



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA TEXTIL

**TESIS PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO TEXTIL**

**TEMA:
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE
ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE TINTURA Y
ACABADO TEXTIL**

**ELABORADO POR:
JARAMILLO TERÁN ENELIO XAVIER**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. NELSON MORALES**

**ASESOR DE TESIS
ING. HERNÁN IZURIETA**

Ibarra, 11 de Enero del 2012

CERTIFICACIÓN

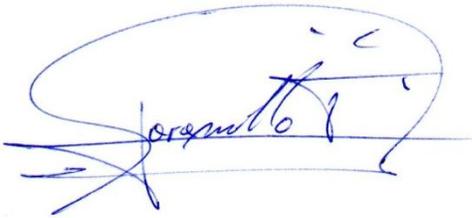
Certifico que el presente trabajo con tema: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE TINTURA Y ACABADO TEXTIL”, fue desarrollado en su totalidad por Enelio Xavier Jaramillo Terán bajo mi supervisión.

.....
Dr. Nelson Morales.
CI:

DECLARACIÓN

Yo, Enelio Xavier Jaramillo Terán, con cédula de identidad No. 100217630-1, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, y que este no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Universidad Técnica del Norte, según lo establecido por las Leyes de Propiedad Intelectual y Normatividad vigente de la misma.



Enelio Xavier Jaramillo Terán
CI: 100217630-1



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR
DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional determina la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

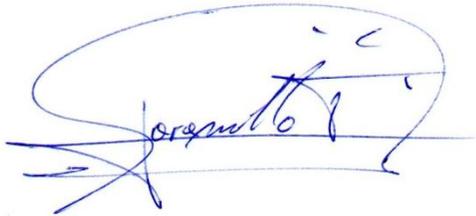
Por medio del presente documento dejamos sentada nuestra voluntad de participar en este proyecto, para lo cual ponemos a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO	
CEDULA DE IDENTIDAD:	100217630-1
APELLIDOS Y NOMBRES:	JARAMILLO TERÁN ENELIO XAVIER
DIRECCIÓN:	QUITO-CALDERÓN-BARRIO EL CLAVEL, CALLE LOS CIPRECES y GIOVANNY CALLES, CONJUNTO LA CAMPIÑA CASA 54
E-MAIL	enelioxjt@hotmail.es
TELÉFONO MÓVIL	098808902

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE TINTURA Y ACABADO TEXTIL
AUTOR:	ENELIO XAVIER JARAMILLO TERÁN
FECHA:	2 de Febrero del 2012
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO TEXTIL
ASESOR:	Dr. NELSON MORALES

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Enelio Xavier Jaramillo Terán, con cédula de identidad No 100217630-1, en calidad de autora y titular de los derechos Patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior, Artículo 144.





UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO A FAVOR
DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Enelio Xavier Jaramillo Terán, con cédula de identidad No 100217630-1, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los Derechos Patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4,5 y 6 en calidad de autora de la obra o trabajo de grado denominado: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE TINTURA Y ACABADO TEXTIL, que ha sido desarrollada para optar por el título de INGENIERO TEXTIL, en la UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

FIRMA.....

NOMBRES: ENELIO XAVIER JARAMILLO TERÁN

CÉDULA: 100217630-1

Ibarra, a los dos días del mes de Febrero del 2012.

ÍNDICE		Pág.
INTRODUCCIÓN		1
PARTE TEÓRICA		
CAPÍTULO I		
1 EL AGUA		5
1.1. GENERALIDADES		5
1.2. USOS DEL AGUA		6
1.2.1. <u>Calidad de Agua.</u>		7
1.3. PROCESOS DE CONTAMINACIÓN EN LA INDUSTRIA TEXTIL		9
1.3.1. <u>Pre Tratamiento.</u>		11
1.3.2. <u>Tintura.</u>		13
1.3.3. <u>Estampación.</u>		15
1.3.4. <u>Acabados.</u>		15
1.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA TEXTIL		15
1.4.1. <u>Materiales que deben ser removidos.</u>		20
1.4.2. <u>Tipo de Contaminantes Causados por el Ennoblecimiento Textil.</u>		22
1.5. PROCESOS DE MINIMIZACIÓN Y PREVENCIÓN		27
1.5.1. <u>Eficiencia de Procesos.</u>		28
1.5.2. <u>Medidas Preventivas.</u>		29
CAPÍTULO II		
2 TRATAMIENTO DE EFLUENTE LÍQUIDO RESIDUAL.		31
2.1. GENERALIDADES.		31
2.2. TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO		32
2.2.1. <u>Coagulación, Floculación y Precipitación.</u>		33
2.2.1.1. <u>Coagulación.</u>		34
2.2.1.2. <u>Floculación.</u>		36
2.2.1.3. <u>Precipitación.</u>		38
2.2.2. <u>Adsorción.</u>		39
2.2.3. <u>Oxidación y Reducción.</u>		40
2.3. TRATAMIENTO BIOLÓGICO.		40
2.3.1. <u>Adsorción biológica.</u>		41
2.3.2. <u>Desorción biológica.</u>		41

2.3.3.	<u>Biodegradación.</u>	42
2.3.3.1	<u>Aerobios.</u>	42
2.3.3.2.	<u>Anaerobios.</u>	42
2.3.4.	<u>Lagunajes.</u>	43
2.3.5.	<u>Fangos activados.</u>	44
2.3.6.	<u>Cultivos Fijos.</u>	44
2.4.	TRATAMIENTOS TERCEARIOS	44
2.4.1.	<u>Filtración.</u>	45
2.4.2.	<u>Desinfección Química.</u>	46
2.4.3.	<u>Remoción de Nutrientes.</u>	48
CAPÍTULO III		
3	LA ELECTRÓLISIS	49
3.1.	IONIZACIÓN. HIPOTESIS DE ARRHENIUS	51
3.2.	MECANISMO DE LA ELECTRÓLISIS	51
3.3.	LEYES DE LA ELECTRÓLISIS	56
3.4.	APLICACIONES DE LA ELECTRÓLISIS	59
3.4.1.	<u>Galvanotecnia.</u>	60
3.4.2.	<u>Electrometalurgia.</u>	61
3.4.3.	<u>Acumuladores, baterías y pilas.</u>	61
3.4.4.	<u>Electrocoagulación.</u>	63
PARTE PRÁCTICA		
CAPÍTULO IV		
4	MATERIALES Y ACCESORIOS.	69
4.1.	MATERIALES.	69
4.1.1.	<u>Tanque reservorio.</u>	69
4.1.2.	<u>Tubería.</u>	70
4.1.3.	<u>Reactor de Electrocoagulación.</u>	70
4.1.3.1.	<u>Cuba trapezoidal.</u>	71
4.1.3.2.	<u>Electrodos de sacrificio.</u>	71
4.1.3.3.	<u>Sistema de inyección del ELRAT.</u>	71
4.1.4.	<u>Rectificador de Corriente.</u>	72
4.2.	ACCESORIOS.	73

CAPÍTULO V

5	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	77
5.1.	DE LA CELDA DEL REACTOR	77
5.2.1.	<u>Dimensiones de la Cuba.</u>	77
5.2.2.	<u>Sistema de Alimentación.</u>	78
5.2.3.	<u>Los Electrodo.</u>	79
5.2.	DEL SISTEMA ELÉCTRICO.	80
5.3.	SISTEMA DE ANCLAJE DE ELECTRODOS.	81
5.3.1.	<u>Número de Electrodo.</u>	82
5.4.	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO.	83

CAPÍTULO VI

6	LA ELECTROCOAGULACIÓN	85
6.1.	FENÓMENOS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	86
6.1.1.	<u>Naturaleza Física.</u>	86
6.1.2.	<u>Naturaleza Química y Electroquímica.</u>	91
6.2.	ANÁLISIS DE FUNCIÓN DE VARIABLES	94
6.2.1.	<u>Consumo de Energía</u>	96

CAPÍTULO VII

7	EXPERIMENTOS	97
7.1.	ENSAYO BACH.	99
7.2.	ENSAYOS DINÁMICOS.	100
7.2.1.	<u>Ensayo uno.</u>	100
7.2.2.	<u>Ensayo Dos.</u>	101
7.2.3.	<u>Ensayo tres.</u>	103
7.2.4.	<u>Ensayo cuatro.</u>	104
7.3.	ANÁLISIS DE COSTOS DEL TRATAMIENTO.	106

CAPÍTULO VIII

8	RESULTADOS.	109
8.1.	DE LOS MATERIALES Y ACCESORIOS.	109
8.2.	DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.	109
8.3.	DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.	110
8.4.	DE LOS EXPERIMENTOS Y EVALUACIONES.	111
8.4.1.	<u>Ensayo Bach.</u>	111
8.4.2.	<u>Ensayo uno.</u>	112

8.4.3.	<u>Ensayo dos.</u>	112
8.4.4.	<u>Ensayo tres.</u>	113
8.4.5.	<u>Ensayo cuatro.</u>	113
CAPÍTULO IX		
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
9.1.	CONCLUSIONES.	115
9.1.1.	DE LOS MATERIALES Y ACCESORIOS.	115
9.1.2.	DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.	115
9.1.3	DE LA ELECTROCOAGULACIÓN.	116
9.1.4.	DE LOS EXPERIMENTOS Y EVALUACIONES.	116
	9.1.4.1. <u>Ensayo Bach.</u>	116
	9.1.4.2. <u>Ensayo uno.</u>	116
	9.1.4.3. <u>Ensayo dos.</u>	116
	9.1.4.4. <u>Ensayo tres.</u>	116
	9.1.4.5. <u>Ensayo cuatro</u>	117
9.2.	RECOMENDACIONES	120
9.3.	ANEXOS	
	BIBLIOGRAFÍA	121
	GLOSARIO	123
	ANEXOS	124

ÍNDICE DE GRÁFICOS

N.	DETALLE	pág.
Gráfico 1	Distribución del agua en el planeta.	7
Gráfico 2	Distribución del agua dulce por su uso.	7
Gráfico 3	Distribución del consumo de agua en tintura y acabado.	9
Gráfico 4	Adsorción de partículas sólidas en carbón activo.	45
Gráfico 5	Reactor elemental de electrolisis.	49
Gráfico 6	Primera ley de Faraday.	57
Gráfico 7	Segunda Ley de Faraday.	57
Gráfico 8	Tercera Ley de Faraday.	58
Gráfico 9	Proceso de electrocoagulación.	64
Gráfico 10	Diagrama esquemático del reactor de electrocoagulación y de los electrodos.	71
Gráfico 11	El reactor vista superior.	79
Gráfico 12	Conexión del electrocoagulador un solo campo.	80
Gráfico 13	Conexión del electrocoagulador dos campos.	81
Gráfico 14	Esquema del sistema de electrocoagulación.	83
Gráfico 15	Doble capa de una partícula coloidal	86
Gráfico 16	Acción de la coagulación	87
Gráfico 17	Fuerzas de atracción de Van Der Walls	88
Gráfico 18	Conexión de electrodos en un solo campo.	101
Gráfico 19	Conexión de electrodos en dos campos.	102
Gráfico 20	Electrodos conexión cuatro campos.	103
Gráfico 21	Alternación de conexión.	106
Gráfico 22	Porcentaje de remoción del ensayo Bach.	111
Gráfico 23	Porcentaje de remoción ensayo uno.	112
Gráfico 24	Porcentaje de remoción ensayo dos.	112
Gráfico 25	Porcentaje de remoción ensayo tres	113
Gráfico 26	Porcentaje de remoción ensayo cuatro	114
Gráfico 27	Comparativo de remoción de ensayos respecto a la Norma de DQO	118
Gráfico 28	Comparativo de remoción de ensayos respecto a la Norma de SS.	119

ÍNDICE DE FOTOS

N.	DETALLE	pág...
Foto 1	Tanque reservorio (El Autor)	70
Foto 2	Reactor de electrocoagulación. (El Autor)	70
Foto 3	Rectificador de corriente. (El Autor)	72
Foto 4	De izquierda a derecha multímetro y amperímetro. (El Autor)	73
Foto 5	Cronómetro. (El Autor)	74
Foto 6	Termómetro. (El Autor)	74
Foto 7	Peachímetro. (El Autor)	75
Foto 8	Sensor de Conductividad. (El Autor)	75
Foto 9	Del sistema de anclaje y separación de electrodos. (El Autor)	82
Foto 10	El reactor dándose la electrocoagulación. (El Autor)	85
Foto 11	Generación de espuma en la electrocoagulación (El Autor).	90
Foto 12	Electrodos con conexión para dos campos. (El Autor)	103
Foto 13	El electrocoagulador actuando en el ensayo cinco. (El Autor)	105
Foto 14	Coagulación y precipitación (El Autor)	110

ÍNDICE DE TABLAS

N.	DETALLE	Pág.
Tabla 1	Clasificación de parámetros indicadores de la calidad del agua	9
Tabla 2	Clasificación de contaminantes de las aguas residuales de la IT.	17
Tabla 3	Componente-efecto de contaminante y concentración.	19
Tabla 4	Biodegradabilidad de Agua Residual.	21
Tabla 5	Caracterizaciones Físico químicas de la descarga líquida.	26
Tabla 6	Limites máximo permisible para efluente.	27
Tabla 7	Agentes de precipitación y sus características.	38
Tabla 8	Características físico-químicas de las descargas líquidas.	98
Tabla 9	Condición inicial del ALRAT.	98
Tabla 10	Caracterización ensayo Bach.	99
Tabla 11	Descripción porcentual de remoción Bach	100
Tabla 12	Caracterización del efluente de ensayo uno	101
Tabla 13	Descripción porcentual de remoción del ensayo uno.	101
Tabla 14	Caracterización del efluente ensayo dos.	102
Tabla 15	Descripción porcentual de remoción del ensayo dos.	102
Tabla 16	Caracterización del efluente ensayo tres.	104
Tabla 17	Descripción porcentual de remoción del ensayo tres.	104
Tabla 18	Caracterización del efluente ensayo cuatro	105
Tabla 19	Descripción porcentual de remoción del ensayo cuatro.	106
Tabla 20	Resultados del diseño y construcción	110
Tabla 21	Resultados analíticos del ensayo cuatro.	114

INTRODUCCIÓN

La Normativa Ambiental vigente, afortunadamente, regula las descargas del efluente líquido residual, mismo que en el caso de las Industrias Textiles que cuentan con proceso de tintura, tienen un impacto ambiental alto. El presente estudio es una alternativa más para tratar el efluente residual. Alternativa que se basa en la electrólisis del agua.

Teniendo en cuenta que: mejor que limpiar es no ensuciar y toda iniciativa preventiva es útil, el proceso en si empieza evitando el uso excesivo de agua, con iniciativas como disminución de la relación de baño, apoyados en tecnología de máquinas, disminución de enjuagues de tintura empleando colorantes más eficientes, auxiliares menos nocivos con el Ambiente y que agiliten la remoción de colorante que no llego a formar parte del género textil, evitando el reproceso, haciendo lo bien a la primera, y con este efluente resultante después de todas estas iniciativas, la electrocoagulación es una alternativa . Para la electrocoagulación es necesario acondicionar el afluente lo máximo posible, con actividades simples como filtración en el proceso mismo de tintura, en las máquinas, una posterior antes del tanque de captación para retener las partículas grandes que pueden ser separadas mediante filtrados (usando coladores de pelusa), el control del potencial hidrógeno, la oxigenación que puede ser aprovechada también para la homogenización. Y después de la electrocoagulación la separación del contaminante se la puede hacer por métodos como la decantación o la misma filtración que fue empleada para el desarrollo de los ensayos previo a la caracterización.

La parte teórica empieza con un análisis de la situación del agua, que mientras no se dé la importancia real al problema de contaminación del recurso hídrico no se puede caer en la redundancia, se analiza los procesos depuratorios tradicionales para efluentes líquidos residuales de la Industria Textil, y se estudia la electrólisis que es la base teórica de la propuesta en esta tesis.

La parte práctica considera la importante actividad de diseño y construcción del reactor de electrocoagulación, descripción de los equipos y accesorios útiles en el estudio, análisis de la electrocoagulación y sus inherentes fenómenos físicos y químicos, y posteriormente con los ensayos y análisis de las caracterizaciones, se justifica y cumplen los objetivos propuestos.

PARTE TEÓRICA

CAPÍTULO I

1. EL AGUA

El agua es un componente químico muy abundante en la biósfera y uno de los más importantes, ya que casi toda la vida en la Tierra, utiliza agua como medio fundamental para el funcionamiento del metabolismo, de ahí la importancia de éste recurso, y el presente estudio es una alternativa más para su preservación en estado útil para la vida.

1.1. GENERALIDADES

La fórmula química del agua es H_2O . También, el agua es un recurso natural indispensable para la mayoría de actividades que desarrolla el ser humano, entre estas están: generación de energía eléctrica, explotaciones piscícolas, navegación, silvicultura, minería y recreación. En la Industria Textil se lo emplea desde la agricultura para el cultivo de las fibras naturales como: el algodón, yute, abacá, cabuya, lino; por mencionar algunas, también se lo emplea como: medio de transporte de calor, sistemas de enfriamiento, disolvente de auxiliares, sistemas acuosos de ennoblecimiento y tintura de géneros textiles, etc.

El agua es el disolvente natural más abundante e importante, y por lo mismo lleva en disolución sustancias diversas. El empleo previsto del agua determina el procedimiento depuratorio, mismos que se los tratará en parte posterior de este estudio.

El presente estudio propone una alternativa más para disponer del agua con alto rendimiento comenzando por una disminución sustancial del consumo y empleo,

evacuándola en las mejores condiciones, para ocasionar el menor impacto posible para el Ambiente, y cumpliendo con los principios de sostenibilidad y las normas establecidas por la ley.

1.2. USOS DEL AGUA

En el futuro se espera que el agua sea un recurso cada vez más escaso, y por consiguiente más valioso. La demanda de agua está creciendo a más del doble de la tasa de crecimiento de la población mundial. Durante los últimos 100 años, la población mundial se incrementó tres veces, pero el consumo del agua se elevó en un factor de siete en el mismo periodo.

La creciente demanda de agua potable, la industria y la agricultura, la decreciente disponibilidad de la misma, debe provocar un cambio de conciencia acerca del uso consumista del agua que se hace actualmente, sobretodo en países en vías de desarrollo, para lograr un uso eficiente del agua.

El ritmo al cual se puede consumir la provisión de agua dulce está limitado por la rapidez con la que el agua circula por el ciclo hidrológico. El tiempo para remplazar el agua varía aproximadamente dos semanas en la atmósfera hasta diez o cien años en los lagos según la profundidad. Actualmente en varias regiones donde la población urbana es densa y llueve poco se presenta escasez de agua, lo que supone que su consumo es mayor a lo que repone el ciclo natural, esto sumado a la provisión de agua en abundancia para usos municipales, industriales y agrícolas sin restricciones, sin incentivos que alienten la reutilización o conservación, ha incrementado en alto grado la competencia para conseguir fuentes limitadas de agua fácilmente accesible.

Aproximadamente el 97.4% de la provisión mundial de agua se encuentra en los océanos y el 2.6% restante es agua dulce, que es un recurso renovable limitado, del cual solamente está disponible el 0.6% en los lagos, corrientes subterráneas, atmósfera y ríos. Como se ilustra en el gráfico 1.

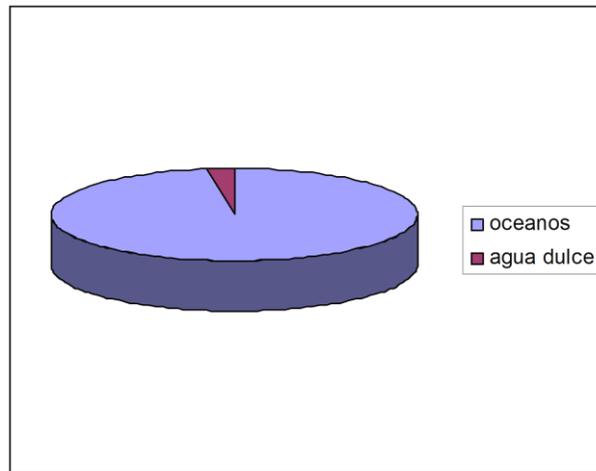


Gráfico 1. Distribución del agua en el planeta.

En el gráfico 2, se observa que del agua dulce disponible, un 7% se destina a la industria, el 4 % al consumo en el hogar y el 89 % para uso agrícola.

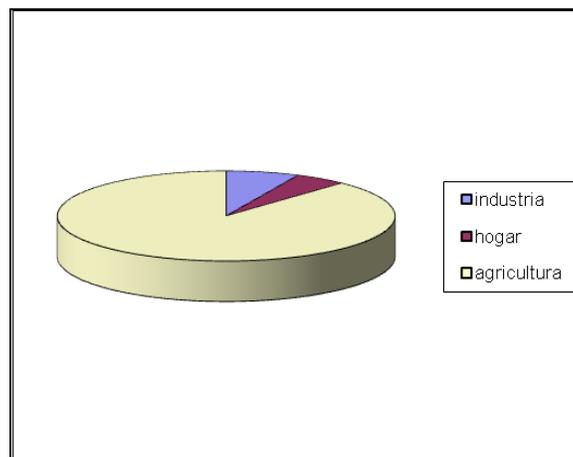


Gráfico 2. Distribución del agua dulce por su uso.

1.2.1. Calidad de Agua. Para definir la calidad de una corriente o una fuente del agua es necesario basarse en parámetros de calidad los cuales se clasifican en hidrológicos, físicos, químicos y biológicos. Los cuales se enuncian en la siguiente tabla 1.

En cuanto a los parámetros físicos es importante tener en cuenta que no son índices absolutos de contaminación y sus valores normales pueden variar considerablemente y, por tanto, en cada caso se mide la desviación con respecto a la norma. Estos parámetros también se denominan organolépticos, es decir que se detectan en primera instancia por los órganos de los sentidos.

El agua para ser potable debe cumplir ciertas cualidades tales como: ausencia de organismos patógenos, concentraciones bajas limitadas de compuestos tóxicos, potencial hidrógeno, oxígeno disuelto, compuestos químicos productores de color, olor y temperatura. Para la industria textil el agua debe cumplir ciertos requisitos elementales, tales como ausencia de color y olor, puesto que la presencia de la misma sería un indicador de que contiene elementos que podrían ser perjudiciales para los procesos de tintura y ennoblecimiento de los géneros textiles, haciendo que estos procesos sean ineficientes e imprecisos, conllevando a posteriores reproceso que significarían mayor demanda de agua, que es precisamente uno de los puntos que se deben evitar con mayor énfasis.

CLASIFICACIÓN	PARÁMETROS	
Químicos	No específicos	Alcalinidad Ph Conductividad Dureza Oxígeno disuelto (OD)
	Específicos	Nitrógeno (NH ₄ , NO ₃) Cloruros Detergentes Fenoles Pesticidas

		Material orgánico oxidable
Físicos		Color Temperatura Turbiedad Olor Sabor
Hidrológicos		Caudal Velocidad Mezcla
Biológicos	Patógenos	Coliformes fecales Virus Vibro cólera
	No patógenos	Población mesófila Zooplanton Algas

Tabla 1. Clasificación de parámetros indicadores de la calidad del agua.

1.3. PROCESOS DE CONTAMINACIÓN EN LA INDUSTRIA TEXTIL

La contaminación del Medio Ambiente provocada por una pujante actividad industrial y comercial, ha creado un déficit medioambiental que es muy difícil eliminar a corto plazo. Solamente los esfuerzos de la sociedad actual puede evitar un problema mucho mayor para las generaciones venideras. Lo que estamos haciendo en la actualidad, es consumir recursos de las generaciones futuras, y sin tomar medidas realmente compensatorias que garanticen abastecimiento normal y natural para el futuro, La frase en el medioambiente, “Estamos viviendo de la herencia de nuestros hijos” es, en muchos casos, una triste realidad. Las actividades humanas y su desarrollo, tanto social como económico deben respetar lo que se ha denominado “desarrollo sostenible”, definiéndose este como la satisfacción de las

necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de cubrir las necesidades de las generaciones venideras.

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

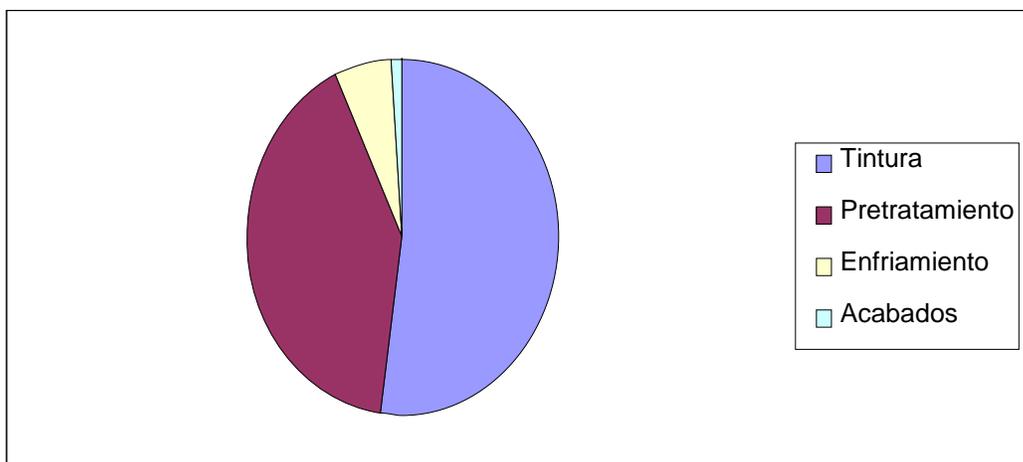


Gráfico 3. Distribución del consumo de agua en tintura y acabado.

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

A continuación se hace una rápida descripción de los procesos de acabado que tienen relación con la contaminación del agua usada en la industria textil por lo que es importante definir cada una de las actividades y funciones mencionadas. Las diferentes etapas o procesos generales que pertenecen al sector del ramo del agua son:

1.3.1. Pre Tratamiento. Que son todas las actividades y funciones a las que se someten las fibras para obtener el género de punto o tejido plano, después de ser hiladas y antes de dársele coloración. Consta de las siguientes actividades:

- **Encolado:** Los hilos crudos se sumergen en baños con colas, estas colas pueden ser de origen natural (almidones) o sintéticos (alcohol de polivinilo, carboximetilcelulosa o poli acrilatos). Cuya función es proporcionar resistencia al género. Esta actividad es exclusiva del tejido plano.
- **Tejido:** Constituye la etapa de fabricación del tejido ya sea entrelazado o entrecruzado. Se realiza por lo general en seco no produciéndose ningún tipo de vertido, a menos que sea tejido plano propulsado por chorro de agua.
- **Chamuscado:** El tejido plano se somete a un proceso de flameado con el que se elimina cascarilla y pelusas, obteniendo una tela con una superficie uniforme, para posteriormente lavar la tela con agua corriente. Y dependiendo de los procesos que le preceden se obtiene por lo general agua de muy poca o nula contaminación.

- **Desencolado:** Consiste en la eliminación de la cola utilizados en el proceso de hilatura que mantiene la continuidad y consistencia del hilo en la tela. El proceso de desencolado puede ser enzimático o ácido. En el primer caso se utiliza encimas vegetales y/o animales que hidrolizan la goma y la solubilizan en el baño. Para mejorar la eficacia de esta etapa se utiliza tensoactivos y secuestrantes. En el segundo caso se utiliza ácido diluido para la remoción. Los efluentes producidos no son muy importantes en volumen pero si en carga contaminante con valores elevados de DBO₅.
- **Mercerizado:** Este proceso permite incrementar la resistencia, lustre y la afinidad de los colorantes sobre las fibras, bien sea hilo o tejido. Se impregna en una disolución fría de hidróxido de sodio (NaOH) manteniendo las fibras estiradas para lograr el reordenamiento. Posteriormente se lava con una mezcla de agua ligeramente ácida para neutralizar el género. Con esto se logra mejorar la apariencia, aumentar su tenacidad y en parte el tacto, por la reordenación de las moléculas de celulosa. Este proceso es costoso y requiere de adecuaciones y maquinaria muy específica.
- **Descrude:** En esta etapa se eliminan las impurezas naturales y adheridas a las fibras, acondicionándolas para las etapas de blanqueo y tintura. Se emplean por lo general disoluciones alcalinas con tensoactivos en baño caliente. En algunos casos el descrude y blanqueo se lo realiza simultáneamente. Con esto se logra en el caso de las fibras celulósicas colores más brillantes y uniformidad de tintura. El agua residual de esta etapa es alta en DBO, por los residuos orgánicos que se eliminan.

- **Blanqueo:** Tiene por objeto el blanqueo de las impurezas de tipo leñoso (celulosa) y coloreado de las fibras. Se persigue asimismo mejorar la hidrofiliidad de la fibra y tener una base suficientemente blanca para obtener un mejor brillo en la tintura o estampación. Los baños contienen agentes blanqueadores como cloro o peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y tenso activos en medio alcalino. Los vertidos de esta etapa suelen tener una elevada alcalinidad y toxicidad baja. Si como blanqueador se utiliza cloro la conductividad y los niveles de compuestos halógenos disueltos puede ser también elevada.

1.3.2. Tintura. En esta etapa la materia textil entra en contacto con una disolución o dispersión de colorante, absorbiéndolo y reteniéndolo en mayor o menor medida. Todo proceso de tintura contempla las siguientes etapas: preparación del baño, transferencia del colorante del baño a la tela, fijación del colorante mediante unión física o química (dependiendo del tipo de colorante y fibra tinturada), lavado y aclarado (enjuagues). Además de los colorantes, los baños contienen una gran variedad de sales, ácidos, secuestrantes, dispersantes, retardantes, tensoactivos y antiespumantes.

Los vertidos generados en este proceso son más abundantes en la etapa de lavado y aclarado, sobre todo si son tonos muy intensos. El grado de contaminación y volumen de vertido depende de varios factores: Tipo de baño, que esta en función de la relación de baño, y que puede ser, alta o baja en función principalmente de la tecnología de la maquinaria, intensidad de color, genera mayor o menor caudal de vertidos. La relación de baño usada en le planta donde se realiza el estudio es de 1 a 7 aproximadamente; Grado de fijación del colorante: Según el tamaño de la molécula del colorante, la química del

colorante, los grupos reactivos del colorante, el tipo de enlace químico al que pertenece la unión será más o menos fuerte, quedando en el baño un mayor contenido de colorante y consecuentemente contaminación y siendo más o menos difícil la rotura del enlace. Como ya se mencionara en la parte previa a la prevención, la tendencia es usar colorantes con una mayor reactividad para ser más eficiente el proceso disminuyendo colorante hidrolizado, que termina en el efluente, además estos colorantes requieren cantidades menores de electrolito, menos número de enjuagues, siendo una ventaja adicional y determinante. En lo que se refiere a colorantes insoluble en agua la gama se extiende a los de tipo disperso, sulfuroso y tina. Su solubilización se obtiene mediante carrier o dispersantes, o agentes reductores. De modo general, los vertidos asociados a los colorantes insolubles son menos biodegradables que los procesos de colorantes solubles.

Los colorantes empleados en la planta donde se realiza el estudio son los dispersos para las fibras de poliéster y los directos y reactivos para las fibras de algodón. El tipo de lavado y enjuague depende del sistema de tintura empleado, y de forma general se afirma que en procesos discontinuos o de agotamiento la generación de vertidos es mayor que en los sistemas continuos o de impregnación.

1.3.3. Estampación. En este proceso se efectúa una coloración localizada sobre la tela, dispuesta generalmente en forma de dibujo. El tratamiento previo necesario para preparar la tela consiste en las siguientes etapas: descrude y blanqueo que condiciona la hidrofiliidad de la tela, que es determinante, mercerizado que mejor aún más la afinidad de la fibra con el colorante y chamuscado para evitar la presencia de fibras sueltas, siendo por supuesto estos

pasos previos opcionales, y en función de las exigencias del consumidor. Las etapas a seguir en el proceso de estampación: preparación de la pasta de estampación, estampación (deposición de la pasta y secado) y polimerización. En este caso y a diferencia del proceso de tintura por sistema de agotamiento, el uso de colorantes solubles proporciona unos vertidos con una menor biodegradabilidad que el de pigmentos.

1.3.4. Acabados. Consiste en la impregnación de la materia textil para modificar su tacto, aspecto, brillo, afinidad o repelencia al agua. En función de las propiedades buscadas la composición del baño varia, siendo algunos de los componentes generales los tensoactivos catiónicos y las resinas acrílicas, las cuales dejan en las aguas de lavado unas cargas de DQO muy elevadas.

1.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA TEXTIL

El estado de las aguas superficiales en el mundo es generalmente malo, razón por la cual a partir de los años 60 y 70 se empezaron a tomar medidas preventivas, acciones correctivas y de esta manera disminuir los efectos causados por las aguas residuales de todas las industrias que aportaban negativamente las características del agua usada.

La contaminación por materia orgánica, procede de los vertidos domésticos e industriales. Son pocas las mediciones de DBO_5 y Oxígeno Disuelto (OD) de los ríos, sin embargo estas denotan contaminación. La contaminación de nitratos proviene fundamentalmente del uso agrario de abonos nitrogenados que por lixiviación llegan a los ríos. El amonio procede de las redes urbanas y de las instalaciones de depuración. La presencia de fósforo en nuestros

ríos es consecuencia de la importante actividad humana, es así que, las descargas de fósforo en las cuencas fluviales son directamente proporcionales a la densidad de población.

Una industria textil genera un número significativo de corrientes de aguas residuales tales como: aguas residuales de procesos, aguas de enfriamiento, de enjuagues, etc. Algunas de estas corrientes pueden tratarse con facilidad y re-utilizarse en la planta, descargar como efluentes, o ingresar a procesos específicos de tratamiento. Otras pueden ser combinadas con diferentes tipos de efluentes y ser tratadas mediante procesos biológicos. Además de factores indirectos determinados por la logística y área disponible dispuesta para actividades depuratorias. El empleo variado de fibras a tinturar, colorantes usados, tipos de acabado y gama de colores, los contaminantes de las aguas residuales de la industria textil son muy variados.

En la siguiente tabla se resume una clasificación elemental de las aguas residuales de la industria textil.

Clasificación	Efectos contaminantes
Materias en suspensión: (residuos minerales, fibras, sustancias insolubles.), son relativamente escasas en los efluentes textiles, excepto en los lavaderos de lana	Las materias disueltas se depositan lentamente sobre los cursos de agua, si el deposito es importante afecta la vida acuática. Cuando estas materias son de naturaleza orgánica se descomponen progresivamente agotando el oxígeno y generando gas tóxico y mal oliente.
Materias flotantes: aceites grasos y espumas	Disminuye el crecimiento de la flora acuática al impedir la penetración de la luz. Los aceites en particular son tóxicos y perturban la aireación de los cuerpos acuáticos y destruyen la vegetación. La industria textil sólo genera grasas y aceites de forma importante en el lavado de la lana y en los procesos de

	estampación en los que intervienen pastas de petróleo. Los tensoactivos son de uso generalizado y en concentraciones bajas (1 - 3 mg/L) son suficientes para generar espuma al verter el agua incluso después de un proceso de depuración. No obstante si las cantidades de tensoactivos son pequeñas la espuma desaparece después de muy pocos metros del vertido.
Impurezas disueltas: Son contaminantes presentes en las aguas residuales industriales textiles de mayor importancia, entre estos se encuentran: ácidos, álcalis, reductores, oxidantes, colorantes y un sin número de productos auxiliares todos ellos solubles en agua.	Los reductores y la materia orgánica disuelta consumen el oxígeno. Algunos de los productos contaminantes disueltos pueden ser además tóxicos, como los derivados fenólicos, transportadores de tintura, cromo, grasa, aceites, metales pesados, etc.

Tabla 2. Clasificación de los contaminantes de las aguas residuales de la industria textil.

Fuente: CRESPI, M y HUERTAS, J. A. Industria textil: Depuración biológica o fisicoquímica En: Boletín textil del instituto de investigación textil y de Cooperación Industrial Terrasa. Vol. 2, No. 92 (jul.-dic. 1987); Pág. 75-90.

Para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil se debe considerar los siguientes parámetros:

- ✓ Composición
- ✓ Concentración
- ✓ Caudal
- ✓ Límites de Descarga
- ✓ Posibilidad de Reutilizar
- ✓ Opciones Adicionales

En la tabla 4 se indican algunas de las sustancias que pueden contener las aguas residuales y su efecto en éstas.

COMPONENTE	EFEECTO	CONCENTRACIÓN CRÍTICA (MG/L)
Sólidos suspendidos	Pueden provocar deposiciones de sólidos o enturbiamiento	Variable
Materia orgánica biodegradable	Pueden agotar la reserva de oxígeno disponible	Variable
Contaminantes prioritarios	Tóxicos para el hombre, carcinógenos	Varía en función del constituyente
	Tóxicos para el entorno acuático	Varía en función de la presencia de la columna de agua, masa biológica o sedimento
Compuestos orgánicos volátiles	Toxico para el hombre, carcinógeno, forman oxidantes fotoquímicos.	Varía en función del constituyente.
NUTRIENTES		
Amoniaco	Aumenta la demanda de cloro. Puede convertirse a nitratos y agotar los recursos de oxígeno.	Cualquier cantidad
Nitrato	Tóxico para los peces	Variable según el pH y la temperatura.
	Estimula el crecimiento de las algas	0,3 para lagos con aguas tranquilas
	Puede causar metahemoglobinemia en los niños	45

Fosfato	Estimula el crecimiento de los peces y algas.	0,3 para lagos con aguas tranquilas
	Interfiere con la coagulación	0,2 a 0,4
	Interfiere con el ablandamiento cal-sosa.	0,3
Otros compuestos orgánicos		
Agentes tensoactivos	Provocan espuma y pueden interferir con la coagulación.	1 a 3
Otros compuestos inorgánicos		
Calcio y magnesio	Aumenta la dureza y los sólidos totales disueltos.	
Cloruro	Imparte sabor salado.	250
	Interfiere en los usos agrícolas e industriales.	75 a 200
Sulfatos	Acción catártica.	600 a 1000

Tabla 3. Componente-efecto de contaminante y concentración.

Tchobanglous, George et al. Ingeniería en aguas residuales, 3ra. Edición, México, Mc Graw Hill, 1996, v. 2 Pág. 755

1.4.1. Materiales que Deben Ser Removidos. Un efluente de aguas residuales puede contener una gran variedad de productos químicos y biológicos, pero solo algunos de ellos son sujetos de control a continuación se menciona los más comunes y sujetos de control:

- **Compuestos Orgánicos Solubles:** Incluye ciertos compuestos sintéticos, así como también productos de origen animal y vegetal. Estos productos son no deseables debido al consumo de oxígeno del agua en los puntos de descarga. El contenido de compuestos orgánicos solubles es expresado como Demanda Química de Oxígeno (DQO) o Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

El DBO_5 , representa la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aeróbicas. La DBO es el parámetro más usado para medir la calidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, para diseñar unidades de tratamiento biológicas, para evaluar los procesos de tratamiento y para fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras.

El DQO, es la cantidad de oxígeno disuelto consumida por un agua residual durante la oxidación por vía química, provocada por un agente químico fuertemente oxidante. La relación entre DBO_5 y DQO, indica la importancia de los vertidos industriales dentro del agua residual analizada y sus posibilidades de biodegradabilidad (ver tabla 5).

DBO_5 ----- DQO	Biodegradabilidad del Agua Residual
<0.2	Poco Biodegradable
0.2 – 0.4	Biodegradable
>0.4	Muy Biodegradable

Tabla 4. Biodegradabilidad del Agua Residual.

- **Iones de metales pesados:** Tales como Mercurio (Hg^{2+}), Cromo (Cr^{3+} , Cr^{6+}), Plomo (Pb^{2+}), Níquel (Ni^{2+}), y otros iones no metálicos de considerable efecto tóxico, por ejemplo Cianuro (CN^-), Sulfuro (S^{2-}), los cuales son sujeto de control permanente y descarga de concentraciones muy reducidas debido a sus características de calidad.
- **Acidez y Alcalinidad:** Las aguas residuales adquieren la acidez por la presencia de ácidos minerales, ácidos orgánicos o compuestos que en medio acuoso generan acidez. En

forma similar la alcalinidad se genera por disolución de bases o hidróxidos, de compuestos orgánicos y por la presencia de compuestos minerales tales como Carbonatos, Bicarbonatos, Fosfatos, Silicatos, Boratos, Cianuros, Sulfuros, otros. Bajo estas condiciones la vida acuática sufre deterioro lo cual justifica la neutralización de efluentes en estas características.

- **Aceite, Grasa, y Otros Materiales:** Que floten sus componentes que deben ser removidos completamente porque recubren las superficies con las cuales entran en contacto, causan iridiscencia y problemas de mantenimiento, e interfieren con la actividad biológica pues son difíciles de biodegradar.
- **Nutrientes:** Tales como Nitrógeno (N) y Fósforo (P) son requeridos en el tratamiento biológico, pero un exceso de N y P deben ser removidos posteriormente porque promueven el crecimiento acelerados de algas en lagos, lagunas, represas, etc. y la reducción del contenido de oxígeno disuelto en estos medios en aguas naturales, para evitar efectos perjudiciales sobre la vida acuática se recomienda emplear concentraciones mayores a 4mg/l.
- **Sólidos Suspendidos y en Estado Coloidal:** Provocan opacidad al agua. Los sólidos suspendidos en un efluente pueden sedimentarse y crear lodos. Los sólidos totales suspendidos (TSS, mg/l) incluyen todos los materiales sólidos de naturaleza orgánica y mineral. Sólidos volátiles suspendidos (VSS, mg/l) incluye aquellos compuestos que pueden ser oxidados a 550°C (se forma gas).
- **Color, Turbiedad y Olor:** Compuestos que contribuyen a estos parámetros deben ser removidos. El color es frecuente en efluentes que se generan en plantas de las industrias

del papel y textiles, procesos galvánicos, etc. El olor puede ser causado por materiales como sulfuros y otros productos químicos volátiles.

- **Contaminantes Prioritarios:** Son compuestos orgánicos específicos, metales pesados, compuestos minerales (como iones) que son regulados en forma individual por la EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Representan un centenar de ellos; los valores mínimos de descarga para cada uno de ellos se expresan en partes por billón (ug/l).

1.4.2. Tipo de Contaminantes Causados por el Ennoblecimiento textil. El sector textil se compone de diversas ramas diferenciadas por el proceso, cada uno de los cuales con una problemática medioambiental diferente.

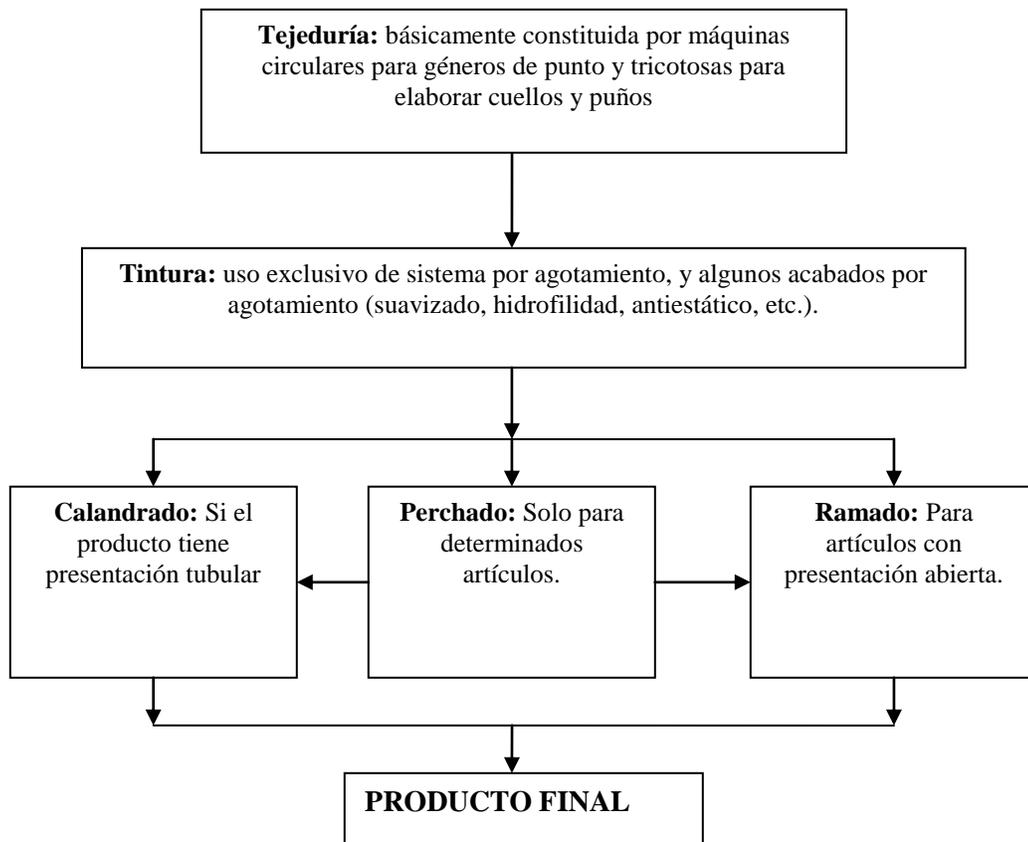
El proceso del ennoblecimiento y tintura textil, también llamado “ramo del Agua” es uno de los que tiene más problemas por la generación de residuos y emanaciones contaminantes. Su condición ineludible de este proceso, por ser parte integrante de la cadena productiva, influye de manera decisiva en el precio final.

El proceso del ramo del agua, como su nombre lo indica, el principal elemento empleado es el agua, cuyos costos provienen de diferentes conceptos:

- Costo del suministro. El que se paga a la empresa que proporciona o los costos de inversión, explotación, mantenimiento y autorizaciones para sistemas de captación propias.
- Costo de acondicionamiento. Dependiendo del uso a darse al agua se requiere someterle a un proceso de ablandamiento, para que no genere problemas en el proceso.

- Costo de tratamiento. Para cumplir con los parámetros de vertido establecidos por la entidad de regulación del sector en el que se desarrollen las actividades, es necesario hacer inversiones de instalaciones, tratamiento y mantenimiento de las plantas de tratamiento. Y además es a donde apunta el presente estudio para tener una alternativa más de procesamiento.
- Costo de mediciones y caracterizaciones. Para comprobar que se esta dentro de los parámetros es necesario hacer análisis en instituciones aprobadas por la entidad de seguimiento y regulación.
- Sanciones. Si no se está dentro de las normas y se debe continuar laborando se debe levantar las sanciones y tomar medidas para evitarlas.

El caso específico de la empresa colaboradora para el estudio, elabora sus productos basado en el siguiente flujo grama.



Flujo grama 1. Flujo grama de procesos de empresa colaboradora.

Considerando los procesos de la empresa colaboradora, la contaminación de su agua residual se puede clasificar de acuerdo a su origen:

- Eliminación de productos naturales, procedentes de impurezas presentes en las fibras de origen natural (ceras, cáscara, fibra muerta).
- Eliminación de aceite de enzimaje de fibras sintéticas y artificiales.
- Eliminación de productos incorporados de forma provisional en cualquiera de las etapas del proceso.

- Los colorantes y productos auxiliares, que no se han incorporado de forma definitiva al género, en el proceso de tintura.
- La limpieza de maquinaria, instalaciones y envases.

El agua de sistemas de calentamiento y enfriamiento es recuperada para ser reciclada y empleada sobre todo para lavados y enjuagues y para la misma generación de vapor.

En función de caracterizaciones del agua residual de la planta, en general se determina las siguientes características:

- Significativa presencia de materia orgánica.
- Presencia de material no biodegradable aportado por material sintético y colorantes de peso molecular elevado.

PARÁMETROS DE DESCARGA	UNIDAD	PROMEDIO ANUAL
Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO) ₅	mg/l	475
Demanda Química De Oxígeno (DQO)	mg/l	834
Sólidos Suspendidos	mg/l	423
Contaminantes asociados a descargas líquidas		
Aceites y grasas	mg/l	19,8
Cadmio	mg/l	<0,05
Cobre	mg/l	0,53
Cromo hexavalente	mg/l	0,004
Color real	unidades de color	1078
Mercurio total	mg/l	0,01
Níquel	mg/l	<0,3

Plomo	mg/l	<0,5
Potencial de hidrogeno	mg/l	10,05
Sólidos sedimentables	mg/l	<0,1
Tensoactivos	mg/l	0,82
Zinc	mg/l	0,0975

Tabla 5. Caracterizaciones Físico químicas de la descarga líquida.

- ✓ Bajo contenido en materias coloidales y en suspensión, por lo que la mayor parte de la contaminación esta en forma soluble.
- ✓ Ph alcalino.
- ✓ Color, ocasionado por colorantes no incorporados a las fibras.
- ✓ Por la naturaleza de los productos empleados los residuos no son tóxicos, y por su alcalinidad si corrosivos.
- ✓ Salinidad elevada, debido a la alta cantidad de sales usadas en baños de tintura con colorantes reactivos.
- ✓ Temperatura alta.
- ✓ Ausencia de microorganismos patógenos.
- ✓ Bajo nivel de nitrógeno en relación a los necesarios para llevar a cabo tratamiento biológico.

A continuación en la siguiente tabla se muestra los límites máximos permisibles para una planta textil, específicamente para el sector algodonero, fibras artificiales y sintéticas, sector al que pertenece la empresa donde se realizara el presente estudio.

Para el Sector Textil – Sub-Sector Algodonero, Fibras artificiales y Sintéticas

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDADES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (5 DÍAS)	D.B.O ₅ .	mg/l	120 (A) 70 (C,)
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	D.Q.O.	mg/l	240 (A) 123 (C,)
SÓLIDOS SUSPENDIDOS	S.S.	mg/l	95 (A) 53 (C,)
CAUDAL	Q	l/kg de producción	140

Nota. (A) Alcantarillado y (C) Cauce de agua.

Tabla 6. Límites máximo permisible para efluente.

* Fuente: Dirección Metropolitana Ambiental, Resolución No 213.

1.5. PROCESOS MINIMIZACIÓN Y PREVENCIÓN

Considerando la importancia de evacuar los efluentes a cualquier medio receptor (ya sea ríos o alcantarillado), en condiciones y características por debajo de las normas, referente a emisiones líquidas, el tratamiento menos costoso que se puede realizar a el agua, es el que no se da, lo que se logra al no emplearla, es decir que se debe tomar todas las medidas para no usar el agua innecesariamente, emplear los productos menos nocivos y de menor impacto y por último, hacerlo bien a la primera.

1.5.1. Eficiencia de Procesos. La primera acción enfocada a la minimización, debe ser la eficiencia en los procesos, que no es más que el empleo preciso de todos los recursos para obtener los resultados esperados, sobretodo del recurso agua empleado en todos los procesos acuosos de la industria textil. Los problemas de contaminación especialmente industrial siguen vigentes, no se han reducido en forma continua en nuestro medio, no obstante podrían evitarse siguiendo normas tan sencillas como las siguientes que afortunadamente en muchas plantas industriales se las están empleando.

- Mejorar la tecnología. Por la importancia del uso eficiente del agua los constructores de maquinaria se han enfocado a disminuir el empleo del agua en sistemas de agotamiento tal es así que existen tecnologías que emplean una relación de baño aproximada a 1/3. En nuestro medio lo común es usar tecnología que trabaja con una relación de baño de 1/6 aproximadamente, siendo menos empleados los sistemas que usan relaciones de baño de 1/12 como las conocidas barcas abiertas.

- La reutilización. De los insumos empleados disueltos en el agua para luego ser empleados en procesos similares, como agua de descrude, agua de enjuagues, agua de tinturas (como el agua de tinte de rojo directo 23 empleado para franela 100% algodón). El aprovechamiento del agua de enfriamiento en procesos posteriores calientes (la media de la temperatura de esta agua en cisterna es de 50 ° C). Recirculación del agua condensada para una nueva generación de vapor aprovechándose su condición de agua tratada y temperatura elevada.

- Aumentar el rendimiento. Empleándose colorantes con alta reactividad, con los cuales se logra disminuir la cantidad de colorante respecto de los de reactividad tradicional, logrando a la vez menor demanda de agua para eliminación de colorante hidrolizado y reducir el tiempo de tintura.
- Clasificación de los residuos para reutilizar o evacuarlos por medio de gestores.

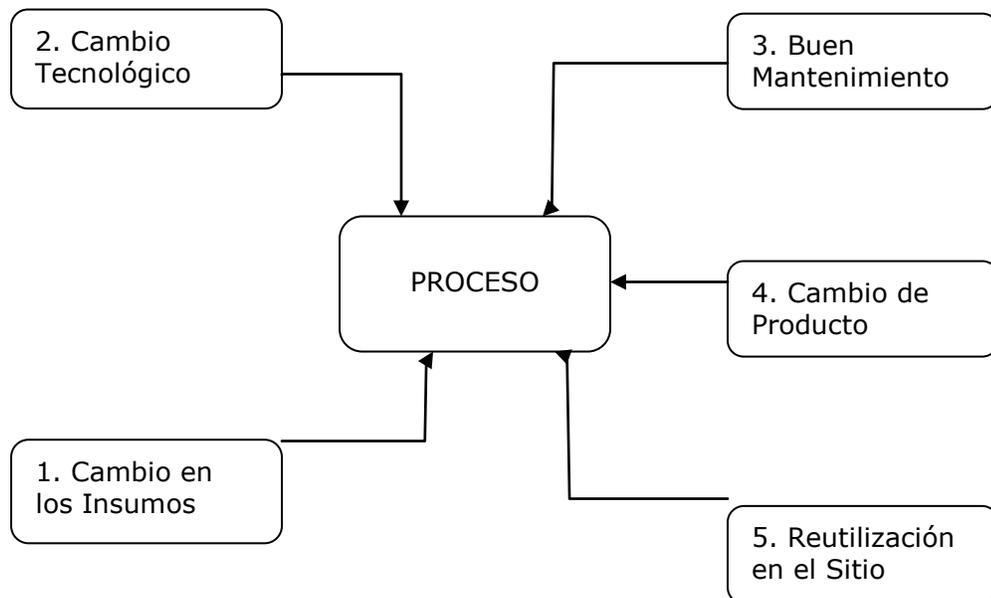
1.5.2. Medidas Preventivas. Se considera la aplicación de Producción Más Limpia: Es un término muy amplio que abarca lo que en algunos países definen como minimización de desechos, elusión de desechos, prevención de contaminación. Reconoce que la producción no puede ser absolutamente limpia. La realidad práctica asegura que habrá residuos de algún tipo, de varios procesos y productos obsoletos.

La producción Más Limpia no desconoce el progreso, solo insiste en que el crecimiento es ecológicamente sostenible en un periodo más largo. Es la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva, integrada para los procesos y los productos, con el fin de reducir el impacto negativo al ser humano y al Medio Ambiente, involucran la aplicación del conocimiento, el mejoramiento de las tecnologías y sobre todo el cambio de actitudes en muchos lugares.

El cambio de colorantes con mejor tecnología, en el caso de empleo de colorantes reactivos para tinturar fibras celulósicas, se ha convertido en una iniciativa muy alentadora. Los colorantes fríos poli funcionales disminuyen el consumo de agua de hasta un 25% de

consumo de agua, apoyados también en auxiliares que ayudan a la remoción rápida de colorante hidrolizado que si no es removido incide en la solidos húmeda del genero.

El apoyo en las mejoras tecnológicas se ha constituido en una medida que ha disminuido el consumo del agua en alrededor del 30%. Las barcas atmosféricas que empleaban relaciones de baño de está 12 litros por kilo han sido remplazadas en su totalidad por máquinas con sobre flujo que emplean relaciones de baño de hasta 2 litros por kilo.



Fuente: INUMA/IMA

Flujo grama 2. Elementos de Proceso para las Opciones de Producción Más Limpia.

CAPÍTULO II

2. TRATAMIENTO DE EFLUENTE LÍQUIDO RESIDUAL

Se denominan efluente líquido residual a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua, también llamadas aguas servidas, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales pues, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no es útil para el consumo directo, ya sea consumo humano, industrial o incluso consumo agrícola; son negras por el color que habitualmente tienen.

2.1. GENERALIDADES

La razón de un proceso de tratamiento, es modificar las características fisicoquímicas y biológicas del agua residual a las establecidas por la normativa correspondiente, considerando el cuerpo receptor, y sobre todo teniendo en cuenta, que todo esfuerzo, acción de prevención, uso eficiente, y depuración, tiene su repercusión en la preservación del Medio, y también repercusión en el costo final del producto para el cual fue empleada el agua.

Las aguas residuales puede ser tratado en el mismo lugar donde fue generado, por ejemplo; tanques sépticos, piscinas, reservorios y otros medios de depuración y recogido; o también llevado mediante una red de tuberías, usando bombas de ser necesario, a una planta de tratamiento municipal. Los esfuerzos para coleccionar y tratar las aguas residuales, están típicamente sujetos a regulaciones, estándares locales, y estatales (regulaciones y controles). Las aguas residuales industriales a menudo requieren procesos de tratamiento especializado.

La presencia en el agua de diversas sustancias sólidas, constituye la parte más importante y aparente de la contaminación. Debe eliminarse esta parte sólida para evitar gran número de inconvenientes, de los cuales los más importantes son la obstrucción de conducciones, abrasión de bombas, desgaste de materiales, etc., puesto que todo esto inciden en los costos de mantenimiento. El tamaño de las partículas contaminantes presentes en el agua es muy variado, hay sólidos que por su tamaño pueden observarse a simple vista en el agua y dejando la suspensión en reposo, se pueden separar bien por decantación bajo la influencia de la gravedad o bien por flotación, dependiendo de las densidades relativas del sólido respecto del agua. También resulta fácil separarlas por filtración.

Sin embargo, hay otras partículas muy finas de naturaleza coloidal que presentan una gran estabilidad en agua y que requieren de métodos y técnicas diferentes de depuración.

2.2. 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.

Este tipo de tratamiento consiste en:

- Remoción de sólidos.

- Remoción de arena.
- Precipitación con o sin ayuda de coagulantes o floculantes.
- Separación y filtración de sólidos.

El agregado de cloruro férrico ayuda a precipitar en gran parte fósforo y los biosólidos.

2.2.1. Coagulación, Floculación y Precipitación.

Las partículas que se encuentran en suspensión coloidal tienen un tamaño comprendido entre 0,001 y 1 μ y constituyen una parte importante de la contaminación, causa principal de la turbiedad del agua. Debido a la gran estabilidad que presentan, resulta imposible separarlas por decantación o flotación. Tampoco es posible separarlas por filtración porque pasarían a través de cualquier filtro. La causa de esta estabilidad es que estas partículas presentan cargas superficiales electrostáticas del mismo signo, que hace que existan fuerzas de repulsión entre ellas y les impida aglomerarse para sedimentar. Estas cargas son, en general negativas, aunque los hidróxidos de hierro y aluminio las suelen tener positivas. La estabilidad de los sistemas coloidales y el estado de dispersión de una sustancia sólida en un líquido depende de la constante dieléctrica del líquido; pues, el grado de asociación aumenta a medida que decrece la constante dieléctrica. Además la estabilidad de un sistema coloidal varía sensiblemente con la adición de pequeñas cantidades de electrolito ya que las partículas coloidales portan cargas eléctricas, las mismas que migran cuando están bajo la influencia de un campo eléctrico. De esta manera se establece que la capacidad coagulante de un electrolito depende de la carga del ión de signo opuesto a la que portan las partículas coloidales que constituyen una suspensión. Además hay que considerar que los sistemas coloidales formados por sustancias orgánicas como pectina en agua no son sensibles a la

adición de electrolitos sino más bien que depende del grado de solvatación de la fase dispersa.

2.2.1.1. Coagulación. Consiste en desestabilizar los coloides por neutralización de sus cargas, dando lugar a la formación de un floculo o precipitado. La coagulación de las partículas coloidales se consigue añadiéndole al agua un producto químico (electrolito) llamado coagulante, normalmente se utilizan las sales de hierro y aluminio. Se pueden considerar dos mecanismos básicos en este proceso:

a. Neutralización de la carga del coloide. El electrolito al solubilizarse en agua libera iones positivos con la suficiente densidad de carga para atraer a las partículas coloidales y neutralizar su carga. Se ha observado que el efecto aumenta marcadamente con el número de cargas del ión coagulante. Así pues, para materias coloidales con cargas negativas, los iones Ba y Mg, bivalentes, son en primera aproximación 30 veces más efectivos que el Na, monovalente; y a su vez, el Fe y Al, trivalentes, unas 30 veces superiores a los divalentes. Para los coloides con cargas positivas, la misma relación aproximada existe entre el ión cloruro, Cl⁻, monovalente, el sulfato, (SO₄)⁻², divalente, y el fosfato, (PO₄)⁻³, trivalente.

b. Inmersión en un precipitado o floculo de barrido.

Los coagulantes forman en el agua ciertos productos de baja solubilidad que precipitan. Las partículas coloidales sirven como núcleo de precipitación quedando inmersas dentro del precipitado.

Los factores que influyen en el proceso de coagulación son:

- El pH es un factor crítico en el proceso de coagulación. Siempre hay un intervalo de pH en el que un coagulante específico trabaja mejor, que coincide con el mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado.

Siempre que sea posible, la coagulación se debe efectuar dentro de esta zona óptima de pH, ya que de lo contrario se podría dar un desperdicio de productos químicos y un descenso del rendimiento de la planta de tratamiento.

Si el pH del agua no fuera el adecuado, se puede modificar mediante el uso de coadyuvantes o ayudantes de la coagulación, entre los que se encuentran:

- Cal viva.
 - Cal apagada.
 - Carbonato sódico.
 - Sosa Cáustica.
 - Ácidos minerales.
-
- Agitación rápida de la mezcla. Para que la coagulación sea óptima, es necesario que la neutralización de los coloides sea total antes de que comience a formarse el floculo o precipitado. Por lo tanto, al ser la neutralización de los coloides el principal objetivo que se pretende en el momento de la introducción del coagulante, es necesario que el reactivo empleado se difunda con la mayor rapidez posible, ya que el tiempo de coagulación es muy corto (1seg).

2.2.1.2. Floculación. Se refiere a 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. Básicamente, existen dos mecanismos por los que las partículas entran en contacto:

- Por el propio movimiento de las partículas (difusión browniana). En este caso se habla de Floculación peri cinética o por convección natural la cual es muy lenta.
- Por el movimiento del fluido que contiene a las partículas, que induce a un movimiento de éstas. Esto se consigue mediante agitación de la mezcla. A este mecanismo se le denomina Floculación orto cinética o por convección forzada.

Existen además ciertos productos químicos llamados floculantes que ayudan en el proceso de floculación. Un floculante actúa reuniendo las partículas individuales en aglomerados, aumentando la calidad del floculo (floculo más pesado y voluminoso).

Hay diversos factores que influyen en la floculación:

- Coagulación previa lo más perfecta posible.

- Agitación lenta y homogénea. La floculación es estimulada por una agitación lenta de la mezcla puesto que así se favorece la unión entre los flóculos. Un mezclado demasiado intenso no interesa porque rompería los flóculos ya formados:
- Temperatura del agua. La influencia principal de la temperatura en la floculación es su efecto sobre el tiempo requerido para una buena formación de flóculos. Generalmente, temperaturas bajas dificultan la clarificación del agua, por lo que se requieren periodos de floculación más largos o mayores dosis de floculante.
- Características del Agua. Un agua residual que contiene poca turbiedad coloidal es, frecuentemente, de floculación más difícil, ya que las partículas sólidas en suspensión actúan como núcleos para la formación inicial de flóculos.
- Tipos de Floculantes. Según su naturaleza, los floculantes pueden ser:
 - Minerales: por ejemplo la sílice activada. Se le ha considerado como el mejor floculante capaz de asociarse a las sales de aluminio. Se utiliza sobre todo en el tratamiento de agua potable.
 - Orgánicos: son macromoléculas de cadena larga y alto peso molecular, de origen natural o sintético.

Los floculantes orgánicos de origen natural se obtienen a partir de productos naturales como alginatos (extractos de algas), almidones (extractos de granos vegetales) y derivados de la celulosa. Su eficacia es relativamente pequeña.

Los de origen sintético, son macromoléculas de cadena larga, solubles en agua, conseguidas por asociación de monómeros simples sintéticos, alguno de los cuales poseen cargas eléctricas o grupos ionizables por lo que se le denominan poli electrolitos.

2.2.1.3. 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.

Los agentes de precipitación habitual son: cal, sosa cáustica y sulfuros. En la tabla 7 se recogen sus características:

Cal, $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Sosa Cáustica, NaOH	Sulfuros, NaSH y FeS
Reactivo más barato	Más cara que la cal	Tratamiento eficaz a bajas concentraciones
Genera grandes volúmenes de lodos	Genera menos volúmenes de lodos básicos	Lodo aplicable a la recuperación de suelos
Los lodos normalmente son aplicables a la recuperación de suelos	Lodo aplicable a la recuperación de suelos	

Tabla 7. Agentes de precipitación y sus características.

- Separación.- La separación de los sólidos que se han formado en el proceso coagulación-floculación, se logra mediante procesos convencionales o combinación de varios. Entre los principales están: Sedimentación por gravedad.

2.2.2. 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.

El proceso inverso de la adsorción es la desorción. Las características principales de la adsorción son:

- La adsorción es altamente selectiva. La cantidad adsorbida depende en gran medida de la naturaleza y del tratamiento previo al que se haya sometido a la superficie del adsorbente, así como de la naturaleza de la sustancia adsorbida. Al aumentar la superficie de adsorbente y la concentración de adsorbato, aumenta la cantidad adsorbida.
- Es un proceso rápido cuya velocidad aumenta cuando aumenta la temperatura, pero disminuye cuando aumenta la cantidad adsorbida.
- Dado que los procesos de adsorción son generalmente exotérmicos, al aumentar la temperatura disminuye la cantidad adsorbida.
- Son muchos los tipos de adsorción existentes (sólido-gas, sólido-líquido, líquido-gas...), pero esta práctica se ceñirá al estudio de la adsorción sólido-líquido. Los sólidos son capaces de adsorber uno o más componentes de una mezcla líquida, o bien el soluto o el disolvente de una solución.

La adsorción depende de la naturaleza y la estructura del adsorbente, de las propiedades fisicoquímicas del adsorbido y del medio en el cual la adsorción debe efectuarse.

El medio puede intervenir modificando las propiedades fisicoquímicas del adsorbente (solubilidad, carga superficial, carácter hidrófobo/hidrófilo, etc.), modificando la accesibilidad a los sitios de adsorción por recubrimiento de la superficie externa del adsorbente o introduciendo compuestos susceptibles de entrar en competición con la molécula cuya eliminación se busca.

Es el caso de las aguas naturales, que contienen numerosas sustancias orgánicas o minerales que pueden modificar la adsorción de una molécula específica.

2.2.3. 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.

Los procesos de reducción y precipitación de corrientes residuales que contienen cromo involucran una reducción del cromo hexavalente al estado trivalente en condiciones ácidas, $\text{pH} \leq 3$, empleando dióxido de azufre como agente reductor, seguida de una precipitación con cal, en condiciones básicas, con pH entre 8 y 9.

2.3. 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.

Los efluentes industriales con carga orgánica depurable por métodos biológicos, corresponden principalmente a industrias de carácter agroalimentario, aunque otras industrias como papeleras, farmacéuticas, industria textil que empleen como materia prima fibras naturales, también producen vertidos que pueden ser sometidos a estos tratamientos.

Los principales objetivos a alcanzar son:

- ✓ Eliminación de materia orgánica carbonosa.
- ✓ Reducción del contenido en nutrientes.
- ✓ Eliminación de sólidos suspendidos (coagulación).
- ✓ Estabilización de la materia orgánica.

Los mecanismos mediante los que se eliminan compuestos orgánicos en procesos biológicos son:

2.3.1 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.

2.3.2. Desorción biológica. Los compuestos orgánicos volátiles pueden resorberse por la agitación generada. Puede causar problemas de contaminación atmosférica.

2.3.3. 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. La eliminación de DBO ocurre en dos

etapas. Una rápida eliminación inicial de materia suspendida, coloidal y soluble, seguida de una eliminación más lenta de la DBO soluble remanente. La eliminación inicial puede producirse por:

- Eliminación de materia suspendida por atrapamiento dentro de floculo biológico. Mecanismo rápido que depende de la agitación.
- Eliminación de materia coloidal por adsorción físico-química en el floculo biológico.
- Adsorción biológica de la materia orgánica soluble. Puede ser un proceso enzimático o superficial.

Los procesos biológicos principales pueden ser de dos tipos:

2.3.3.1. Aerobios. Los más empleados son el de lodos activados y tratamientos de bajo costo: filtros percoladores, biodiscos, biocilindros, lechos de turba, filtros verdes y lagunaje (este sistema se puede considerar como “mixto”, ya que se dan tanto en procesos aerobios como anaerobios, dependiendo de la profundidad). En todos estos procesos, la materia orgánica se descompone convirtiéndose en dióxido de carbono, y en especies minerales oxidadas.

2.3.3.2. Anaerobios. La descomposición de la materia orgánica por las bacterias se realiza en ausencia de aire, utilizándose reactores cerrados; en un proceso anaerobio, la mayoría de las sustancias orgánicas se convierte en dióxido de carbono y metano. Los productos finales de la digestión anaerobia son el biogás (mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno), que se puede aprovechar

para la producción energética, y los lodos de digestión (compuestos no biodegradables y biomasa). Estos tratamientos tienen tres aplicaciones principales:

- Aguas residuales industriales con alta carga orgánica.
- Residuos ganaderos.
- Lodos de depuradora.

Los tratamientos biológicos engloban tanto el proceso de reacciones biológicas comentado, como la posterior separación de los fangos por decantación.

Entre las variables a controlar en estos procesos se encuentran la temperatura (en anaerobios esencialmente), oxígeno disuelto, el pH, nutrientes, sales y la presencia de inhibidores de las reacciones.

En plantas de tratamiento grandes suficiente la energía se puede generar de esta manera de producir más electricidad que las máquinas requieren. La generación del metano es una ventaja dominante del proceso anaeróbico. Su desventaja dominante es la de largo plazo requerido para el proceso (hasta 30 días) y el alto costo de capital.

2.3.4. Lagunajes. El tratamiento de lagunas proporciona el establecimiento necesario y fomenta la mejora biológica de almacenaje en charcos o lagunas artificiales. Estas lagunas son altamente aerobias y la colonización por los macrophytes nativos, especialmente cañas, se dan a menudo. Los invertebrados de alimentación del filtro pequeño tales como Daphnia y especies de Rotifera asisten grandemente al tratamiento removiendo partículas finas.

2.3.5. 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 amoniaco en nitrito y nitrato, y en última instancia a gas nitrógeno.

2.3.6. 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 agregada del carbón desprendiendo calor. Los procesos anaerobios y aerobios de la digestión pueden dar lugar a la destrucción de microorganismos y de parásitos causantes de enfermedades dejándolos en niveles suficiente para permitir que los sólidos digeridos que resultan sean aplicados con seguridad a la Tierra usada como material de la enmienda del suelo.

2.4. TRATAMIENTOS TERCEARIOS

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. Si la desinfección se practica siempre en el proceso final, es siempre llamada pulir el efluente.

2.4.1. 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.



Gráfico 4. Adsorción de partículas sólidas en carbón activo.

Los Carbones Activos (CA) presentan una gran capacidad de adsorción de un amplio rango de contaminantes, entre los que se incluyen: Compuestos aromáticos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, colorantes solubles, disolventes clorados, fenoles, y derivados de grupos hidroxilos. Son una opción ideal para su aplicación como tratamiento terciario, con vistas a la reutilización de las aguas.

También resultan muy eficaces en la eliminación de compuestos tóxicos que puedan hacer peligrar el funcionamiento del tratamiento biológico, mejorando, a su vez, su rendimiento.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante carbón activo son fáciles de implantar y mantener, ya que incluso se pueden incorporar a sistemas convencionales de depuración.

Entre los beneficios del sistema se encuentran: mayor estabilidad del sistema biológico frente a puntas de contaminación, eliminación de color y olor, reducción de amoníaco, mejora la nitrificación, incluso a temperaturas bajas, mejora en la sedimentación de los sólidos en aguas muy contaminadas, se puede implementar en un sistema de fangos activos con un coste mínimo.

2.4.2. 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. El agua turbia será tratada con menor éxito puesto que la materia sólida puede blindar organismos, especialmente de la luz ultravioleta o si los tiempos del contacto son bajos. Generalmente, tiempos de contacto cortos, dosis bajas y altos flujos influyen en contra de una desinfección eficaz. Los métodos comunes de desinfección incluyen el ozono, la clorina, o la luz UV. La Cloramina, que se utiliza para el agua potable, no se utiliza en el tratamiento de aguas residuales debido a su persistencia.

La desinfección con cloro sigue siendo la forma más común de desinfección de las aguas residuales en Norteamérica debido a su bajo historial de costo y del largo plazo de la eficacia. Una desventaja es que la desinfección con cloro del material orgánico residual puede generar compuestos orgánicamente clorados que pueden ser carcinógenos o dañinos al Ambiente.

La luz ultravioleta (UV) se está convirtiendo en el medio más común de la desinfección en el Reino Unido debido a las preocupaciones por los impactos de la clorina en el tratamiento de aguas residuales y en la clorinación orgánica en aguas receptoras. La radiación UV se utiliza para dañar la estructura genética de las bacterias, virus, y otros patógenos, haciéndolos incapaces de la reproducción. Las desventajas dominantes de la desinfección UV son la necesidad del mantenimiento y del reemplazo frecuentes de la lámpara y la necesidad de un efluente altamente tratado para asegurarse de que los microorganismos objetivo no están blindados de la radiación UV (es decir, cualquier sólido presente en el efluente tratado puede proteger microorganismos contra la luz UV).

El ozono O_3 es generado pasando el O_2 del oxígeno con un potencial de alto voltaje resultando un tercer átomo de oxígeno y que forma O_3 . El ozono es muy inestable y reactivo y oxida la mayoría del material orgánico con que entra en contacto, de tal manera que destruye muchos microorganismos causantes de enfermedades. El ozono se considera ser más seguro. La ozonización también produce pocos subproductos de la desinfección que la desinfección con cloro. Una desventaja de la desinfección del ozono es el alto costo del

equipo de la generación del ozono y que las habilidades de los operadores deben ser muy técnicas.

2.4.3. 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 (por ejemplo, crecimiento de algas). Las algas pueden producir toxinas, agotar el oxígeno en el agua, consecuentemente sofocar los pescados y la otra vida acuática. El retiro del nitrógeno o del fósforo de las aguas residuales se puede alcanzar mediante la precipitación química o biológica.

CAPÍTULO III

3. LA ELECTRÓLISIS

La Electrólisis es un proceso para separar un compuesto de los elementos que lo conforman, usando para ello la electricidad. La palabra Electrólisis viene de las raíces *electro*, electricidad y *lisis*, separación. Estos procesos se presentan en sistemas líquidos que pueden ser sales metálicas fundidas o disoluciones (generalmente acuosas) de ciertos compuestos, principalmente inorgánicos. Cuando se introducen sendos electrodos en dos puntos de un sistema homogéneo, provenientes de un generador puede suceder: que el líquido no conduzca la corriente por ser aislador, es el caso del agua pura, el alcohol, el aceite; otra posibilidad es que la corriente pase sin que se produzca ningún fenómeno nuevo, sin considerar incremento en la temperatura, en este caso es porque el líquido es un conductor como por ejemplo el mercurio; por ultimo al pasar la corriente se producen reacciones químicas en el líquido, que recibe el nombre de electrolito, esto ocurre en todas las soluciones acuosas de los ácidos, las bases, y sales fundidas en agua.

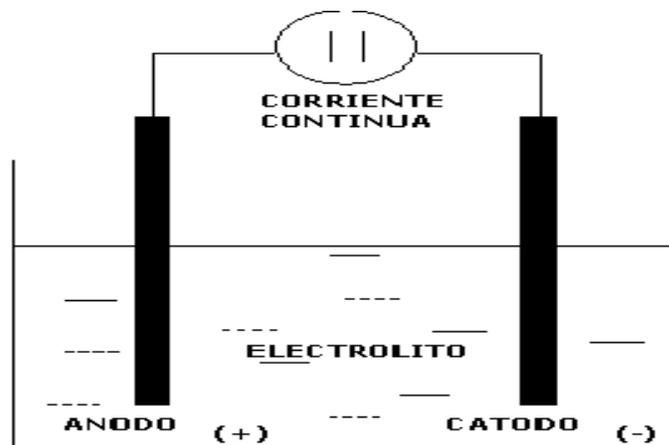


Gráfico 5. Reactor elemental de electrólisis.

Los electrodos sumergidos en un medio acuoso manteniendo una caída de potencia entre ellos, (reactor electrolítico) se producen fenómenos que consisten principalmente en el

transporte de carga eléctrica (paso de corriente con los efectos físico-químico inherentes) y transporte de materia con reacción química. El electrodo cargado negativamente se conoce como cátodo, y el cargado positivamente como ánodo.

Cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta. Así, los iones positivos, o cationes, son atraídos al cátodo, mientras que los iones negativos, o aniones, se desplazan hacia el ánodo. La energía necesaria para separar a los iones e incrementar su concentración en los electrodos, proviene de una fuente de potencia eléctrica que mantiene la diferencia de potencial en los electrodos. En algunos reactores de electrólisis, si el valor de la diferencia de potencial aplicada es tan sólo ligeramente mayor que el calculado teóricamente, la reacción es lenta o no se produce, por lo que resulta necesario aumentar el potencial aplicado. El potencial añadido en exceso se denomina potencial de sobretensión.

La cantidad de producto que se forma durante una electrólisis depende de:

- a.** La cantidad de electricidad que circula a través del reactor electrolítico.
- b.** De la masa equivalente de la sustancia que forma el electrolito.

Todos los cambios químicos implican una reagrupación o reajuste de los electrones en las sustancias que reaccionan; por eso puede decirse que dichos cambios son de carácter eléctrico. Para producir una corriente eléctrica a partir de una reacción química, es necesario tener un oxidante, es decir, una sustancia que gane electrones fácilmente, y un reductor, es decir, una sustancia que pierda electrones fácilmente.

3.1. IONIZACIÓN. HIPÓTESIS DE ARRHENIUS

Para explicar los fenómenos electroquímicos que se producen en los electrolitos, el Sr Arrhenius propuso las siguientes hipótesis que se conocen como la teoría de la disociación electrolítica o también como la teoría de los iones y que explica la química de las soluciones. La disolución o la fusión provocan ruptura molecular de los ácidos, bases y sales en iones o fragmentos electrizados que son de dos tipos. El fragmento positivo recibe el nombre de catión; el negativo, el de anión. Por ejemplo el cloruro de sodio (ClNa) disuelto en agua, se disocia o ioniza en un catión Na^+ y un anión Cl^- , los cationes están siempre formados por el hidrogeno de un acido o por el metal de una base o de una sal, el resto de la molécula forma los aniones.

Un catión de valencia n lleva una carga positiva equivalente a n veces la carga eléctrica de un electrón, a la que designaremos por e. Un anión de valencia n' lleva una carga negativa igual a n'e. La ionización de sulfato de cobre se escribe $Cu^{++} SO_4^-$.

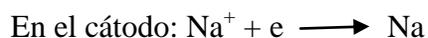
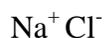
La carga eléctrica de los iones les confiere propiedades especiales y en particular aquellas de no poder actuar sobre las moléculas. Así el ion Na^+ no descompone el agua, en tanto que el sodio Na si la descompone.

3.2. MECANISMO DE LA ELECTRÓLISIS

Cuando una corriente eléctrica atraviesa el electrolito, los iones se desplazan en la solución. Los aniones se dirigen hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo, cuando estos están en movimiento no ejercen ninguna reacción química, pero cuando hacen contacto con los electrodos correspondientes, empieza la acción química, el anión toca el ánodo, abandona

sus cargas negativas y vuelve al estado de átomo; en el lado del cátodo sucede que el catión recibe una carga eléctrica e, la cual lo restablece como átomo. El electrón cedido por el cátodo es transportado al ánodo, lo cual asegura el pasaje de la corriente a través del electrolito. El conjunto de estos fenómenos constituye la reacción fundamental de la electrolisis.

Uno de los compuestos químicos usado con mayor frecuencia en las tintorerías de fibras celulósicas, es el cloruro de sodio (ClNa) que es precisamente el electrolito más usado. La electrolisis de cloruro de sodio fundido es:



En el ánodo se desprende el cloro, y en el cátodo aparece el sodio, sin embargo esta reacción fundamental se presenta generalmente turbada por reacciones secundarias, especialmente si el electrolito es una solución.

A continuación se muestra otros ejemplos.

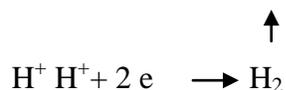
- Reacción de los iones sobre el disolvente (electrolisis del ácido sulfúrico H_2SO_4 en solución acuosa).

H_2SO_4 Se ioniza:

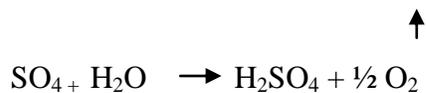


Reacción fundamental:





Reacción secundaria:



En definitiva el ácido se reconstituye, el hidrógeno aparece en el cátodo, y hay un desprendimiento de oxígeno en el ánodo, todo ocurre como si se descompusiese el agua.

- Descomposición de los iones, electrólisis de hidróxido de sodio (soda caustica) NaOH.

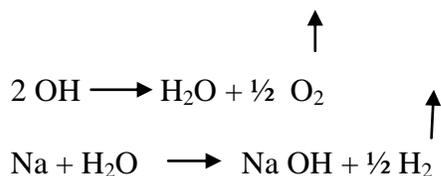
NaOH se disocia:



Reacción fundamental:



Reacciones secundaria:



En definitiva la sosa se recompone, y hay desprendimiento de hidrógeno en el cátodo y de oxígeno en el ánodo, otra vez, todo ocurre como si se descompusiese el agua.

- Reacción de los iones sobre los electrodos, Electrólisis de una solución de sulfato de cobre (CuSO₄) con electrodos de cobre.

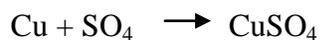
CuSO₄ se ioniza:



Reacción fundamental:



Reacción secundaria:



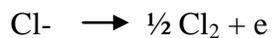
SO₄ reacciona con el cobre del ánodo y se compone en sulfato de cobre, todo ocurre como si el cobre fuera transportado del ánodo al cátodo y se califica el ánodo como soluble.

- Reacciones recíprocas de los productos, electrólisis del cloruro de sodio (ClNa) en disolución acuosa.

NaCl se ioniza:



Reacción fundamental:



Reacción secundaria:



El cloro reacciona con sosa y produce hipoclorito de sodio:



Con estos ejemplos se demuestra que en el curso de una sola electrólisis de un mismo reactor se puede obtener varias reacciones secundarias de diferente tipo.

Si se somete a electrólisis el cloruro de sodio, no se obtiene sodio sino hidrógeno.

Los iones presentes en la disolución resultan de las ionizaciones:



En el ánodo se desprende cloro:



En el cátodo se desprende hidrógeno:



Se desprende hidrógeno, porque el catión sodio tiene un potencial de reducción muy negativo (-2,71 V) y, por tanto, tiene mucha menos tendencia que el H^+ a tomar electrones.

Para evitar que reaccionen entre sí, el cloro y el hidrógeno obtenidos se separan, dentro de la cuba electrolítica, mediante un tabique poroso de asbesto. Este proceso permite, además de producir cloro e hidrógeno, la obtención de hidróxido de sodio (NaOH).

Al ir desprendiéndose cloro e hidrógeno, la disolución se empobrece en iones cloruro e hidrógeno. El agua está muy poco ionizada, pero al ir disminuyendo la concentración de cationes de hidrogeno (H^+), se obliga el equilibrio.



La evolución de izquierda a derecha genera iones hidróxido, que con el ion sodio forman el hidróxido de sodio.



La electrólisis del cloruro de sodio disuelto en agua es un proceso industrial que permite la obtención de cloro, hidrógeno e hidróxido de sodio.

3.3. LEYES DE LA ELECTRÓLISIS

Para entender los fenómenos que se dan en la electrólisis es importante estudiar los trabajos del Sr. Faraday acerca de los procesos electrolíticos, que están descritos en las dos leyes empíricas propuestas por él. La primera establece la proporcionalidad entre la masa de producto formado en la reacción y la cantidad de electricidad que ha atravesado el reactor; la segunda afirma que para la misma cantidad de electricidad las masas de los diferentes productos formados son proporcionales a los equivalentes químicos respectivos, entendiendo bajo esta ley, la razón del peso molecular a la valencia del átomo o radical que participa en la reacción.

Si se dispone en serie un circuito de tres reactores de agua acidulada, como indica la figura, se observa que los tres reactores, tienen electrodos de dimensiones diferentes; la concentración del ácido sulfúrico, varía de uno a otro y la temperatura también puede variar, sin embargo todos los volúmenes de hidrógeno resultante son iguales, de donde el Sr. Faraday concluye, que si la misma corriente atraviesa varios reactores diferentes, con un mismo electrolito, la cantidad de electrolito descompuesto en cada uno de ellos es siempre la misma.

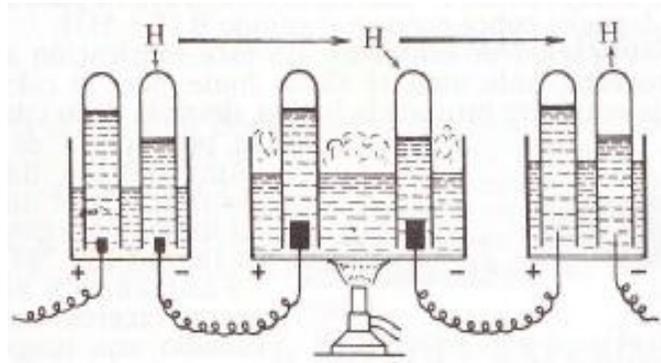


Gráfico 6. Primera ley de Faraday.

- La cantidad de electrones (electricidad) que circulan por un conductor se mide en culombios. El culombio es la cantidad de electricidad que al atravesar un voltámetro de nitrato de plata deja en libertad: $108/96500 = 1.118$ mg de plata. El amperio es la intensidad de una corriente continua que al atravesar un voltámetro de nitrato de plata deja en libertad 1.118 mg, de plata por segundo
- Si se dispone tres reactores , uno conectado al circuito principal y dos en paralelo unido en serie al otro; se comprueba que cuando una corriente se secciona (bifurca) la cantidad de electrolito descompuesto por la corriente principal es igual a la suma de las cantidades de electrolito descompuestas por las corrientes derivadas.

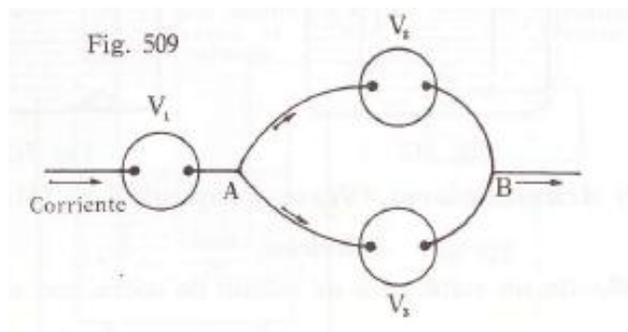


Gráfico 7. Segunda Ley de Faraday.

• Si se dispone en un circuito varios reactores que contienen: agua acidulada, una disolución de nitrato de plata una disolución de sulfato de cobre, una disolución de cloruro de oro y otra de cloruro de platino, la experiencia muestra que el volumen de hidrógeno que se desprende y las masas de los metales depositados en los respectivos cátodos durante el mismo tiempo, es decir utilizando la misma cantidad de corriente, muestra la siguiente relación: $H_2/2$; $Ag/1$; $Cu/2$; $Au/3$; $Pt/4$. Teniendo en cuenta la plata es monovalente, el cobre divalente, el oro trivalente y el platino tetravalente. Se observa que la cantidad de electricidad que deja en libertad en el caso de la plata 108 g, equivalente a 1 valencia-gramo; 63.5/2 g de cobre; 196/3g de oro y 194/4 g de platino todos equivalentes a una valencia-gramo, concluyendo que para la misma corriente que atraviesa varios electrolitos diferentes libera, en cada uno de ellos, el mismo número de valencias-gramos.

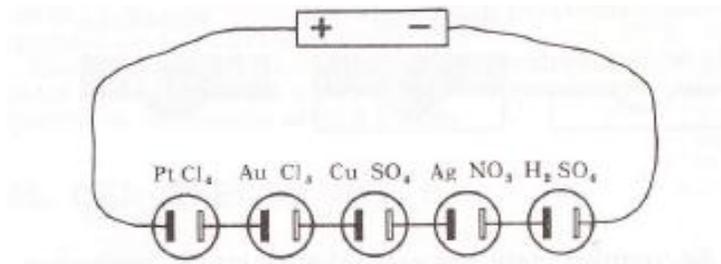


Gráfico 8. Tercera Ley de Faraday.

La valencia-gramo, como se enseña en los anteriores ejemplos es el cociente de la masa atómica por la valencia, lo que se expresa: A/n ; siendo A la masa atómica, y n la valencia del elemento. La masa de un producto liberado en un electrodo es proporcional a la cantidad de corriente (es decir: la intensidad de la corriente y la duración de la electrólisis) y la valencia-gramo del producto depositado:

$$m = K \frac{A}{n} It$$

El factor K depende de las unidades. Si se expresa I en amperios, t en segundos y $\frac{A}{n}$ en gramos, K es igual a 96500, de donde se escribe la ley de Faraday:

$$m = \frac{1}{96500} \frac{A}{n} I t$$

De donde se entiende que se necesita 96500 culombios para liberar una masa de iones igual a la valencia-gramo $\frac{A}{n}$. También se conoce al valor 96500C como un Faraday (F).

Para depositar el equivalente químico de cualquier elemento se necesita la misma cantidad de electricidad.

- Cuando una fuente fuerza a los electrones a circular por un conductor, se presenta una resistencia al flujo de corriente y se produce una caída de potencial. La resistencia eléctrica se mide en Ohm, y la diferencia de potencial en Voltios.

3.4. APLICACIONES DE LA ELECTRÓLISIS

Las aplicaciones que se le puede dar al a electrólisis es muy variada y se siguen consiguiendo cada día más utilidades, ya que combinada con otras tecnologías se ha logrado muchas mejoras, como es el caso de la galvanotecnia, electroquímica, en los acumuladores, que no es otra aplicación de la electroquímica, mas sin embargo, por la amplitud de la utilidad y de los estudios se la subdivide, la electro flotación, y la electrocoagulación, esto por mencionar algunas y las más importantes.

3.4.1. Galvanotecnia. Proceso electrolítico por el cual se deposita una capa fina de metal sobre una base generalmente metálica. Los objetos además se galvanizan para obtener una superficie dura o un acabado atractivo. Los metales que se utilizan normalmente en galvanotecnia son: cadmio, cinc, cromo, cobre, oro, níquel, plata y estaño. Las cuberterías plateadas, los accesorios cromados de automóvil y los recipientes de comida estañados son productos típicos de galvanotecnia.

En este proceso, el objeto que va a ser cubierto actúa como cátodo en un reactor electrolítica que contiene una solución de una sal del metal recubridor, y se conecta a un terminal negativo o cátodo una fuente de electricidad externa. Otro conductor, compuesto por el metal recubridor, se conecta al terminal positivo de la fuente de electricidad actuando como ánodo. Para el proceso es necesaria una corriente continua de bajo voltaje, normalmente de 1 a 6 V.

Cuando se pasa la corriente a través de la solución, los átomos del metal recubridor se depositan en el cátodo. Esos átomos son sustituidos en el baño por los del ánodo, si está compuesto por el mismo metal, como es el caso del cobre y la plata. Si no es así, se sustituyen añadiendo al baño periódicamente la sal correspondiente, como ocurre con el oro y el cromo. En cualquier caso, se mantiene un equilibrio entre el metal que sale y el metal que entra en la disolución hasta que el objeto está galvanizado. Los materiales no conductores pueden ser galvanizados si se cubren antes con un material conductor como el grafito. Los diseños de plástico para la electrotipia, y las matrices de los discos fonográficos se recubren de esta manera.

Para asegurar una cohesión estrecha entre el objeto a ser recubierto y el material recubridor, se debe pulir bien la pieza y limpiar el objeto a fondo, eliminando polvo, grasa y suciedad, ya sea sumergiéndolo en una solución ácida o básica, o bien utilizándolo como ánodo en un baño limpiador durante un instante, tan solo invirtiéndose la polaridad.

Para eliminar irregularidades en las depresiones de la placa y asegurar que la textura de su superficie es de buena calidad y propicia para el refinado, hay que controlar cuidadosamente la densidad de la intensidad de corriente ($d = I/A$, donde A es la superficie del cátodo), la concentración de la solución y la temperatura. Con frecuencia se añaden al baño ciertos coloides o compuestos especiales para mejorar la uniformidad de la superficie de la placa.

3.4.2. Electrometalurgia. Se refiere al conjunto de tecnologías que a más de la electricidad y otros factores por los cuales se obtiene reacciones químicas y/o físicas son empleadas para obtener o refinar metales. Los procesos de la electrometalurgia está basado por las leyes de la electrolisis. Los métodos electrolíticos son muy importantes para la obtención de metales muy activos como el sodio, ya que este no se puede obtener de soluciones acuosas, porque el agua se reduce con más facilidad que los iones metálicos.

3.4.3. Acumuladores, baterías y pilas. También podemos tipificarlos por algunas de sus características, como el hecho de ser sistemas simples (celda o elemento) o compuestos (baterías), o también por su capacidad para ser regenerados o "recargados" tras el agotamiento producido tras su uso (posible en los acumuladores pero no en las pilas

normales). Aunque no siempre se usan con propiedad estos términos, conviene especificar su significado y sus diferencias:

Célula, celda o elemento voltaico es una celda electroquímica primaria que puede generar una corriente eléctrica. Consta de dos semiceldas conectadas donde se realizan los procesos elementales de la oxidación (ánodo) y la reducción (cátodo), apareciendo entre ellos una diferencia de potencial de algunos voltios. Algunos ejemplos son la celda de Volta, la celda Daniell, la pila Bunsen, etc.

Pila eléctrica es cualquier dispositivo, generalmente pequeño, que convierte energía química en energía eléctrica por un proceso químico transitorio. Generan una corriente desde el primer momento sin necesidad de un proceso de "carga inicial", pero una vez agotadas, no admiten su reutilización. En sentido estricto, es un conjunto de varios elementos o celdas voltaicas, apilados verticalmente y conectados en serie para obtener una corriente de mayor voltaje, como la pila de Volta.

Batería es un conjunto de varios elementos o celdas voltaicos, agrupados horizontalmente y conectados en serie para obtener una corriente de mayor voltaje, como la batería de automóvil. A veces se usa este término como sinónimo de pila o de generador eléctrico.

Acumulador es una celda electroquímica secundaria que puede almacenar energía eléctrica para posteriormente generar una corriente eléctrica. Sus componentes son similares a los de las pilas pero inicialmente requieren un proceso de "carga" (hacer pasar una corriente a través de ella para generar las sustancias químicas capaces de hacerla funcionar durante la "descarga").

3.4.4. Electrocoagulación. Uno de los efectos producidos durante el proceso de la electrolisis es la coagulación. Este sistema tiene como protagonista principal un componente llamado “Reactor de Electrocoagulación”, la que está compuesta por electrodos inmersos en un dieléctrico y una fuente de poder de corriente continua.

El fundamento teórico de la electrocoagulación, consiste en que la precipitación se lleva a cabo al mismo tiempo que la desestabilización de coloides; en cambio la coagulación química, consiste en la formación de lodos debido a la unión de coloides formando masas de tamaño considerable, para luego separarlas del agua mediante la adición de más químicos como el sulfato de aluminio, cloruro férrico, entre otros que hace la función de floculante. Las masas de coloides se forman por el contacto entre los coloides, éste se logra principalmente por el movimiento del líquido, debido a fenómenos eléctricos, como la presencia de iones de carga opuesta a la de los coloides, acción del catión H^+ y otros.

Es importante mencionar que el agua está sometida a electrólisis, la cual se ve favorecida por la presencia de sales en disolución, como el cloruro de sodio, que posibilitan la conducción de electricidad y que están presentes en la mayoría de aguas residuales de la industria Textil que emplean colorantes que requieren de electrolito para la reacción química entre colorante y fibra. Debido a esto se produce un desprendimiento de hidrógeno y oxígeno gaseoso en sus respectivos electrodos. Estos gases al ascender a la superficie provocan tres fenómenos: Separación rápida de coloides del electrodo, evitando que se ensucie (limpieza), arrastre de coloides desestabilizados a la superficie formando una nata, posibilitando no sólo una extracción por sedimentación clásica, sino también, por flotación,

Debido a las burbujas de gas se producen corrientes ascendentes y descendentes de la solución ocasionando una mejor superficie de contacto, provocando así un aumento en la eficiencia de desestabilización. Esta agitación espontánea evita la agitación "mecánica", la cual es muy útil para la formación de los flóculos.

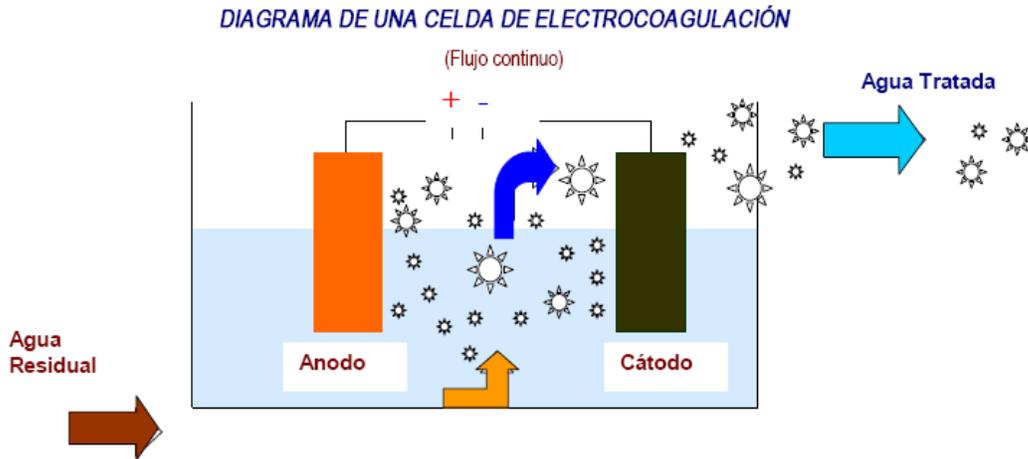


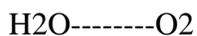
Gráfico 9. Proceso de electrocoagulación.

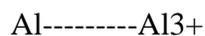
Con esto se logra el aprovechamiento del mejor coagulador, los electrones. Asociado al efecto físico que se genera por el desprendimiento de finísimas burbujas en la solución a tratar.

Los fenómenos que se producen con las descargas en los electrodos son de naturaleza electroquímica, química y física.

Desde el punto de vista químico, en el ánodo (electrodo positivo) se verifican principalmente y contemporáneamente las siguientes reacciones:

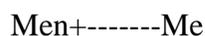
Oxidación electrolítica





En el cátodo se dan las siguientes reacciones:

Reducción electrolítica



Siendo Me^{n+} cualquiera de los posibles iones metálicos que se pueden reducir (Plomo, Cadmio, cobre, cinc, níquel, cromo, plata, oro, hierro, etc.) y depositarse en el cátodo siendo eliminados totalmente de la solución.

A este fenómeno que se desarrolla en los electrodos, le siguen una serie de reacciones químicas, cuya naturaleza depende de la composición de la solución a tratar, y que consisten principalmente en:

A) Procesos de oxidación-reducción particularmente en presencia de materia orgánica.

B) Procesos de coagulación y floculación, favorecidos por la precipitación de los hidróxidos de hierro y aluminio que se forman espontáneamente al pH de trabajo como consecuencia de la lenta disolución de los ánodos, que aportan a la solución los iones metálicos correspondientes.

También importante para el desarrollo del proceso de depuración, son los fenómenos sustancialmente físicos desencadenados por la formación de micro burbujas de gas (hidrógeno y oxígeno) que se generan en los electrodos.

Estas micro-burbujas, que obviamente son inicialmente moleculares, se adhieren a las minúsculas partículas contaminantes presentes en la solución a tratar, provocando un proceso de flotación que transporta a la superficie, en forma de espuma compacta, todas las sustancias contaminantes, que por su densidad, ó por sus reducidas dimensiones son difíciles de precipitar y permanecen en suspensión.

Hablamos de Electro-flotación para evidenciar que los micro-burbuja se generan electrolíticamente. La capacidad de flotación del sistema electrolítico con respecto a la flotación tradicional, en la que se inyecta aire, es mayor debido al tamaño de las burbujas, ya que con la flotación tradicional no se consiguen burbujas del tamaño suficientemente pequeño para garantizar una flotación eficaz.

PARTE PRÁCTICA

CAPÍTULO IV

4. MATERIALES Y ACCESORIOS

En este capítulo hago una descripción rápida de los materiales y su razón de uso, así como los accesorios y su utilidad.

4.1. MATERIALES

Los materiales empleados en su mayoría tienen una particularidad común que es la de ser aislante (no trasmite energía eléctrica), exceptuando por supuesto los electrodos de sacrificio, que son metálicos (hierro) igual que el cableado, a continuación se los describe.

4.1.1. Tanque reservorio. Reservorio de Efluente Liquido Residual a Tratar (ELRAT).

Se trata de un recipiente que contiene el ELRAT y que cuenta con una llave dosificadora para permitir su paso, ubicado por encima del reactor para que la circulación del ELRAT sea por acción de la gravedad. Es fundamental mantener el nivel del agua, para tener un caudal constante en el reactor, lo cual se lo hace de forma manual.



Foto 1. Tanque reservorio (El Autor)

El tratamiento del ELRAT en el presente estudio radica principalmente es el empleo de energía eléctrica, razón por la cual y con la finalidad de evitar fugas de esta es fundamental emplear materiales aislantes para el caso del sistema reservorio y que consiste o está constituido por un recipiente cilíndrico con una capacidad de 20 litros, la dosificación del ELRAT se lo hace por una llave de paso plástica señalada para una dosificación constante de caudal de 2 litros por minuto.

4.1.2. Tubería. Esta también está hecha en su totalidad en poliuretano, que también ha sido seleccionada por ser material aislante.

4.1.3. Reactor de Electrocoagulación. El reactor de electrocoagulación está compuesto de: una cuba trapezoidal, de los electrodos de sacrificio con su respectiva conexión de alimentación de energía eléctrica y del sistema de inyección del ELRAT.



Foto 2. Reactor de electrocoagulación. (El Autor)

4.1.3.1.Cuba trapezoidal. Es el recipiente del reactor, está hecha de poliuretano que es un material aislante, para evitar perdida de energía, y sobretodo mantener la individualidad de los electrodos, así como evitar filtraciones del ELRAT.

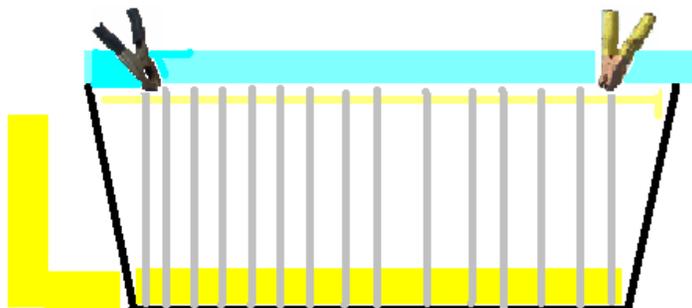


Gráfico 10: Diagrama esquemático del reactor de electrocoagulación y de los electrodos.

4.1.3.2. Electroodos de sacrificio. Son láminas de metal (hierro), que serán disueltas por el proceso de electrocoagulación ya que son estas las que proporcionan los iones necesarios para desestabilizar los coloides presentes en el ELRAT, considerando que los coagulantes que se emplea comúnmente en el proceso químico de coagulación son el aluminio y hierro, se ha dispuesto emplear laminas de estos dos metales para el estudio, además tomando en cuenta que son materiales que se puede conseguir fácilmente en el medio y que tienen un costo accesible. Los electrodos que son en un total de veinte y siete, se las dispone en forma paralela y están sujetadas por un eje de poliuretano, con separadores hechos del mismo material cuya función es mantener la individualidad de los electrodos.

4.1.3.3.Sistema de inyección de ELRAT. Es el dispositivo encargado de distribuir el ELRAT en el reactor de manera homogénea, hecho de poliuretano, con similar características que el material de la cuba, y es un tubo con orificios a lo largo, por donde ingresa el ELRAT al reactor. El tubo dosificador está considerado en esta parte con la

simple particularidad de los orificios direccionados a la base del reactor con la finalidad de producir choque y mejorar la homogeneidad de alimentación al sistema.

4.1.4. Rectificador de Corriente. La corriente debe ser continua, condición fundamental de la electrolisis para que se dé la circulación de iones unidireccionalmente. Como el que se muestra en la fotografía, el cual posibilita regulaciones independientes tanto de intensidad como de potencia, pues estos dos parámetros son fundamentales en el presente estudio ya que el rendimiento del proceso es proporcional a estas.

Con respecto a la intensidad, con el fin exclusivo de tener una medición directa, se ha instalado un control de medición en serie, el cual permite registrar los valores para las diferentes condiciones que se ha considerado. Este se lo puede observar en la foto número 4.

El rectificador de corriente de alterna a continua se lo adquiere con dos dispositivos fundamentales que son el control de intensidad y el de tención (controles de perilla) ya que son las dos variables determinantes para el presente estudio. En la siguiente fotografía se observa el rectificador con los dispositivos mencionados.



Foto3. Rectificador de corriente.

4.2. ACCESORIOS

A continuación se enumera los diferentes accesorios empleados en el estudio que han sido utilizados tanto para la medición de variables así como también para su control.

En cuanto a la parte eléctrica las variables medidas son la tención y la intensidad, para lo cual se usa un voltímetro y un amperímetro respectivamente los cuales se puede observar en las siguientes fotos.

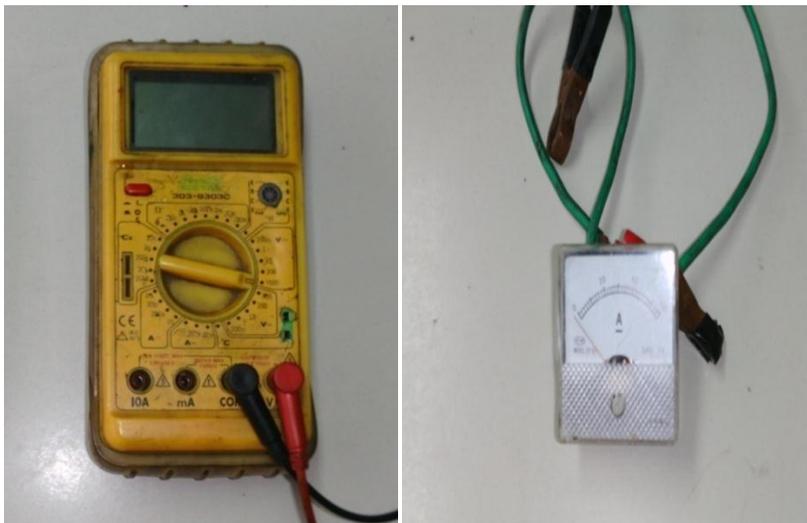


Foto 4. De izquierda a derecha multímetro y amperímetro.

Para la determinación del caudal, se ha empleado un cronometro pata medir el tiempo y en cuanto al volumen, se usa la regleta marcada en el recipiente reservorio, controlándose por la llave de dosificación hasta lograr un caudal constante para el estudio de 2 litros por minuto. En la foto se observa el cronometro usado.



Foto 5. Cronómetro.

La temperatura no es un parámetro fundamental en el presente estudio, mas sin embargo se lo ha medido, puesto que si presenta variaciones, que se pueden considerar como perdida de energía y que para control de eficiencia de uso de energía si debería ser considerado.



Foto 6. Termómetro.

El pH es un parámetro considerado porque para las descargas al medio receptor es tomado en cuenta y que en la actualidad la normativa dice que debe estar por debajo de 9 y por arriba de 4.5.



Foto 7.Peachímetro digital.

La conductividad es un parámetro necesario ser medido y para el efecto se usa el sensor que se muestra en la siguiente fotografía.



Foto 8.Sensor de conductividad.

Respecto de las variables tales como el DBO y el DQO ha sido necesario enviar a hacer las mediciones en el laboratorio de la Universidad Católica ya que no se dispone del equipo necesario para hacer estas mediciones.

CAPÍTULO V

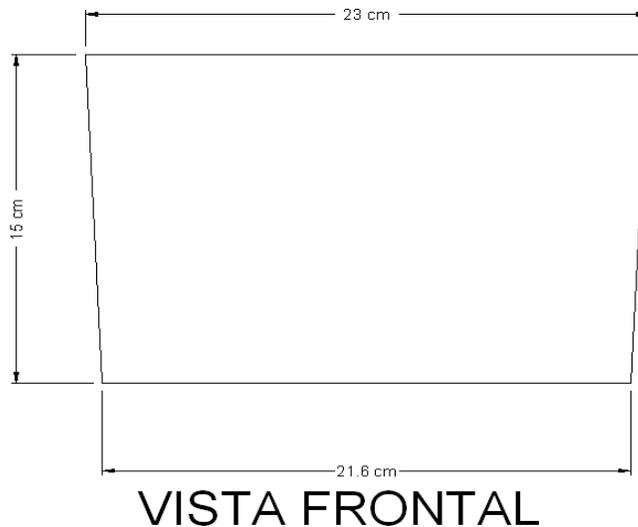
5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

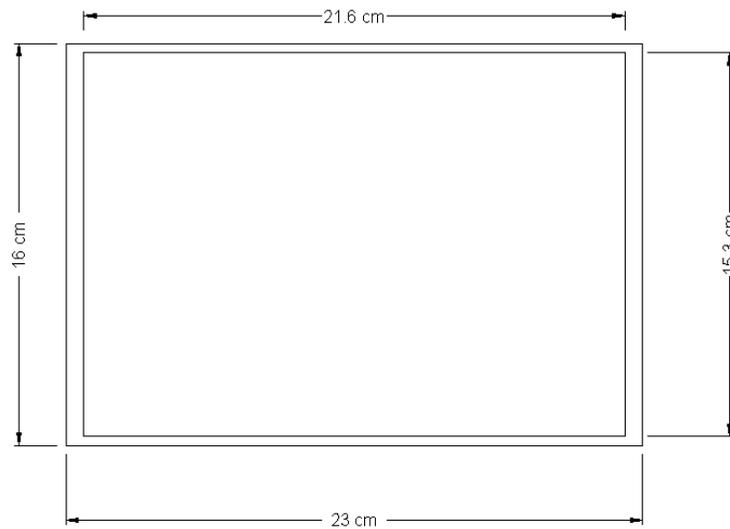
En el presente capítulo describo y expongo las dimensiones del reactor, las cuales han sido determinadas por el área que puedo utilizar para el estudio, los recursos disponibles, refiriéndome al recipiente que debe contener los electrodos y en función a este, los accesorios necesarios.

5.1. DE LA CELDA DEL REACTOR

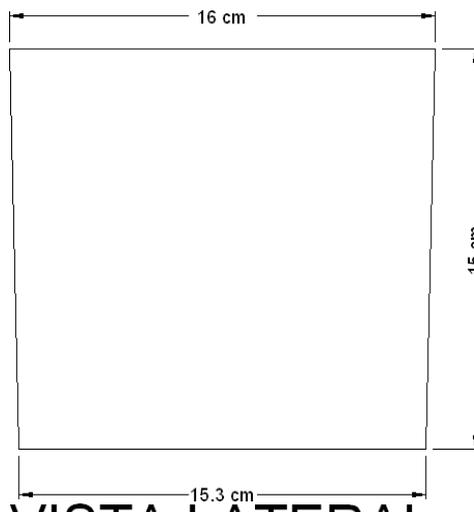
El reactor en si está conformado en primer lugar por el recipiente, el sistema de ingreso o alimentación del ELRAT, los electrodos y el sistema separador de estos.

5.2.1. Dimensiones de la Cuba. Las dimensiones del recipiente que contiene el reactor son: En la base; 21.6 cm de largo por 15.3 cm de ancho; en la parte superior tiene: 23 cm de largo y 16 cm de ancho y tiene 15 cm de alto.





VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL

5.2.2. Sistema de Alimentación. En cuanto al sistema de alimentación del ELRAT, este conformado por un cilindro hueco cuyas dimensiones son: 21 cm de largo, 0.2 cm de espesor, y un diámetro neto de 1.9 cm, los orificios por donde se distribuye el ELRAT son cada 0.67 cm. los cuales tienen 1.5 mm de diámetro.

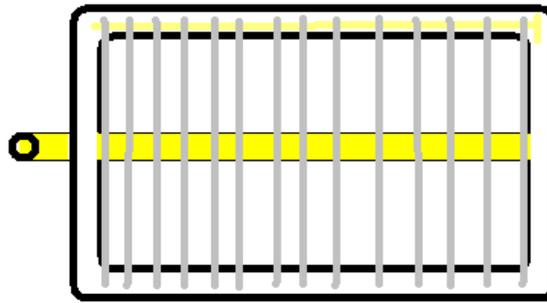
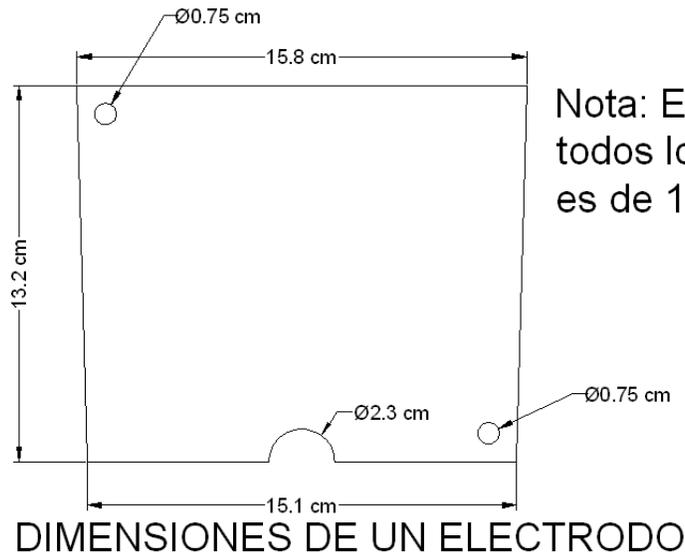


Gráfico 11. El reactor vista superior.

5.2.3. Los Electrodo. En su totalidad los electrodos con los que cuenta el electrocoagulador son veinte y siete y cada uno de estos tiene las siguientes dimensiones: 15.1 cm de largo en la base y 15.8 cm de largo en la parte superior, con una altura de 13.2 cm. En la parte media de la base tiene una hendidura con forma de semicírculo con un diámetro de 2.3 cm, el cual está diseñado para dar alojamiento al cilindro alimentador del ELRAT, en un extremo de la base se encuentra un orificio de 0.75 cm de diámetro y uno igual en la parte perpendicular superior, los cuales son atravesados por una barra de poliuretano cuyas dimensiones se indican en su parte correspondiente.



El área total de un electrodo es de 200.98 cm² más sin embargo el área útil expuesta a disolución es de 198.73 cm², a causa del aro separador que limita y no expone a disolución del esta parte del electrodo. Multiplicada por el total de electrodos que son veinte y siete, tenemos que es de 5365.6 cm², el espesor es de 1.7 mm. El peso de cada lamina es de 222.22 gramos.

5.2. DEL SISTEMA ELÉCTRICO

La electrocoagulación se basa en el flujo de electrones en una dirección lo que se logra exclusivamente con el paso de corriente continua, por lo cual es elemental un rectificador de corriente que ya se mencionó y describió en el capítulo anterior. La conexión eléctrica de los electrodos en el presente estudio se la hace de dos maneras:

La primera es haciendo un solo campo, lo cual se logra tomando como ánodo el electrodo extremo derecho y cátodo el izquierdo. Lo cual implica que los electrodos están conectados en serie y que el flujo de la energía es de ánodo a cátodo como se muestra en la figura.

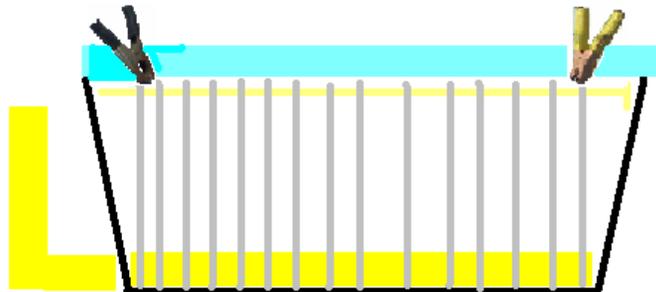


Gráfico 12. Conexión del electrocoagulador un solo campo.

La segunda se la hace dividiendo el total de electrodos en dos campos conectados entre si en paralelo, mientras que los electrodos entre si siguen conectados por el ELRAT en serie como se muestra en la figura.

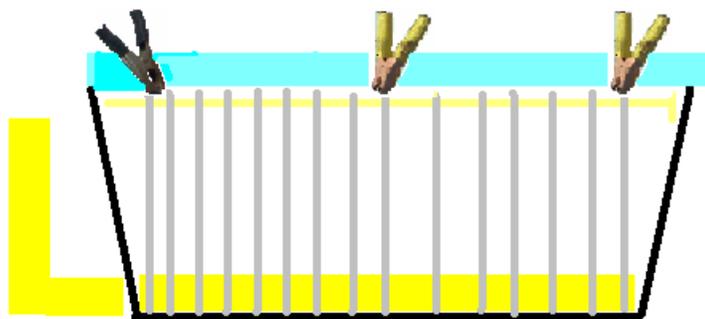


Gráfico 13. Conexión del electrocoagulador dos campos.

Con respecto a la conexión, los campos de reacción se los ha dispuesto en paralelo ya que de esta manera se alimenta la misma tensión y se puede incrementar la intensidad.

Para el estudio se experimentó con un campo total, y división en dos campos en paralelo, logrando un mejor resultado en el segundo caso como se analiza y concluye posteriormente.

5.3. SISTEMA DE ANCLAJE DE ELECTRODOS

La regla básica para el anclaje es que el material empleado con este fin debe ser de material aislante para lo cual se emplea dos barras de poliuretano que son las que sostienen los electrodos y con separadores en forma de aro que se intercalan entre los electrodos para mantener la separación. Estas barras con separadores deben ser lo menos gruesas posible porque reducen el área activa de los electrodos por tanto se emplea solo dos barras que están dispuestas la una en la parte inferior, en la base y la otra en el extremo superior opuesta, como se muestra en la fotografía número 9. Las dimensiones de las barras que sujetan los electrodos son: 0.74 cm de diámetro y 21 cm de largo cuya función es sujetar y separar los electrodos, para mantener la separación entre electrodos se logra intercalando en cada uno de estos un aro que también es atravesado por la barra de poliuretano, que está hecha en el mismo material del que también esta hecho el aro cuyas dimensiones son: diámetro interno hueco de 0.745 cm y el diámetro exterior de 1.6 cm.



Foto 9. Del sistema de anclaje y separación de electrodos.

5.3.1. Número de Electrodos. La presencia de más o menos electrodos determinara la mayor o menor presencia de iones que puedan desestabilizar el ELRAT, mas no por esto pondremos mayor número de electrodos, ya que al aumentar su número disminuiremos la distancia entre estos, ocasionando atascamientos por las deposiciones de compuestos en estos, que dificultaran el paso de la corriente, limitaran el espacio para una correcta agitación (auto agitación producto de la circulación de iones), por lo mencionado haciendo diferentes experimentaciones preliminares observando la agitación del ELRAT, se determinó que la distancia entre electrodos más óptima es de 0.57 cm.

El número de electrodos empleados en este reactor está dado por la siguiente expresión:

$$\text{Número de electrodos} = \frac{\text{Ancho del reactor} - 1.6 \text{ cm}}{\text{Distancia entre electrodos} + \text{espesor de electrodo}}$$

$$\text{Número de electrodos} = \frac{21.6 \text{ cm} - 1.6 \text{ cm}}{0.57 \text{ m} + 0.17 \text{ cm}} = 27$$

5.4. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO

En el esquema se puede diferenciar las siguientes partes constitutivas del sistema de electrocoagulación: el depósito de alimentación de ELRAT, la bomba dosificadora, el reactor con los electrodos la conexión eléctrica con sus respectivo dispositivo de medición de corriente, y el rectificador de corriente.

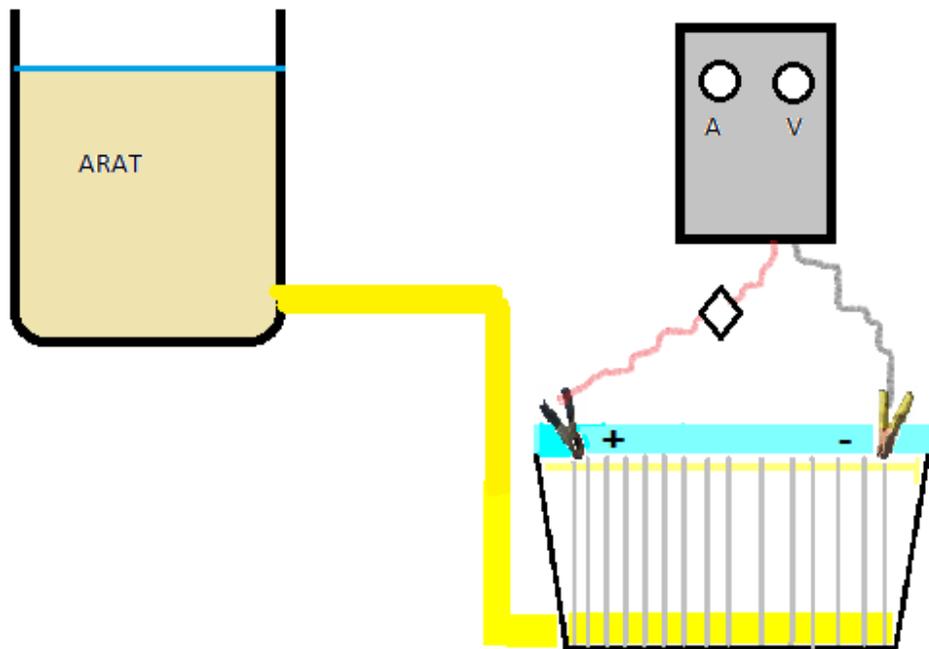


Gráfico14. Esquema del sistema de electrocoagulación.

CAPÍTULO VI

6. LA ELECTROCOAGULACIÓN

La coagulación se produce en esta etapa, específicamente al interior del reactor de electrocoagulación con la desestabilización y coagulación simultánea de los coloides, producto de la aplicación de una diferencia de potencial, a través de electrodos (cátodo/ánodo) de Hierro sumergidos en un Electrolito y conectados a una fuente de poder, el que se unirá por enlaces iónicos a los coloides cargados opuestamente. En un principio la suspensión coloidal se mantiene porque la carga eléctrica de cada uno de los coloides es igual produciendo la repelencia, pero el momento que hay circulación de energía por medio



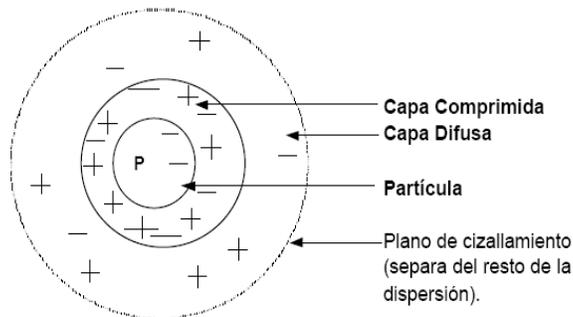
Foto 10.El reactor dándose la electrocoagulación. (El Autor)

de los iones liberados en el cátodo, la polaridad de los coloides que tienen contacto con los iones cambia o se reordena haciendo que la repelencia en estos cambie en el mismo momento de la circulación de energía, y al tener polaridad opuesta entre los coloides estos se agrupan formando complejos de partículas o también llamada coagulación, y por ser ocasionada por medios eléctricos se la llama electrocoagulación.

6.1. FENÓMENOS DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

Los fenómenos que se producen con la circulación de corriente continua en los electrodos son de naturaleza física, química y electroquímica. La energía empleada debe ser continua (justificándose el empleo de un rectificador de corriente) ya que de esta manera se garantiza el flujo en una sola dirección de los aniones y de los cationes respectivamente, condición fundamental para que se dé la coagulación.

6.1.1. Naturaleza Física. También importante para el desarrollo del proceso de depuración, son los fenómenos sustancialmente físicos. Dentro del ELRAT, las partículas coloidales son las causantes de la turbiedad y el color, por lo que el tratamiento del agua está orientado a la remoción de estas partículas; estas poseen una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie.



Doble Capa de Una Partícula coloidal.

Gráfico15. Doble capa de una partícula coloidal.

Estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que constituye la denominada capa comprimida y esta a su vez atrae a sus alrededores iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos constituyendo la denominada capa difusa. El objetivo principal es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión para

favorecer su aglomeración a través de la coagulación; en consecuencia se eliminan las materias en suspensión estables, esto no solo eliminan la turbiedad sino también la concentración de materias orgánicas y los microorganismos. Las cargas eléctricas de la superficie del coloide se acumulan permitiendo que se aglomeren formando flocs. La coagulación se debe a la desestabilización que se obtiene por los siguientes mecanismos:

- Comprensión de la doble capa
- Absorción y neutralización de las cargas
- Agrupamientos de partículas en un precipitado
- Absorción y puente.

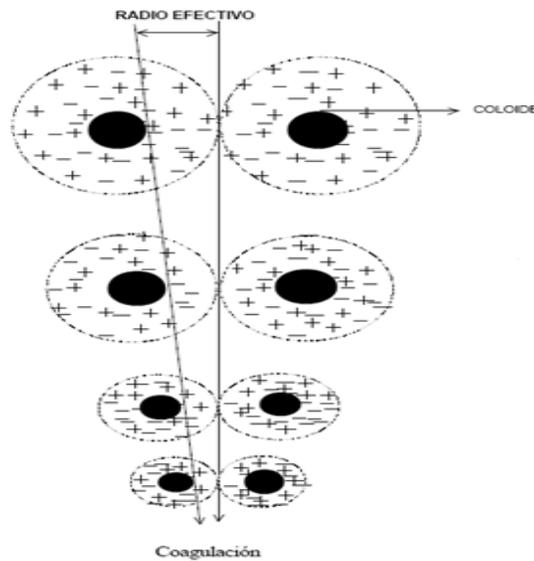


Gráfico 16. Acción de la coagulación

Las partículas coloidales están sometidas a dos grandes fuerzas que determinan la estabilidad e inestabilidad de estas:

- Fuerza de atracción de VAN DER WAALS (E_a) son fuerzas de atracción producidas por el movimiento continuo de las partículas.

- Fuerzas de repulsión electrostáticas (E_b) son fuerzas que impiden la aglomeración de las partículas cuando estas se acercan una a otras; por ejemplo dos partículas de igual signo no se pueden aproximar, estas se rechazan.

El equilibrio de una suspensión coloidal depende de la fuerza resultante entre la fuerza de atracción y la fuerza de repulsión (E_r)

$$E_r = E_a + E_b$$

Cuando se aproximan dos partículas sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuestas al de las partículas (Fe^{3+}), esto se consigue solo con los iones del electrodo de sacrificio. Existen por otro lado un potencial de atracción o fuerza E_a (Fuerzas de Van Der Waals) que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de esta.

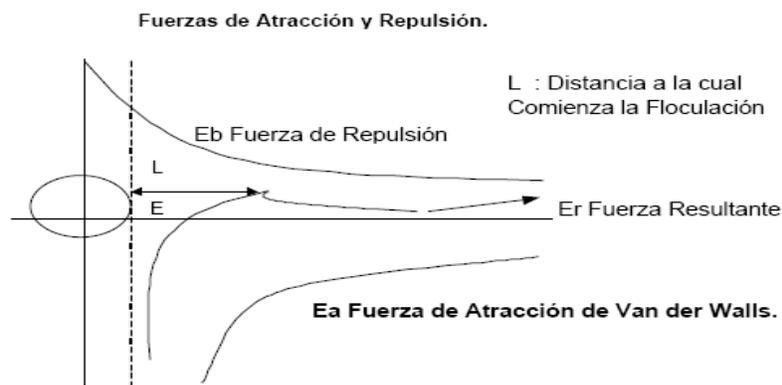


Gráfico 17. Fuerzas de atracción de Van Der Walls

Si la distancia que separa las partículas en suspensión es “L”, entonces las partículas no se atraen, “E” es la energía que los mantiene separados.

La formación de micro burbujas de gas (hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo) que se generan en los electrodos, son inicialmente moleculares, se adhieren a las minúsculas

partículas contaminantes presentes en la solución a tratar, provocando un proceso de flotación que transporta a la superficie, en forma de espuma compacta, todas las sustancias contaminantes, que por su densidad, o por sus reducidas dimensiones son difíciles de precipitar y permanecen en suspensión.

Con la electrólisis del ELRAT y la generación de hidrógeno y oxígeno en su respectivo electrodo se facilita la separación de fases (clarificado – lodo), es decir, no sólo permite la extracción por sedimentación clásica, sino también, por flotación, debido a que los coágulos se saturan de gases provenientes del proceso de electrólisis. La capacidad de flotación del sistema electrolítico con respecto a la flotación tradicional, en la que se inyecta aire, es mayor debido al tamaño de las burbujas, ya que con la flotación tradicional no se consiguen burbujas del tamaño suficientemente pequeño para garantizar una flotación eficaz siendo esta una ventaja determinante en el proceso depuratorio propuesto.

Al interior de la celda se favorece la mezcla del electrolito desestabilizado, ya que, por la presencia de los gases generados en la electrólisis, se producen corrientes ascendentes y descendentes de la solución, ocasionando una mayor probabilidad de contacto entre los coágulos formados. En algunos casos, esta agitación espontánea puede remplazar una agitación mecánica.

La reacción se da por la circulación del ELRAT por entre las láminas energizadas, y la dinámica del líquido en la cuba del reactor es por gravedad y la salida del agua se da por reboce.

1. Separación rápida de coloides del electrodo, evitando que se ensucie (limpieza).

2. Arrastre de coloides desestabilizados a la superficie formando una nata, posibilitando no sólo una extracción por sedimentación clásica, sino también, por flotación (elección de extracción).

3. Debido a las burbujas de gas se producen corrientes ascendentes y descendentes de la solución ocasionando una mejor superficie de contacto, provocando así un aumento en la eficiencia de desestabilización. Esta agitación "espontánea" evita la agitación "mecánica".

También importante para el desarrollo del proceso de depuración, son los fenómenos sustancialmente físicos desencadenados por la formación de micro burbujas de gas (hidrógeno y oxígeno) que se generan en los electrodos.



Foto 11. Generación de espuma en la electrocoagulación (El Autor).

Estas micro-burbujas, que obviamente son inicialmente moleculares, se adhieren a las minúsculas partículas contaminantes presentes en la solución a tratar, provocando un proceso de flotación que transporta a la superficie, en forma de espuma compacta, todas las sustancias contaminantes, que por su densidad, ó por sus reducidas dimensiones son difíciles de precipitar y permanecen en suspensión.

Los coágulos se forman por el contacto entre los coloides que anteriormente se mantenían en suspensión coloidal por su tamaño y por su carga eléctrica igual, sin embargo al reordenarse sus cargas eléctricas (su polaridad) la atracción entre coloides es posible ya que unos tendrán polaridad opuesta, que implica atracción y por tanto la ya mencionada formación de coágulos, éste se logra principalmente por el movimiento del líquido, debido a fenómenos eléctricos, como la presencia de iones de carga opuesta a la de los coloides, acción de hidrógenos.

Se debe maximizar la transferencia de masa entre electrodos. El transporte de masa se puede incrementar aumentando la turbulencia de la solución en el reactor. Las burbujas gaseosas de oxígeno e hidrógeno que se forman alrededor de los electrodos son de forma esférica y a medida que se acumulan en la superficie de los electrodos se incrementa la resistencia eléctrica de la celda y como resultado de esto se requiere mayor cantidad de energía para lograr eficiencia de remoción; para minimizar esta acumulación de las burbujas se puede emplear vibraciones. Hablamos de Electro flotación para evidenciar que los micro-burbuja se generan electrolíticamente.

6.1.2. Naturaleza Química y Electroquímica. El paso de la energía en un medio acuoso (que está determinado su conductividad por la presencia de sales, cloruro de sodio en el caso particular del presente estudio) está dado por el transporte de materia con reacciones químicas.

En el ARAT están presentes dos electrolitos comunes en todo tipo de agua producto de la disociación de esta, que son el ion hidrógeno (H^+) y el hidroxilo (OH^-).



Por lo anterior la electrolisis del agua conduce a la obtención de hidrogeno y oxígeno, el uno anódico y el otro catódico. El proceso anódico, tiene lugar por supuesto en el ánodo, que es al electrodo positivo que se dirigen los iones negativos (aniones), lugar donde se produce la oxidación de los hidroxilos, como se muestra a continuación.



En cuanto al proceso catódico tiene lugar en el electrodo negativo (cátodo), que es donde se produce la reducción de los iones de hidrógeno.



El proceso total será la suma de ambos de donde se concluye que por cada dos moléculas de agua se obtiene una molécula de oxígeno y dos de hidrogeno.



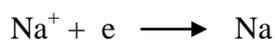
A este fenómeno que se desarrolla en los electrodos, le siguen una serie de reacciones químicas, cuya naturaleza depende de la composición del ELRAT, y el agua a tratar e la empresa donde se realiza el estudio emplea colorantes reactivos y el electrolito usado es el cloruro de sodio ($NaCl$) una de las reacciones que se dan es la que se describe a continuación:

$NaCl$ se ioniza:

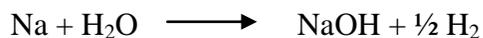


La reacción fundamental producto de la ionización es:





Consecuentemente se da una reacción secundaria que es evidente en las caracterizaciones del ARAT en el aspecto de aumento del pH, producto de la formación de hidróxido de sodio:



Mas sin embargo el incremento del pH no es verdaderamente significativo por el hecho de la formación de hipoclorito de sodio.



- A) Procesos de oxidación-reducción particularmente en presencia de materia orgánica.
- B) Procesos de coagulación y floculación, favorecidos por la precipitación de los hidróxidos de hierro que se forman espontáneamente al pH de trabajo como consecuencia de la lenta disolución de los ánodos, que aportan a la solución los iones metálicos correspondientes.

Es importante mencionar que el agua está sometida a una electrólisis, la cual se ve favorecida por la presencia de sales en disolución, que posibilitan la conducción de electricidad y que están presentes en el ELRAT.

La diferencia de potencial aplicada a los electrodos depende del electrolito que en el caso del presente estudio es muy rico en cloruro de sodio puesto que este es el electrolito que se emplea para que se de la reacción entre el colorante reactivo y la celulosa. El otro factor que influye para la diferencia de potencia aplicada es el material que constituye los electrodos y que el estudio se puntualiza específicamente para electrodos de hierro, la analogía que se considera para esta elección es que los átomos de hierro que tienen contacto

y relación con los coágulos formados son más pesados que los que se forman al emplear electrodos de aluminio, los cuales fueron considerados en un principio, mas sin embargo las experimentaciones preliminares fueron contundentes al obtener mejores resultados con el hierro, por lo cual se descartó en primer plano el empleo de láminas de aluminio como electrodos para la reacción.

En definitiva lo que ha ocurrido es una reacción de oxidación-reducción, donde la fuente de alimentación eléctrica ha sido la encargada de aportar la energía necesaria. Las reacciones de oxidación-reducción son aquellas reacciones químicas en las cuales un átomo se oxida y otro se reduce. La cantidad de electrones perdidos (Átomos que se oxidan) es igual a la cantidad de electrones ganados (Átomos que se reducen). Para determinar cuál es el átomo que se oxida y cuál es el que se reduce, se utiliza lo que se conoce como número de oxidación. El agua tratada contiene otras partículas: en primer lugar las empleadas para teñir el poliéster y en una mayor cantidad las empleadas para teñir el algodón al producirse la electrólisis no sólo separa el Oxígeno y el Hidrógeno, sino los demás componentes que estén presentes como sales, metales y algunos otros minerales.

6.2. ANÁLISIS DE FUNCIÓN DE VARIABLES

Las condiciones de operación de un sistema de electrocoagulación son altamente dependientes de las condiciones químicas, pH, tamaño de partículas del agua a tratar y especialmente de su conductividad. El tratamiento general de las aguas residuales requiere aplicaciones baja de voltaje (<60 Volts) con amperaje variable, de acuerdo a las características químicas del agua. Con respecto al pH, este es un parámetro que es regulado

y debe estar entre 4.5 y 9, en el caso de Industrial Textiles Tornasol, el pH del ELRAT se mantiene en 10.5, por lo cual es necesario neutralizarlo incluso antes de la electrocoagulación porque esta afecta en el deterioro de los electrodos.

Sobre la conductividad se ha notado que cuando es más conductora (mayor cantidad de material ionizable) el ELRAT, se tiene un incremento de la intensidad, manteniendo la misma tensión, en el caso de agua en estudio tiene una conductividad promedio de 1900 mS/cm (micro siemens por centímetro).

Sobre la temperatura se debe hacer notar que después del tratamiento del ELRAT por electrocoagulación se tiene un incremento de 1.5 grados centígrados. El consumo de agua promedio que se maneja en la planta está entre 56 litros por kilogramo producido.

La tensión es dependiente de la densidad de corriente, de la conductividad del agua a tratar, de la distancia entre electrodos y del estado de la superficie de los mismos. El voltaje entre electrodos es independiente del pH si el agua tratada no se aleja mucho de un valor de pH de 7. El voltaje puede minimizarse decreciendo la distancia entre electrodos e incrementando su área de sección transversal y la conductividad específica de la solución.

Con respecto a la densidad de corriente, mientras mayor sea la densidad de corriente aplicada mayor será la producción de burbujas en los electrodos.

La distancia entre electrodos debe ser la mínima, puesto que incide directamente en el consumo de energía, y sin embargo no se los debe juntar mucho porque esto limita la auto agitación producto de la propia generación de burbujas de hidrogeno y oxigeno, así como

de las reposiciones de hidróxido de sodio en las caras de los electrodos, lo que con el transcurso del tiempo de reacción aumenta su presencia limitando y dificultando el flujo de iones, por lo que es necesario la variación del sentido de la corriente para producir una auto limpieza de electrodos.

6.2.1 Consumo de Energía. La tención más alta empleada en las diferentes experimentaciones dinámicas es de sesenta y cinco voltios (65 V), y la intensidad más alta registrada es de diez amperios (10 A). En un proceso dinámico, es decir al tener presencia de caudal constante, se mantiene la misma resistencia del ELRAT, mas sin embargo se puede tener variaciones a largo plazo (más de 48 horas) ya que depende de la planificación de la producción y del empleo de electrolito en los colores, tipo de colorantes e intensidades de color tinturados en la planta.

Se debe tener en cuenta que una diferencia de potencial mayor se requiere para un mismo flujo de corriente cuando se realiza el arreglo en serie, porque las celdas conectadas en serie tienen una mayor resistencia mientras que en un arreglo en paralelo la corriente eléctrica se divide entre los electrodos de manera proporcional a la resistencia de la celda individual.

En el caso de la formación de un solo campo electrolítico se tiene una tensión entre electrodos de 2.31 V.

CAPÍTULO VII

7. EXPERIMENTOS

Si con la electrocoagulación se logra disminuciones significativas de los valores iniciales del ELRAT de la empresa Industrial Textiles Tornasol Cía. Ltda., es factible el uso de esta tecnología para el tratamiento de su agua residual, por lo que, en un principio se propone un ensayo de electrocoagulación Bach, el objetivo de este ensayo es determinar la factibilidad de la electrocoagulación como medio depuratorio y segundo determinar su alcance. Un segundo paso del diseño de experimentos es un ensayo dinámico, es decir con circulación continua (caudal) y constante del ELRAT por el electrocoagulador, para determinar constantes que ayuden a determinar dimensionar el reactor de la planta.

La tabla que a continuación se expone indica las condiciones del ELRAT de la planta

PARÁMETROS DE DESCARGA	unidad	Promedio anual
Demanda Bioquímica De Oxígeno (DBO) ₅	mg/l	313
Demanda Química De Oxígeno (DQO)	mg/l	480
Sólidos Suspendidos	mg/l	84,0
CONTAMINANTES ASOCIADOS A DESCARGAS LÍQUIDAS		
Aceites y grasas	mg/l	6.46
Cadmio	mg/l	<0,02
Cobre	mg/l	<0,05
Cromo hexavalente	mg/l	<0,04
Color real	unidades de color	9550.0
Mercurio total	mg/l	<0,5

Níquel	mg/l	<0,15
Plomo	mg/l	<0,32
Potencial de hidrógeno	mg/l	9.24
Sólidos sedimentables	mg/l	0.4
Tensoactivos	mg/l	0,915
Zinc	mg/l	0,1

Tabla 8. Características físico-químicas de las descargas líquidas.

Esta caracterización es del ELRAT que es la base, o el agua original sin tratar, que fue sometida a las diferentes experiencias que a continuación se describen. Un antecedente notorio a considerar de las caracterizaciones del agua efluente de la empresa patrocinadora es su biodegradabilidad es baja ($DBO_5/DQO: 0.652$), considerando la caracterización inicial, la misma que será la base de los siguientes ensayos, esta alta biodegradabilidad es debido principalmente por la alta presencia de partículas de celulosa, material que es tinturado en esta planta. Los ensayos preliminares permitieron concluir que el hacer todos los electrodos en hierro es mejor que en aluminio, por lo que todos los ensayos a continuación descritos están hechos con electrodos de hierro. La siguiente tabla indica las condiciones iniciales tanto del agua como del sistema.

CONDICIÓN INICIAL			
PARÁMETRO MEDIDO	DIMENSIONES	unidades	VALOR
Material de electrodos	hierro		
Número de electrodos			27
Potencial hidrógeno	pH	pH	9,5
Temperatura	grados centígrados	°C	45

Tabla 9. Condición inicial del ELRAT.

El ELRAT, es neutralizado antes de los ensayos de electrocoagulación llegando a un potencial de hidrogeno de 7.5 con el que empiezan todos, pues es el mismo ELRAT.

7.1. ENSAYO BACH

En este ensayo se tiene una constante fundamental y es el tiempo de residencia del ELRAT en el reactor, el tiempo que se dejara determinado para el ensayo es de tres minutos. Con la caracterización inicial del ELRAT, y la caracterización posterior o final, y haciendo una comparación determinaremos el alcance del proceso como medio depuratorio. Las variables a considerar son las mismas que se consideran en una legislación ambiental como son el DBO, el DQO, pH, temperatura y sólidos suspendidos.

PARÁMETRO MEDIDO	DIMENSIONES	unidades	VALOR INICIAL	VALOR FINAL
Número de electrodos			27	-
Potencial hidrógeno	pH	pH	6	7
Temperatura	grados centígrados	°C	45	46
Tensión	voltios	V	64	65
Intensidad	amperios	A	3	2
DBO ₅	miligramos/litro	mg/l	313	110
DQO	miligramos/litro	mg/l	480	291
Sólidos suspendidos	miligramos/litro	mg/l	84	68

Tabla 10. Caracterización ensayo Bach.

Al hacer la experimentación, una de las principales variaciones de condiciones observadas es la caída de la intensidad y aumento de la tensión, bajas pero notorias, esto producto de la perdida de conductividad del ELR, a medida que transcurre el tiempo.

El porcentaje de remoción en este ensayo se indica en la siguiente tabla.

PARAMETRO	%
DBO ₅	64,86
DQO	39,38
Sólidos suspendidos	19,05

Tabla 11. Descripción porcentual de remoción Bach.

Este ensayo Bach es disponiendo tan solo de un asolo sistema tomando los electrodos de los extremos para la conexión eléctrica como se muestra en la grafica del primer ensayo dinámico.

7.2. ENSAYOS DINÁMICOS

Los volúmenes de consumo de agua en una industria textil que cuente con tintorería son altos, y consecuentemente sus descargas de efluente líquido residual también lo son, por lo que es necesario analizar métodos dinámicos de tratamiento de este, por lo que en los siguientes ensayos se trabaja con un caudal de dos litros por minuto (2 L/min).

De ensayos preliminares se notó variación de intensidad con caídas de tensión al seccionar en campos el sistema de electrodos, por lo cual se ha considerado conexiones variadas.

7.2.1. Ensayo uno. En una primera instancia se considera la toma de un ánodo y un cátodo de todo el sistema de láminas ubicadas a los extremos como se muestra en el esquema grafico a continuación. El caudal es el ya indicado de dos litros por minuto.

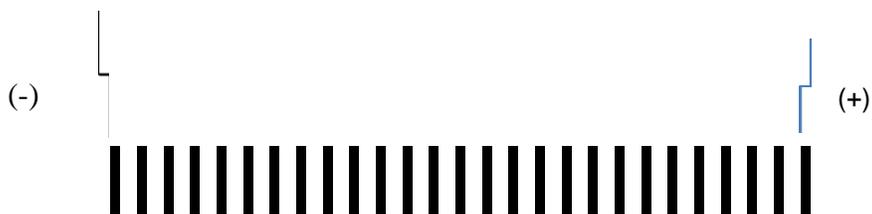


Gráfico 18. Conexión de electrodos en un solo campo.

Los resultados de este ensayo son los que se indican en la siguiente tabla:

CONEXIÓN UN SOLO CUERPO				
PARÁMETRO MEDIDO	DIMENSIONES	unidades	VALOR INICIAL	VALOR FINAL
Número de electrodos			27	-
Caudal	litros /minuto	L/min	2	-
Potencial hidrógeno	pH	pH	6	7
Temperatura	grados centígrados	°C	45	45,5
Tensión	voltios	V	66	66
Intensidad	amperios	A	1	1
DQO	miligramos/litro	mg/l	480	283
Sólidos suspendidos	miligramos/litro	mg/l	84	76

Tabla 12. Caracterización del efluente de ensayo uno

Los porcentajes de remoción se indican en la siguiente tabla:

PORCENTAJE DE REMOCIÓN	
PARÁMETRO	%
DQO	41,04
Sólidos suspendidos	9,52

Tabla 13. Descripción porcentual de remoción del ensayo uno.

7.2.2. Ensayo Dos. Para aumentar la intensidad del sistema se subdivide el conjunto de electrodo en dos cuerpos como se muestra en el grafico.

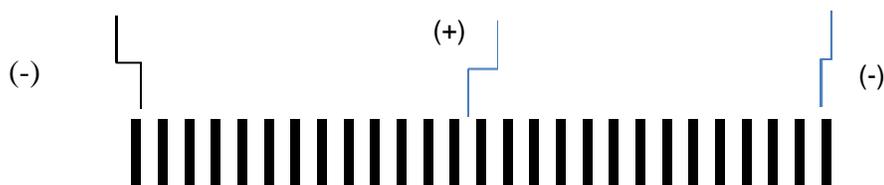


Gráfico 19. Conexión de electrodos en dos campos.

Con esta división de electrodos al hacer la conexión poniendo un ánodo y dos cátodos lo más significativo es el incremento de la intensidad a seis amperios, lo que incide en los resultados como se muestra en la siguiente tabla.

PARÁMETRO MEDIDO	DIMENSIONES	unidades	VALOR INICIAL	VALOR FINAL
Número de electrodos			27	-
Caudal	litros /minuto	l/min	2	-
Potencial hidrógeno	pH	pH	6	7
Temperatura	grados centígrados	°C	45	45,5
Tensión	voltios	V	63	63
Intensidad	amperios	A	6	6
DQO	miligramos/litro	mg/l	480	297
Sólidos suspendidos	miligramos/litro	mg/l	84	98

Tabla 14. Caracterización del efluente ensayo dos.

Los porcentajes de remoción con esta disposición es la que se muestra en la siguiente tabla.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN	
PARÁMETRO	%
DQO	38,12
Sólidos suspendidos	16,67(AUMENTO)

Tabla 15. Descripción porcentual de remoción del ensayo dos.



Foto 12. Electrodo con conexión para dos campos. (El Autor)

7.2.3. **Ensayo tres.** En este caso se busca aumentos considerables de la intensidad lo cual se logra aumentando a dos ánodos y tres cátodos como se indica en el esquema.

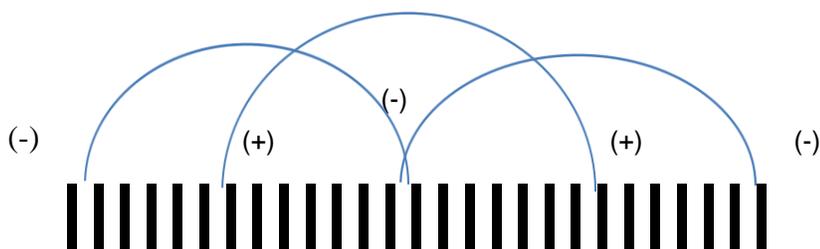


Gráfico 20. Electrodo conexión cuatro campos.

Los resultados son significativamente notorios puesto que la tensión disminuye a 52 voltios y consecuentemente incremento de la intensidad a 26 amperios y otros resultados que se muestran en la siguiente tabla.

DOS ÁNODOS TRES CÁTODOS				
PARÁMETRO MEDIDO	DIMENSIONES	unidades	VALOR INICIAL	VALOR FINAL
Número de electrodos			27	-
Potencial hidrógeno	pH	pH	6	7
Temperatura	grados centígrados	°C	45	46
Tensión	voltios	V	62	62
Intensidad	amperios	A	6	6
DQO	miligramos/litro	mg/l	480	297
Sólidos suspendidos	miligramos/litro	mg/l	84	98

Tabla 16. Caracterización de efluente del ensayo tres.

En cuanto a los porcentajes de remoción se indican en la siguiente tabla:

PORCENTAJE DE REMOCIÓN	
PARÁMETRO	%
DQO	38,125
Sólidos suspendidos	16,67 (AUMENTO)

Tabla 17. Descripción porcentual del ensayo tres.

7.2.4. Ensayo cuatro. Considerando los resultados de los ensayos anteriores, mismos que indican mejores resultados seccionando en dos campos el sistema de electrodos (ver foto 12), el ensayo cuatro es una repetición de estos ensayos con la variación de que las muestras del agua tratada es compuesta en él un caso haciendo el sistema con un ánodo (ensayo dos) y el otro con dos ánodos. Una variación adicional es una que la caracterización es más completa ya que muestra la remoción de ciertos elementos. Estos resultados se muestran en la tabla siguiente.

PARÁMETRO MEDIDO	DIMENSIONES	unidades	VALOR INICIAL	VALOR FINAL
Número de electrodos			27	-
Potencial hidrógeno	pH	pH	6	7
Temperatura	grados centígrados	°C	45	46
Tensión	Voltios	V	62	62
Intensidad	amperios	A	6	6
DBO ₅	miligramos/litro	mg/l	313	112
DQO	miligramos/litro	mg/l	480	227
Sólidos suspendidos	miligramos/litro	mg/l	84	71

Tabla 18. Caracterización de efluente del ensayo cuatro.



Foto 13. El electrocoagulador actuando en el ensayo cinco. (El Autor)

El porcentaje de remoción se indica en la siguiente tabla.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN	
PARÁMETRO	%
DBO ₅	64,22
DQO	52,71
Sólidos suspendidos	15,48

Tabla 19. Descripción porcentual del ensayo cinco.

El esquema de conexión eléctrica es el mismo del ensayo dos pero de forma alternada la polaridad, manteniendo tiempos de tres minutos en cada sistema.

Los esquemas de conexión eléctrica son:

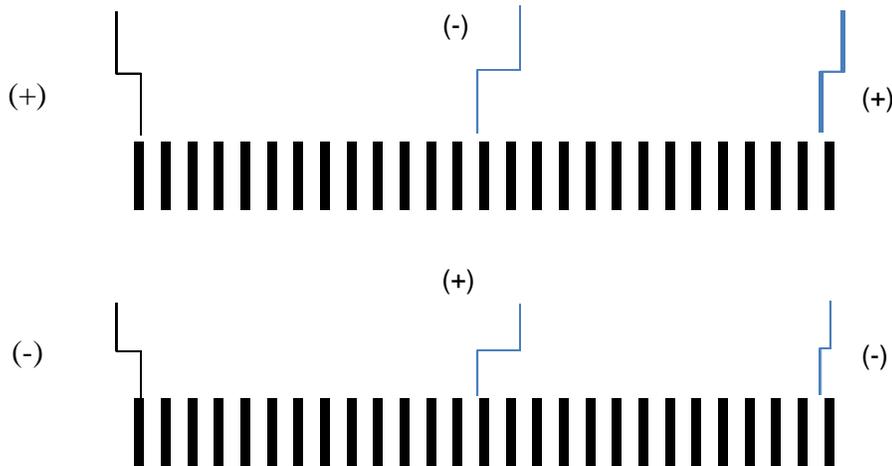


Gráfico 21. Alternación de conexión.

7.3. ANÁLISIS DE COSTOS DEL TRATAMIENTO

El presente estudio, que es una propuesta más para el tratamiento del efluente líquido residual de la industria Textiles Tornasol, tiene un punto neurálgico que es la electrocoagulación para lograr la desestabilización de los contaminantes presentes en estado coloidal, para la cual el principal insumo es la energía eléctrica, y de los ensayos realizados

el que reduce los valores de los diferentes parámetros controlados, es el que emplea una tensión de 62 voltios (V) y una intensidad de 6 amperios (A) con lo cual se realiza la siguiente estimación de costos de tratamiento.

El caudal es de 2 L/min.

Un metro cubico se trataría en 8.3 horas

$I = 6 \text{ A}; T = 62 \text{ V}$

$P = 372 \text{ W}$

Donde I es la intensidad de corriente, T la tensión, y P la potencia activa o empleada.

Para tratar un metro cubico de agua debo consumir 3.08 KWh ($8.3\text{h} \times 372\text{W}$).

Si el costo de la energía esta por entre los 6.83 centavos de Dólar por KWh.

Tengo un costo de 21.04 ctvs. /m³

Haciendo un comparativo con las dos técnicas de tratamiento de ELRAT de las industrias Textiles más comunes en nuestro medio, como son: tratamiento químico y tratamiento biológico, se concluye que la electrocoagulación está en un costo medio entre estas.

CAPÍTULO VIII

8. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tanto de la parte pertinente a los materiales y accesorios, el diseño y construcción, la electrocoagulación como tal y los diferentes ensayos.

8.1. DE LOS MATERIALES Y ACCESORIOS

Con respecto a los materiales y accesorios, considerando que el medio empleado para la generación de iones es la corriente eléctrica, estos deben tener la característica de ser aislantes, esto para la parte externa del reactor, para evitar fugas de energía y accidentes. En cuanto al material de los electrodos, ensayos preliminares con aluminio dieron resultados no alentadores, puesto que la desestabilización de los coloides no fue completa, razón por la cual se optó y construyó los electrodos con láminas de hierro, la coagulación fue total.

8.2. DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

El número total de electrodos que caben en el reactor es de 27, manteniendo una separación entre estos de 0.57 centímetros, el área total disponible de exposición de electrodos en este diseño es de 0.54 m², El volumen total neto del reactor de electrocoagulación es de 4.5 litros. Estos resultados y otros se muestran en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	UNIDADES/MATERIAL	VALOR
Material de electrodos	Hierro (Fe)	
Material del reactor	Poliuretano	
Tensión máxima del rectificador	Voltios (V)	70
Intensidad máxima del rectificador	Amperios (A)	32
Numero de electrodos		27
Área total de electrodos	metros cuadrados (m2)	0,54
Distancia de separación de electrodos	centímetros (cm)	0,57
Volumen neto del reactor	litros (L)	4,5

Tabla 20. Resultados del diseño y construcción.

8.3. DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

Con la electrocoagulación se logra la desestabilización de los contaminantes presentes en el efluente líquido residual en suspensión coloidal (coagulación), para facilitar su remoción.

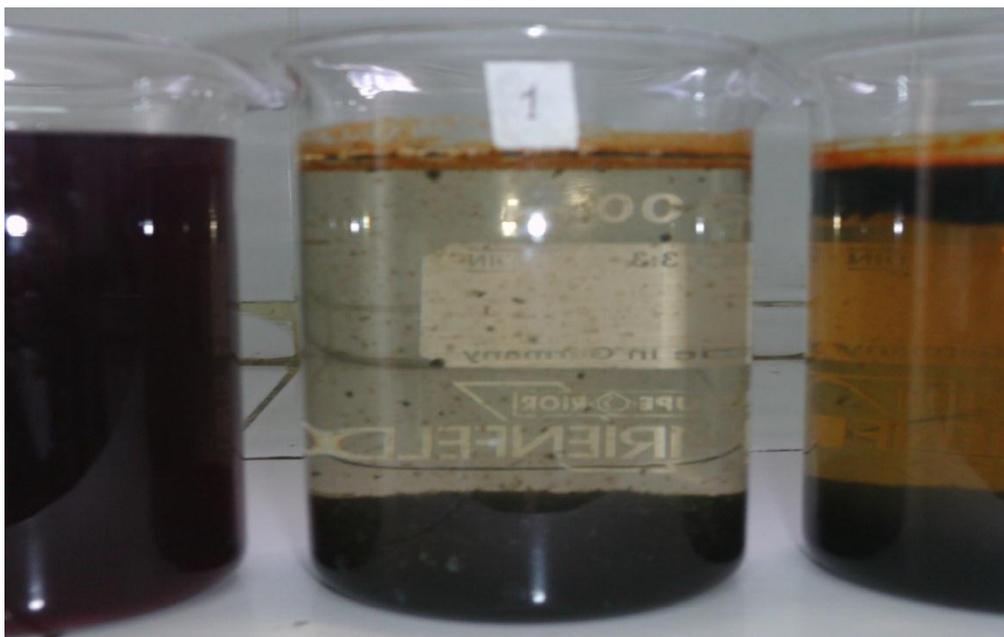


Foto 14. Coagulación y precipitación.

En la fotografía se observan tres vasos; el de la izquierda es el efluente líquido residual sin tratar, cuya caracterización se indica en el anexo uno, el vaso marcado con el numero uno (del medio de la foto) es la del agua tratada en el electrocoagulador, igual que el de la derecha.

Con respecto al color aparecen (que no es un parámetro regulado), a través de la electrocoagulación se logra remoción de hasta el 93.7 %.

8.4. DE LOS EXPERIMENTOS Y EVALUACIONES

Las caracterizaciones del efluente líquido residual sin tratar y tratado de los diferentes parámetros analizados fueron hechos en LABFIGEMPA (Laboratorio de la Facultad de Ingeniería en Geología, Mina, Petróleos y Ambiental, de la Universidad Central del Ecuador), y constan en los anexos del uno al cuatro.

8.4.1. Ensayo Bach. La razón del ensayo Bach es determinar el alcance del método de purificación. Y en el grafico se observa el porcentaje de remoción alcanzado.

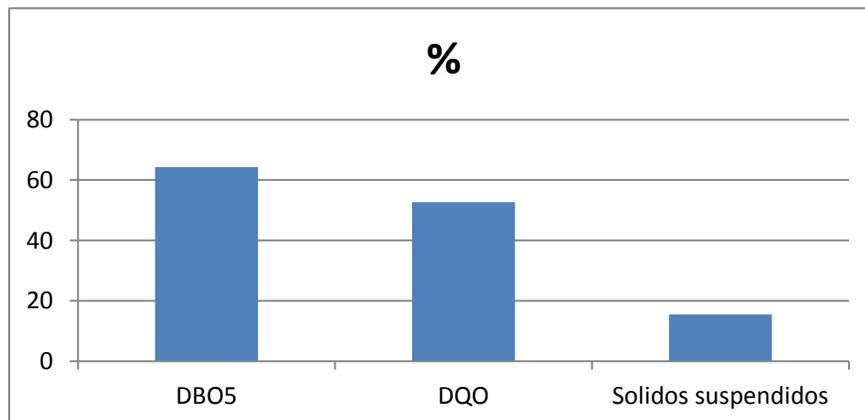


Gráfico22. Porcentaje de remoción del ensayo Bach.

8.4.2. Ensayo uno. Este ensayo considera todo el sistema de electrodos como un solo campo, es decir se tiene una entrada de corriente, y en el grafico se observa el porcentaje de remoción alcanzado. Son evaluados solo dos características el DQO y SS.

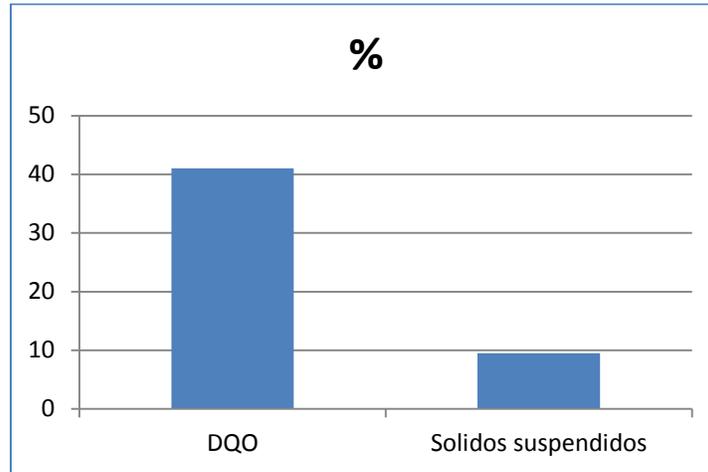


Gráfico 23. Porcentaje de remoción ensayo uno.

8.4.3. Ensayo dos. Este ensayo tiene la característica de dividir el sistema de electrodos en dos campos con una entrada de corriente. En el grafico se observa el porcentaje de remoción alcanzado.

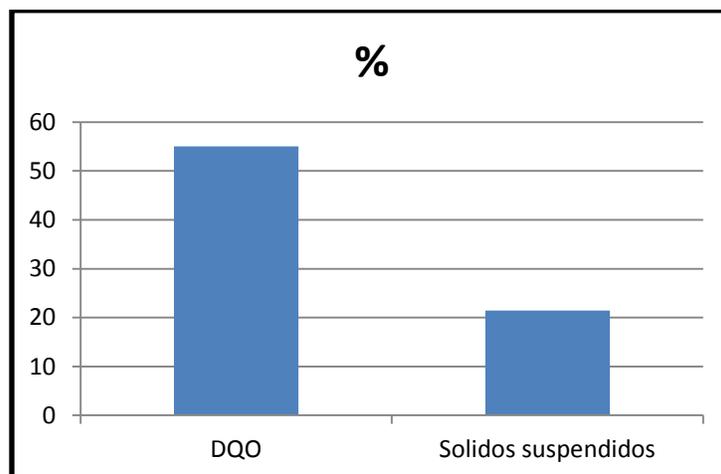


Gráfico 24. Porcentaje de remoción ensayo dos.

8.4.4. Ensayo tres. Este ensayo tiene la particularidad de dividir el sistema de electrodos en cuatro campos, para lograr un incremento significativo de la intensidad de corriente. El porcentaje de remoción de sólidos suspendidos es negativo para el proceso porque no disminuye el valor sino se incrementa.

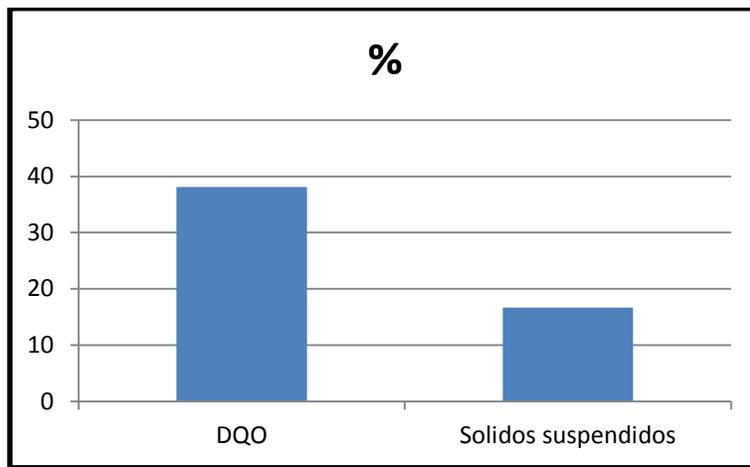


Gráfico 25. Porcentaje de remoción ensayo tres.

8.4.5. Ensayo cuatro. Este ensayo está basado en resultados del ensayo dos con alternación de polaridad. Los porcentajes de remoción se muestran en la siguiente tabla.

RESULTADOS ANALÍTICOS (BASADO EN ANEXO 1 Y 2)				
PARÁMETRO	UNIDAD	ANTES	DESPUÉS	% REMOCIÓN
Aceites y Grasas	mg/L	6,46	1,21	81
Color aparente	Units. Pt. Co.	9550	595	93,7
DBO ₅	mgO ₂ /L	313	112	64,2
Detergentes	mg/L	0,915	0,429	53,1
DQO	mg/L	480	227	52,7
pH	UpH	9,24	9,07	1,84

Sólidos Sedimentables	mg/L	0,4	0,1	75
Sólidos Suspendidos	mg/L	84	71	15,5
Zinc	mg/L	0,1	0,07	30

Tabla 21. Resultados analíticos del ensayo cuatro.

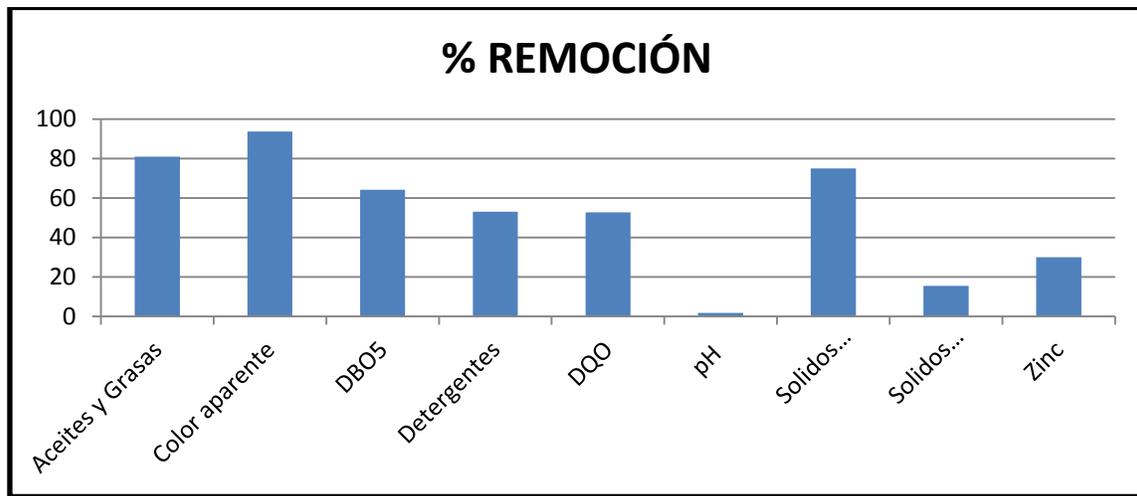


Gráfico 26. Porcentaje de remoción ensayo cuatro.

CAPÍTULO IX

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES

Basado en los resultados y considerando las condiciones particulares del efluente líquido residual de Industrial Textiles Tornasol, se concluye.

9.1.1. DE LOS MATERIALES Y ACCESORIOS

La cuba trapezoidal, el sistema de entrada del ELRAT, los separadores de electrodos, la tubería, deben ser hechos de material aislante de corriente, para evitar fuga de energía y accidentes.

Los electrodos para la electrocoagulación del efluente líquido residual de Industrial Textiles Tornasol, debe ser de hierro, la coagulación es más rápida.

9.1.2. DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

El reactor construido es apropiado para realizar el estudio de tratamiento de agua, empleando la electrocoagulación como medio de depuración.

La separación de los electrodos de 0.57 cm, se logra una adecuada agitación del efluente en proceso de tratamiento, sin llegar a atascamientos producto de incrustaciones, que afectarían el rendimiento del proceso.

9.1.3. DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

Con la electrocoagulación se logra la desestabilización de los contaminantes presentes en el efluente líquido residual en suspensión coloidal (coagulación), para facilitar su remoción y de esta manera mejorar sus condiciones antes de la evacuación.

9.1.4. DE LOS EXPERIMENTOS Y EVALUACIONES

Cada uno de los ensayos dio diferentes resultados y se concluye lo siguiente:

9.1.4.1. Ensayo Bach. La electrocoagulación facilita la remoción de contaminantes en suspensión coloidal, con un alcance de remoción de: sólidos suspendidos de 20 %; DQO 40%, DBO₅65%.

9.1.4.2. Ensayo uno. Con valores de alrededor de 1 amperio y 66 voltios se logra remoción del 40 % de DQO y 10 % de SS. Si el efluente líquido residual por tratar tuviera valores menores de contaminantes, esta disposición sería suficiente para tratar el agua.

9.1.4.3. Ensayo dos. Al dividir en dos campos el sistema de electrodos se incrementa la intensidad a 6 amperios con lo que se logra mejorar los índices de depuración.

9.1.4.4. Ensayo tres. Este ensayo divide el sistema de electrodos en cuatro campos, para lograr un incremento significativo de la intensidad de corriente alcanzando valores de 21 amperios y los porcentajes de remoción no mejoran, esto se debe a que la coagulación

ya alcanzó su nivel máximo y que el excedente de corriente solo provoca electrólisis del agua. El porcentaje de remoción de sólidos suspendidos es negativo para el proceso porque no disminuye el valor sino se incrementa.

9.1.4.5. Ensayo cuatro. Esta es la disposición de campos de electrodos optima porque se logra los niveles de remoción más altos, sin desperdicios de energía como los que se da en el ensayo tres.

Con esta disposición se alcanza remoción de contaminantes dejando el efluente líquido residual en condiciones dentro de norma para su evacuación, exceptuando el pH que se podrían emplear neutralización posterior para alcanzar valores aptos de evacuación.

La determinación de la longitud entre los electrodos oscila entre 0.5 cm y 0.8 cm, para el caso exclusivo del efluente líquido residual de Industrial Textiles Tornasol, que tiene una conductividad promedio de 1900 mS/cm², la distancia entre electrodos es de 0.57 cm, ya que esta permite un buen flujo de material ionizado, con una adecuada agitación para lograr eficiente uso de los iones desestabilizantes (que son los que transportan la corriente).

El siguiente gráfico muestra el nivel de cumplimiento del efluente respecto de la norma vigente para descargas después de haber sometido el efluente a electrocoagulación.

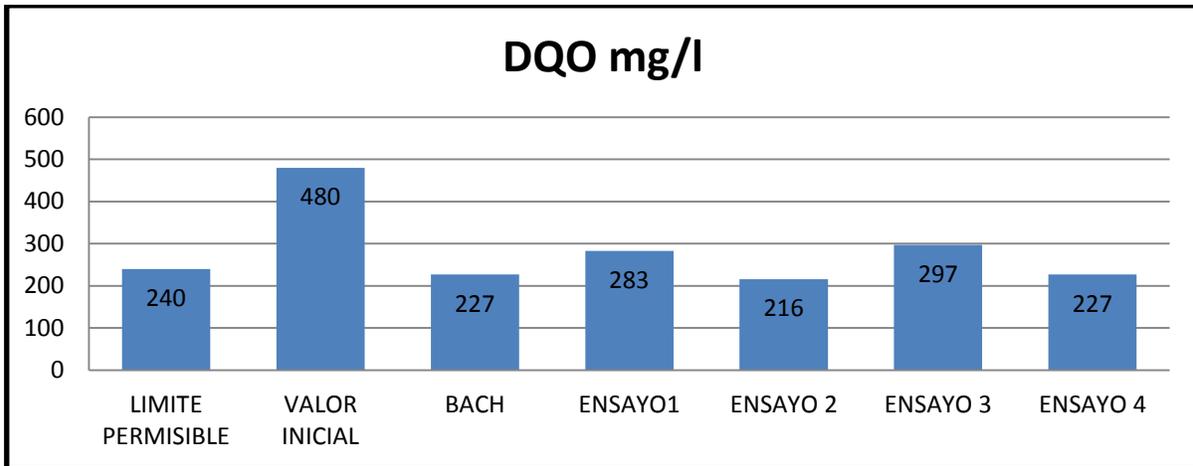


Gráfico 27. Comparativo de remoción de ensayos respecto a la Norma de DQO.

La barra primera muestra el nivel máximo permisible, la segunda indica la situación del afluente antes de someter a electrocoagulación, la barra tercera indica el nivel de depuración con un tiempo mayor de residencia del efluente, concluyéndose que una ves rota la fase coloidal de la carga contaminante, no tiene ningún resultado adicional positivo. El ensayo dos y cuatro determinan la conexión más idónea para el tratamiento, concretándose en el ensayo cuatro que es la instalación que tiene la alternación de polaridad en periodos de tiempo de tres minutos.

El otro parámetro que es cuantificado en todos los ensayo, es el de los Sólidos Suspendidos y que se puede observar su nivel de remoción y alcance respecto a la norma en el siguiente gráfico.

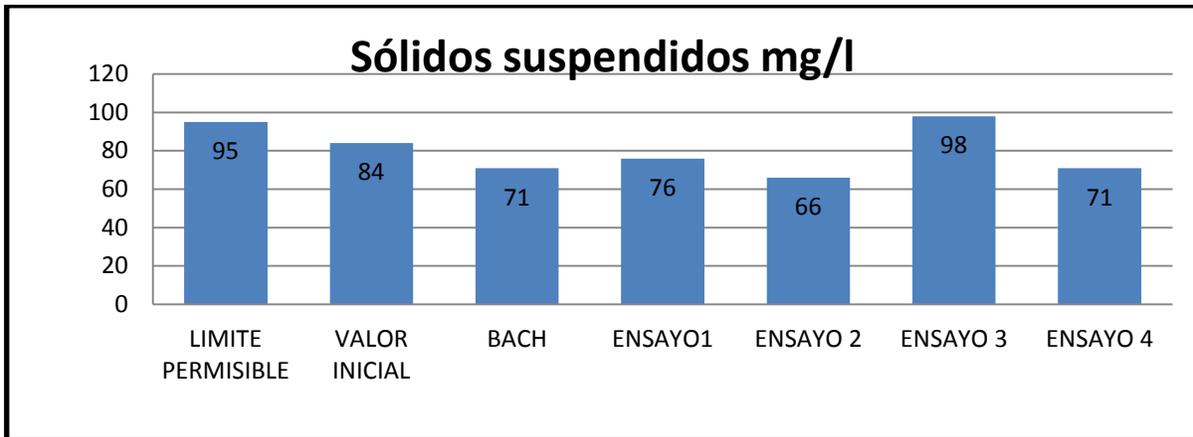


Gráfico 28. Comparativo de remoción de ensayos respecto a la Norma de SS.

La intensidad adecuada para lograr la desestabilización sin llegar a incrementos innecesarios

Que representarían desperdicio de energía, en incremento de calor, es de entre 4 a 8 amperios (A), con una tensión de entre 64 a 67 voltios (V).

La alterabilidad de polaridad de los electrodos es fundamental, porque evita incrustaciones de sales en los electrodos que limitarían el área de exposición de estos, es decir los mantiene limpios, con solo cambiar la dirección del flujo de electrones.

La electrocoagulación se fundamenta en el concepto básico del empleo de electrones como agente coagulante cuya producción está regida por las leyes de electrólisis.

La electrocoagulación es una alternativa viable y eficiente para disminuir la carga contaminante del efluente líquido residual de Industrial Textiles Tornasol.

9.2. RECOMENDACIONES

Es recomendable emplear la electrocoagulación como medio de depuración de ELRAT de Industrial Textiles Tornasol.

Es fundamental hacer los estudios preliminares a nivel de laboratorio como está presente tesis, antes de tomar la decisión de implementar este método de depuración, puesto que las condiciones de las plantas de tintura son variadas y responden a diferentes realidades.

La electrocoagulación es una alternativa recomendable ya que el reactor ocuparía muy poco espacio, comparado con un sistema químico de coagulación.

En el caso de no llegar a niveles de depuración altos, la electrocoagulación puede ser complementada con medios biológicos de tratamiento del efluente.

Con respecto a las caracterizaciones, estas han sido realizadas en laboratorios calificados ya que esta es una exigencia de la normativa nacional, y Las Universidades en Quito pueden hacerlas (las que tienen certificación). Esta podría ser una alternativa para la Universidad Técnica del Norte, y brindar este servicio a la zona norte del país.

Se debe apoyar en mejores tecnologías de: maquinaria, química de colorantes y auxiliares y procesos productivos para disminuir el consumo de agua, mejorar el rendimiento de colorantes.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- Efraín Huerga Pérez, **Desarrollo de alternativas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante el uso de tecnologías limpias dirigidas al reciclaje y/o valoración de contaminantes**, Universidad de Valencia, 2005.
- Javier Molina, Ana Restrepo, Jorge Kirby, Seminario “**Tratamiento de aguas residuales en tintorería**”. Colombia 1995.
- Enciclopedia Autodidáctica Quillet, Tomo II, Hachete, México, 1995
- MORALES, Nelson. **Guía del textil en el acabado**. 1º Edición. Ed. Universitaria UTN. Ibarra. 1995.
- McGraw-Hill, "**manual de la prevención de la contaminación industrial**" México 1998.
- ARMENDÁRIS, Gerardo. **Química orgánica moderna**. Segunda Edición. Quito. 1981
- GUTIÉRREZ, Poveda. **Química**. Ed. Educar Bogotá Colombia. 1994.
- JOSE ANTONIO CORRALES ZARAHUZA, **Curso de Química-Física**. Primera Edición Madrid 1974
- **Evaluación Ambiental** (Volumen I; II y III). Trabajos Técnicos del Departamento de Medio Ambiente del Banco Mundial.
- Fair, G.M., J.C. Geyer, y D.A. Okun. 1966. **Water and Wastewater Engineering**. 2 Volúmenes. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Feachem, R.G. y otros. 1983. **Sanitation and Disease: Health Effects of Excreta and Wastewater Management**. Chishester, Reino Unido: John Wiley and Sons.

DIRECCIONES EN INTERNET

- http://www.invenia.es/inveniaextensions:tratamiento_agua_medio_electroflotacion_electrocoagulacion
- <http://www.invenia.es/oepm:e963015055>
- www.ucm.es/info/iqpapel/.../electroflotacion.html
- map@redahsl.com Tompes, 5 - Bajo. Urdanibia, 20 305 IRUN (Guipúzcoa), Tno-
FAX:943 6 105 34, Móvil 629 40 98 00
- <http://www.redahsl.com/es-reda-hispania--s-l-descripcion-del-proceso.html>
- WWW. tratamiento de aguas residuales. org. ALEJANDRO MARSILLI, **Tratamiento de Aguas Residuales.** (Dic. 2005)
- WWW.Wikipedia. ORG, la enciclopedia libre.
- www.Enciclopedia Libre. Universal en Español.
- www.angelfire.com/me2/ciberquimia/electrolisis.htm
- www.epec.com.ar

GLOSARIO

Al: Aluminio

A: Amperios

°C: Grados Celsius.

DBO₅: Demanda biológica de oxígeno total a los 5 días de ensayo.

DQO: Demanda química de oxígeno.

ELR: Efluente líquido residual.

ELRAT: Efluente líquido residual a tratar.

Fe: Hierro

H: Hidrógeno

H₂O: Agua

I: Intensidad de corriente eléctrica

NaCl: Cloruro de sodio.

NaCO₃: Carbonato de sodio.

NaOH: Hidróxido de sodio.

O: Oxígeno

pH: Potencial de hidrógeno

SS: Sólidos suspendidos.

T: Tensión eléctrica

V: Voltios

kWh: Kilo vatio hora.

ANEXOS

Conformado principalmente por las caracterizaciones de los ensayos.