{\text{Fe}^{+3}}}{M_{\text{Al}^{+3}}} = 0.48582$$

La masa del hierro usada es:

$$M_{\text{Fe}^{+3}} = 0.48582 M_{\text{Al}^{+3}}$$

$$M_{\text{Fe}^{+3}} = 0.48582 (0.006711 \text{ g Al})$$

$$M_{\text{Fe}^{+3}} = 0.003260 \text{ g}$$



4.8. Pruebas en línea final

Tabla 12. Prueba final

Resultados			
Parámetros	Inicial	Tratamiento físicoquímico	Tratamiento de electrocoagulación
Color (Pt/Co)	189200	327	5
DQO (mg/l)	87783	417	9
Conductividad (ms/cm)	5.56	5.56	6.22
Temperatura (C°)	26.8	26.8	26.9

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

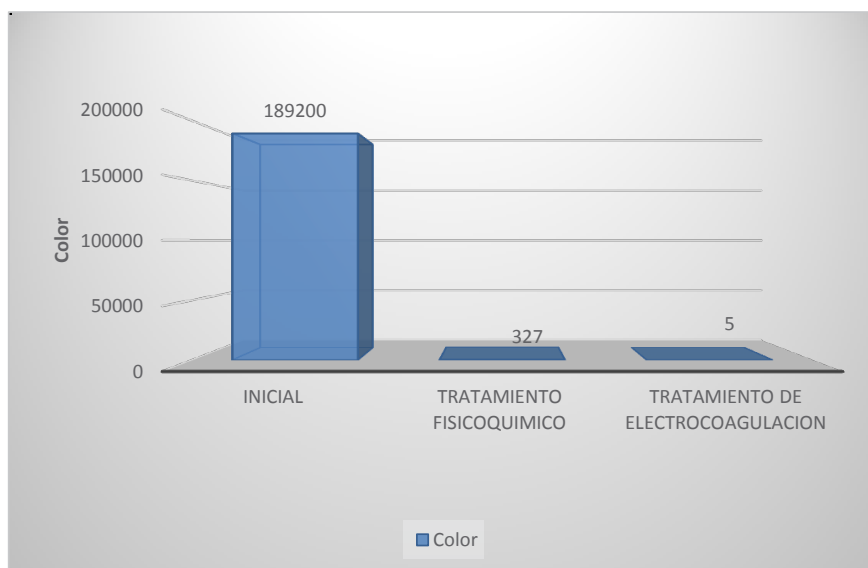


Figura 35. Resultado Final Color

Fuente: (Yagual Romero, 2017)

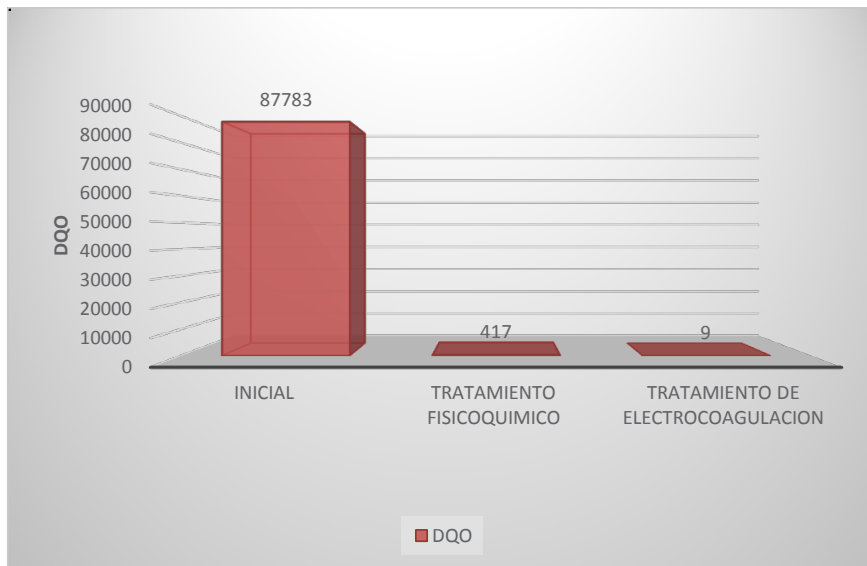


Figura 36. Resultado Final DQO
Fuente: (Yagual Romero, 2017)



Figura 37. Resultados final
Fuente: (Yagual Romero, 2017)

En la figura 37 se puede comprobar la remoción de color de 327 a 5 Pt/Co, mientras que la remoción de DQO de 417 a 9 mg/lt. Teniendo un buen rendimiento del equipo para la remoción de contaminantes.

Los lodos que se han separado pasan a una digestión y acondicionamiento de lodos luego al lecho de secado, de acuerdo a los analisis finales se dispone como abono orgánico.



5. ABREVIATURAS

Al	Símbolo aluminio
Fe	Símbolo hierro
Å	Amperio
V	Voltio
T	Temperatura
t	tiempo
e-	Electrón
Å/m²	Densidad de corriente
mg/l	Unidades miligramos por litro
mS/cm	Unidad de Conductividad
l/hab/d	Litro habitante por día
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Química de Oxígeno
pH	potencial de Hidrógeno
Pt/Co	Unidades de color Platino-Cobalto
STD	Sólidos Totales Disueltos
SST	Sólidos Suspendidos Totales
ST	Sólidos Totales
TAR	Tratamiento de Aguas Residuales
OAE	Organismo de Acreditación Ecuatoriana
ONU	Organización de Naciones Unidas
kg	Kilogramo
K	Potasio
Ca	Calcio
SO₄⁼	Ión sulfato
NMP/100ml	Número mas probable de 100 mililitros
POA	Procesos de Oxidación Avanzada
Al₂(SO₄)₃	Sulfato de aluminio
FeCl₃	Cloruro férrico
Fe₂(SO₄)₃	Sulfato férrico
FeSO₄	Sulfato ferroso
kJ/mol	Kilojulio mol
FEM	Fuerza electromotriz
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
X	media
M	masa

6. GLOSARIO

Coloide:	Suspensión de partículas diminutas de una sustancia, llamada fase dispersada, en otra fase llamada continua o medio de dispersión (Cárdenas, 2005)
DQO:	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas (Giraldo, 2004)
Efluente:	Líquido que sale de un proceso de tratamiento.
Amperaje:	Cantidad de flujo de electrones o de corriente en un circuito eléctrico (Withman, 2000)
Celda Eléctrica:	Es un circuito eléctrico constituido por dos electrodos y una solución de electrolitos. Contando con un cátodo y un ánodo. En la cual se producen reacciones químicas como resultado de un potencial aplicado. (Gennaro, 2000)
Densidad de Corriente:	Se define como una magnitud vectorial representada como J , como la corriente por unidad de área que atraviesa la superficie cuya normal coincide con la dirección de J .
Ánodo:	Es el electrodo hacia el cual fluye la corriente de electrones liberados por el cátodo.
Cátodo:	Es un electrodo que produce la liberación masiva de electrones por efecto del calor.
Iones:	Partícula cargada eléctricamente obtenida a partir de un átomo o grupo de átomos enlazados químicamente al añadir o eliminar electrones (Gammon, 2009)
Voltaje:	Medida que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico, entendido como presión eléctrica, fuerza electromotriz presión eléctrica gradiente de potencial y diferencia de potencial. (Harper, 2004)

7. BIBLIOGRAFÍA

- Arango. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 49-56.
- Arango, A. y. (2008). Tratamiento de aguas residuales de la industrias por electrocoagulación. Obtenido de <https://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/458/14ARTICULOABR.pdf>
- Arbeláez, F. (2005). *Química Inorgánica*. Bogota Colombia : Santillana .
- Arboleda, J. (1992). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Mc Graw Hill.
- Baeza, R. A. (2006). *Expresión Gráfica de las Reacciones Químicas*. SyG editores.
- Barrera. (2014). *Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales*. MÉXICO: REVERTÉ.
- Bermeo, M. (2017). Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/xmlui/handle/cybertesis/6368>
- Bermeo, M. (2017). *Tratamiento de Aguas Residuales: Técnicas Convencionales*. Guayaquil: Grupo Compas.
- Brossard Pérez, L. y. (1996). Experiments on vinasse disposal part I: emulsification with fuel oils. *Engineering*.
- Charlot, G. B.-L. (2004). *Las reacciones electroquímicas*. España: Toray-Masson.
- Chen. (2004).
- CONADESUCA. (2016). www.gob.mx. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/171932/Nota_Informativa_Septiembre_Vinazas.pdf
- Condorchem Envitech. (14 de Octubre de 2014). La electrocoagulación, un tratamiento económico y eficaz para las aguas residuales. Obtenido de <http://blog.condorchem.com/electrocoagulacion-aguas-residuales/>
- Dinámica en Soluciones. (Abril de 2015). distribuidornacional.com. Obtenido de <http://blog.distribuidornacional.com/2015/05/escorrentia-agricola.html>
- Fitzgibbon, F., Nigam, P., Singh, D., & Marchant, R. (1995). Biological treatment of distillery waste for pollution-remediation. *Basic Microbiol* 35.
- Huerga, E. (2005). Desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valoración de contaminantes. España: Universidad de Valencia.
- Ibañez. (2014). *Tecnología de Tratamiento de Aguas*. Santander: Programa Consolider Tragua.
- Jaramillo, R. (2012). Rediseño del sistema de pre-tratamiento y tratamiento físico químico de las aguas residuales industriales generadas en el proceso de la elaboración de las bebidas carbonatadas.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización* (Vol. 1). Madrid, España: Mc. Grawll-Hill.
- Ministerio del Ambiente. (2012). *Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria*. Quito: Corporación de estudios y publicaciones.

- Molina, C. (2012). Biodegradación anaeróbica de vinaza generada en la destilería Sode-
ral y aprovechamiento energético del biogás como medio para bajar el impacto de
gases de efecto invernadero. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana .
- MOLLAH, M. (2001). Electrocoagulación. Yousuf.
- Mondragón, C. (2005). Química Inorgánica . Bogotá: Santillana .
- Mywatershed Watch. (2017). mywatershedwatch.org. Obtenido de <http://www.mywatershedwatch.org/es/about-watersheds/stormwater-pollution/>
- Ojeda, E. H. (2010). Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando
electrodos de hierro. Cuba: Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente.
- Perez, I. G. (2006). Aprovechamiento integral de vinazas de destilerías. Cuba : Instituto
Cubano de Investigaciones de los derivados de la Cana de azúcar .
- Pinzon, E. (2010). REMOCIÓN DE COLOR DE ORIGEN TEXTIL POR MEDIO DE
ELECTROCOAGULACIÓN.
- Restrepo, A. Á. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de
aguas. Corporación Universitaria Lasallista.
- Richert, C. C. (1992). Manual 3: teoría coagulación, tomo 1. Brazil: CEPIS. Centro Pana-
americano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Samaniego, A. (2015). Aplicación de tratamiento a efluentes de industria textil mediante
electrocoagulación.
- Sánchez Flores, S. (2016). Utilización de la liparita o vulcanita para la reducción de pará-
metros o indicadores físicos, químicos de aguas residuales domésticas. Guayaquil:
Universidad de Guayaquil.
- Utadeo. (30 de Septiembre de 2013). Utadeo.edu.co. Obtenido de <http://www.utadeo.edu.co/es/noticia/opinion/ingenieria-quimica/82/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales-y-sus-avances>
- Yagual Romero, A. P. (2017). Diseño y construcción de un Equipo Didáctico de Electro-
coagulación para el tratamiento de vinaza proveniente de una destilería. Guayaquil,
Ecuador: Universidad de Guayaquil. Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/20053>

Dra. MARTHA BERMEO GARAY

Doctorado en Ciencias Ambientales

Magister en Ingeniería Ambiental

Diplomado en Docencia Superior

Ingeniera Química

Docente Principal de la Universidad De Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, carrera Ingeniería Química

Mg. LUIS BONILLA ABARCA

Ingeniero Químico

Diplomado en Docencia Superior

Magister en Ingeniería Ambiental

Docente Principal de la Universidad de Guayaquil, Facultad

de Ingeniería Química, carrera de Ingeniería Química,

asignaturas Operaciones Unitarias y Diseño de Plantas.

Coordinador de Gestión Curricular carrera de Ingeniería Química, UG.

Asesor Ambiental y en plantas de alcoholes.

Ing. ANA PAULA YAGUAL ROMERO

Ingeniera Química

Docente del Colegio Sagrados Corazones

MSc. DESIREE ALVAREZ MACIAS

Magister en Procesamiento y Conservación de Alimentos,

Facultad de Ingeniería Química

Técnico Ambiental, Coordinadora de Calidad de Aire,

Elicrom Cía. Ltda. • Asesora de Curso "Producción y Medio

Ambiente", Programa Aprendamos, Fundación Ecuador

Docente de la Universidad de Guayaquil, Facultad de

Ingeniería Química, carrera de Ingeniería Química

ISBN: 978-9942-770-12-7



9 789942 770127