

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN PLANTA DE TEÑIDO
DE HILOS”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

**GERARDO ISRAEL SOTOMAYOR YACSAVILCK
VIMARY VICTORIA FELICIANO MENDOZA**

LIMA – PERÚ

2013

RESUMEN

Los más remotos antecedentes de tratamiento de aguas, que datan de hace más de 1500 años y que alcanzan el 400 a. C., indican que las formas más comunes de purificación del agua eran hirviéndola mediante calefacción, calentándola al Sol o sumergiendo una pieza de hierro caliente dentro de la misma. Otro de los métodos más usuales era el filtrado del agua hervida a través de arena o grava para luego dejarla enfriar.

En las últimas décadas, la importancia que ha cobrado la calidad del agua ha permitido evidenciar que entre los factores o agentes que causan su contaminación se encuentran: agentes patógenos, desechos que requieren oxígeno, sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, nutrientes vegetales que ocasionan crecimiento excesivo de plantas acuáticas, sedimentos o material suspendido, sustancias radioactivas y el calor.

Actualmente existen normas que establecen los rangos permisibles de contaminación que buscan asegurar que las aguas residuales evacuadas en los desagües industriales no afecten gravemente los ríos y lagos.

Para la industria, el costo del agua tratada, así como el costo del tratamiento del agua residual provenientes de su proceso industrial, está incrementándose dramáticamente, motivando a los investigadores de este campo esforzarse por obtener mejores resultados de reducción de contaminantes, de costos de operación y mantenimiento en la generación de procesos que posean una elevada flexibilidad para soportar las variaciones en el efluente.

Conscientes de esta situación y habiendo tenido la experiencia de manejar efluentes de la plantas textiles, es conveniente hacer un estudio para tratar tales efluentes, lo que se asumirá dentro de esta tesis.

Las investigaciones realizadas en el presente trabajo consistirán de pruebas de laboratorio para determinar los parámetros fisicoquímicos que permiten conocer los contenidos de pH, DQO y turbiedad en el efluente de una planta textil

Luego de concluir las pruebas. Se pudo determinar las dosis óptimas para reducir los parámetros indicados al fin de que el efluente se encuentre dentro de los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la normatividad vigente.

Finalmente se realizó un análisis de costos que conllevara la ejecución del proyecto motivo de la tesis.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	OBJETIVO	2
1.2	ALCANCE	2
1.3	JUSTIFICACIÓN	3
II.	PANORAMA DE LA INDUSTRIA DE TEÑIDO TEXTIL	4
2.1	Generalidades	4
2.2	Descripción del proceso textil	4
2.2.1	Tratamiento previo	5
2.2.2	Blanqueo óptico	9
2.2.3	Proceso de teñido	9
2.2.4	Fijado y suavizado	13
2.2.5	Centrifugado y secado	13
III.	AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA TEXTIL	14
3.1	Generalidades	14
3.2	Agentes contaminantes	14
3.2.1	Colorantes	15
3.2.2	Reactivos	19
A.	Peróxido de hidrógeno	19
B.	Ácido acético	19
C.	Carbonato de sodio	19
D.	Hidróxido de sodio (soda cáustica)	20
E.	Hidrosulfíto de sodio	20
3.2.3	Agentes auxiliares	20
A.	Cloruro de sodio	20
B.	Secuestrante	21
C.	Agentes tensoactivos	22
D.	Blanqueador óptico	25
E.	Catalasa	25
3.3	Efectos en la salud	26

3.3.1	Materias flotantes	26
3.3.2	Materias en suspensión	27
3.3.3	Materias disueltas	27
A.	Colorantes	27
B.	Metales pesados.....	28
C.	Otros componentes.....	29
3.3.4	Altas temperaturas.....	29
IV.	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA TEXTIL	30
4.1	Generalidades	30
4.2	Desbaste	32
4.3	Homogenización	32
4.4	Enfriamiento	34
4.4.1	Intercambiador de calor.	34
4.4.2	Torres de enfriamiento.....	34
4.4	Sedimentación	35
4.5	Neutralización	37
4.5.1	Neutralización con ácido fuerte.....	37
4.5.2	Absorción de dióxido de carbono.....	37
4.6	Coagulación-floculación.....	38
4.6.1	Desestabilización de partículas.....	38
4.6.2	Coagulantes	39
4.6.3	Reacciones químicas de los coagulantes.	41
4.6.4	pH y concentración en coagulantes metálicos	42
4.6.5	Coadyuvantes.....	45
4.6.6	Dosificación de coagulantes	46
4.6.7	Factores que influyen en el proceso de coagulación.....	47
4.7	Tecnología de membrana	48
4.7.1	Ósmosis inversa	48
4.7.2	Nanofiltración.....	49
4.7.3	Ultrafiltración.....	49

4.7.4	Microfiltración.....	49
4.8	Electrocoagulación	49
4.9	Adsorción.....	51
4.10	Procesos de oxidación avanzada.....	53
4.10	Tratamiento aerobio.....	54
4.11	Tratamiento anaerobio.....	55
4.12	Proceso enzimático.....	56
4.13	Combinación de los procesos físico-químicos y bioquímicos	56
4.14	Elección del tratamiento de agua residual textil	56
4.14.1	Factores importantes para la elección del tratamiento de efluentes de la planta de teñido y acabado.....	57
4.14.2	Análisis cinético	58
4.14.3	Relaciones empíricas.....	58
4.14.4	Variaciones de caudales y de las cargas de contaminantes	59
V.	BASES LEGALES	60
5.1	Constitución Política (1993)	60
5.2	Ley General del Ambiente.....	60
5.3	Política Nacional del Ambiente	61
5.4	Ley de Recursos Hídricos	61
5.5	Reglamento de Desagües Industriales.....	62
5.6	Reglamento de Protección Ambiental para el Desarrollo de actividades de la Industria Manufacturera	64
5.7	Estándares de Calidad Ambiental y Límites Máximos Permisibles.....	65
A.	Estándares de Calidad Ambiental (ECA)	65
B.	Límites Máximos Permisibles (LMP)	67
5.7.1	Legislación Nacional.....	67
A.	Sector Producción:	67
B.	Sector Minería	70
C.	Sector Vivienda.....	70
5.7.2	Legislaciones Internacionales	72

5.7.3	Límites máximos Permisibles para las aguas residuales de la planta de teñido.....	72
VI.	CAUDAL DEL AGUA RESIDUAL DE UNA PLANTA TEXTIL.....	73
VII.	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TEXTIL	75
7.1	Análisis físico-químico del agua residual textil	75
7.1.1	Toma de muestra.....	75
7.1.2	Interpretación de los resultados	77
7.2	Evolución horaria de los parámetros fisicoquímicos del agua residual textil.	79
VIII.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	82
8.1	Datos referentes a la muestra.....	82
8.1.1	Ubicación.....	82
8.1.2	Temporalidad.....	82
8.1.3	Muestreo.....	82
8.1.4	Procesamiento de muestras	82
8.1.5	Análisis físico-químicos de la muestra	83
8.2	Pruebas de coagulación-floculación.....	83
8.2.1	Determinación del coagulante óptimo y dosis óptima.....	84
8.2.2	Determinación del floculante y su dosis óptima.....	94
IX.	PARÁMETROS DE DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES	101
9.1	Desbaste, rejillas de limpieza manual	101
9.2	Tanque de homogenización.....	103
9.3	Sistema de bombeo	104
9.4	Tanque de neutralización.....	105
9.5	Tanque de agitación rápida, coagulación.....	108
9.6	Floculador hidráulico tubular	110
9.7	Clarificador	113
9.8	Manejo y almacenamiento de materiales	115
9.8.1	Ácido sulfúrico	115
A.	Características.....	115
B.	Manipulación y transporte	115

C.	Consumo del ácido sulfúrico y diseño del tanque de almacenamiento..	116
9.8.2	Sulfato de aluminio	117
A.	Características.....	117
B.	Manipulación y transporte	117
C.	Consumo del sulfato de aluminio y diseño del tanque de almacenamiento	117
9.8.3	Poliacrilamida	119
A.	Características.....	119
B.	Manejo y transporte	119
C.	Consumo de la poliacrilamida y diseño del tanque de almacenamiento	119
D.	Preparación y dosificación del floculante	121
9.9	Operación y mantenimiento	121
X.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	122
10.1	Capital fijo.....	122
10.1.1	Costos directos	122
10.1.2	Costos indirectos	124
10.1.3	Costos fijo total.....	124
10.2	Costo de operación.....	125
10.2.1	Gastos directos.....	125
10.2.2	Gastos indirectos	126
10.2.3	Gasto total anual.....	126
10.2.4	Reutilización del agua tratada.....	127
XI.	CONCLUSIONES	128
XII.	BIBLIOGRAFÍA.....	130
XIII.	APENDICE	133
	Apéndice A.....	134
	Apéndice B.....	135
	Apéndice C	141
	Apéndice D	142
	Apéndice E.....	145
	Apéndice F.....	154

Apéndice G	156
Apéndice H	159
Apéndice I	168
Apéndice J	169
Apéndice K.....	170
Apéndice L.....	176
Apéndice M.....	178
Apéndice N	183
Apéndice O	184
Apéndice P.....	189
Apéndice Q	196
Apéndice R	197
Apéndice S.....	200
Apéndice T	207
Apéndice U	208
Apéndice V.....	209
Apéndice W.....	210

I. INTRODUCCIÓN

La industria de teñido textil es uno de los sectores productivos que emplean diversas sustancias para proporcionar el color a una alta variedad de materiales. Los tintes mayormente utilizados son sintéticos, y que son extraídos de plantas y combinados con otros elementos; a diferencia de los tintes naturales, los sintéticos se caracterizan por tener una mejor afinidad en fibras vegetales como el algodón. Estos pueden ser divididos en dos grandes grupos: los colorantes que son solubles en agua y los pigmentos, insolubles capaces de unirse fuertemente a la fibra sin verse afectado por la acción de la luz, agua, siendo además relativamente estables a otros agentes químicos como: ácidos, bases, jabones, suavizantes o fijadores. A su vez, están conformados por más de un compuesto, y estos tienden a ser aromáticos con sustituyentes nitros, aminos, hidroxilos, entre otros.

En los años 80', William Henry Perkín obtuvo el colorante púrpura por oxidación de la anilina con ácido crómico. Actualmente, la producción de colorantes y pigmentos se calcula aprox. en 700 000 toneladas anuales, de las cuales más del 18% se descarga en los efluentes industriales.

Los colorantes son sustancias orgánicas con una estructura molecular no saturada; es decir, son electrónicamente inestables, y por eso absorben energía a determinada longitud de onda de la zona espectral visible, reflejando así un determinado color. Los grupos responsables de la absorción de luz son los cromóforos, unos compuestos que tienen electrones resonando a determinada frecuencia, los cuales al acumularse en lagos y ríos provocan una disminución en la luminosidad de las aguas, y, en consecuencia, inducen a la reducción de la actividad fotosintética.

1.1 OBJETIVO

Reducir los parámetros fisicoquímicos que representan la carga contaminante de los efluentes de una planta textil, aplicando tratamientos fisicoquímicos alternativos.

1.2 ALCANCE

Hoy en día, los efluentes industriales realizan un tratamiento primario que consiste en sedimentadores por los cuales pasa el agua en donde se separa, por efecto de la gravedad, una cierta cantidad de las partículas sólidas o sólidos suspendidos de la interfaz del líquido. El estudio está dirigido a la disminución de más del 20% en los diversos parámetros comprendidos en la caracterización del agua proveniente de las variadas etapas del proceso de teñido de los materiales utilizados.

Los recursos tecnológicos para los tratamientos de efluentes de teñido y acabado, se dispondrán de pruebas piloto para la determinación de los parámetros a controlar, tales como el pH y DQO.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las reservas mundiales de agua ocupan un lugar de suma importancia y muy especial dentro de los recursos naturales. El agua es base de la vida, el compuesto fundamental de nuestro entorno y esencial en muchos procesos industriales como los que se desarrollan en las industrias de pinturas, papelera, alimentos, textiles y manufactura en general. La contaminación de este recurso es la causa de catástrofes naturales, sequías y erosión de suelos o enfermedades, epidemias y probablemente sea en el futuro el centro de conflictos mundiales. Bajo este contexto y habiendo tenido la experiencia de manejar efluentes de una planta textil (teñido y acabados) consideramos importante realizar una investigación para el tratamiento de los efluentes de la planta de teñido de hilos el cual se resume en la presente tesis.

II. PANORAMA DE LA INDUSTRIA DE TEÑIDO TEXTIL

2.1 Generalidades

La industria textil abarca un amplio abanico de procesos, tales como la producción de fibras, fabricación de teñidos, teñido de hilos, acabados y confección de ropas, tejidos para el hogar y distintos productos industriales. El teñido es un proceso comercial, y sobre todo competitivo, y el éxito depende de la consecución de la firmeza, la ausencia de daños y de la eficiencia que puede involucrar al tiempo, energía, mano de obra, agua, colorantes y productos químicos, pero también debe considerar los impactos ambientales del proceso.

La mayoría de los procesos de preparación y teñido requieren calor, y el agua como vapor es el medio más común para el suministro de energía para alcanzar la temperatura requerida por estos procesos por su alto grado de poder calorífico. Después del teñido se realizan lavados, aclarados y secados que también consumen vapor de agua y agua caliente. El éxito de estos procesos depende de la calidad del agua que se utiliza. También se ha introducido a estos procesos, dispositivos de control y automatización, como medidores de temperatura y tiempo de preparación y teñido; dependiendo de la formulación requerida, lo que repercute en la mejora de la calidad del proceso y su productividad.

2.2 Descripción del proceso textil

Actualmente, la planta realiza solo el servicio de teñido y acabado a diversas empresas textileras del mercado local, las cuales envían cantidades desde 40 hasta 150 kg por lote de hilo en diferentes títulos que son de 50/1 la más delgada hasta 20/1 la más gruesa, y en diversas variedades de hilo: pima, hindú, bambú y tangüis. Cada lote es preparado en máquinas enconadoras en donde el hilo es transferido desde los conos de cartón hacia bobinas de plástico, y que luego de

ser pesado se le asigna una formulación requerida para el proceso de teñido, que comienza con un tratamiento previo que varía según el color que indica la formulación asignada para la cantidad de hilo para teñir; es decir, si son colores oscuros se realiza un tratamiento de descrude o jabonado; y si son colores claros, el tratamiento es un preblanqueado. En el caso de que la formulación indique un color blanco, se realiza un proceso de preblanqueo, jabonado y suavizado. Seguidamente a un tratamiento previo se realiza el proceso de tintura del material a determinadas condiciones de temperatura, presión y tiempo. Esta etapa continúa con una serie de enjuagues: frío, ácido y jabonado. En esta parte del proceso se verifica el matiz del material y se consulta la aprobación del color, y, finalmente, se realiza el proceso de acabado (fijado y suavizado). En el caso de presentarse problemas con el matiz obtenido, se efectúa un matizado para lo cual el laboratorio emitirá una nueva formulación que permitirá llegar al matiz o color aprobado por el cliente.

2.2.1 Tratamiento previo

A. Descrude

Este tratamiento permite eliminar las impurezas naturales y adquiridas de los hilados, por medio de una disociación de uno de sus átomos de hidrógeno de la fibra celulosa en medio acuoso. El hilo contiene impurezas naturales como ceras, pectinas, alcoholes y otros componentes orgánicos, así como impurezas provenientes de sus procesamientos tales como la suciedad y el aceite.

Este tratamiento consiste en preparar una relación de baño entre el peso del hilo y el volumen de agua que es una constante de 1 a 10. El descrude como ya se mencionó es un paso previo realizado para colores oscuros; sin embargo, el descrude también puede ser condicionado para el tipo de hilo que se va a teñir, o sea, para lotes con hilo pima, hindú o tangüis. En

el caso de ser un hilo pima, se realiza un descruce añadiendo auxiliares como es el humectante y secuestrante a 80 °C por un tiempo de 30 min; luego se adiciona detergente y soda líquida al 50% y se calienta a 98 °C por más de 40 min; el medio alcalino a temperaturas elevadas acelera las reacciones químicas. Durante este tiempo, se saponifican los aceites y ceras naturales (se convierten en jabones), se suaviza la fibra, se suspenden las pectinas y otros materiales no celulósicos. Luego se procede a botar el baño para realizar un enjuague caliente con agua blanda a 80 °C por 10 min; para eliminar el remanente de soda en la fibra, se continúa con un enjuague frío, un enjuague ácido que consiste en adicionar ácido acético a la relación de baño a 60 °C por 10 min, y, finalmente, un enjuague en frío (ver figura B.1 del Apéndice B).

En el caso de ser un hilo hindú o tangüis se realiza un descruce normal que consiste en añadir los auxiliares: secuestrante, humectante, detergente y soda líquida al 50%, y se calienta a 98 °C por 40 min. Después se procede a botar el baño para realizar un enjuague en caliente con agua blanda a 80 °C por 10 min; para eliminar el remanente de soda en la fibra, se continúa con un enjuague frío, un enjuague ácido que consiste en adicionar ácido acético a la relación de baño a 60 °C por 10 min, y, finalmente, un enjuague en frío (ver figura B.2 del Apéndice).

B. Preblanqueo

Este tratamiento se encarga de limpiar las impurezas de la fibra y blanquearlo para ser, posteriormente, teñido a un color claro; el blanqueo químico consiste en una destrucción de la materia colorante natural de la fibra por oxidación utilizando el peróxido de hidrógeno o hipoclorito de sodio como agente oxidante estabilizado. Este tratamiento se basa en preparar una relación de baño entre el peso del hilo y el volumen de agua

que es una constante de 1 a 10. El preblanqueo puede ser condicionado para el tipo de hilo que se va a teñir; es decir, para lotes con hilo pima, hindú o tangüis. En el caso de ser un hilo pima se efectúa un primer preblanqueo añadiendo auxiliares como: humectante, secuestrante, detergente, soda líquida al 50% y peróxido de hidrógeno al 50% a 92 °C por 30 min; en seguida se bota el baño y se llena nuevamente con agua blanda y se realiza un segundo preblanqueo donde se adiciona detergente, soda líquida al 50% y peróxido de hidrógeno al 50% a 92 °C por 40 min; después, se bota el baño y se efectúa un enjuague en caliente con agua blanda a 80 °C por 10 min para eliminar el remanente de soda en la fibra y se continúa con un enjuague frío; se procede a realizar el neutralizado que consiste en adicionar a la relación de baño el ácido acético, la enzima líquida tipo catalasa para eliminar el peróxido residual y el detergente, y se calienta a 45 °C por 10 min; en este punto se sube la temperatura a 80 °C por 10 min y se bota el baño; finalmente, se enjuaga en frío (ver figura B.3 del Apéndice B).

En el caso de ser un hilo hindú o tangüis se realiza un preblanqueo normal que consiste en añadir los auxiliares: secuestrante, humectante, detergente y soda líquida al 50% y peróxido de hidrógeno al 50%; y se calienta a 92 °C por 40 minutos. Luego se procede a botar el baño para realizar un enjuague en caliente con agua blanda a 80 °C por 10 min; para eliminar el remanente de soda en la fibra, se continúa con un enjuague frío, y después se procede a realizar el neutralizado que consiste en adicionar ácido acético, la enzima líquida tipo catalasa y detergente, y se calienta a 45 °C durante 10 min; en este punto se sube la temperatura a 80 °C por 10 min y se bota el baño para, finalmente, realizar un enjuague en frío (ver figura B.4 del Apéndice B).

C. Jabonado

Este tratamiento permite eliminar las impurezas naturales de los hilados, y también son procesos que se efectúan después de neutralizar el baño que contiene el hilo, para eliminar los colorantes que no se han fijado en la fibra; es decir, los que se han descompuesto por hidrólisis. Este proceso se aplica a hilos de bambú que proviene de la pulpa del bambú; son hilos naturales que pueden ser teñidos con colorantes reactivos al igual que los hilos pima, hindú o tangüis.

El proceso consiste en añadir a la relación del baño con auxiliares químicos, tales como humectantes, secuestrantes y detergentes a una temperatura de 98° C por 30 minutos. Luego se bota el baño y se repite el proceso nuevamente y se efectúa un enjuague caliente a 80° C por 10 minutos y finalmente un enjuague frío. (ver figura B.5 del Apéndice B).

D. Desmontado

Es el proceso por el cual el hilo después de haber sido teñido, y en el proceso de inspección de tonalidad, este no cumple con los requerimientos del cliente, y se realiza un desteñido de la fibra para teñir nuevamente. Este proceso consiste en añadir a la relación de baño soda líquida al 50%, hidrosulfito de sodio y auxiliares químicos como dispersantes que ayuden a remover el fijador de teñido en la fibra, a una temperatura de 95 °C por 40 min. Luego se bota el baño y se realiza un enjuague caliente a 80 °C por 10 min y un enjuague frío. Se continúa con un jabonado en el cual se adicionan a la relación de baño ácido acético y un dispersante a 98 °C por 40 min. En seguida se retira el baño y se efectúa un enjuague caliente a 80 °C por 10 min, y, finalmente, un enjuague frío (ver figura B.6 del Apéndice B).

2.2.2 Blanqueo óptico

En el caso de los blancos, se realiza un tratamiento previo, el cual puede ser condicionado para el tipo de hilo que se va teñir, o sea, para lotes con hilo pima, hindú o tangüis. En el caso de ser un hilo pima se realiza un preblanqueo pima, y luego se procede a efectuar un jabonado en el cual se añaden a la relación de baño el óptico concentrado al 150% y detergente; luego se calienta a 92 °C por 30 min, se procede a botar el baño, y, finalmente, se realiza un suavizado que consiste en añadir a la relación de baño ácido acético y el suavizante (ver figura B.7 del Apéndice B).

En el caso de ser un hilo hindú o tangüis se hace un preblanqueo normal, y se realiza un jabonado en el cual se añaden a la relación de baño óptico concentrado al 150% y el detergente, y se calienta a 95 °C por 30 min; después se procede a botar el baño, y, por último, se realiza un suavizado que consiste en añadir a la relación de baño ácido acético y los suavizantes a una temperatura de 45°C por 20 minutos (ver figura B.8 del Apéndice B).

2.2.3 Proceso de teñido

Este proceso es la operación más compleja de la planta, el cual tiene por finalidad el proporcionar un color específico al hilo según lo demande el cliente. La tintura de fibras textiles en baños acuosos se basa en un método de absorción del colorante (solute) en un sistema heterogéneo desde el baño de tintura (fase líquida) hacia las fibras (fase sólida); es decir, se produce una transferencia de masa del colorante en estado molecular o iónico siguiendo el proceso de difusión del colorante a través de la fibra, y, finalmente, la interacción entre el colorante y la fibra que puede ser físico, y, por lo tanto, reversible, o también puede ser químico o irreversible. Los factores fisico-químicos como la solubilidad, la velocidad de difusión, la temperatura y la afinidad del colorante por la fibra determinan el comportamiento del teñido. La velocidad de difusión del

colorante en la fibra es debido a un gradiente de concentración del colorante entre el baño de tintura y la fibra, y está regido por la 2ª Ley de Fick:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v \left(\frac{\partial C_A}{\partial x} + \frac{\partial C_A}{\partial y} + \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) + R_A \quad \text{Ec.(1)}$$

La cual nos da una mejor aproximación del proceso en un sistema multidireccional.

Donde: v : velocidad.

D_{AB} : constante de difusividad del colorante A en la fibra B.

C_A : concentración del colorante A.

R_A : término equivalente a la reacción química del colorante A.

Este proceso requiere de la acción de la temperatura para que cada molécula del colorante adquiera la energía de activación óptima para el inicio de la difusión o del transporte molecular. En segundo lugar, el colorante debe tener sustantividad y afinidad por la fibra; el tiempo que demora la realización de la tintura es aquel que toma al proceso alcanzar el estado de equilibrio, lo cual significa que a una temperatura dada del proceso el colorante ha quedado completamente adherido a la fibra, y en tales condiciones la velocidad de absorción del colorante en la fibra y la de desorción del mismo en el baño se igualan. Entonces, bajo tales condiciones, el potencial químico del colorante será el mismo en la fibra y baño de tintura. Desde el punto de vista termodinámico, los sistemas reactivos colorante-fibra involucran funciones termodinámicas en el estado de equilibrio del sistema, como es el concepto de la actividad del colorante en la siguiente ecuación termodinámica:

$$\mu = \mu^\circ + RT \ln a \quad \text{Ec.(2)}$$

La cual define la actividad "a" de un componente de la solución en términos de su potencial químico en la solución y en su estado estándar; y como en el estado de equilibrio el potencial químico del colorante en la fibra y baño de tintura son

iguales ($\mu_f = \mu_s$), se puede establecer una ecuación que defina la afinidad estándar del colorante hacia la fibra ($-\Delta\mu^\circ$).

$$-\Delta\mu^\circ = -(\mu_f^\circ - \mu_s^\circ) = RT \ln \left(\frac{a_f}{a_s} \right) \quad \text{Ec.(3)}$$

Sin embargo, en el estado de equilibrio, la concentración del colorante no es la misma en ambas fases, lo cual es propio de la preferencia y mayor afinidad que tiene el colorante por la fibra textil donde la concentración del mismo es mucho mayor. El proceso de teñido es una operación batch, el cual utiliza en dicho proceso, reactivos, auxiliares y otros agentes. A una determinada temperatura, el teñido puede ser en frío a 60 °C o en caliente a 80 °C, y esto dependerá de los colorantes que intervengan en el proceso; o sea, el teñido será en caliente solo cuando los colorantes azul y turquesa intervengan en un porcentaje mayor con respecto a los otros colorantes que se utilicen en el teñido.

A. Teñido en frío a 60 °C

Consiste en añadir a la relación de baño los auxiliares: secuestrante humectante, ácido acético, cloruro de sodio, y luego se ingresan los colorantes a 80 °C. Si el color a teñir es un color oscuro se mantendrá esta temperatura por 30 min, después se disminuye la temperatura a 60 °C y se continúa con la etapa de dosificación que consiste en añadir el álcali y la soda cáustica en pequeñas dosis por intervalos de 10 min; y se prosigue con la etapa de agotamiento a 60 °C durante 45 min; se realiza después un enjuague frío, un enjuague ácido en el cual se adiciona ácido acético y se calienta a 50 °C por 10 min, luego un enjuague en frío, y se realiza en seguida dos jabonados en el cual se agrega detergente y se calienta a 98 °C por 10 min; se procede a botar el baño y, finalmente, se realiza un enjuague en frío (ver figura B-9 del Apéndice B).

Si el color a teñir es un color claro, se eleva la temperatura a 90 °C por 30 min, y luego se disminuye la temperatura a 60 °C y se continúa con la etapa de dosificación que consiste en añadir el álcali y la soda cáustica en pequeñas dosis por intervalos de 10 min, y se prosigue con la etapa de agotamiento a 60 °C durante 45 min, y se efectúa después un enjuague frío, un enjuague ácido en el que se adiciona ácido acético y se calienta a 50 °C por 10 min, luego un enjuague en frío, y se realiza un jabonado en el cual se agrega detergente y se calienta a 98 °C durante 10 min, después se procede a botar el baño y, por último, se realiza un enjuague en frío (ver figura B-10 del Apéndice B).

B. Teñido en caliente a 80 °C

Consiste en añadir a la relación de baño los auxiliares: secuestrante, humectante, ácido acético, cloruro de sodio; se ingresan los colorantes a 80 °C y se eleva la temperatura a 90 °C por espacio de 30 min; luego se disminuye la temperatura a 80 °C y se continúa con la etapa de dosificación en que se añade el álcali en pequeñas dosis por intervalos de 10 min, y se continúa con la etapa de agotamiento a 80 °C por 45 min; en seguida se realiza un enjuague en frío, un enjuague ácido en el cual se adiciona ácido acético y se calienta a 50 °C por 10 min, un enjuague en frío; después se realiza un jabonado en el cual se agrega detergente y se calienta a 98 °C por 10 min; luego, se procede a botar el baño y, finalmente, se efectúa un enjuague en frío (ver figura B-11 del Apéndice B).

2.2.4 Fijado y suavizado

Es la última operación que se realiza una vez aprobado el matiz obtenido después del último jabonado; este proceso se caracteriza por utilizar auxiliares como suavizantes y fijadores que proporcionan una mejor apariencia en cuanto al color y al tacto. Esta operación consiste en adicionar los auxiliares: suavizante, fijador y ácido acético a una temperatura de 45 °C durante 20 min.

2.2.5 Centrifugado y secado

El centrifugado es un proceso que remueve el líquido de los hilos en un tanque donde se somete a la acción de la fuerza centrífuga, por efecto del rápido giro del tanque que causa la separación por un medio filtrante. En seguida, se realiza el secado en un sector de la planta donde se suministra aire seco y caliente para la eliminación de humedad del mismo; el aire seco proviene de la compresora y es calentado por un intercambiador de calor, por lo que este aire caliente ingresa al tanque de secado.

III. AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA TEXTIL

3.1 Generalidades

Las descargas de agua residual en el medio ambiente, genera un impacto en los cuerpos de agua naturales y la tierra donde tiene contacto con la misma; de tal manera, afectará la vida natural y la de las personas. Su descarga está formada de partículas coloidales, materias flotantes y disueltas, y otras sustancias causantes significativas de los problemas medioambientales.

Figura 3.1. Agua residual textil en una planta de teñido y acabado



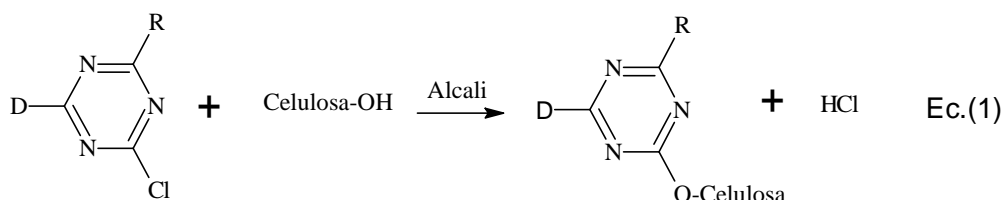
3.2 Agentes contaminantes

Son químicos sobrantes de los procesos productivos, los cuales son vertidos junto con el agua al terminar una etapa de estos procesos (preblanqueo, descruce, teñido, suavizado). Los agentes contaminantes utilizados en estos procesos productivos son los colorantes, reactivos y agentes auxiliares.

3.2.1 Colorantes

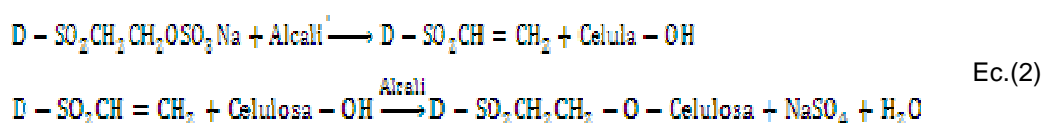
Son reactivos de gran aplicación de los procesos de la industria textil. Estos compuestos son productos de aminas aromáticas con ácido nitroso para producir un compuesto diazo; estos colorantes en su estructura contienen enlaces insaturados, y a estos grupos con algún enlace insaturado se les denomina cromóforos, siendo los más importantes: nitroso-N=O, nitro, azo, azoamina, azoxi y tiocarbonilo; estos grupos por ser inestables absorben energía a determinada longitud de onda que, a diferencia de los estables, absorben todas las radiaciones dando una superficie negra o blanca cuando las refleja todas. Los grupos cromóforos tienen una absorción selectiva y son los que imparten color a la molécula; además, al unirse con anillos aromáticos, refuerzan la absorción de la radiación, pero es necesario que los colorantes contengan en sus moléculas grupos auxocromos, capaces de fijar la molécula del colorante en la fibra, siendo el hidroxilo, amino, carboxilo sulfónicos, cloro y bromo los más importantes de dichos grupos. Existen diversos colorantes empleados para el teñido de diferentes tipos de fibras los cuales se clasifican en colorantes ácidos, básicos, directos, dispersos, sulfurosos, reactivos, etc. Los colorantes reactivos son empleados en el proceso de tintura de fibras celulósicas mediante reacción química con las moléculas de celulosa; además, tienen anillos heterocíclicos en su molécula, y su reacción se basa en un mecanismo de sustitución nucleofílica formando ésteres de celulosa.

Reacción por sustitución nucleofílica



Y, respecto a los que contienen vinisulfónicos, su reacción se basa en el doble enlace C=C que son capaces de formar en un medio alcalino, mediante un mecanismo de adición nucleofílica originando ésteres de celulosa.

Reacción de adición nucleofílica



Todos los colorantes reactivos para la celulosa son propensos a la hidrólisis en presencia de humedad, y a menos que se almacenen y traten adecuadamente, sufren deterioros. Para este fin es necesario contar con condiciones adecuadas de almacenamiento (lugar seco y frío). Cuando el tintorero disuelve los colorantes, los compuestos químicos empleados para el teñido no deben disolverse junto con los colorantes. El límite de solubilidad de cada colorante nunca debe excederse. En caso sea necesario acercarse a estos límites, es posible mejorar la calidad de las soluciones empleando úrea. Cuando se empleen colorantes a base de vinil-sulfon, la úrea no debe disolverse junto con los colorantes.

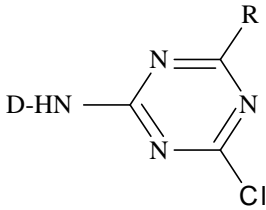
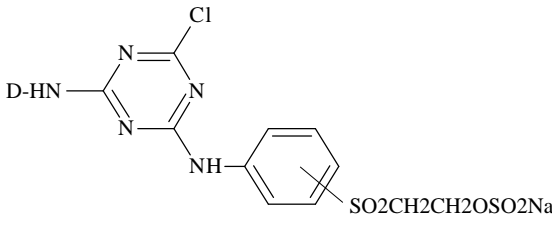
Actualmente, los colorantes reactivos tienen gran demanda en el mercado textil; sin embargo, se ha podido identificar en los colorantes actuales varios problemas relacionados con los siguientes aspectos: color, productividad, reproductividad, calidad, igualación, energía y contaminación. Los colorantes se clasifican según el color que imparten a la fibra en: colores primarios los cuales no se pueden crear mezclando otros colores; colores secundarios que son el resultado de mezclar dos colores primarios, y los colores terciarios que se obtienen de la mezcla de un primario con un secundario. Para la obtención de un color se recurre a ver la gama de colores primarios teñidos en fibras desde concentraciones menores a mayores que maneja el laboratorio, y que

actualmente son 9 colorantes reactivos, para formular en principio una aproximación al tono del color requerido. El aspecto de la productividad depende del tiempo de teñido, de la propiedad del lavado, de la relación de fijación, de la relación de baño, entre otros. Para obtener un teñido reproducible se debe controlar, aproximadamente, 14 factores del proceso de teñido o monitorear los cambios efectuados. Estos factores son: calidad de suministro de agua, tratamiento del previo, ponderación de los colorantes y de los productos químicos, método de dispersión de los colorantes y de los productos químicos, selección de los colorantes, relación de baño, pH del baño de tintura, perfil de tiempo y temperatura, etc. La selección de colorantes está determinada por algunos factores: compatibilidad, calidad y costo. La compatibilidad de los colorantes con perfiles óptimos similares, cuando se emplean en combinaciones, garantiza que los tres agoten, migren y se fijen como un colorante único, manteniendo un ángulo de matiz similar durante todo el proceso. La calidad depende del balance de la solidez de una combinación de tres colores y de la estabilidad del enlace químico entre el colorante y la fibra. Cabe indicar, que es importante el ahorro de energía con la finalidad de obtener procesos cortos, económicos, de bajo consumo de agua residual y a bajas temperaturas.

Características de los colorantes reactivos:

- Absorben la longitud de onda del espectro visible.
- Se componen de compuestos aromáticos policíclicos.
- Son solubles en agua en su forma aplicada.
- Tienen afinidad química por la fibra.
- El colorante queda adherido a la fibra cuando alcanza el estado de equilibrio ($\mu_f = \mu_s$).
- Reaccionan a diversas temperaturas para alcanzar su E_a (Energía e activación) óptima para el inicio de la difusión molecular.
- Son resistentes a la degradación biológica.

Cuadro 3.1. Algunos colorantes aplicados en la planta de teñido y acabado

Colorante	Grupo reactivo	Características
Azul	Monoclorotriazina 	Alta sustentividad y limitada propiedad de lavado. Reactividad con la fibra es baja. Temperatura de teñido es alta.
Anaranjado Negro Azul Turquesa	Vinilsulfona $D - SO_2CH_2CH_2OSO_3H$	Enlace químico estable con la fibra (buena solidez). Temperatura de teñido es baja.
Amarillo Amarillo Rojo Navy	Bifuncional 	Tiene dos grupos reactivos: el MCT y el VS. Sustentividad y reactividad son similares, buena igualación. Colores brillantes y buena solidez.

Fuente: Sanchez, J. C. Introducción al blanqueo de materia texti. 1966.

3.2.2 Reactivos

A. **Peróxido de hidrógeno**

El peróxido de hidrógeno o agua oxigenada es un compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, y que por lo general se presenta como un líquido viscoso. Es conocido por ser un poderoso oxidante, eficaz, de gran alcance y versátil. El peróxido de hidrógeno es inestable y se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor durante la reacción de blanqueo químico de hilados de algodón.

B. **Ácido acético**

Es un líquido incoloro de olor fuerte, muy soluble en agua y alcohol. Cuando está anhidro cristaliza a 17 °C tomando un aspecto parecido al hielo, por lo que se le conoce como ácido acético glacial; asimismo, es un buen disolvente de varios compuestos orgánicos y de algunos inorgánicos como el azufre y fósforo. Se utiliza como agente acidulante en la disolución de colorantes y como agente neutralizante.

C. **Carbonato de sodio**

Es un sólido blanco bastante soluble en el agua. Sus disoluciones tienen reacciones alcalinas por efecto de la gran hidrólisis que experimenta esta sal. Este álcali permite abarcar el rango de pH de 8 a 12, lo que constituye el rango de interés para todos los métodos de teñido reactivo. Es recomendable emplear carbonato de sodio de alta pureza, y para efectuar adiciones al baño de tintura se debe emplear soluciones bien diluidas.

D. Hidróxido de sodio (soda cáustica)

Comercialmente es llamada soda cáustica, reacciona con agua, ácidos y compuestos orgánicos y es altamente corrosiva. Asimismo, la soda cáustica es utilizada en el tratamiento previo a la fibra, reacciona con el peróxido y juntos blanquean el tejido eliminando su coloración natural; y en el proceso de tintura la soda cáustica, al igual que el carbonato de sodio, cumple la función de fijar el colorante en la fibra. Además, la soda cáustica es utilizada como una solución de 50% en las diversas etapas del proceso.

E. Hidrosulfito de sodio

Es un producto (sólido de color blanco) que contiene sodio dionizado ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) como ingrediente activo; actúa como agente reductor aportando un electrón o electrones a otros componentes; como agente azufroso, el hidrosulfito adiciona azufre a otros compuestos químicos, y como fuente de catión, el hidrosulfito adiciona catión o sodio a un sistema de producto; además, es un agente blanqueador de carácter reductor similar al peróxido de hidrógeno. Mantiene la estructura molecular de los colorantes por efecto del calor.

3.2.3 Agentes auxiliares**A. Cloruro de sodio**

Se caracteriza por su alta pureza con mínima cantidad de insolubles y libre de materias extrañas; le da homogenización en los colores y tonos fijándolos en la fibra textil con mayor duración; optimiza la reacción de colorantes reactivos brindando un mayor agotamiento del colorante en el proceso del teñido. Por su baja dureza disminuye el consumo de secuestrantes químicos. El mecanismo de reacción que utiliza estos

electrolitos en una solución acuosa del colorante, es que el ion salino le quita el espacio al anión colorante, hasta un punto tal que o sube a la fibra o se agrega a otros iones del colorante, formando un equilibrio que se pueda desplazar hacia una u otra dirección de acuerdo con los cambios de los factores externos. La sal disminuye la solubilidad de los colorantes al poseer un efecto agregado a las moléculas del colorante en soluciones acuosas, al reducir la hidrófila del colorante. Así mismo, la cantidad de sal inorgánica a agregar depende de la intensidad del teñido y de la relación de baño. Cabe señalar que las sales más utilizadas en el proceso de tintura son el sulfato de sodio, sulfato de amonio, bicromato de potasio y el sulfato de cobre.

B. Secuestrante

Este agente se utiliza en acción al tratamiento previo que se da a la fibra celulósica la cual contiene pectinas conformadas principalmente por ácidos poligaracturónicos que gradualmente se convierten, con el crecimiento de la planta, en sales de calcio, magnesio o hierro, y consecuentemente se vuelven menos gruesas y más solubles al agua por la carencia de enlaces químicos con la celulosa. El secuestrante es un compuesto que forma complejos estables (quelatos), con iones metálicos, y son solubles en agua; estos complejos son aquellos donde el átomo metálico está en un anillo ligado a 5 o 6 átomos. Cuando el complejo es formado, el ion metálico es prácticamente removido de la solución, y deja de existir como tal; se retira de dos formas: secuestrándolo o precipitándolo. Los secuestrantes pueden ser de tipo orgánico, fosfonato e inorgánico; estos son seleccionados según el tipo de metales a secuestrar, solubilidad de complejos en presencia de electrolitos, efecto sobre los colorantes según la tintura, rango de pH y temperatura del proceso.

C. Agentes tensoactivos

Son sustancias que modifican la actividad superficial de las soluciones acuosas, permitiendo una rápida humectación de los líquidos y sólidos a la vez que un mejoramiento de las propiedades emulsionantes y dispersantes de las soluciones acuosas.

Los agentes detergentes tienen en su estructura moléculas o grupos funcionales (carboxilo, sulfoéster, sulfonatos, aminas, amidas) que, dependiendo de la posición en la cadena alifática o cíclica, favorecen propiedades manifestadas en las soluciones que caracterizan a estas sustancias en humectantes, detergentes, suavizantes, fijadores y dispersantes.

a. Humectante

Es utilizado en el tratamiento previo de la fibra, y cada fibra consta de tres partes principales: pared primaria, pared secundaria y lúmen. La pared primaria consiste de una red de fibrillas de celulosa cubierta de una capa exterior o cutícula a base de pectina, proteínas, material mineral y cera. Cabe indicar que la cera hace que la fibra sea impermeable al agua y a soluciones acuosas. El humectante asegura una buena penetración del licor de baño sobre la fibra; esta ventaja es bien aprovechada en tejidos muy compactados o hilos de alta torsión; y su uso es ideal en los procesos de tintura, y además posee un excelente poder de detergencia.

b. Detergente

Son especies químicas de naturaleza polar y no polar a la vez. La parte lipofílica (parte no polar) de la molécula está compuesta, generalmente, por estructuras alifáticas o alifático-aromáticas; mientras que los grupos

hidrofílicos, que constituyen la parte polar de la molécula, suelen estar cargados eléctricamente; estas sustancias se clasifican normalmente según la carga que lleva su grupo polar hidrofílico. Finalmente, los productos más utilizados son los sulfatos aniónicos, los sulfonatos y los fosfatos.

c. Suavizante

Es un producto que confiere a los materiales textiles una serie de propiedades, entre las que destaca la mejora al sentido del tacto; se puede clasificar en aniónicos, catiónicos y no iónicos. En general, los productos del tipo catiónico son aquellos aplicables a métodos por agotamiento, debido a la atracción de cargas entre el producto y los materiales textiles. Se busca que el producto en solución del baño de aplicación suba a la fibra, esto es se agote en el baño. Por esta razón se suavizan en la misma máquina de teñido. Generalmente, estos productos tienden a producir un color amarillento, más notorio en el caso de blancos, y suelen aplicarse en medios ligeramente ácidos.

d. Fijador

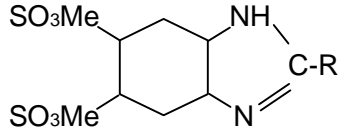
Son auxiliares catiónicos y reactivos hidrolizados que, aplicados después de la tintura, mejoran la resistencia del color a los efectos de los lavados y la luz; en su estructura, los fijadores pueden contener formaldehído y fenoles. Se deben escoger productos libres de estos compuestos.

e. Dispersante

Son sulfonatos aromáticos de carácter aniónico de color amarillento o marrón, y tienen buena estabilidad a la dureza del agua, a los ácidos y electrolitos, y su efecto es de dispersar adecuadamente los colorantes

impidiendo que el colorante se sobredeposite sobre el material a teñir. Se utiliza principalmente en el proceso de desmontado para retirar el fijador y el colorante de la fibra.

Cuadro 3.2. Agentes tensoactivos presentes en la industria textil

Agentes tensoactivos	Compuestos químicos	Estructura molecular
Humectantes	Sulfoésteres internos de ácidos grasos	$\begin{array}{c} \text{—R—CH—R}_1\text{—COOH} \\ \\ \text{O.SO}_3\text{Me} \end{array}$
	Sulfonatos internos de ácidos grasos	$\begin{array}{c} \text{—R—CH— —R}_1\text{—COOH} \\ \\ \text{SO}_3\text{Me} \end{array}$
	Sulfoésteres internos de ésteres de ácidos grasos	$\begin{array}{c} \text{R—COOX}_1 \\ \\ \text{O.SO}_3\text{Me} \end{array}$
	Sulfoésteres de alcoholes secundarios	$\begin{array}{c} \text{R—CH—R}_1 \\ \\ \text{O.SO}_3\text{Me} \end{array}$
Detergentes	Jabones	—R—COOMe
	Alquilbenzimidazol sulfonado	
	Alcoholes grasos sulfatados	$\text{—R—CH}_2\text{.SO}_3\text{Me}$
	Ésteres de ácidos grasos con ácidos alquilsulfónicos	$\text{—R—COOXSO}_3\text{Me}$
	Sulfonalquilamidas de ácidos grasos	$\text{—R—CONHX.SO}_3\text{Me}$
Suavizantes	Hidrocarburos alifáticos sulfonados	$\text{—C}_n\text{N}_{2n-1}\text{SO}_3\text{Me}$
Fijadores	Aminas y sales de amonio	$\begin{array}{c} \text{X} \\ \\ \text{— R—C— NH— X}_1 \\ \\ \text{D} \end{array}$
Dispersantes	Sulfonatos	$\text{—SO}_3\text{Me}$

Me: metal alcalino generalmente Na, K; D: Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, $\text{CH}_3\text{—COO}^-$

Fuente: Sanchez, J. C. Introducción al blanqueo de materia textil. 1966.

D. Blanqueador óptico

Es un cuerpo incoloro o ligeramente coloreado en varias tonalidades (rojizo, azulado, mas azulada, violeta, etc.) que poseen la propiedad de absorber la luz UV invisible y emitirla como luz visible de una longitud de onda determinada, y que en varios casos corresponde a la banda espectral del azul con lo que se obtiene un aumento de la cantidad de luz azul emitida por el cuerpo, y con el consiguiente incremento de la sensación de blanco, basándose su acción en el principio de la fluorescencia.

Su carácter de compuestos anión activo determina que sean depositados por las sales de metales pesados. Su estructura química es un derivado diaminostilbeno sulfonado, el cual tiene la propiedad de dar buena solidez a la luz, al lavado y al sudor; asimismo, son estables a tratamientos oxidantes por lo que se puede mezclar con los baños de blanqueo con peróxido, pero inestables con los de blanqueo con clorito. Su rendimiento tintóreo es elevado, y adiciones del 0,3% sobre fibra, al baño en el proceso de jabonado para la obtención de un blanco óptico en las fibras, son suficientes para producir efectos notorios.

E. Catalasa

Es una enzima que contiene cuatro grupos de ferroporfirina por molécula que cataliza o acelera la descomposición del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno. Esta enzima de naturaleza proteica tiene su máxima actividad cerca del rango de pH de 6-7; es utilizado en el proceso de neutralizado del preblanqueo para eliminar el peróxido residual de la fibra en una relación de baño con la fibra donde intervienen detergentes y ácido acético para ajustar el pH; asimismo, la temperatura óptima para activarse estas enzimas está en el rango de entre 45 y 55 °C, y su dosificación a la relación de baño con la fibra es desde 0,1 hasta 0,3 g/l.

Cabe indicar que la catalasa pierde su actividad después de 4 meses de almacenamiento a 25 °C.

3.3 Efectos en la salud

El agua residual es perjudicial para el medio ambiente y las personas. Los efectos de la salud pueden representar un cuadro clínico de una enfermedad, asociada de los agentes contaminantes presentes en el agua residual.

Las principales sustancias que causan los efectos de la salud y del medio ambiente son las materias flotantes, suspendidas y disueltas.

3.3.1 Materias flotantes

Las materias flotantes son producidas por varios tratamientos previos del proceso de teñido de fibras celulósicas y de las etapas de jabonado y suavizado, los cuales producen espuma durante el vertimiento de los efluentes. Están compuestos de aceites, grasas y espumas, y que su toxicidad genera ciertos efectos a la salud y al ambiente siendo los siguientes:

- Interfiere la fotosíntesis de la microflora al impedir el paso de la luz.
- Contribuye la contaminación estética que es desagradable a la vista
- Destruye la vegetación natural y la vida acuática
- Entra en contacto con la piel y los ojos causando irritación
- Produce diarreas y vómitos.

Por último, la espuma producida desaparece en minutos, después de muy pocos metros del punto de vertido.

3.3.2 Materias en suspensión

Estos materiales están constituidos por fibras, pelusas, pigmentos y materiales de limpieza. Algunos de estos materiales se depositan lentamente sobre el fondo de los cuerpos de agua generando acumulaciones de sólidos, y que obstruyen el paso de los efluentes. Si los depósitos de agua presentan estos sólidos, producen asfixia de los microorganismos depuradores y destrucción de las zonas de alimentación y reproducción de los peces. Cuando estas materias son de naturaleza orgánica, se descomponen progresivamente agotando el oxígeno y generando gases tóxicos y olores indeseables.

3.3.3 Materias disueltas

Constituye el grupo más importante de contaminantes presentes en las aguas residuales textiles, en las que se puede encontrar productos químicos, tales como los colorantes, metales pesados y otros químicos, los cuales son venenosos dependiendo de la dosis y el tiempo de exposición. Estos componentes no solo son tóxicos para los seres humanos, sino también para la vida acuática, y pueden dar lugar a la contaminación de los alimentos.

A. Colorantes

Los colorantes son solubles en el agua, adsorben la radiación visible y saltan a la vista en los cuerpos de agua a los ojos de las personas. Su toxicidad afecta la salud de la persona y el medio ambiente. Los efectos producidos por la presencia de colorantes en el agua son los siguientes:

- Interfieren la fotosíntesis de la microflora al impedir el paso de la luz.
- Cambian el color natural de los cuerpos de agua denominándolo contaminación estética.

- Consumen el oxígeno del agua provocando muerte por asfixia de los organismos acuáticos.

Algunos de los colorantes disueltos son tóxicos para el ser humano, como los derivados fenólicos, transportadores de tintura, sales, bases y una gran concentración de auxiliares textiles; generan un efecto más agudo sobre el cauce receptor. En cambio, los colorantes azoicos y antraquinonas producen cáncer porque poseen estructuras electrofílicas tales como las aminas, derivados de aminas y nitroaminas, hidroxilaminas e hidracinas.

Cuadro 3.3. Efecto de los colorantes a la salud

Toxicidad aguda	<ul style="list-style-type: none"> • Irritación a la piel y ojos • Dermatitis • Conjuntivitis • Rinitis • Asma • Reacciones alérgicas
Toxicidad crónica	<ul style="list-style-type: none"> • Cáncer • Mutación • Alteraciones genéticas

Fuente: Elaboración basada de Christie, R. M. Environmental aspect of textile dyeing. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited. 2007.

En el cuadro 3.3 se muestra los efectos tóxicos en la persona cuando esta ingiere por vía oral, respiratoria o por contacto a la piel.

B. Metales pesados

Los metales pesados son solubles y cancerígenos. Los metales de transición como el mercurio y plomo son causantes de envenenamiento, los cuales afectan el sistema nervioso, hallándose estos metales en los pigmentos para pinturas y para usos de estampados textiles.

C. Otros componentes

El amoníaco en el efluente textil es nocivo para los peces u otros organismos acuáticos. Por su parte, el sulfuro en el efluente textil puede conducir a la mala calidad del aire del ambiente convirtiéndose en amenaza para las personas y la vegetación.

3.3.4 Altas temperaturas

Los procesos de teñido son realizados a altas temperaturas, y en el momento de la descarga su temperatura varía desde 30 hasta 80 °C. Estas temperaturas aumentan la rapidez de agotamiento de oxígeno en áreas donde existen desechos que lo demandan causando menor solubilidad de oxígeno, y deteriorando la calidad del agua.

El aumento de la temperatura del agua es una consideración importante cuando las sustancias tóxicas están presentes en el agua. Varias sustancias, como los cianuros fenoles, zinc xileno, exhiben una mayor toxicidad a temperaturas elevadas.

Otro de los efectos sobre la biodiversidad acuática es la emigración de diversas especies.

IV. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LA INDUSTRIA TEXTIL

4.1 Generalidades

En las últimas décadas se encontraron técnicas de tratamiento con el objetivo de hallar una manera económica y eficiente para la industria textil mediante tratamientos físico-químicos, procesos bioquímicos, tratamientos combinatorios y otras tecnologías.

Los tratamientos de agua residual son los métodos más aceptados para lograr la seguridad del medio ambiente. Los tratamientos físico-químicos, bioquímicos y las combinaciones de las mismas no son muy eficaces por el porcentaje de separación deseado. Sin embargo, las otras tecnologías son altamente eficientes para las aguas residuales de la industria textil.

Un tratamiento está compuesto por una serie de procesos unitarios individuales; por lo tanto, la salida del proceso (efluente) se vuelve como la entrada (afluente) del siguiente proceso.

Cuadro 4.1. Tratamientos físico-químicos y biológicos utilizados en las aguas residuales textiles

Tratamientos	
Tratamiento físico	<ul style="list-style-type: none"> • Desbaste • Sedimentación • Floculación • Filtración y tecnología de membranas (microfiltración, nanofiltración, osmosis inversa) • Flotación
Tratamiento químico	<ul style="list-style-type: none"> • Neutralización (dosificación y/o absorción) • Procesos de oxidación avanzada • Coagulación • Electrocoagulación • Adsorción
Tratamiento biológico	<ul style="list-style-type: none"> • Digestión aerobia • Digestión anaerobia • Procesos enzimático

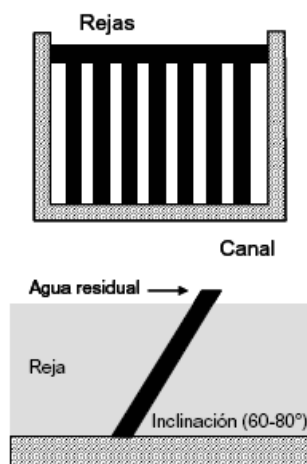
Fuente: Cristie, R. M. Environmental aspect of textile dyeing. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited. 2007.

En las últimas décadas, muchas técnicas se han desarrollado para encontrar una manera económica y eficiente para el tratamiento de aguas residuales de la industria de teñido textil, tales como los procesos físico-químicos, bioquímicos y otras tecnologías. Estas tecnologías son altamente eficientes para las aguas residuales de teñido textil.

4.2 Desbaste

Es el primer proceso físico que tiene lugar en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Este proceso retiene los materiales de grandes dimensiones y características ajenas al sistema de tratamiento químico y biológico, tales como los trozos de tela, trapos, fibras, hilos, pelusa y otros materiales para no deteriorar los equipos de las siguientes etapas del tratamiento. Los elementos separadores son de material mecánico con aberturas de tamaño uniforme o variado; están formados por rejillas, barras, alambres, varillas paralelas, placas perforadas o tamices de material metálico.

Figura 4.1. Desbaste de rejillas inclinadas



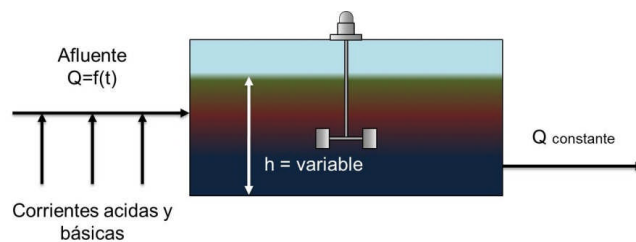
Fuente: Miliarium.com. Ingeniería Civil y Medio Ambiente. 2004.

4.3 Homogenización

Es un proceso físico donde las corrientes de agua residual se recolectan en un tanque o poza. La ecualización permite uniformizar la composición en el flujo de agua residual produciendo la mezcla compósito, y posibilita que los sólidos se asienten, y este ayuda a mantener un rango de flujo constante en la unidad de tratamiento. También permite corregir el pH, bajar la temperatura, y actúa como sedimentador primario. El caudal varía conforme el nivel del tanque debe

hacerse variable tal como está en la figura 4.2 donde Q es el caudal y h el nivel del agua residual.

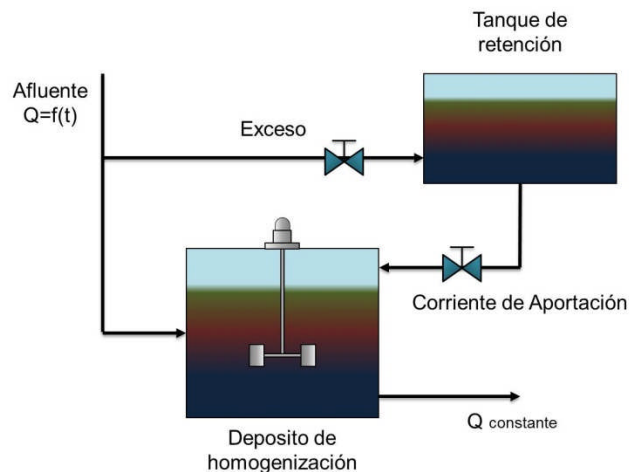
Figura 4.2. Depósito de homogenización de nivel variable



Fuente: Ramalho, R. Tratamiento de Aguas Residuales. Segunda ed. 2003.

Si existe un exceso según las pruebas experimentales, este exceso irá a un depósito de retención, el cual sale de una pequeña purga que va alimentando al tanque de homogenización para mantener el caudal, DQO, turbiedad, alcalinidad total y pH. En la figura 4.3 se muestra este proceso.

Figura 4.3. Método de estanque de retención para homogenización



Fuente: Ramalho, R. Tratamiento de Aguas Residuales. Segunda ed. 2003.

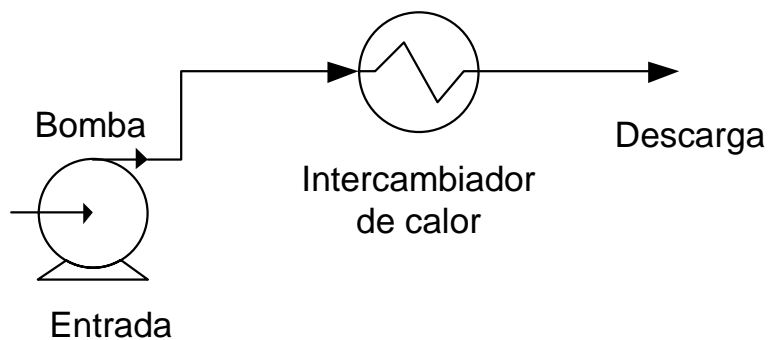
4.4 Enfriamiento

Los sistemas de enfriamiento para el tratamiento de efluentes de la industria textil son importantes para reducir la temperatura, el cual genera efectos contaminantes en los cuerpos del agua. Para solucionar este problema se tiene dos métodos de enfriamiento.

4.4.1 Intercambiador de calor.

Es un proceso donde el efluente se enfría en contacto con el agua.

Figura 4.4. Intercambiador de calor para enfriamiento de efluentes textiles



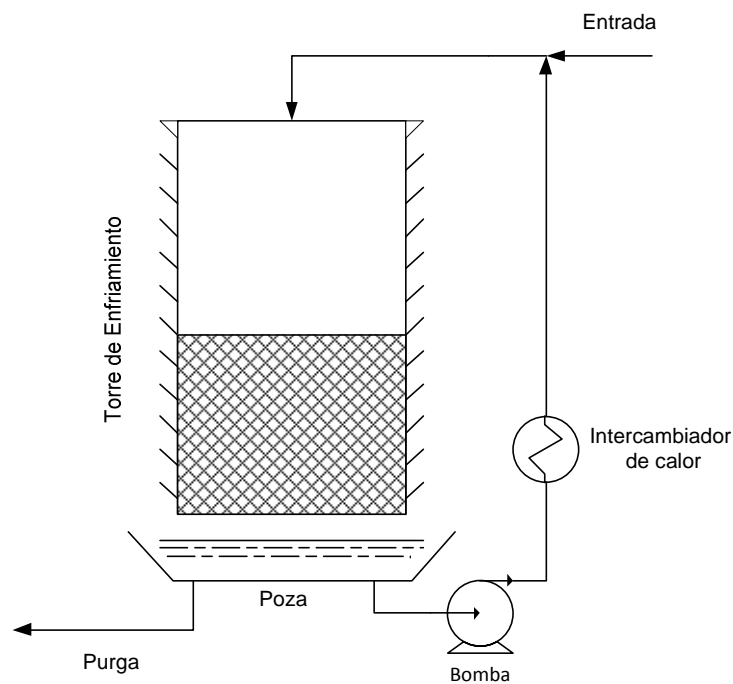
Fuente: Yayon, F. V. Tratamiento de aguas industriales. 1984

4.4.2 Torres de enfriamiento.

Es un proceso donde el efluente se enfría exponiendo su superficie al aire. Su tratamiento ocurre debido a la evaporación de una pequeña cantidad de agua y la diferencia de temperatura entre el agua y el aire. Para lograr un enfriamiento eficaz del efluente hasta llegar a una temperatura requerida, dependerá de la temperatura y humedad del aire. En la figura 4.5 se aprecia una torre de enfriamiento de tiro natural, donde el aire ingresa en los orificios de las paredes y

el efluente ingresa por el tope y cae hasta la poza para luego ser purgado hasta el desagüe o hasta los siguientes tratamientos.

Figura 4.5. Torre de enfriamiento para efluentes textiles



Fuente: Yayon, F. V. Tratamiento de aguas industriales. 1984.

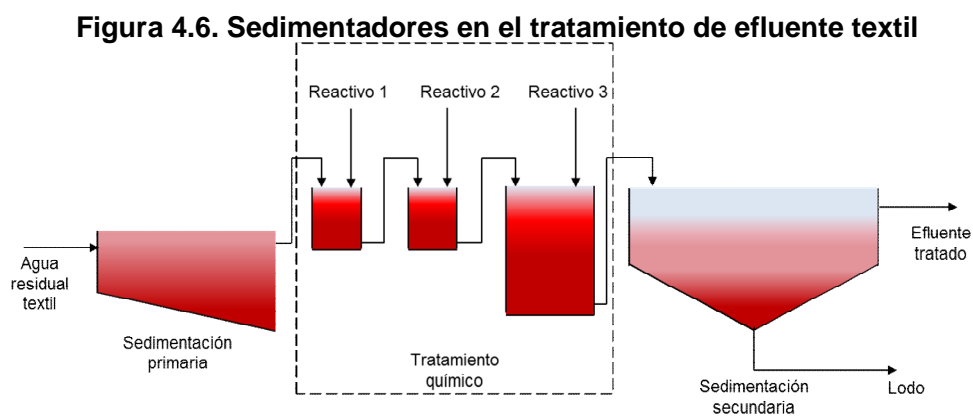
4.4 Sedimentación

Es un tratamiento físico-químico que separa sólidos del líquido, o sea las partículas floculadas, del medio en el cual están suspendidas. La separación de los sólidos más densos que el agua tiene una velocidad de caída que puede llegar al fondo del sedimentador con un tiempo económicamente aceptable. Para las partículas aglomeradas, que son productos del tratamiento de coagulación-floculación, favorecen la velocidad de caída aumentando y reduciendo el tiempo de sedimentación.

Los lodos producidos en la planta textil son separados mediante métodos mecánicos, tales como los recolectores de lodo. En la sedimentación se considera tres tipos de mecanismos según la naturaleza de los sólidos suspendidos.

- **Sedimentación discreta:** las partículas se sedimentan manteniendo sus propiedades físicas.
- **Sedimentación por floculación:** las partículas se sedimentan ocurriendo cambios en sus propiedades físicas, y aumenta la velocidad de sedimentación.
- **Sedimentación por zonas:** las partículas se sedimentan formando una manta total presentando una interface distinta a la fase líquida.

En la figura 4.6, los sedimentadores están instalados al inicio o al final del tratamiento según la naturaleza de las partículas sedimentables. En el sedimentador primario se sedimenta las partículas que no fueron tratadas físico-químicamente; y en los sedimentadores secundarios se sedimentan las partículas que fueron tratadas, de manera que ocurrirán cambios en las partículas aumentando la velocidad de sedimentación.

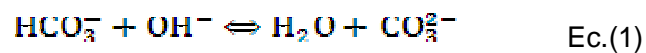


Elaboración propia

4.5 Neutralización

Consiste en reducir o ajustar el pH del agua residual para facilitar los procesos posteriores.

Las aguas residuales textiles comprenden un rango de pH entre 6 y 13, por lo cual, son altamente alcalinos; de tal forma que al adicionar ácido sulfúrico u otro sufren cambios de pH. Asimismo, estas aguas residuales contienen iones bicarbonatos y carbonatos en la solución según la ecuación:



Los tratamientos de neutralización para las aguas residuales textiles son los siguientes:

4.5.1 Neutralización con ácido fuerte

Las aguas residuales textiles son alcalinas, por lo tanto, se desea reducir su pH utilizando un ácido fuerte que es considerablemente económico, tales como el H_2SO_4 , y cuyas reacciones son esencialmente instantáneas.

4.5.2 Absorción de dióxido de carbono

Consiste en la utilización del gas CO_2 para neutralizar las aguas residuales alcalinas a través del burbujeo por medio de tubos perforados o aspersores. La reacción es lenta, pero suficiente, si se neutraliza el pH por debajo de 7 u 8.

4.6 Coagulación-floculación

La coagulación es un proceso por el que los componentes de una suspensión o disolución estable son desestabilizados por superación de las fuerzas que mantiene su estabilidad. Este fenómeno comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua residual, produciendo una serie de reacciones físicas o químicas en fracciones de segundo.

Por otro lado, la floculación es el fenómeno por el cual las partículas desestabilizadas chocan entre sí para formar aglutinaciones de mayor tamaño. Las partículas desestabilizadas entran en contacto unas con otras al aglutinarse. La floculación depende del movimiento browniano y la velocidad de agitación, por lo cual están influenciados al tamaño de partícula.

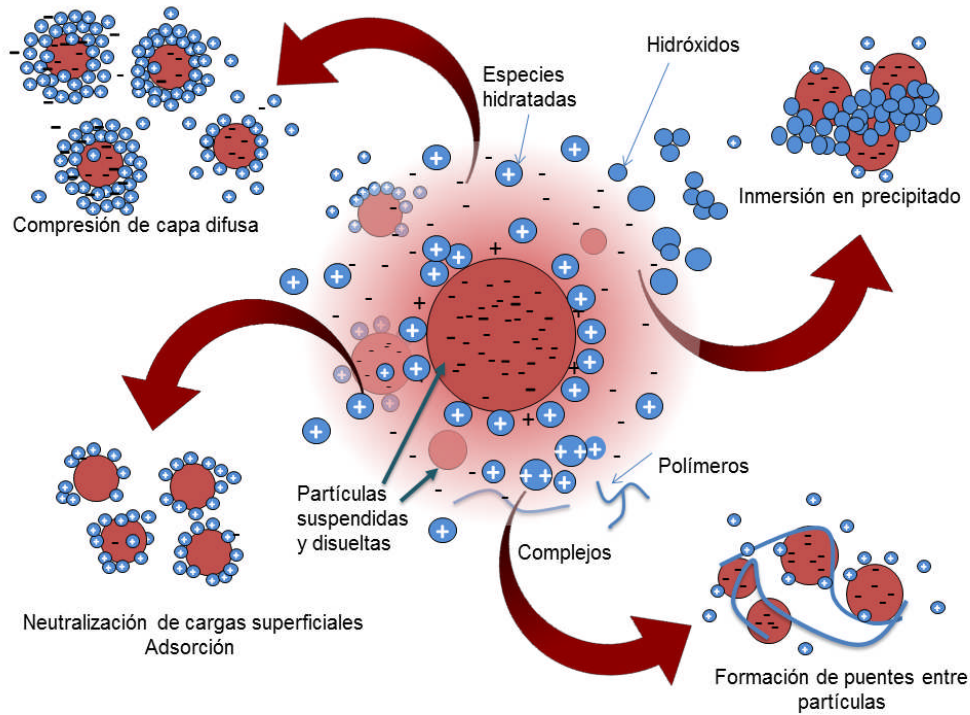
4.6.1 Desestabilización de partículas

Es la reducción de las fuerzas intermoleculares que rodean la partícula que las mantiene separadas; dichas fuerzas están constituidas por la interacción eléctrica, fuerzas de London-Van der Waals, fuerzas de hidratación, y otros.

La desestabilización es presentada mediante mecanismos, como se aprecia en la figura 4.7, y que se mencionan entre los más importantes:

- Compresión de la capa difusiva o doble capa.
- Neutralización de cargas superficiales.
- Inmersión en precipitado.
- Formación de puentes entre partículas.

Figura 4.7. Mecanismos de coagulación de partículas suspendidas y disueltas



Fuente: Elaboración basada de Arbolera, V. J. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. Segunda ed. 1981.

Estos mecanismos son muy complejos y difíciles de predecir cuál de estos sucede primero.

4.6.2 Coagulantes

Los coagulantes se clasifican en dos grandes grupos: metálicos y polielectrolitos (catiónicos, aniónicos y no iónicos).

Cuadro 4.2. Coagulantes metálicos

Compuesto químico	Fórmula
Sulfato de aluminio	$Al_2(SO_4)_3$
Policloruro de aluminio (PAC)	$Al_n(OH)_mCl_{(3m-n)}.H_2O$
Sulfato de hierro II	$FeSO_4$
Sulfato de hierro III	$Fe_2(SO_4)_3$
Cloruro de hierro	$FeCl_3$
Cloruro de aluminio	$AlCl_3$

Fuente: Aguilar, M. S. Tratamiento físico-químico de aguas residuales COAGULACION-FLOCULACION. 2002.

Cuadro 4.3. Coagulantes polielectrolitos

Polielectrolitos	Ejemplos
Polielectrolitos catiónicos	Quitosano
	Almidón
	Polietilamina
	Polivinilamina
	Polivinilpiridina
Polielectrolitos aniónicos	Alginato de sodio
	Ácido poliacrílico
	Poliacrilamida
	Ácido poliglutámico
	Polimetacrilato hidrolizada
	Polivinilsulfónicos
No iónicos	Poliacrilamida
	Polisina
	Polivinil alcohol
	Óxido polietilenito

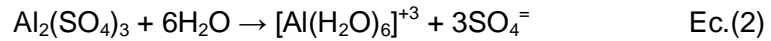
Fuente: Aguilar, M. S. Tratamiento físico-químico de aguas residuales COAGULACION-FLOCULACION. 2002.

El uso de los coagulantes tales como las sales de aluminio, sales de hierro y polímeros depende de la naturaleza del efluente según su pH y alcalinidad de la misma (Ver Apéndice Q). Los polielectrolitos a diferencia de los metálicos producen flóculos grandes con pequeñas dosis debido a la presencia de grupos multifuncionales en las cadenas macromoleculares.

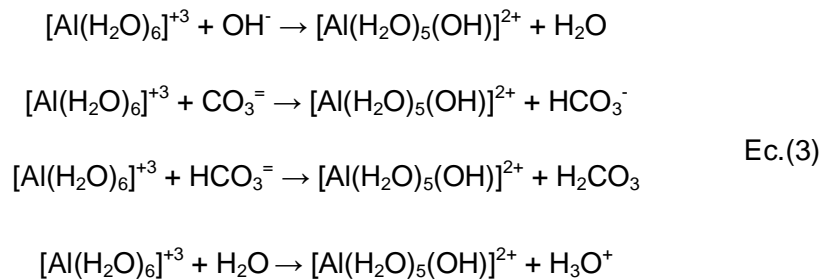
4.6.3 Reacciones químicas de los coagulantes.

Cuando los coagulantes se disuelven en agua, se hidrata en estas especies de $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$ o $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$ cuyas reacciones en agua se muestran a continuación. Además, estos iones pueden hidrolizarse y formar especies monoméricas o poliméricas dependiendo del pH.

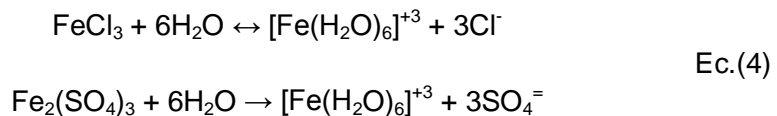
a. Reacciones de sales de aluminio:



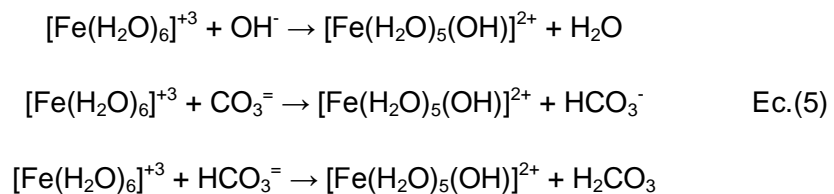
Reacciones con la alcalinidad:



b. Reacciones de sales de hierro:



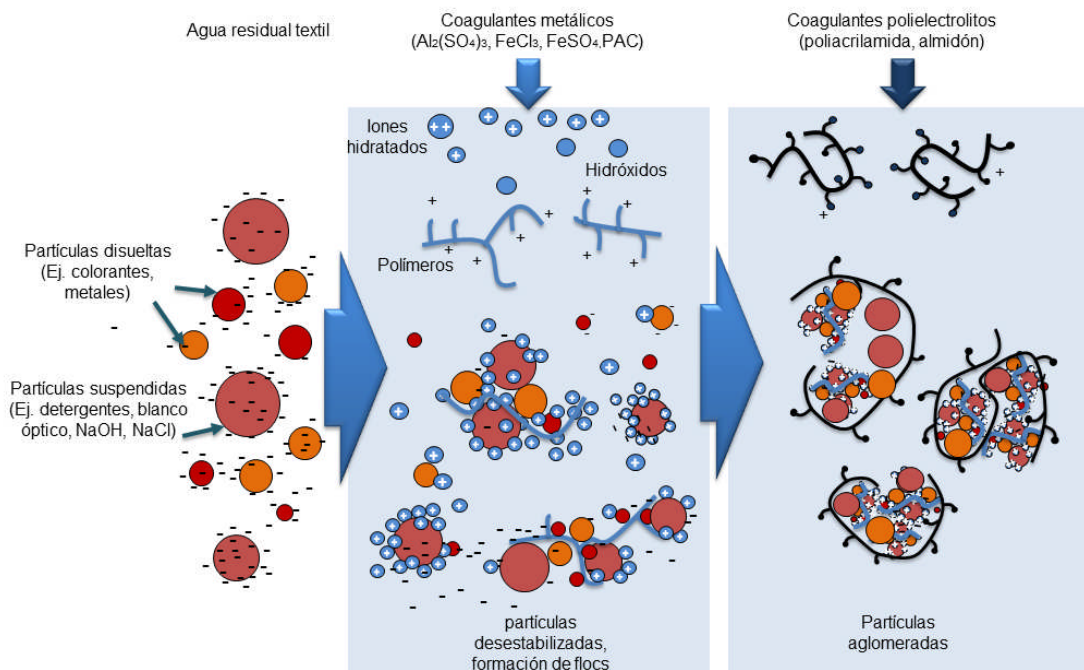
Reacciones con la alcalinidad:



Los coagulantes orgánicos son polímeros cuyos grupos funcionales atraen las partículas suspendidas, disueltas o floculadas con coagulantes metálicos que al añadir una pequeña dosis producen flóculos grandes y tenaces. Estos coagulantes favorecen la floculación, aumentando la velocidad de sedimentación y no afecta el pH del agua tratada.

Los coagulantes orgánicos pueden enlazar con partículas de carga opuesta, lo que es aprovechado para utilizarlos como coadyuvantes junto con sales de aluminio o hierro, tal como se muestra en la figura 4.8.

Figura 4.8. Proceso de coagulación - floculación de un efluente textil



Fuente: Alley, E. R. Water Quality Control Handbook. Segunda ed. 2007.

4.6.4 pH y concentración en coagulantes metálicos

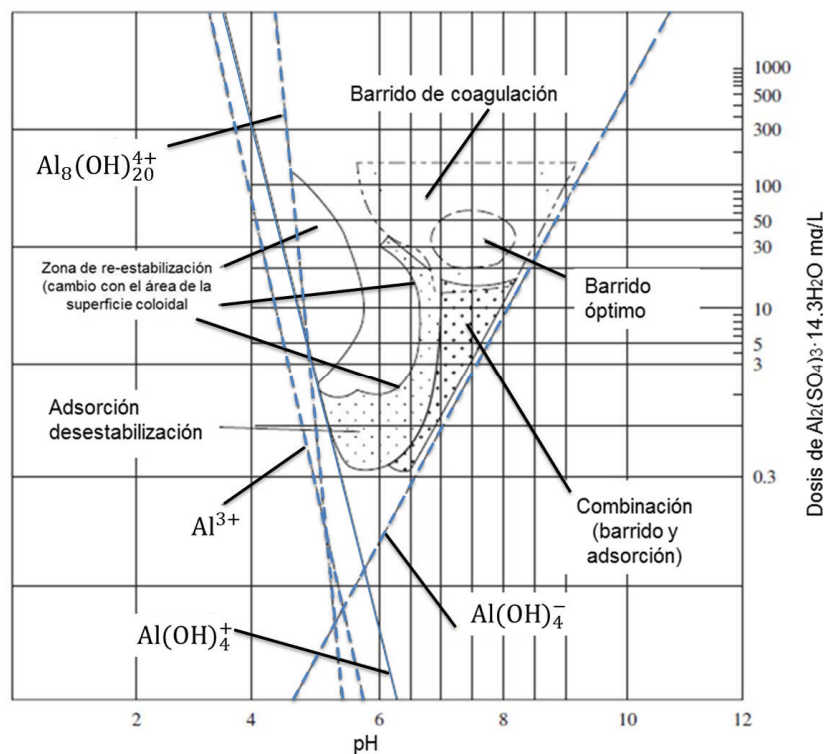
El pH y la concentración afectan a la razón de transformación de unas especies con otras, y durante las reacciones forman un número de complejos

polinucleares con un grado de polimerización mayor que la disminución de la carga por ion metálico en los complejos (Aguilar, 2002).

Dos importantes factores en la adición del coagulante son la dosis y el pH. La dosis óptima y pH deben ser determinadas en las pruebas de laboratorio. El rango óptimo de pH para el sulfato de aluminio es, aproximadamente, desde 5,5 hasta 7,7 con una efectiva coagulación posible entre pH desde 5 hasta 9.

Las sales de hierro, generalmente, tienen un rango de pH para una coagulación efectiva de 4 hasta 9. Las siguientes figuras representan la relación de pH y dosis para los coagulantes de sulfato de aluminio y cloruro férrico.

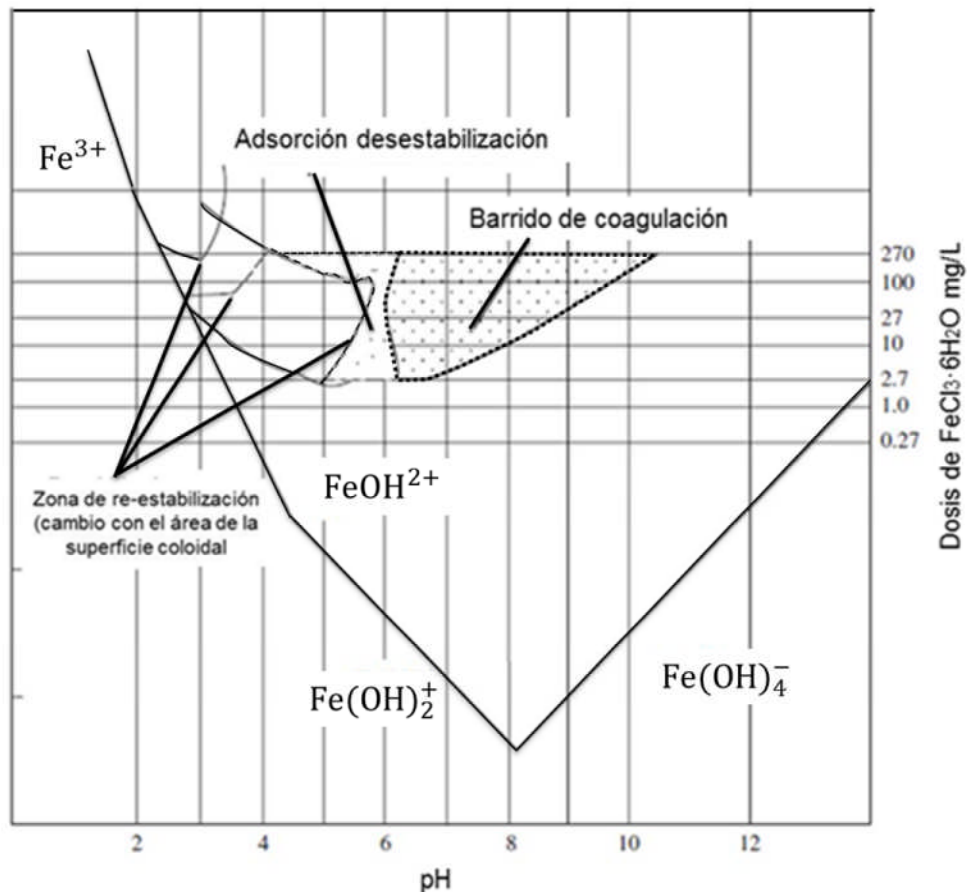
Figura 4.9. Diagrama de diseño y operación de coagulación del sulfato de aluminio



Fuente: Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. Primera ed. 2010.

Para las sales metálicas polihidrolizadas (cloruro de aluminio, sulfato de aluminio) pueden ser usados a un rango desde 4,5 hasta 9,5; porque los números y complejidad de las reacciones del coagulante, la dosis actual y pH para una muestra de agua residual son determinados empíricamente en las pruebas de jarras (ver Apéndice H: Traducción de la Práctica Estándar para la Prueba de Jarras de Coagulación-Floculación del Agua. ASTM D2035-08).

Figura 4.10. Diagrama de diseño y operación de coagulación del cloruro de hierro



Fuente: Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. Primera ed. 2010.

4.6.5 Coadyuvantes

Son agentes auxiliares de la coagulación o la floculación, los cuales actúan sobre los elementos que producen la interferencia en la coagulación, o influyen sobre la etapa de floculación para mejorar algunas de las etapas de las mismas o la sedimentación.

A continuación se citan los más importantes, clasificándolos de acuerdo a su función:

Cuadro 4.4. Tipos de coadyuvantes

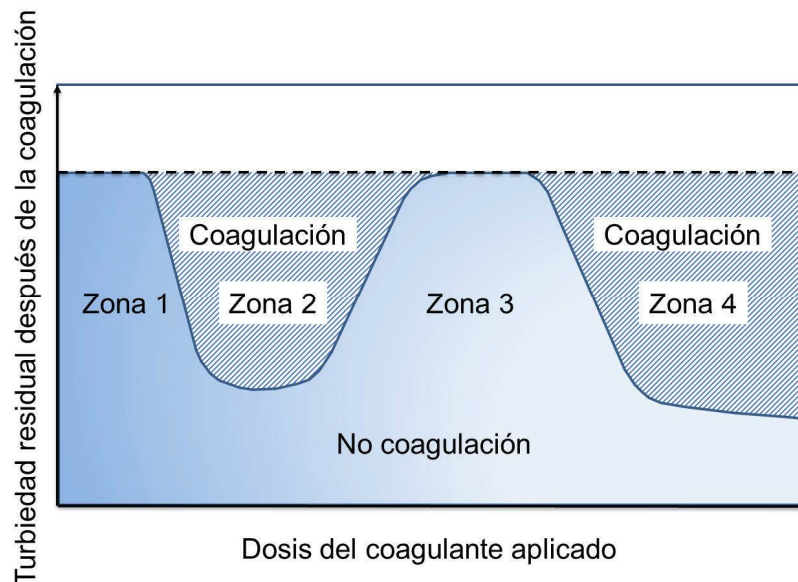
Tipos de coadyuvantes	Función química	Coadyuvantes
Coadyuvantes inorgánicos	Modifican el pH en la coagulación	Cal viva Cal apagada Carbonato de sosa Sosa cáustica
	Reducen la dosis necesaria para la coagulación	Cloro
	Neutralizan las cargas eléctricas de las partículas	Sulfato de magnesio
	Facilitan la aglomeración de flóculos	Arcillas (bentonita) Sílice activada Carbón activado Carbón cálcico precipitado
Coadyuvantes orgánicos	Facilitan la aglomeración de flóculos	Almidón Alginatos Quitosano

Fuente: Aguilar, M. S. Tratamiento físico-químico de aguas residuales COAGULACION-FLOCULACION. 2002.

4.6.6 Dosificación de coagulantes

La dosificación de una dosis creciente de coagulante en agua que contiene partículas productoras de turbiedad origina un comportamiento que se muestra en la forma indicada en la figura 4.11, tomada de una experiencia.

Figura 4.11. Remoción de turbiedad



Fuente: Arbolera, V. J. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. Segunda ed. 1981.

En la figura 4.11 se indica cuatro zonas y que a continuación se explican:

- **Zona 1:** la dosis del coagulante no es suficiente para deshabilitar las partículas
- **Zona 2:** al incrementar la dosis del coagulante, se produce una rápida aglutinación de las partículas suspendidas
- **Zona 3:** por el continuo incremento de la dosis llega un momento en que no se produce buena coagulación, pues los coloides se reestabilizan

- **Zona 4:** por el continuo incremento de la dosis, hasta producir una supersaturación, se origina de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes que hace un efecto de barrido, arrastrando en un descenso las partículas de turbiedad.

4.6.7 Factores que influyen en el proceso de coagulación

- **Tipo de coagulante.** Varía el pH y la solubilidad por lo que es necesario recurrir a los procedimientos experimentales.
- **Contenido de materia en suspensión.** La cantidad y tamaño de las partículas suspendidas están relacionados por la dosis del coagulante.
- **pH.** Está relacionado con la naturaleza de las especies presentes en el agua. Existe para cada coagulante una zona de pH, donde se produce una buena floculación en plazo corto y con una dosis dada de coagulante.
- **Salinidad.** Es la presencia de sales en el agua que afecta la coagulación, tales como el pH óptimo, dosis óptima y tiempo de floculación.
- **Efectos de la temperatura del agua.** La temperatura también influye el tiempo requerido para la formación de flóculos.
- **Tiempo de mezcla y floculación.** Este factor está relacionado con la fuerza de agitación y la formación de flóculos.
- **Fuerza de agitación.** El agua residual está sometido a mezclas rápidas y lentas, las primeras para dispersar el coagulante y las segundas para aumentar el tamaño del flóculo durante un tiempo adecuado.
- **Presencia de núcleos.** Las partículas sólidas suspendidas actúan como núcleo para la formación inicial de flóculos. La presencia de estas partículas puede influir en la velocidad de floculación, y contribuye al aumento de la densidad del flóculo, dando lugar a velocidades de sedimentación superiores.

4.7 Tecnología de membrana

Son tratamientos físicos que los efluentes pasan a través de lechos granulares estáticos, reteniendo las partículas presentes en el agua. El flujo que pasa a través de la filtración suele ser laminar o turbulento.

En los efluentes textiles, los sólidos suspendidos son retenidos según la densidad, viscosidad, tamaño de las partículas y los componentes presentes del efluente, tales como pigmentos, detergentes, metales pesados y materiales de limpieza. También pueden retener partículas precipitadas por coagulación, floculación u otros procesos que no se separaron durante las mismas.

La separación de membranas es un proceso en el que se utiliza una membrana con permeabilidad selectiva para separar sustancias de las aguas residuales. Este proceso es útil para el tratamiento de las aguas residuales en la industria de teñido textil, tales como la osmosis inversa, ultrafiltración, nanofiltración y microfiltración. Cabe destacar que este proceso tiene alta eficiencia de separación, fácil operación, sin contaminación. Sin embargo, tiene ciertas limitaciones, tales como el alto costo de los equipos, mantenimiento.

4.7.1 Osmosis inversa

Este proceso decolora y elimina los reactivos y auxiliares químicos de las aguas residuales. La osmosis inversa permite la eliminación de todas las sales minerales, por lo que, al aumentar la concentración de sales disueltas, mayor es la energía necesaria para el proceso de separación.

4.7.2 Nanofiltración

La nanofiltración retiene compuestos de bajo peso molecular, iones divalentes, tintes hidrolizados y auxiliares químicos.

4.7.3 Ultrafiltración

La ultrafiltración consiste en la separación de una membrana cuya abertura es solo, aproximadamente, desde uno (01) nm hasta 0,05 μm . Permite la eliminación parcial de colorantes por lo que no admite su reutilización para procesos sensibles tales como el teñido, pero puede utilizarse para los procesos de lavado.

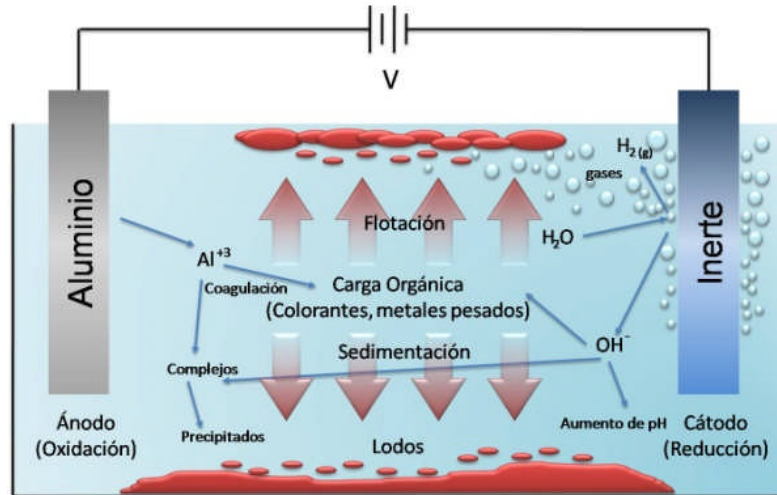
4.7.4 Microfiltración

Este proceso puede ser utilizado para pretratamiento de nanofiltración y ósmosis inversa.

4.8 Electrocoagulación

Es un proceso por el cual se utiliza corriente eléctrica que pasa a través de los electrodos para crear reacciones químicas de los sólidos disueltos, emulsiones y suspensiones susceptibles a este proceso, resultando fenómenos de coagulación, flotación, reducción u oxidación. Este fenómeno puede producir precipitados (sedimentos), gases (hidrógenos u oxígeno) o incrementos de pH, tal como se indica en la figura 4.12.

Figura 4.12. Representación del tratamiento de electro-coagulación



Fuente: Elaboración basada de Christie, R. M. Environmental aspect of textile dyeing. 2007.

En la figura 4.12, los electrodos generan burbujas de hidrógeno que chocan y adhieren los flóculos, arrastrándolos a la superficie del líquido donde se forma una espuma que puede ser removida mecánicamente. También, las burbujas formadas dentro del reactor ayudan a que el aceite y las grasas floten.

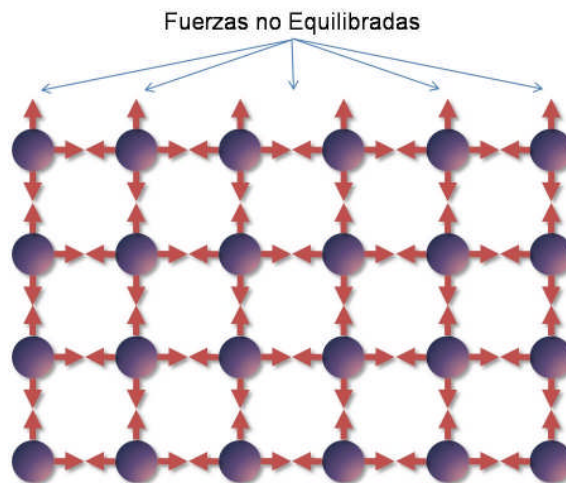
La coagulación normal tiene la desventaja por el exceso de dosificación a la corriente del efluente, resultando el exceso como un componente contaminante. Esta adición excesiva puede evitarse mediante el uso de la electrocoagulación. El coagulante es generado en el ánodo en lugar de dosificarlo, sin necesidad de conocer la cantidad que se requiere. Sin embargo, la electrocoagulación produce menos lodo que la coagulación convencional (Christie, 2007).

Finalmente, la electrocoagulación se ha utilizado en varias industrias textiles para la eliminación del colorante (Christie, 2007).

4.9 Adsorción

Es una operación por la cual ciertos sólidos tienen la capacidad de hacer concentrar sustancias específicas de una solución a la superficie de la misma. Este fenómeno no tiene lugar cuando se coloca dicha superficie en contacto con una solución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido, debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales (Ramalho, 1993).

Figura 4.13. Representación de fuerzas de un sólido



Fuente: Ramalho, R. Tratamiento de Aguas Residuales. Segunda ed. 2003.

En el interior del sólido, las moléculas están sujetas a fuerzas equilibradas, tal como indican las flechas de la figura 4.13. Las moléculas en la superficie están sometidas por fuerzas no equilibradas elevadas que son capaces de atrapar moléculas de un soluto, si se encuentran en contacto. A este fenómeno se denomina adsorción física (o de Van der Waals).

La capacidad de adsorción es función de la superficie total del sólido adsorbente, porque, cuanto mayor sea su superficie, se dispone de mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción.

Otra operación sólido-líquida de gran importancia para el tratamiento de agua residual industrial es el intercambio iónico. Consiste en el intercambio reversible de iones entre ciertos sólidos y una solución de sólidos disueltos, que permite la separación y fraccionamiento de los sólidos disueltos. Su naturaleza química abarca la interacción de los iones con el sólido y la difusión de los iones dentro de la fase sólida.

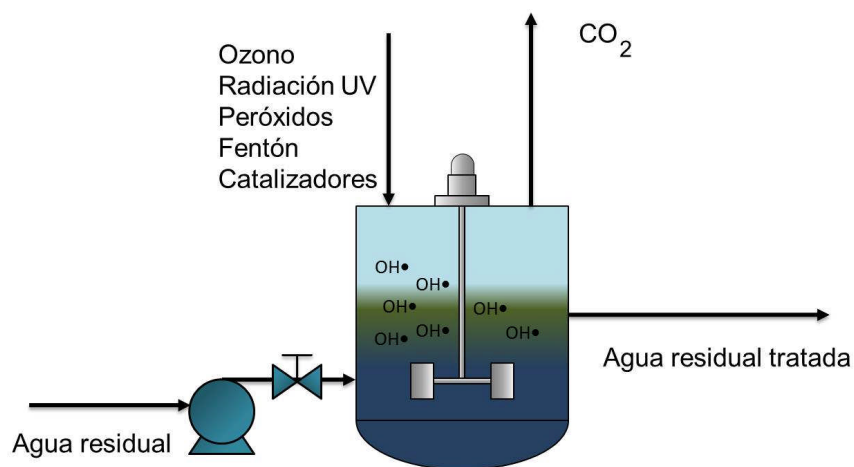
Sólidos adsorbentes aplicados en la industria textil:

- **Arcillas activadas.** Son la bentonita y la montorillonita que muestran su poder de adsorción en medio ácido para reducir colorantes azoicos y derivados del efluente.
- **Adsorbente polimérico biodegradable.** Poseen gran capacidad de adsorción para la separación de colorantes básicos con base de almidón e hidratos de carbono complejos.
- **Carbones decolorantes.** Son mezclas de materia orgánica e inorgánica mediante deshidratación y carbonización empleados para reducir los colorantes del efluente.
- **Carbón activado.** Es una forma preparada para concentrar colorantes en la superficie de la misma.
- **Zeolitas sintéticas.** Son mallas moleculares de aluminosilicatos metálicos en las cuales la composición del cristal atrapa la materia colorante, reduciendo el DQO. Las mallas pueden separar de acuerdo con el tamaño molecular, polaridad molecular y el grado de instauración de la carga orgánica.
- **Penca de la tuna.** Poseen partículas orgánicas que adsorbe los colorantes de los efluentes.

4.10 Procesos de oxidación avanzada

Es un proceso fisicoquímico que consiste en la oxidación química en condiciones requeridas de presión y temperatura hasta la mineralización completa de la carga orgánica. El agente oxidante es el radical hidroxilo ($\text{OH}\bullet$), el cual tiene altísima reactividad para eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos logrando así una reducción de DQO y toxicidad en las aguas residuales tratadas (Hauser, 2011). La generación de radicales se realiza a partir de oxígeno, peróxidos y catalizadores soportados, por lo que los subproductos de reacción son únicamente agua y dióxido de carbono, tal como se indica en la figura 4.14.

Figura 4.14. Procesos de oxidación avanzada en un reactor para producir materia biodegradable



Fuente: Elaboración basada de Hauser, P. J. Advance in Theatring Textile. 2011

Los procesos de oxidación avanzada pueden incluir la oxidación a través de los organismos biológicos, ozono, hipoclorito de sodio, peróxido de hidrógeno e inclusive los ácidos. Estos procesos son útiles para los tratamientos previos con el fin de aumentar la biodegradación en sistemas convencionales. En el siguiente cuadro se muestra las aplicaciones de los POA para efluentes textiles.

Cuadro 4.5. Aplicaciones de los procesos de oxidación avanzadas para efluentes textiles

Procesos no fotoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> – Cloración – Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-) – Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2) – Procesos fentón (Fe^{2+}/H_2O_2) – Oxidación electroquímica
Procesos fotoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> – Oxidación de agua sub y supercrítica – Fotólisis del agua en radiación ultravioleta al vacío – UV/ peróxido de hidrógeno – UV/O_3, foto-fentón – Fotocatálisis heterogénea.

Fuente: Hauser, P. J. Advance in Theatring Textile Effluent. 2011

4.10 Tratamiento aerobio

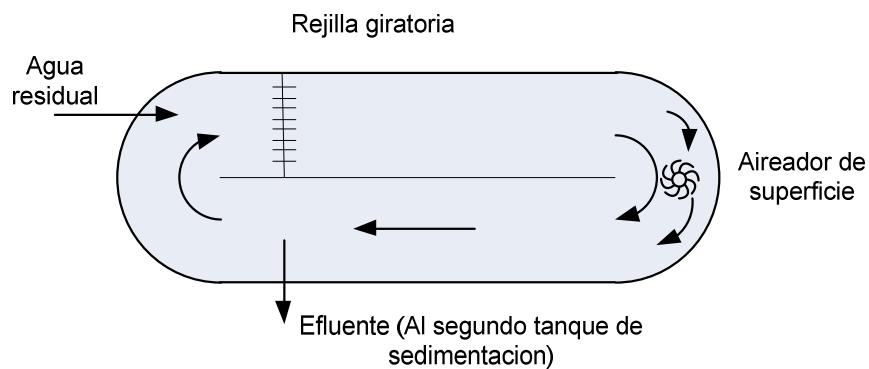
Es el tratamiento biotecnológico en que los microorganismos consumen oxígeno disuelto oxidando parcialmente la materia orgánica en masa de lodo biológico (MLVSS), dióxido de carbono y energía para la generación de nuevas células. El lodo puede ser eliminado en un vertedero, se seca o se incinera.

Este proceso se aplica para la eliminación de colorantes azoicos por ser recalcitrantes; y su facilidad de eliminación está fuertemente relacionada con su solubilidad, por el número de grupos de ácidos sulfónicos que están presentes.

Los procesos de lodo activado es un método eficaz si está sujeto a las leyes científicas. Los procesos aeróbicos más comunes son la zanja de oxidación,

como se muestra en la figura 4.15, y el proceso de secuencia de lotes (Hauser, 2011).

Figura 4.15. Plan de zanja de oxidación



Fuente: Hauser, P. J. Advance in Theatring Textile Effluent. 2011

4.11 Tratamiento anaerobio

Es un tratamiento biotecnológico que se produce en tanques cerrados, convirtiendo la materia orgánica en dióxido de carbono. Si el efluente contiene grupos sulfuros y nitrogenados, produce sustancias amoniacales y sulfuros de hidrógenos.

En la industria textil hay varios tipos de aguas residuales de alta carga orgánica, tales como las aguas residuales del lavado de lana, teñido y estampado textil, etc., que el contenido de materia orgánica del mismo es de hasta 1000 mg/l o más; el tratamiento anaerobio de aguas residuales puede lograr grandes resultados.

Las aguas residuales de la planta de teñido y acabado tienen iones metálicos que afecta el tratamiento anaerobio reduciendo la decoloración.

En la actualidad, el proceso de digestión anaeróbica es un tratamiento esencial en el tratamiento biológico de aguas residuales de la industria de teñido y acabados. Además, hay muchos otros procesos utilizados, tales como el biorreactor tubular anaerobio, lecho fluidizado (UABF), reactor anaeróbico desconcertado (ABR) y el filtro biológico anaeróbico, y así sucesivamente (Christie, 2007).

4.12 Proceso enzimático

Es un proceso biotecnológico en el cual las enzimas degradan los colorantes como células vivas, catalizándolas hasta una degradación específica. Este proceso es fácil de manejar y tiene bajo costo (Christie, 2007).

4.13 Combinación de los procesos físico-químicos y bioquímicos

Son nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales aplicadas en la industria de teñido que vienen a ser una serie de tratamientos mencionados, que facilitan la reducción de la carga orgánica (Hauser, 2011). Las combinaciones de estos tratamientos han sido desarrolladas gradualmente, por lo cual hay varios tipos de procesos combinatorios, y los principales son los siguientes:

- Neutralización - oxidación - flotación
- Neutralización - coagulación - floculación - sedimentación - filtración
- Coagulación - floculación - sedimentación.

4.14 Elección del tratamiento de agua residual textil

La elección de los procesos de tratamiento del agua residual textil depende de los factores importantes en la elección de los procesos, análisis cinético, relaciones empíricas, efectos de variación de los caudales y de las cargas de contaminantes sobre los procesos.

4.14.1 Factores importantes para la elección del tratamiento de efluentes de la planta de teñido y acabado

Los factores importantes valoran y seleccionan los procesos y operaciones unitarias de una planta de tratamiento de agua en la industria textil.

- **Potencial de aplicación.** Están basados de la experiencia anterior en datos de la planta a escala industrial y datos en estudio en planta piloto.
- **Variación del caudal.** Si la variación del caudal es grande, necesitará su regulación.
- **Caracterización del agua a tratar.** Las características del agua a tratar afectan a los tipos de procesos a utilizar y la exigencia para su adecuada exposición.
- **Cinética de reacción.** Se basa en los datos de la experiencia, referencias bibliográficas y de los resultados en planta piloto para determinar el dimensionamiento de los reactores.
- **Eficacia.** La eficacia representa la calidad del efluente, según las exigencias formuladas respecto al vertido del efluente.
- **Residuos del tratamiento.** Es necesario conocer la cantidad de lodo producido, por lo tanto, se llevará a cabo el estudio en planta piloto.
- **Tratamiento de lodos.** El tratamiento debe estar relacionado con la elección del sistema de recolección de lodos.
- **Necesidades químicas.** El tipo y la dosis óptima de los reactivos más usados se determinará mediante procesos experimentales.
- **Necesidades energéticas.** Es necesario para determinar el consumo eléctrico del sistema de tratamiento del efluente.
- **Necesidades de otros recursos.** Son necesarios para el desarrollo sistemático del tratamiento propuesto.
- **Recursos humanos.** La cantidad de operadores y el nivel de preparación son necesarios para el trabajo del proceso u operación unitaria.

- **Mantenimiento.** La cantidad, tipo de repuesto y el periodo de mantenimientos determina el costo y disponibilidad.
- **Espaciamiento.** El espacio suficiente es necesario para minimizar el impacto visual de la construcción de las instalaciones y de las futuras a realizar.

4.14.2 Análisis cinético

El tratamiento de aguas residuales de la industria textil se realiza en tanques y depósitos de diferentes tipos y dimensiones, según la demanda del caudal. Para la planta de teñido y acabado se utilizarán reactores tipo batch, reactores discontinuos o por lotes, y que tendrá las siguientes características.

- Menor costo fijo y de operación
- Puede o no contener un agitador
- Se realiza una sola frecuencia
- Se le da un tiempo de residencia para que se lleve a cabo el tratamiento correspondiente
- Se utiliza para procesos altamente tóxicos y aplicaciones en control de contaminación.

4.14.3 Relaciones empíricas

Las relaciones empíricas estarán basadas en los procedimientos experimentales del laboratorio con la finalidad de determinar el dimensionamiento y la evaluación económica de la planta de tratamiento.

4.14.4 Variaciones de caudales y de las cargas de contaminantes

Las aguas residuales de la planta textil son variables según el Apéndice E. Este problema afectará el dimensionamiento de los equipos y el consumo de reactivos, razón por la que se utilizará factores de seguridad en los tanques de almacenamiento. Dichos factores de seguridad de los reactivos será 1,5 (Mackenzie, 2010) y 1,5 para el tanque de homogenización del agua residual (Ramalho, 1993).

V. BASES LEGALES

5.1 Constitución Política (1993)

- Reconoce el derecho fundamental a un ambiente equilibrado y adecuado para el desarrollo de la vida
- El Estado determina política nacional del ambiente
- Compromiso de promover la conservación de la diversidad biológica y de las áreas naturales protegidas
- Los recursos naturales, renovables y no renovables son patrimonio de la Nación. El Estado es soberano en su aprovechamiento
- Respeto a la identidad cultural de las comunidades campesinas y nativas.

5.2 Ley General del Ambiente

Ley N° 28611 (Octubre, 2005)

- Derogó el Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (Decreto Legislativo N° 613, 1990)
- Establece principios del derecho ambiental: internalización de costos, precautorio, prevención, entre otros
- Confirma esquema institucional existente
- Establece el mandato de contar con un régimen común de fiscalización y sanción ambiental
- Comprende los principales contenidos de la legislación ambiental general.

5.3 Política Nacional del Ambiente

Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM. Control Integrado de la Contaminación.

Se tiene los lineamientos de la calidad del agua:

- Impulsar una adecuada calidad ambiental de los cuerpos de agua de acuerdo a estándares que permitan evitar riesgos a la salud y al ambiente
- Identificar, vigilar y controlar las principales fuentes emisoras de efluentes contaminantes, privilegiando a las cuencas que abastecen a centros urbanos y articular la actuación de las autoridades
- Promover el conocimiento científico y tecnológico
- Impulsar la rehabilitación de cuerpos de agua afectados por contaminación
- Aplicar instrumentos e incentivos económicos para evitar la contaminación de las fuentes de agua.

5.4 Ley de Recursos Hídricos

Ley N° 29338, Artículos 79º, 80º y 83º

Prohíbe el vertimiento de aguas residuales sin autorización, señalando que la Autoridad Nacional Ambiental (ANA) autoriza el vertimiento previa opción técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP).

Todo vertimiento de agua residual requiere de autorización de vertimiento para lo cual se debe presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado, el mismo que debe considerar: someter los residuos a los necesarios tratamientos previos y comprobar que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación. En caso el vertimiento pueda afectar la calidad del cuerpo receptor o la vida acuática, la Autoridad Nacional Ambiental (ANA) debe disponer medidas

adicionales o suspender autorizaciones otorgadas. Si el vertimiento afecta la salud o el modo de vida de la población local, la ANA suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas.

El Estado reconoce como zonas ambientalmente vulnerables las cabeceras de cuenca donde se originan las aguas. La ANA con opinión del Ministerio del Ambiente (MINAM) puede declarar las zonas intangibles en las que no se otorga ningún derecho para uso, disposición o vertimiento de aguas. La ANA puede establecer zonas de veda o zonas de protección, en las cuales puede limitar o suspender los derechos de uso de aguas, con opinión de la Autoridad de Salud, en caso de riesgo para la salud de la población.

Cabe señalar que está prohibido verter sustancias contaminantes y residuos de cualquier tipo en el agua y en los bienes asociados a esta, que representen riesgos significados, en función a su toxicidad, persistencia o bioacumulación. La autoridad ambiental, en coordinación con la ANA, establece los criterios y la relación de sustancias prohibidas.

5.5 Reglamento de Desagües Industriales

Decreto Ley N° 28-60-SAPL

Artículo 2º: Prohíbe la descarga en el alcantarillado público de residuos que puedan causar el deterioro de sus estructuras u originar obstrucciones trayendo como consecuencia la elevación del costo normal de operación y mantenimiento.

Artículo 3º: Señala un listado de residuos que, bajo ninguna circunstancia, serán permitidos de ser descargados en las redes públicas de desagües, y un listado de sustancias cuyo ingreso directo no puede aceptarse en las redes de alcantarillado:

- Basura o restos de comida
- Gasolina o solventes industriales
- Barros y arenas
- Alquitranes, materiales bituminosos y viscosos
- Pegamentos y cementos
- Plumas, huesos, trapos e hilachas
- Trozos de metal, vidrio, madera, cerámica y materiales similares capaces de producir atoros
- Gases peligrosos para la vida y la salud
- Productos residuales de petróleo
- Aquellos que pueden ser tóxicos o convertirse en tales al mezclarse con los ácidos naturales del líquido cloacal, cianuros, fenoles arseniatos, etc.
- Aquellos que pueden ser corrosivos o incrustantes o que puedan convertirse en tales al reaccionar con los gases y ácidos naturales de los líquidos cloacales
- Aquellos que sean radioactivos en condiciones y concentraciones superiores a los establecidos por los Reglamentos Internacionales
- Aquellos que contengan iones de metales pesados.

Artículo 5º: Todo residuo industrial que ingrese a las redes públicas de desagüe deberá cumplir, sin excepción, con las siguientes normas:

- Temperatura que no sobrepase a los 35 °C
- Los vapores deberán ser condensados para ingresar al desagüe
- Los líquidos grasos que ingresen al colector deberán tener una concentración menor de 0,1 g/l en peso
- Las sustancias inflamables que ingresen al desagüe deben tener un punto de ignición superior a los 90 °C y concentración inferior a un g/l
- El pH deberá estar comprendido entre 5 y 8,5. Las industrias que evacúen ácidos o minerales o sustancias fuertemente alcalinas, deberán tener tanques de suficiente capacidad donde sean neutralizados

- La Demanda Bioquímica del Oxígeno (DBO) no sobrepasa las 1000 ppm.
- Los sólidos sedimentables no tiene una concentración mayor a 8,5 ml/l/h.

Normas para el ingreso de residuos industriales en el alcantarillado.

El Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL) está facultada para suspender el servicio del agua potable y gestionar la clausura de industrias renuentes.

5.6 Reglamento de Protección Ambiental para el Desarrollo de actividades de la Industria Manufacturera

Decreto Supremo N° 019-97-ITINCI

- Obligación del titular de actividades de la industria manufacturera: llevar un registro de los muestreos periódicos realizados y sus respectivos análisis, antes y después del uso de aguas por plantas industriales o instalaciones fabriles
- LMP de efluentes para actividades industriales: D.S. N° 003-2002-PRODUCE. La aplicación de los LMP se encuentra focalizada en las actividades industriales manufactureras de producción
- Se recoge la figura los “Límites Máximos Permisibles de Efluentes para Alcantarillado”
- Protocolo de Monitoreo de Efluentes Líquidos: Resolución Ministerial N° 026-2002-ITINCI.

5.7 Estándares de Calidad Ambiental y Límites Máximos Permisibles

A. Estándares de Calidad Ambiental (ECA)

Es la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de personas ni del ambiente. (LGA, art. 31º).

- No es exigible, salvo excepción (LGA, art. 31º.4)
- Es obligatorio en diseño de normas y políticas públicas (LGA, art. 31º.2)
- No otorgamiento de certificación ambiental, si el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) prevé el incumplimiento de ECA (LGA, art. 31º.3).

**Cuadro 5.1. Estándares de Calidad Ambiental. Decreto Supremo Nº 002
2008. Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático**

Parámetros	Unidades	Lagunas y lagos	Ríos	Mares
Aceites y grasas	mg/l	<5	<10	1
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/l	<0,02	0,05	15
pH	unidad	6,5-8,5	6,5-8,5	6,8-8,5
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	500	500	500
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	≤25	≤25-100	≤25-100
Arsénico	mg/l	0,01	0,05	0,05
Bario	mg/l	0,7	0,7	1
Cadmio	mg/l	0,004	0,004	0,005
Cianuro libre	mg/l	0,022	0,022	-----
Cobre	mg/l	0,02	0,02	0,05
Fenoles	mg/l	0,001	0,001	-----
Fosfatos total	mg/l	0,001	0,001	-----
Mercurio	mg/l	0,0001	0,0001	0,0001
Nitratos (N-NO ₃)	mg/l	5	10	0.07 – 0.28
Nitrógeno total	mg/l	1,6	1,6	-----
Níquel	mg/l	0,025	0,025	0,0082
Plomo	mg/l	0,001	0,001	0,0081
Silicatos	mg/l	-----	-----	0,14 - 0,7
Zinc	mg/l	0,03	0,3	0,081

Fuente: MINAM

B. Límites Máximos Permisibles (LMP)

Es la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a un efluente o a una emisión, y que al ser excedido causa o puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente (LGA, art. 32º).

Es legalmente exigible, y sancionable, por la autoridad competente (LGA, art. 32º.1).

5.7.1 Legislación Nacional

A. Sector Producción:

Mediante D.S. 003-2003 – PRODUCE se aprueba los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de las actividades de cemento, cerveza, papel y curtiembre.

Cuadro 5.2. Límite Máximo permisible de efluentes para el alcantarillado de las actividades de cemento, cerveza, papel y curtiembre

Parámetros	Cemento		Cerveza		Papel		Curtiembre	
	En Curso	Nueva	En Curso	Nueva	En Curso	Nueva	En Curso	Nueva
pH	6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9	-----	6 - 9
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35
Sólidos Susp. Tot (mg/l)	100	50	500	350	1 000	500	-----	500
Aceites y grasas (mg/l)	-----	-----	20	15	100	50	100	50
DBO ₅ (mg/l)	-----	-----	1 000	500	-----	500	-----	500
DQO (mg/l)	-----	-----	1 500	1 000	-----	1 000	-----	1 500
Sulfuros (mg/l)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	3
Cromo VI (mg/l)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,4
Cromo Total (mg/l)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	2
N-NH ₄ (mg/l)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	30

Fuente: MINAM.

Cuadro 5.3. Límite Máximo permisible para aguas superficiales de las actividades de cemento, cerveza, papel y curtiembre

Parámetros	Cemento		Cerveza		Papel		Curtiembre	
	En Curso	Nueva	En Curso	Nueva	En Curso	Nueva	En Curso	Nueva
pH	6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9	6 - 9	5-8,5	5 - 8,5
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35
Solidos Susp. Tot (mg/l)	50	30	50	30	100	30	50	30
Aceites y grasas (mg/l)	-----	-----	5	3	20	10	25	20
DBO ₅ (mg/l)	-----	-----	50	30	-----	30	50	30
DQO (mg/l)	-----	-----	250	50	-----	50	250	50
Sulfuros (mg/l)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	1	0,5
Cromo VI (mg/l)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,3	0,2
Cromo Total (mg/l)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	2,5	0,5
Coliformes Fecales, NMP/100 ml	-----	-----	-----	-----	-----	-----	4 000	1 000
N-NH ₄ (mg/l)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	20	10

Fuente: MINAM.

Mediante D.S. 011-2009 – MINAM se aprueba los Límites Máximos Permisibles para las emisiones de la industria de aceite y harina de pescado.

Cuadro 5.4. Límites Máximos Permisibles (LMP) para la industria de harina y aceite de pescado y normas complementarias

Parámetros	I	II	III	Método de Análisis	Formato
	Límites máximos permisibles de los efluentes que serán vertidos dentro de la zona de protección ambiental (a)	Límites máximos permisibles de los efluentes que serán vertidos fuera de la zona de protección ambiental litoral (a)	Límites máximos permisibles de los efluentes que serán vertidos fuera de la zona de protección ambiental litoral (b)		
Aceites y grasas (mg/l)	20	$1,5 \times 10^3$	$0,35 \times 10^3$	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20° Ed. Method 5520D. Washington; o equipo automático extractor Soxhiet	Los valores consisten en el promedio diario de un mínimo de tres muestras de un compuesto según se establece en la Resolución Ministerial N° 003-2002-PE
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	100	$2,5 \times 10^3$	$0,70 \times 10^3$	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20° Ed. Method 5520D. Washington.	
pH	6 - 9	5 – 9	5 - 9	Protocolo de Monitoreo aprobado por Resolución Ministerial N° 003-2002-PE	
DBO ₅ (mg/l)	≤ 60 mg/l	(c)	(c)	Resolución Ministerial N° 003-2002-PE (d)	

(a) La Zona de Protección Ambiental Litoral establecida en la presente norma es para uso pesquero.

(b) De obligatorio cumplimiento a partir de los dos (2) años posteriores a la fecha en que sean exigibles los LMP señalados en la columna anterior.

(c) Ver Segunda Disposición Complementaria y Transitoria.

(d) El Protocolo de Monitoreo será actualizado.

Fuente: MINAM.

B. Sector Minería

Mediante D.S. 010-2010 – MINAM se aprueba los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de la actividad minero - metalúrgicas.

Cuadro 5.5. Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes de la actividad minero – metalúrgicas

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH		6 – 9	6 – 9
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	50	25
Aceites y Grasas	mg/l	20	16
Cianuro Total	mg/l	1	0,8
Arsénico Total	mg/l	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/l	0,05	0,04
Cromo Hexavalentes (*)	mg/l	0,1	0,08
Cobre Total	mg/l	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/l	2	1,6
Plomo Total	mg/l	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/l	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/l	1,5	1,2

Fuente. MINAM

C. Sector Vivienda

Mediante D.S. 021-2009- VIVIENDA y D.S. 003-2010 – MINAM se aprueba los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.

Cuadro 5.6. Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales

Parámetro	Unidad	Expresión	VMA para descargas
			Al sistema de acanillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/l	DBO ₅	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	DQO	1 000
Sólidos Suspendedos Totales	mg/l	SST	500
Aceites y Grasas	mg/l	A y G	16
Aluminio	mg/l	Al	10
Arsénico	mg/l	As	0,5
Boro	mg/l	B	4
Cadmio	mg/l	Cd	0,2
Cianuro	mg/l	CN ⁻	1
Cobre	mg/l	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/l	Cr ⁺⁶	0,5
Cromo total	mg/l	Cr	10
Manganeso	mg/l	Mn	4
Mercurio	mg/l	Hg	0,02
Níquel	mg/l	Ni	4
Plomo	mg/l	Pb	0,5
Sulfatos	mg/l	SO ₄ ⁻²	500
Sulfuros	mg/l	S ⁻²	5
Zinc	mg/l	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	NH ⁺⁴	80
pH (2)	Unidad	pH	6 – 9
Sólidos Sedimentables (2)	ml/l/h	SS	8,5
Temperatura (2)	°C	T	<35

Fuente. MINAM

5.7.2 Legislaciones Internacionales

La norma oficial mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil.

Cuadro 5.7. Límites Máximos Permisibles del NOM-CCA-014-ECOL/1993

Parámetros	Unidad	LMP, promedio diario instantáneo
pH	Unidades	6-9
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	100-120
Aceites y grasas	mg/l	20
Sólidos Sedimentables	mg/l	1
DBO ₅	mg/l	100
DQO	mg/l	200
Sulfuros	mg/l	0,2
Fenoles	mg/l	0,1

Fuente: Instituto Nacional de Ecología, 2005

5.7.3 Límites máximos Permisibles para las aguas residuales de la planta de teñido.

Los límites máximos permisibles para el tratamiento de aguas residuales de la planta de teñido se tomaran a partir de la norma mexicana.

Cuadro 5.8. Límites Máximos Permisibles seleccionados para las aguas residuales de una planta de teñido

Parámetros	Unidad	LMP
pH	Unidades	6-9
DQO	mg/l	200

VI. CAUDAL DEL AGUA RESIDUAL DE UNA PLANTA TEXTIL

Las descargas de agua residual de la planta de teñido y acabado varían según el proceso productivo presente; por lo tanto, es una desventaja para la determinación de las características de diseño de los equipos de tratamiento, tales como los tanques de tratamiento físico-químico, almacenamiento, equipos auxiliares, consumo de materias primas, energía, manejo de desechos y otros.

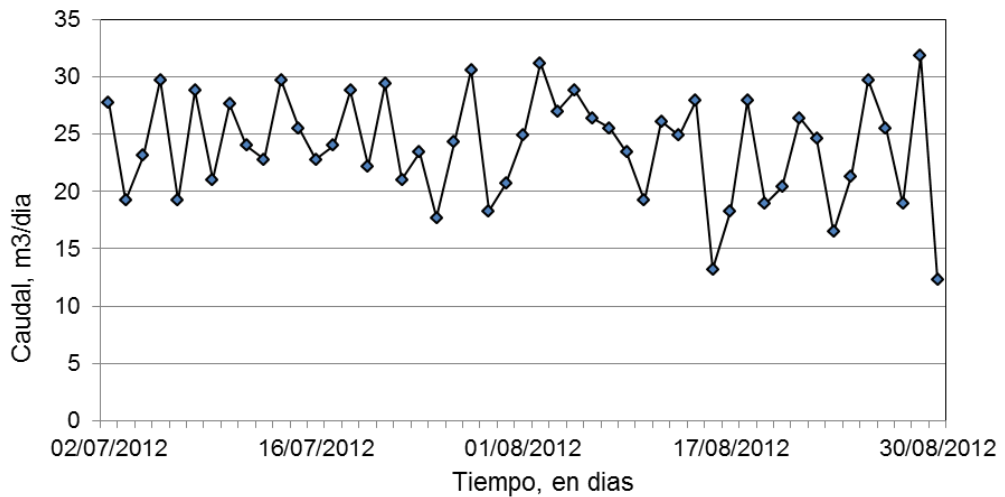
Cuadro 6.1: Caudales diarios de los meses de julio y agosto del 2012 en m³/d

Julio			Agosto		
27,75	24,00	29,40	24,90	26,10	26,40
19,20	22,80	21,00	31,20	24,90	24,60
23,10	29,70	23,40	27,00	27,90	16,50
29,70	25,50	17,70	28,80	13,20	21,30
19,20	22,80	24,30	26,40	18,30	29,70
28,80	24,00	30,60	25,50	27,90	25,50
21,00	28,80	18,30	23,40	18,90	18,90
27,60	22,20	20,70	19,20	20,40	31,80
-----	-----	-----	-----	-----	12,30

Elaboración propia

El cuadro 6.1 muestra los caudales diarios entre los meses de julio y agosto del 2012; dichos caudales son medidos en toda la jornada del proceso productivo de la planta, los periodos de descarga no son iguales para cada día tal como se observa en la figura 6.1.

Figura 6.1: Variación del caudal de las aguas residuales de la planta de teñido de los meses de julio y agosto del 2012



Elaboración propia

El caudal promedio de la planta es $24,2 \text{ m}^3/\text{día}$ y el caudal máximo de $45 \text{ m}^3/\text{día}$; la varianza es de 28,85 y la desviación estándar es de $5,37 \text{ m}^3/\text{día}$. Los cálculos del promedio se muestran en el Apéndice F.

La desviación estándar del caudal indica que varios valores tienden a alejarse del promedio; por lo tanto, el promedio no será el único valor requerido para los cálculos de diseño y economía de la planta de tratamiento de agua residual. Como el caudal máximo es aproximadamente el doble del caudal promedio, se asume que el tiempo de operación sea de dos horas. La figura 9-1 muestra la variación del caudal a lo largo de los dos meses; uno de los valores está alejado de la región, por lo cual se podría omitir y obtener otro valor promedio.

VII. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL TEXTIL

7.1 Análisis físico-químico del agua residual textil

El análisis físico-químico y biológico del agua residual de la industria textil está basado en los principales contaminantes que son materia orgánica, los cuales provienen de procesos productivos del pretratamiento, teñido y acabado de hilos.

7.1.1 Toma de muestra

La muestra fue tomada en el punto de la salida del sedimentador primario. Algunos parámetros, tales como el color, olor, temperatura y pH, fueron determinados en la planta durante la toma de muestra. La muestra tenía materias extrañas tales como pelusa e hilo.

Cuadro 7.1. Datos referentes de la muestra para la caracterización del agua residual

Fecha de muestreo	2 de diciembre del 2011
Hora de muestro	4:50 p. m.
Etapas realizadas	Blanco óptico, enjuague, descruce teñido oscuro, enjuague
Color	Turquesa
Olor	Detergente
Presencia de burbujas	Sí
Temperatura, °C	45
pH	10,4

Fuente: los datos son tomados de la planta de teñido de hilos

La muestra es una mezcla compósito de las primeras dos horas del proceso productivo de la planta. Los parámetros determinados se midieron en el laboratorio mostrándose los siguientes resultados:

Cuadro 7.2. Resultados de la caracterización del agua residual textil

Parámetros	Valores	Límite de cuantificación	Método de muestreo
STD	8228,0 mg/L	10,0 mg/l	EPA 160,1
SST	11,7 mg/l	5,0 mg/l	SMWWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 21st
Sólidos sedimentables	<0,2 ml/l/Hr	<0,2 ml/l/hr	EPA 160,5
DBO	105,4 mg/l	2,0 mg/l	EPA 405,1
DQO	906,7 mg/l	20,0 mg/l	EPA 410,1
Turbidez	20,9 NTU	0,1 NTU	EPA 180,1
Nitrógeno-nitrato	0,44 mg/l	0,06 mg/l	EPA 352,1
Sulfatos	312,6 mg/l	0,5 mg/l	EPA 375,4
Fosfatos	11,734 mg/l	0,008 mg/l	EPA 365,3
Nitritos	0,204 mg/l	0,006 mg/l	EPA 354,1
Cloruros	2998,6 mg/l	1,0 mg/l	EPA 325,3
Fluoruros	0,5 mg/l	0,1 mg/l	EPA 340,2
Aceites y grasas	< 5 mg/l	< 5 mg/l	EPA 1664
Fenoles	< 0,0010 mg/l	0,0010 mg/l	EPA 420,1
Litio	0,1804 mg/l	0,0012 mg/l	EPA 200,8
Boro	1,3394 mg/l	0,0012 mg/l	EPA 200,8
Mercurio	<0,0001 mg/l	0,0001 mg/l	EPA 200,8
Sodio	3,359,4 mg/l	0,01 mg/l	EPA 200,8
Magnesio	6,9 mg/l	0,0356 mg/l	EPA 200,8
Potasio	103,6331 mg/l	0,0237 mg/l	EPA 200,8
Calcio	13,7 mg/l	0,0303 mg/l	EPA 200,8
Aluminio	0,1733 mg/l	0,0019 mg/l	EPA 200,8
Fosforo	12,5840 mg/l	0,003 mg/l	EPA 200,8
Fierro	0,310 mg/l	0,0031 mg/l	EPA 200,8
Cobalto	0,0005 mg/l	0,0002 mg/l	EPA 200,8
Níquel	0,0044 mg/l	0,0004 mg/l	EPA 200,8
Cobre	0,1288 mg/l	0,0001 mg/l	EPA 200,8
Zinc	0,1021 mg/l	0,0002 mg/l	EPA 200,8
Plomo	0,0091 mg/l	0,0002 mg/l	EPA 200,8

Fuente: Muestra obtenida en el laboratorio de Inspectorate Lab.

7.1.2 Interpretación de los resultados

- El DBO₅ de agua residual es de 105,4 mg/l indicando la cantidad de materia biodegradable que está presente.
- El DQO del agua residual es de 906,7 mg/l por lo cual se considera el parámetro principal para los ensayos de tratamiento de agua residual. La proporción de DBO₅/DQO es de 0,12 que es menor que 0,5*, indicando que el agua residual no se necesita ser tratado biológicamente. Además las altas temperaturas como explica en el Apéndice E, impiden la propuesta de estos tratamientos. Por lo tanto, se utilizara los procesos fisicoquímicos disponibles.
- La turbidez de 20,9 NTU es muy bajo con respecto a las aguas residuales domésticas. Como el agua residual es de un color azul oscuro con esta turbidez, esto indica que las partículas de color son muy finas.
- El pH es de 10,4 por la presencia de agentes auxiliares de los procesos productivos de la planta. La muestra presenta alta alcalinidad que se necesitara una alta dosis de ácido sulfúrico concentrado para su neutralización.
- La concentración de sulfatos es de 312,6 mg/l porque está relacionado por la presencia de sales. Esta concentración, que sobrepasa los 300 mg/l puede ocasionar ataque del hormigón y acelerar la corrosión del hierro; también puede atacar los campos agrícolas y ganaderas.
- Los sólidos suspendidos son muy bajo con respecto a los sólidos disueltos, la mayoría de las partículas son muy finas y difíciles de desestabilizar por coagulación.

* La proporción DBO/DQO es un indicador de probabilidad de que el tratamiento biológico de residuos solo se descomponen las moléculas orgánicas en el flujo de residuos (Christie, 2007). La proporción de la DBO₅/DQO menor que 0,5 indica que el efluente contiene una gran proporción de materia no biodegradable (Ntuli, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. 2009).

- Los aceites y grasas están por debajo de 0,5 mg/l por lo cual forma parte de los sólidos suspendidos. Este valor no obliga la instalación de trampa de grasa u otro medio de separación.
- El sodio y potasio tienen una elevada concentración por la utilización de cloruro de sodio y soda caustica en el proceso productivo de la planta. Estos parámetros están relacionados con la alcalinidad y pH de la muestra.
- Los metales pesados son menores con respecto a los Límites Máximos Permisibles a las descargas de aguas residuales en el sistema de recolección de alcantarillado sanitario, por lo tanto, no es un problema.

Cuadro 7.3. Elección del tratamiento de agua residual según la caracterización de la muestra

Tratamiento de agua residual	Caracterización de la muestra	Operación Unitaria
Pretratamiento	Pelusa, hilos y otros materiales que pueden deteriorar los equipos	Desbaste
	Variación de los caudales de agua residual	Homogenización
Tratamiento primario	Alta alcalinidad, pH=10,4	Neutralización
	Presencia de sólidos suspendidos tipo coloidal DBO ₅ /DQO = 0,12	Coagulación-floculación-sedimentación.

Elaboración propia

7.2 Evolución horaria de los parámetros fisicoquímicos del agua residual textil.

Cuadro 7.4: Análisis físico-químico del agua residual textil de cada hora del día

Hora	Descarga efluente (m ³ *)	pH [†]	DQO (mg/l)	ST (mg/l)	SDT (mg/l)	SST (mg/l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Turbidez (NTU)
8-9	1,5	5,7	398	1503,3	1193,3	310,0	475,0	0,635
9-10	1,5	10,2	267	960,0	796,7	163,3	250,0	2,51
11-12	1,5	8,1	292	1363,3	1130,0	233,3	300,0	2,64
12-13	5,4	10,4	307	7826,6	7526,7	300,0	1925,0	3,02
13-14	2,7	9,8	242	3463,3	843,3	2620,0	450,0	1,29
15-16	0,6	11,5	2750	4920,0	3510,0	1410,0	1675,0	24,5
16-17	3,9	11,6	2240	5300,0	1310,0	3990,0	1775,0	29,6
17-18	3,6	11,6	5890	9610,0	7183,3	2426,7	3125,0	55,4
18-19	2,1	6,9	193	730,0	660,0	70,0	175,0	10,6

Elaboración determinada en el laboratorio de Ambiental

En el cuadro 7.4, cada descarga contenía un conjunto propio de agentes contaminantes, tal como se muestra en el siguiente cuadro. Los agentes contaminantes y los procesos productivos de la planta están relacionados en el Apéndice C. Los procesos de preblanqueo coinciden con los altos valores de DQO, turbidez, alcalinidad y sólidos suspendidos. Por lo tanto, los procesos de blanqueo son los agentes contaminantes principales de la planta de teñido; sin embargo, los colorantes son cancerígenos y tóxicos por su estructura molecular.

* Las descargas del efluente fue determinada el día 15 de octubre del 2012.

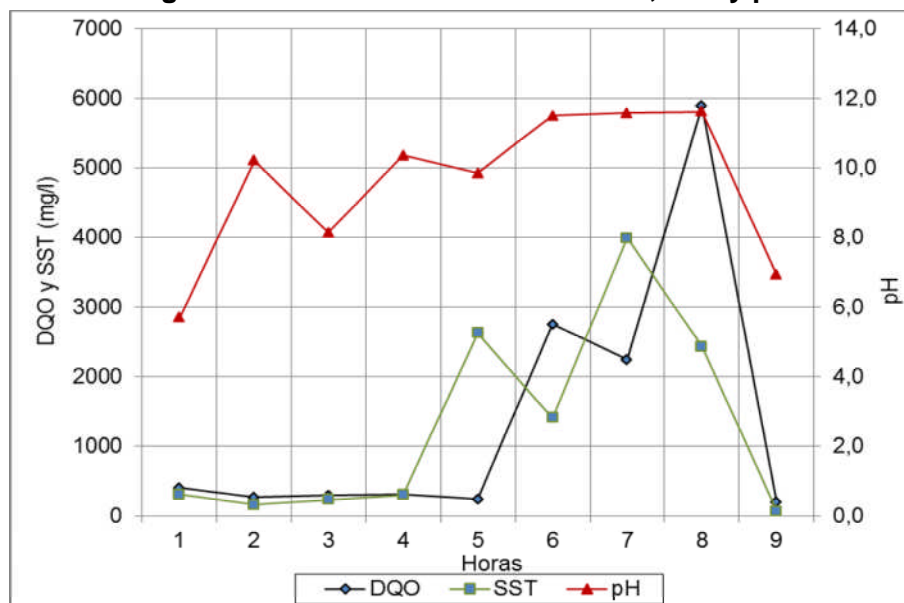
† El pH, DQO, ST, SDT, SST, la alcalinidad total y la turbidez se determinaron según el Apéndice P, donde están sus respectivos métodos.

Cuadro 7.5. Evolución horaria de los posibles agentes contaminantes en los efluentes de la planta textil

N°	Hora	Procesos productivos	Agentes contaminantes
1	8-9	Enjuague frío, preblanqueo	Humectantes, secuestrantes, detergentes, NaOH y H ₂ O ₂
2	9-10	Neutralizado de preblanqueo	Detergentes, CH ₃ COOH y catalasa
3	11-12	Jabonado de preblanqueo	Detergentes y óptico
4	12-13	Teñido en frío (color claro), neutralizado y jabonado de teñido	Colorantes, CH ₃ COOH, cloruro de sodio, humectantes, secuestrantes, carbonatos, detergentes
5	13-14	Enjuague frío	CH ₃ COOH, detergentes
6	15-16	Preblanqueo, neutralizado y enjuague	Humectantes, secuestrantes, detergentes, NaOH y H ₂ O ₂
7	16-17	Preblanqueo	Humectantes, secuestrantes, detergentes, NaOH y H ₂ O ₂
8	17-18	Preblanqueo	Humectantes, secuestrantes, detergentes, NaOH y H ₂ O ₂
9	18-19	Enjuague del jabonado, suavizado de blanco óptico y fijado	Detergentes, óptico, suavizantes y CH ₃ COOH

Elaboración basada del proceso textil de cada descarga del efluente el día 15 de octubre del 2012.

Figura 7.1. Evolución horaria del DQO, SST y pH

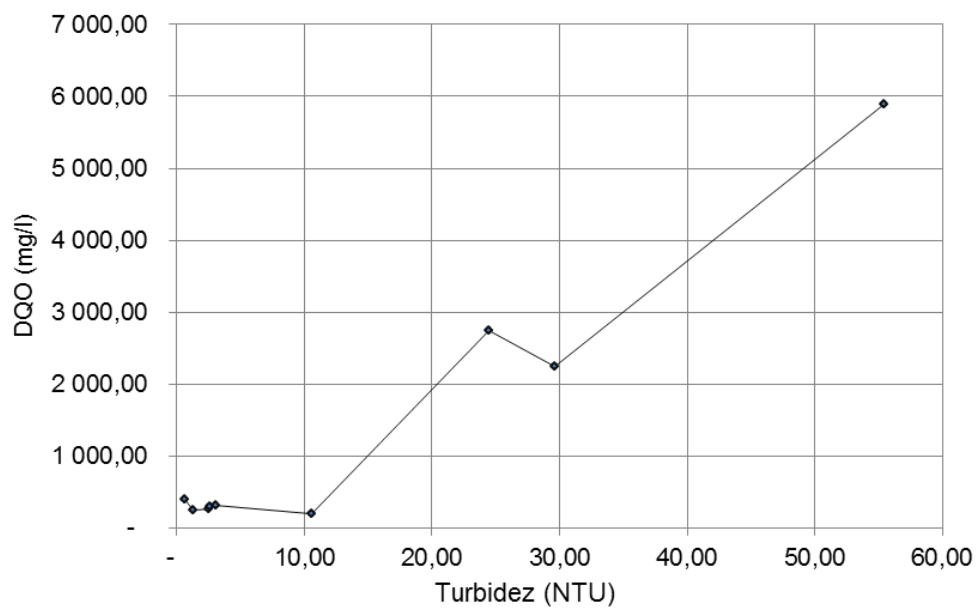


Elaboración propia.

La figura 7.1 muestra variabilidad de los diferentes parámetros de las descargas de todo el día. A medida que aumenta el pH, crece la carga química (DQO) y los sólidos suspendidos. Por lo tanto, las partículas coloidales pertenecen a los agentes auxiliares que son los principales agentes contaminantes.

La figura 7.2 indica la relación de la turbidez y el DQO del agua residual textil. A medida que aumenta la turbidez, crece la carga química (DQO).

Figura 7.2. Relación de la turbidez y la carga orgánica del agua residual textil



Elaboración propia

Los procesos de blanqueo tienen una alta carga contaminante, por lo que, según su turbidez de la figura, las moléculas son muy grandes. Sin embargo, con la turbidez por debajo de 4 NTU, los valores de DQO son menores de 500 mg/L, por lo que las partículas coloidales son finas, disueltas y que contribuyen al consumo de oxígeno.

VIII. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

8.1 Datos referentes a la muestra

8.1.1 Ubicación

Para la presente tesis de investigación, la muestra se tomó en las fosas de sedimentación de una planta de teñido de hilos. Los trabajos de investigación se realizaron en el Laboratorio de Tratamiento de Investigación del Agua en la Facultad de Ingeniería Ambiental de la UNI.

8.1.2 Temporalidad

El muestro se realizó el miércoles 7 de noviembre del 2012. La muestra se almacenó en un tanque de 50 galones en un tiempo de 10 días a condiciones ambientales.

8.1.3 Muestreo

La recolección de la muestra fue tomada en la fosa de sedimentación entre las 11:00 y la 1:00 p. m., cuando empezó la primera descarga de la tina de teñido. La mezcla compósito está compuesta de una serie de descargas de diversas etapas del proceso productivo de la planta.

8.1.4 Procesamiento de muestras

Una vez tomadas las muestras fueron llevadas al laboratorio en donde se realizaron los análisis físico-químicos y, posteriormente, las pruebas de jarras.

8.1.5 Análisis físico-químicos de la muestra

Cuadro 8.1. Parámetros fisicoquímicos de la muestra antes de la prueba de jarras.

Parámetro	Valor	Método
Temperatura de descarga	35° C	Termómetro*
Temperatura realizada en el laboratorio	20° C	Termómetro
pH	12,3	Electroquímico [†]
Turbidez	33,3 NTU	Nefelométrico [‡]
DQO	1 119,0 mg/l	Colorimétrico [§]
Sólidos totales	12 601,1 mg/l	Gravimétrico ^{**}
Sólidos disueltos	12 126,6 mg/l	
Sólidos Suspendidos	474,5 mg/l	
Alcalinidad total	2122 mg/l	Volumétrico ^{††}
Color	Violeta	Sensorial
Olor	Detergente	
Presencia de espuma	SI	

Datos determinados en el laboratorio de fisicoquímica (FIA: Facultad de Ingeniería Ambiental).

8.2 Pruebas de coagulación-floculación

* La temperatura fue medida en la planta de teñido de hilos durante la descarga.

† El pH se midió con el electrodo (ver Apéndice P).

‡ La turbidez se midió con el turbidímetro (ver Apéndice P).

§ El DQO se determinó por el método colorimétrico (ver Apéndice P).

** Los sólidos totales, disueltos y suspendidos se determinó por método gravimétrico (ver Apéndice P).

†† La alcalinidad total se determinó mediante el método volumétrico (ver Apéndice P).

Las pruebas de coagulación-floculación consisten en determinar la dosis y coagulante óptimo con su respectivo pH para una apropiada coagulación.

Figura 8.1. Equipo de multiagitación para pruebas de jarras



Fuente: Foto tomada en el Laboratorio de Ambiental.

8.2.1 Determinación del coagulante óptimo y dosis óptima

Luego de completar los datos referentes de la muestra, se prepara las dosis de cada tipo de coagulante al 1% (un (01) gramo en solución del 100 ml de agua destilada), donde 2 ml de esta solución equivale a 10 mg/L de coagulante para 2000 ml de la muestra. La solución debe ser agitada cada vez que se utilice.

Una vez preparadas las soluciones de cada coagulante, se prepara los vasos de precipitados de 2000 ml de la muestra natural manteniendo la agitación constante con el uso del Equipo de agitación múltiple que se muestra en el Apéndice H, y se toma la velocidad rápida de 300 rpm^{*}, velocidad lenta de

^{*} La velocidad rápida de 300 rpm equivale a una gradiente mayor que 400 s⁻¹ a los 20°C según el Apéndice I. esta gradiente es recomendada para el diseño de tanque de agitación rápida (Mackenzie, 2010).

30 rpm en 20 minutos y 30 minutos de decantación*. Luego de la decantación, se retira las jarras del agitador múltiple, se extrae una muestra para determinar la turbidez final y el pH de la muestra (ver Apéndice P).

Los resultados y observaciones se señalan en los cuadros 8.2 al 8.5. Los cálculos del porcentaje de remoción y volumen del sedimento son los siguientes:

$$\% \text{ Remocion} = \frac{\text{Turbidez Inicial} - \text{Turbidez Final}}{\text{Turbidez Inicial}} \times 100 \quad \text{Ec.(1)}$$

En las primeras corridas de jarras se tiene los resultados de cada uno de los coagulantes.

Cuadro 8.2. Resultados de las pruebas de jarras con sulfato de aluminio

Parámetro	Número de jarras					
	1	2	3	4	5	6
H ₂ SO ₄ conc. (pH=7), ml/l [†]	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Coagulante, mg/l	2,5	5	10	15	20	25
Temperatura, °C	20	20,1	20,6	20,1	20,1	20,3
pH final	7,3	7,6	7,6	7,5	7,6	7,6
Turbidez final, NTU	19,70	14,68	3,92	3,36	3,30	30,40
% Remoción	40,3%	55,5%	88,1%	89,8%	90,0%	7,9%
Decoloración (SI/NO)	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Índice de Willcomb [‡]	2	2	2	2	2	2

Elaboración propia

Observaciones: agua transparente con presencia del colorante disuelto, presencia de flóculos blancos, agitación lenta.

* La velocidad lenta 30 rpm equivale a 35 s^{-1} de gradiente de velocidad a los 20°C según el Apéndice I. Esta gradiente está dentro del intervalo de floculación de 20 a 70 s^{-1} para baja turbiedad y remoción de color (Mackenzie, 2010). El tiempo de decantación es recomendado por el artículo de Colotta, 2003.

[†] La dosis de ácido sulfúrico concentrado (ml/l) para el pH = 7, se determinó en la curva de neutralización indicada en el Apéndice G.

[‡] El índice de floculación de Willcomb se especifica en el Apéndice J.

Cuadro 8.3. Resultados de las pruebas de jarras con cloruro de hierro

Parámetro	Número de jarras					
	1	2	3	4	5	6
H ₂ SO ₄ conc. (pH=6), ml/l [*]	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Coagulante, mg/l	2	3	5	10	15	20
Temperatura, °C	20,2	21,2	20,2	20,1	20,2	20,2
pH final	6,0	6,0	6,0	6,1	6,1	6,2
Turbidez final, NTU	16,50	11,60	12,20	6,71	6,22	12,00
% Remoción	50,0%	64,8%	63,0%	79,7%	81,2%	63,6%
Decoloración (SI/NO)	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Índice de Willcomb	2	2	2	2	2	2

Elaboración propia.

Observaciones: agua transparente con presencia del colorante disuelto, presencia de flóculos blancos, agitación lenta. Cambio de color de violeta a rojo en las jarras 5 y 6.

Cuadro 8.4. Resultados de las pruebas de jarras con sulfato de hierro II

Parámetro	Número de jarras					
	1	2	3	4	5	6
H ₂ SO ₄ conc. (pH=6), ml/l	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Coagulante, mg/l	5	10	15	20	30	50
Temperatura, °C	20,1	20,1	20,1	21,1	20,6	20,1
pH final	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Turbidez final, NTU	19,56	18,80	16,80	17,20	17,80	17,60
% Remoción	40,7%	43,0%	49,1%	47,9%	46,1%	46,7%
Decoloración (SI/NO)	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Índice de Willcomb	2	2	2	2	2	2

Elaboración propia.

Observaciones: agua transparente con presencia del colorante disuelto, presencia de flóculos blancos, agitación lenta.

^{*} La dosis de ácido sulfúrico concentrado (ml/l) para el pH = 6, se determinó en la curva de neutralización indicada en el Apéndice G.

Cuadro 8.5. Resultados de las pruebas de jarras con sulfato de hierro III

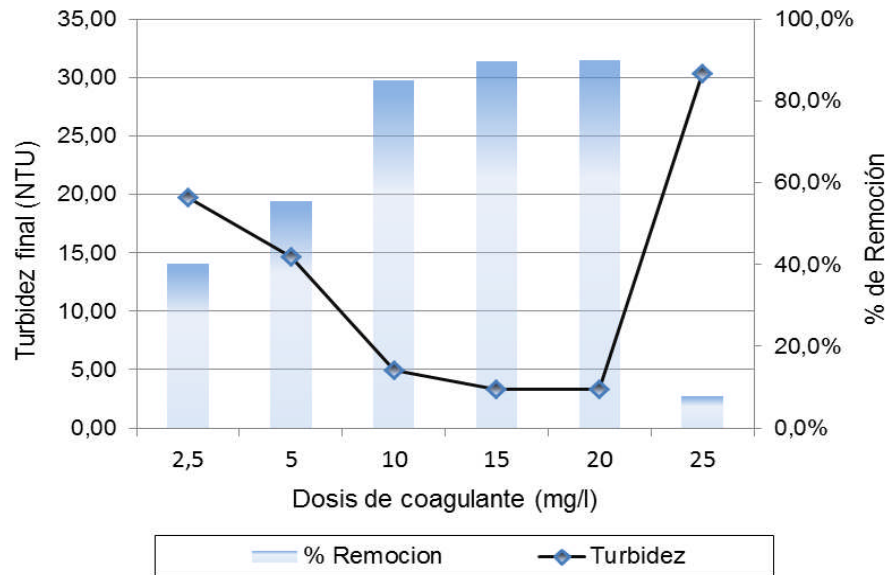
Parámetro	Número de jarras					
	1	2	3	4	5	6
H ₂ SO ₄ conc. (pH=6), ml/l	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Coagulante, mg/l	2,5	5	7,5	10	15	25
Temperatura, °C	20,2	20,1	20,1	20,1	20	20,1
pH final	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
Turbidez final, NTU	12,20	12,50	9,32	12,00	15,40	14,50
% Remoción	63,0%	62,1%	71,8%	63,6%	53,3%	56,1%
Decoloración (SI/NO)	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Índice de Willcomb	2	2	2	2	2	2

Elaboración propia.

Observaciones: agua transparente con presencia del colorante disuelto, presencia de flóculos blancos, agitación lenta. Presencia de partículas flotadas.

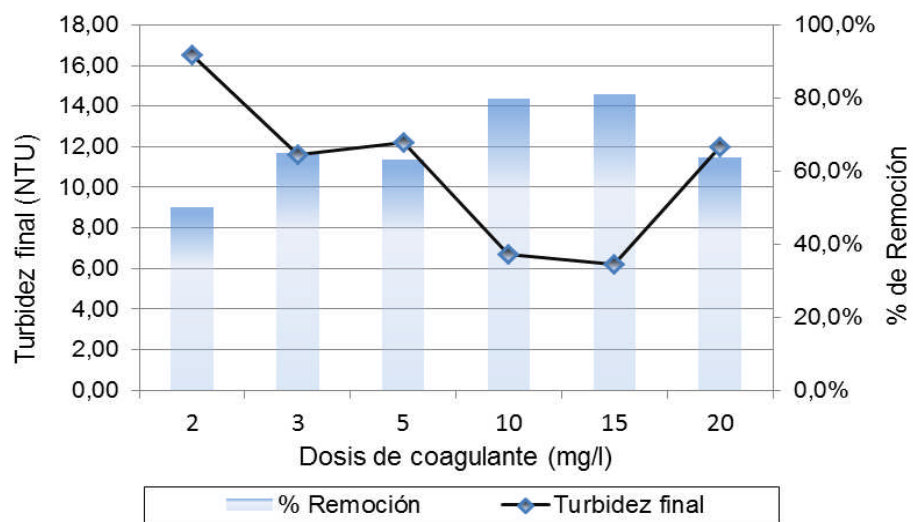
En las siguientes figuras se observa la relación de la dosis de coagulante en el eje de abscisa (x); y su turbidez final de la muestra y porcentaje de remoción de la misma en el eje de coordenadas (y) izquierda y derecha respectivamente.

Figura 8.2. Curva de coagulación con sulfato de aluminio



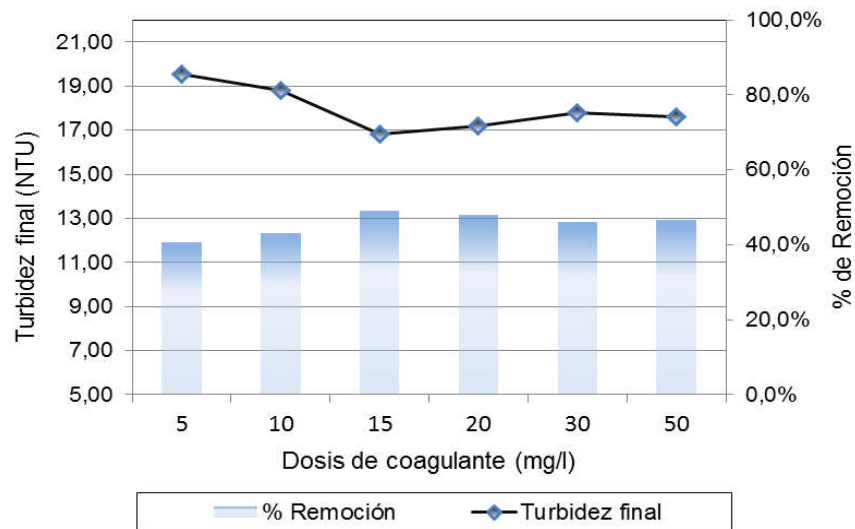
Elaboración propia.

Figura 8.3. Curva de coagulación con cloruro de hierro



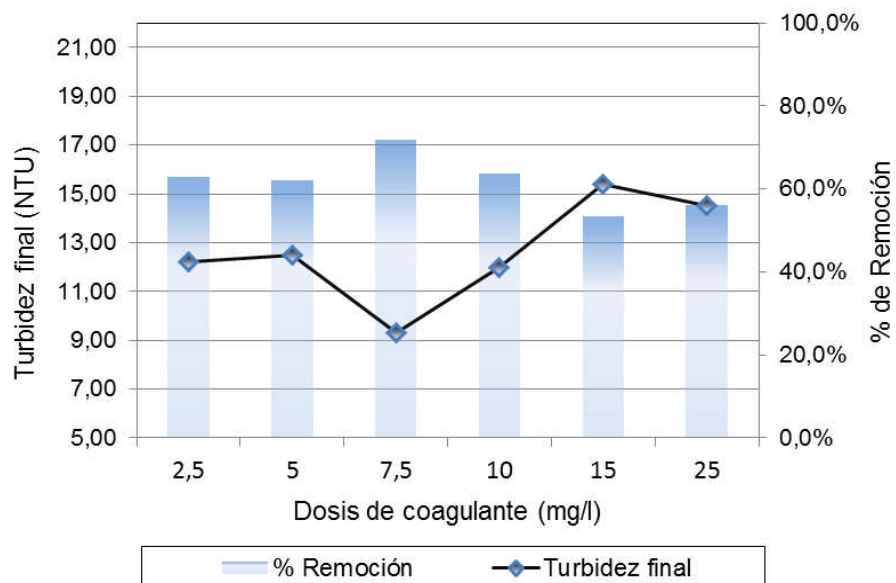
Elaboración propia.

Figura 8.4. Curva de coagulación con sulfato de hierro II



Elaboración propia.

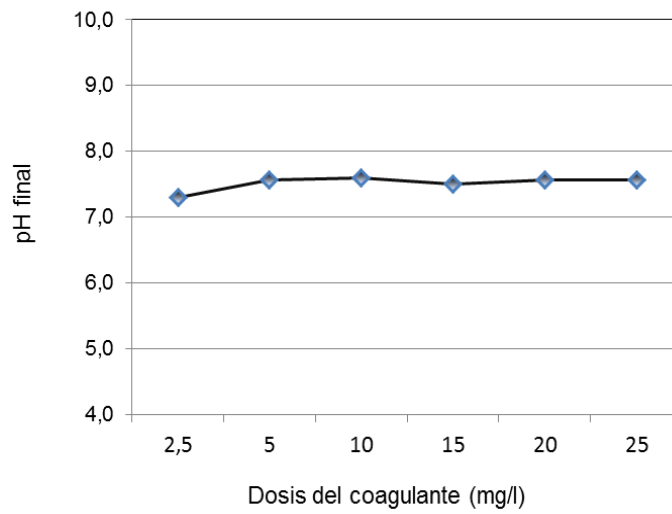
Figura 8.5. Curva de coagulación con sulfato de hierro III



Elaboración propia.

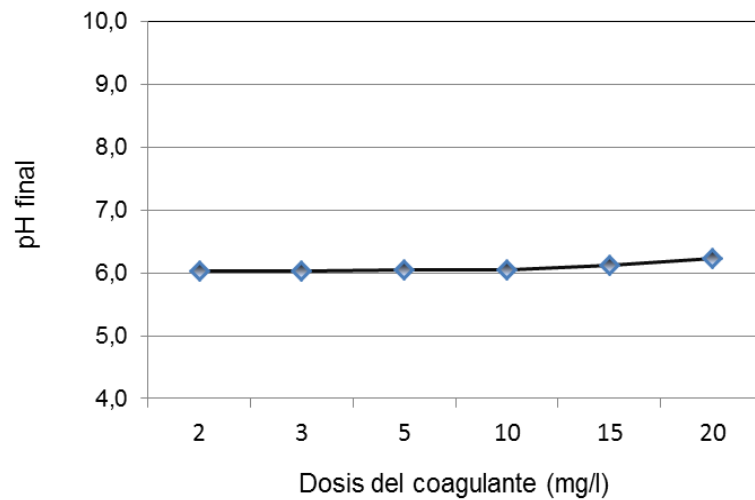
Las siguientes figuras son la relación de dosis de coagulantes vs. pH final de la prueba de jarras.

Figura 8.6. Curva de pH con sulfato de aluminio

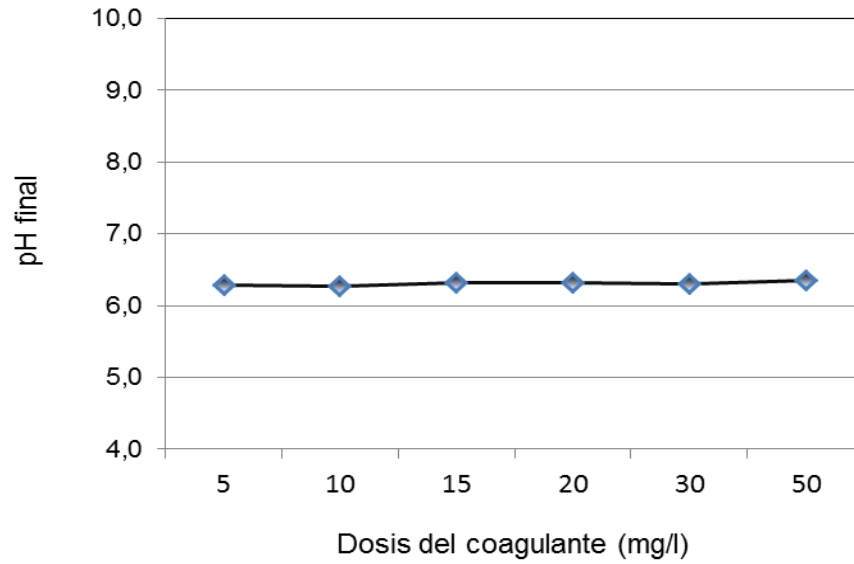


Elaboración propia.

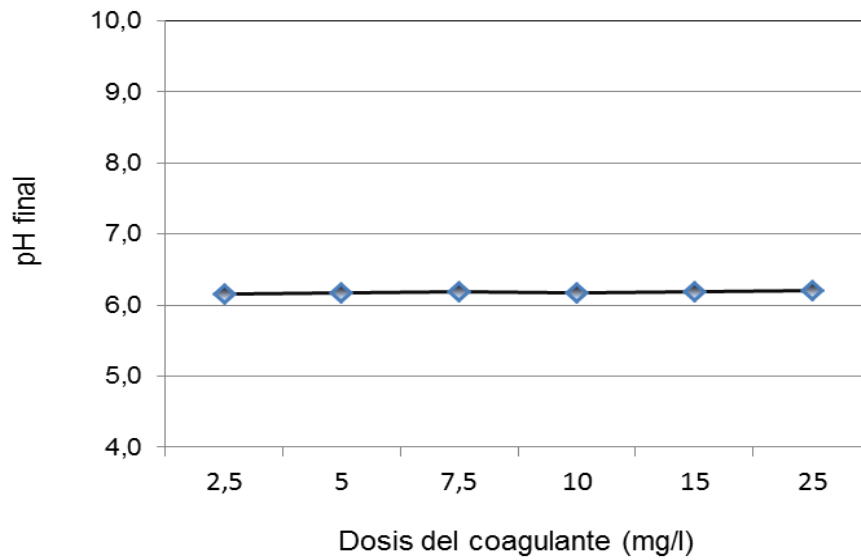
Figura 8.7. Curva de pH con cloruro de hierro



Elaboración propia.

Figura 8.8. Curva de pH con sulfato de hierro II

Elaboración propia.

Figura 8.9. Curva de pH con sulfato de hierro III

Elaboración propia.

Observaciones: en las cuatro figuras, el pH final no varía a medida que aumenta la dosis del coagulante.

En el cuadro 8.6 se determina el coagulante que tiene la dosis óptima con el mayor porcentaje de remoción de turbiedad.

Cuadro 8.6. Resultados de la selección del coagulante y su dosis óptima

Coagulantes	Dosis de H ₂ SO ₄ (ml/l)	Dosis óptima (mg/l)	pH final	Turbidez final, NTU	% Remoción
Sulfato de aluminio	0,93	20	7,6	3,30	90,0%
Cloruro de hierro	1,54	15	6,1	6,22	81,2%
Sulfato de hierro II	1,54	15	6,3	16,80	49,1%
Sulfato de hierro III	1,54	7,5	6,2	9,31	71,8%

Elaboración propia.

Observaciones: El sulfato de aluminio remueve más turbiedad que los demás coagulantes; por lo tanto, es el coagulante óptimo del efluente. El pH final no cambió con respecto de sus valores de neutralización.

Se compara el estado inicial, final y los límites máximos permisibles, como se indica en el cuadro 8.7, donde el DQO se redujo a 550 mg/l que es igual más del doble de los Límites Máximos Permisibles de la norma mexicana.

Cuadro 8.7. Comparación de los estados iniciales y final del agua tratada con el coagulante y su dosis óptima con los LMP de la norma mexicana

Parámetros físico-químicos	Estado inicial	Estado final	LMP
pH	12	7,6	6-9
DQO, mg/l	1 190,0	550,0	200,0

Elaboración propia.

Luego se calcula la eficiencia de reducción del DQO (η) según la ecuación:

$$\eta = \frac{DQO_{inicial} - DQO_{final}}{DQO_{inicial}} \times 100 \quad \text{Ec.(2)}$$

Reemplazando los valores del cuadro 8.7 se obtiene el siguiente resultado.

Cuadro 8.8. Eficiencia del coagulante y su dosis óptima

Parámetros físico-químicos	Estado inicial	Estado final	Eficiencia
DQO, mg/l*	1190,0	550,0	53,8%

Elaboración propia.

Observaciones: El DQO está encima de los LMP, y por lo tanto sigue estando contaminado. Es así que se deberá aplicar un respaldo para la coagulación, tales como los floculantes.

* El DQO se determinó tanto inicial como final después de las pruebas de coagulación-floculación por el método colorimétrico (Ver Apéndice P).

8.2.2 Determinación del floculante y su dosis óptima

Los ensayos de floculación siguen la misma metodología de un ensayo de la determinación de coagulante y su dosis óptima, con la diferencia de dosificar, junto con la dosis óptima del coagulante, reactivos floculantes.

Poliacrilamida

Cuadro 8.9. Resultados de las pruebas de jarras con sulfato de aluminio y poliacrilamida

Parámetros	Jarras					
	1	2	3	4	5	6
H ₂ SO ₄ conc. (pH=7), ml/l	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Sulfato de aluminio, mg/l	20	20	20	20	20	20
Floculante, mg/l	2	4	6	8	10	12
Temperatura, °C	21,1	20,1	20,1	20,3	20,1	20,4
Tiempo del primer flóculo, segundos	12	6	7	5	4	4
Turbidez final, NTU	11,6	9,67	7,13	2,84	1,61	2,22
pH final	7,2	7,2	7,1	7,1	7,1	7,1
% Remoción	64,8%	70,7%	78,4%	91,4%	95,1%	93,3%
Decoloración (SI/NO)	NO	NO	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Índice de Willcomb	6	4	4	8	8	8

Elaboración propia.

Observaciones: los primeros minutos de la agitación lenta, las jarras 3, 4, 5 y 6 empiezan a formar de flóculos del mismo color del colorante presente y sucede la decoloración de la muestra. A los 10 minutos se formaron flóculos grandes, algunos flóculos formados están adheridos en los ejes del agitador múltiple, en los deflectores y en las paletas. En la figura 8.10 los floc aglomerados se sedimentan en la agitación lenta. Finalmente, en la etapa de decantación, ocurre la sedimentación para los restos de los flóculos que permanecieron en el líquido durante la agitación lenta. El lodo formado es gelatinoso y adhesivo a la superficie.

Figura 8.10. Presencia de floc formados y decoloración en la pruebas de jarras con sulfato de aluminio y poliacrilamida



Foto tomada en el Laboratorio.

Policloruro de aluminio

Cuadro 8.10. Resultados de la prueba de jarras con sulfato de aluminio y policloruro de aluminio

Parámetros	Número de jarras					
	1	2	3	4	5	6
H ₂ SO ₄ conc. (pH=7), ml/l	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Sulfato de aluminio, mg/l	20	20	20	20	20	20
Floculante, mg/l	2	4	6	8	10	12
Temperatura, °C	20,1	20	20,1	20,2	20,1	20,1
Tiempo del primer flóculo, segundos	2	2	1	1	1	1
Turbidez final, NTU	11,5	11,2	11,5	10,5	17	24,6
pH final	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2
% Remoción	65,2%	66,1%	65,2%	68,2%	48,5%	25,5%
Decoloración (SI/NO)	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Índice de Willcomb	4	4	4	4	4	4

Elaboración propia.

Observaciones: no hay decoloración, se formaron flóculos blancos, pero no grandes aglomeraciones; la sedimentación es lenta y la muestra perdió su transparencia.

Almidón

Cuadro 8.11. Resultados de la prueba de jarras con sulfato de aluminio y almidón

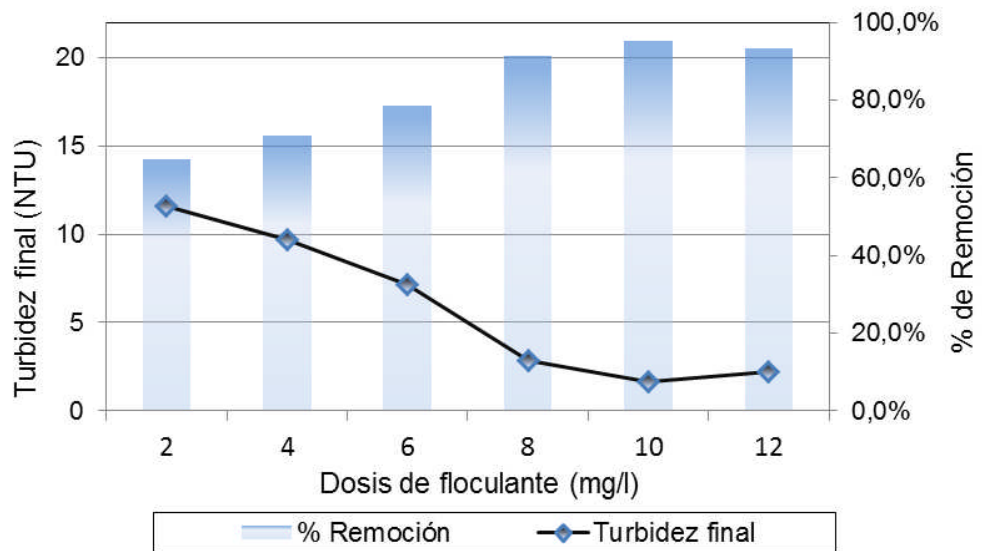
Parámetros	Número de jarras					
	1	2	3	4	5	6
H ₂ SO ₄ conc. (pH=7), ml/l	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Sulfato de aluminio, mg/l	20	20	20	20	20	20
Floculante, mg/l	2	4	6	8	10	12
Temperatura, °C	20	20	20,1	20,1	20,2	20
Tiempo del primer flóculo, segundos	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
Turbidez final, NTU	11,3	11	10,4	11,1	11,6	11
pH final	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
% Remoción	65,8%	66,7%	68,5%	66,4%	64,8%	66,7%
Decoloración (SI/NO)	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Índice de Willcomb	4	4	4	4	4	4

Elaboración propia.

Observaciones: no hay decoloración, se formaron flóculos blancos, pero no grandes aglomeraciones. La sedimentación es lenta y la muestra perdió su transparencia.

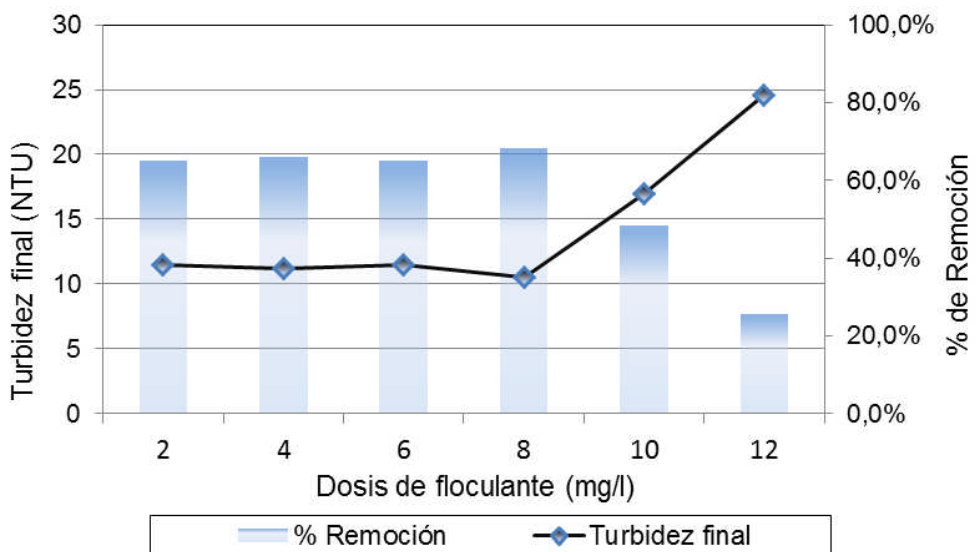
En las curvas de coagulación-floculación se observan los descensos de la turbiedad de la muestra hasta la dosis óptima por determinar. Cada dosis representa un porcentaje de remoción de turbiedad el cual se observa a continuación.

Figura 8.11. Curva de coagulación-floculación con sulfato de aluminio y poliacrilamida



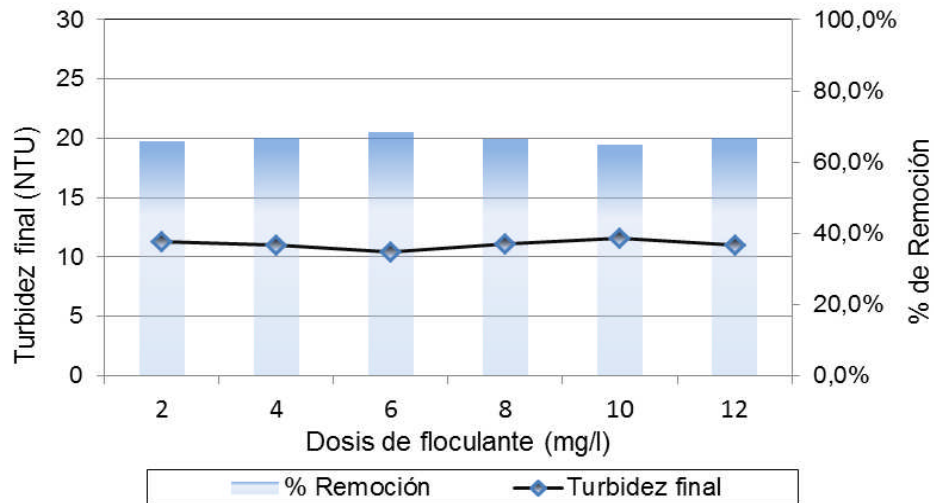
Elaboración propia

Figura 8.12. Curva de coagulación-floculación con sulfato de aluminio y policloruro de aluminio



Elaboración propia.

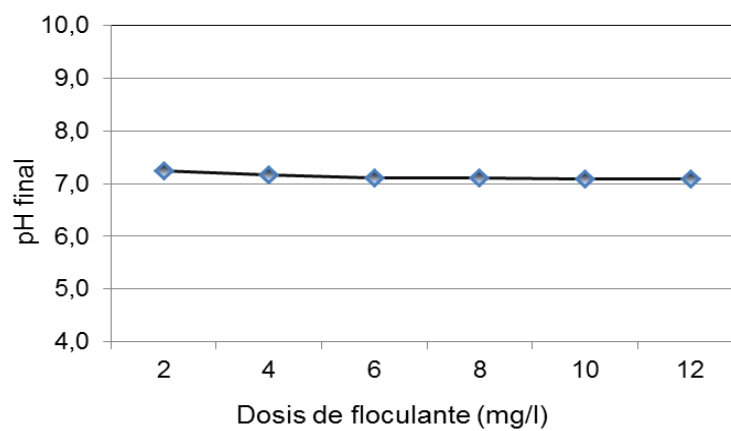
Figura 8.13. Curva de coagulación-floculación con sulfato de aluminio y almidón



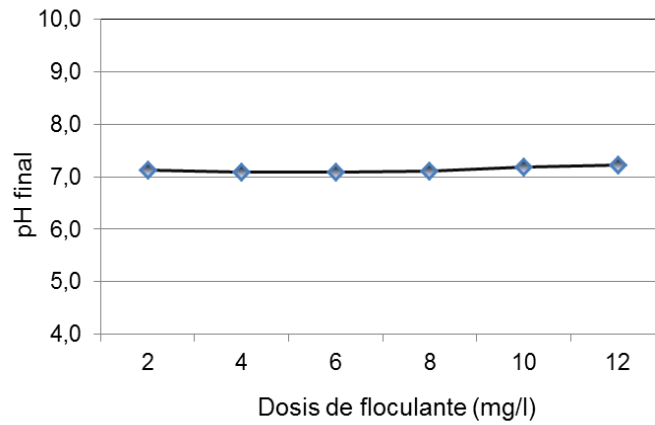
Elaboración propia.

En las siguientes figuras se observa la relación de la dosis del floculante en el eje de abscisa (x) y el pH final de la muestra en el eje de coordenadas (y).

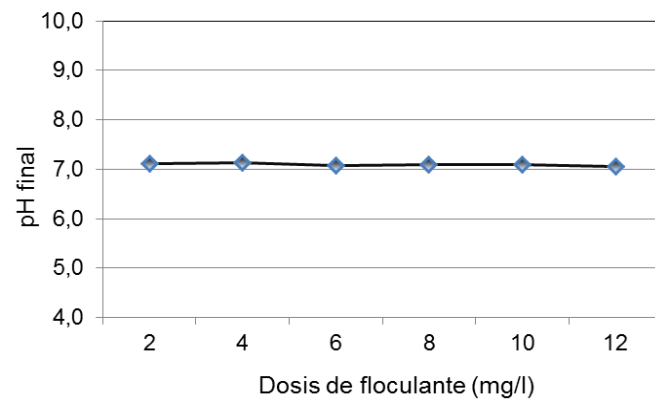
Figura 8.14. Curva de pH con sulfato de aluminio y poliacrilamida



Elaboración propia.

Figura 8.15. Curva de pH con sulfato de aluminio y policloruro de aluminio

Elaboración propia.

Figura 8.16. Curva de pH con sulfato de aluminio y almidón

Elaboración propia.

Observaciones: no presenta variación de la adición de floculantes en los ensayos.

En el cuadro 8.12 se tiene el floculante óptimo con el mayor porcentaje de remoción de turbiedad.

Cuadro 8.12. Resultados de la selección del floculante y su dosis óptima

Floculantes	Dosis de H ₂ SO ₄ conc. (ml/l)	Dosis de Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/l)	Dosis óptima del floculante (mg/l)	pH final	Turbidez final, NTU	% Remoción
Poliacrilamida	0,96	20	10	7,1	1,6	95,1%
Policloruro de aluminio	0,96	20	8	7,1	10,5	68,2%
Almidón	0,96	20	6	7,1	10,4	68,5%

Elaboración propia.

Observaciones: la poliacrilamida reúne más partículas desestabilizadas que los demás floculantes; por lo tanto, es el floculante óptimo del efluente.

Cuadro 8.13. Comparación de los estados iniciales y final del agua tratada con el coagulante y floculante con su dosis óptima, con los LMP de la norma mexicana

Parámetros físico-químicos	Estado inicial	Estado final	LMP
pH	12,0	7,1	6-9
DQO, mg/l	1190,0	218,0	200

Elaboración propia.

Luego se determina la eficiencia de reducción de DQO.

Cuadro 8.14. Eficiencia del coagulante y floculante óptimo con sus dosis óptimas

Parámetros físico-químicos	Estado inicial	Estado final	Eficiencia
DQO, mg/l	1190	218	81,8%

Elaboración propia.

Observaciones: el DQO del agua tratada está cerca de los LMP, por lo tanto, es aceptable para la descarga al sistema alcantarillado.

IX. PARÁMETROS DE DISEÑO Y SELECCIÓN DE MATERIALES

La planta de tratamiento de efluentes de la planta de teñido y acabado está definida a partir del diagrama de flujo (Ver apéndice T).

9.1 Desbaste, rejillas de limpieza manual

Cuadro 9.1 Datos iniciales para el diseño de rejillas de limpieza manual

Datos	Símbolo	Valores numéricos	Unidades
Caudal máximo del canal*	$Q_{\text{máx.}}$	0,05	m^3/s
Velocidad del fluido	$V_{\text{prom.}}$	0,6	m/s
Altura del canal	h	0,28	m
Temperatura†	T	35	$^{\circ}\text{C}$
Viscosidad cinemática	ν	$0,723 \times 10^{-6}$	m^2/s

Elaboración propia.

Cuadro 9.2 Criterios de diseño de la rejilla de limpieza manual

Datos	Símbolo	Valores numéricos	Unidades
Caudal	Q	$<0,05$	m^3/s
Grado de inclinación	Θ	$30 - 60^{\circ}$	-----
Velocidad	V	$0,3 - 0,6$	m/s
Espesor de las barras‡	s	0,005	m
Separaciones entre barras	e	0,025	m

Fuente: Elaboración basada de Fundación ICA. Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales. 2003.

* El caudal y la velocidad de flujo son obtenidos de las pruebas de velocidad para el diseño de desbaste y rejillas de limpieza (ver Apéndice R).

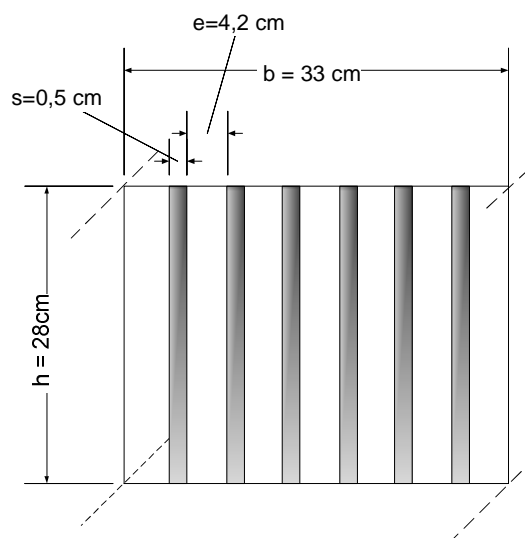
† Los datos de densidad, viscosidad y viscosidad cinemática están en función de la temperatura (ver Apéndice N).

‡ El material de las barras son de acero al carbono

Cuadro 9.3 Cálculo de las dimensiones de la rejilla

Pasos	Datos	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal máximo $Q_{\text{máx.}} = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ Velocidad del paso de la rejilla $v = 0,6 \text{ m/s}$	$A_L = Q_{\text{máx.}}/v_{\text{prom.}}$	Área libre al paso del agua $A_L = 0,05/0,6$ $A_L = 0,08 \text{ m}^2$
2	Altura del tirante $h = 0,28 \text{ m}$	$b_g = A_L/h$	Suma de separaciones entre barras $b_g = 0,08/0,28$ $b_g = 0,30 \text{ m}$
3	Espesor de las barras $s = 0,005 \text{ m}$ Separación entre barras $e = 0,025 \text{ m}$	$b = (b_g/e - 1) \times (s + e) + e$	Ancho del canal calculado $b_c = (0,3/0,025 - 1) \times (0,005 + 0,025) + 0,025$ $b_c = 0,36 \text{ m}$
4	Ancho del canal medido $b = 0,33 \text{ m}$	Si $b \leq b_c$, cumple	Condiciones de ajuste $e = 0,042 \text{ m}$ $b_c = 0,33 \text{ m}$
5		$n_b = b_g/e - 1$	Numero de barras $n_b = 0,3/0,042 - 1$ $n_b = 6 \text{ barras}$

Fuente: Elaboración basada de Fundación ICA. Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales. 2003.

Figura 9.1. Diseño de las rejillas de limpieza manual

Fuente: Fundación ICA. Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales. 2003.

9.2 Tanque de homogenización

Cuadro 9.4. Datos iniciales para el diseño de tanque de homogenización

Datos	Símbolo	Valores numéricos	Unidades
Caudal máximo*	Q_{max}	45	$m^3/día$
Tiempo de operación	t_{op}	24	horas

Elaboración previa

Criterios de diseño

Espesor del tanque: ¼ pulg.

Material: acero al carbono

Orientado horizontalmente

Cuadro 9.5. Cálculo de las dimensiones del tanque de homogenización

Paso	Dato	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal máximo $Q_{max} = 45 m^3/día$ Tiempo de operación $t = 1 día$	$V = t_s \times V$	Volumen del tanque, V $V = 1 \times 45$ $V = 45 m^3$
2	Área del tanque $A = [\pi(D)^2/4]$	$L = 2 \times D$ $V = A \times L$ $V = [\pi(D)^2/4] \times (2 \times D)$ $D = [2 \times V / \pi]^{1/3}$	Diámetro interno del tanque, D $D = (2 \times 45 / \pi)^{1/3}$ $D = 3,1 m$
3		$L = 2 \times D$	Longitud del tanque, L $L = 2 \times 3,1 m$ $L = 6,2 m$

Fuente: Elaboración basara de Perry, R. H. Manual del Ingeniero Quimico. New York: McGrawHill. Sexta ed. 1992.

* El caudal máximo es determinado en el Apéndice E

9.3 Sistema de bombeo

Cuadro 9.6. Datos iniciales para el diseño del sistema de bombeo

Datos	Símbolo	Valores numéricos	Unidades
Caudal	Q_0	$6,72 \times 10^{-3}$	m^3/s
Carga total*	H	4	m
Temperatura	T	35	$^{\circ}C$
Densidad	ρ	994,0	kg/m^3

Elaboración propia

Criterios de diseño

Cuadro 9.7. Criterios de diseño para el sistema de bombeo

Tipo de bomba	Centrífuga radial
Material	Hierro fundido
Eficiencia, η	85%

Fuente: Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. México D.F. 1992.

Cuadro 9.8. Cálculo de la potencia para el sistema de bombeo

Paso	Dato	Criterios	Cálculo y resultados
1	Carga total H = 4 m Caudal Q = $6,72 \times 10^{-3} m^3/s$ Eficiencia de la bomba $\eta = 0,85$ $\rho = 994,0 kg/m^3$ $g = 9,8 m/s^2$	$P = Q \times H \times \rho \times g / \eta$	Potencia requerida $P = 6,72 \times 10^{-3} \times 4 \times 994,0 \times 9,8 / 0,85$ $P = 0,31 kW$
2	Tiempo de operación $t_{op} = 2$ horas Tiempo de consumo anual t = 360 días	$C_{Pa} = t_{op} \times t \times P$	Consumo energético anual, C_{Pa} $C_{Pa} = 2 \times 360 \times 0,31$ $C_{Pa} = 221,80 kWh/año$

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. México D.F. 1992.

* La carga total incluye un suministro de succión a presión atmosférica.

9.4 Tanque de neutralización

Cuadro 9.9. Datos iniciales para el diseño del tanque de neutralización

Datos	Símbolo	Valores numéricos	Unidades
Caudal	Q_0	$6,72 \times 10^{-3}$	m^3/s
Tiempo de residencia*	θ	60	Segundos
Temperatura	T	35	$^{\circ}C$
Densidad	ρ	994,0	kg/m^3
Viscosidad	μ	$0,719 \times 10^{-3}$	Pa.s

Elaboración previa.

Cuadro 9.10. Criterios de diseño del tanque de neutralización

Eficiencia de agitación, η	90%
Espesor del tanque	$\frac{1}{4}$ pulg
Tipo de agitador	Turbina de palas inclinadas a 45° , 4 paletas
Material	Acero al carbono
Velocidad de agitación	20 – 150 rpm

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. México D.F. 1992.

Cuadro 9.11 Cálculo de diseño del tanque de neutralización

Pasos	Datos	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal $Q_0 = 6,72 \times 10^{-3} m^3/s$ Tiempo de residencia $\theta = 60$ s	$V = \theta \times Q_0$	Volumen del tanque, V $V = 60 \times 6,72 \times 10^{-3}$ $V = 0,4032 m^3$
2	Altura del tanque $H = D$ Área del tanque $A = (\pi(D)^2/4)$	$V = A \times H$ $V = (\pi(D)^2/4) \times D$ $D = (4 \times V / \pi)^{1/3}$	Diámetro interno del tanque, D $D = (4 \times 0,4032 / \pi)^{1/3}$ $D = 0,8$ m Altura del tanque, H $H = 0,8$ m

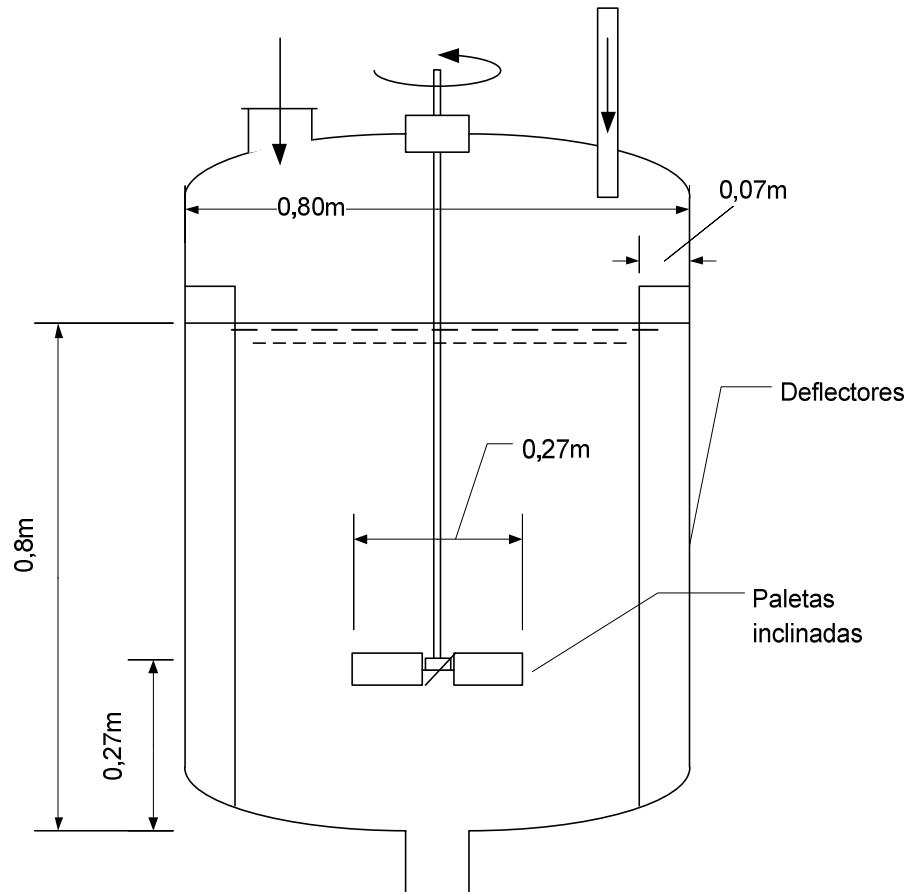
* El tiempo de residencia es tomado del Apéndice G.

Pasos	Datos	Criterios	Cálculo y resultados
3	-----	$B = H/3$	Altura entre la turbina y la base, B $B=0,8/3$ $B=0,27 \text{ m}$
4	-----	$Da = D/3$	Diámetro de la turbina, Da $Da = 0,8/3$ $Da = 0,27 \text{ m}$
5	-----	$J = D/12$	Deflector del tanque $J = 0,8/12$ $J = 0,07 \text{ m}$
6	Densidad $\rho = 994,0 \text{ kg/m}^3$ Viscosidad $\mu = 0,719 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ Velocidad de agitación $n = 85 \text{ rpm}^*$	$Re = Da^2 \times n \times \rho / (\mu \times 60)$	Número de Reynolds, Re $Re = 0,27^2 \times 85 \times 994,0 / (0,719 \times 10^{-3} \times 60)$ $Re = 1,3 \times 10^6$
7	-----	$Np = f(Re)$ Ver apéndice V	Número de potencia $Np=1,4$
8	-----	$P = Np \times \rho \times n^3 \times Da^5$	Potencia de la turbina, P $P = 1,4 \times 994,0 \times (85/60)^3 \times 0,27^5$ $P = 5,67 \text{ W}$
9	Eficiencia de la mezcla $\eta = 90\%$	$P_m = P/\eta$	Potencia del motor, P_m^\dagger $P_m = 5,67/0,9$ $P_m = 6,3 \text{ W}$
10	Tiempo de operación $t_{op} = 2 \text{ horas}$ $= 7\,200 \text{ s}$ Tiempo anual de consumo $t = 360 \text{ días}$	$C_{Pa} = t_{op} \times P_m / (\theta \times 1\,000)$	Consumo energético anual $C_{Pa} = 7\,200 \times 360 \times 6,3 / (60 \times 1000)$ $C_{Pa} = 272,16 \text{ kWh/año}$

Fuente: Elaboración basada de McCabe, W. L. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Sexta ed. 2002.

* La velocidad de agitación es el promedio entre 20 y 150 rpm.

† La potencia del motor representa el consumo energético para el tiempo de residencia (θ) de 60 segundos.

Figura 9.2. Diseño del tanque de neutralización

9.5 Tanque de agitación rápida, coagulación

Cuadro 9.12. Criterios de diseño del tanque de agitación rápida, coagulación

Datos	Símbolo	Valores numéricos	Unidades
Caudal	Q_0	$6,72 \times 10^{-3}$	m^3/s
Temperatura	T	35	$^{\circ}C$
Densidad	ρ	994,0	kg/m^3
Viscosidad	μ	$0,719 \times 10^{-3}$	Pa.s

Elaboración propia.

Cuadro 9.13. Criterios de diseño del tanque de agitación rápida

Material	Acero al carbono
Eficiencia de agitación, η	80%
Espesor del tanque	$\frac{1}{4}$ pulg
Tipo de agitador	Turbina de palas inclinadas a 45° , 4 paletas
Tiempo de retención	10 s
Gradiente de agitación	$300 - 1\ 000\ s^{-1}$

Fuente: Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. 2010.

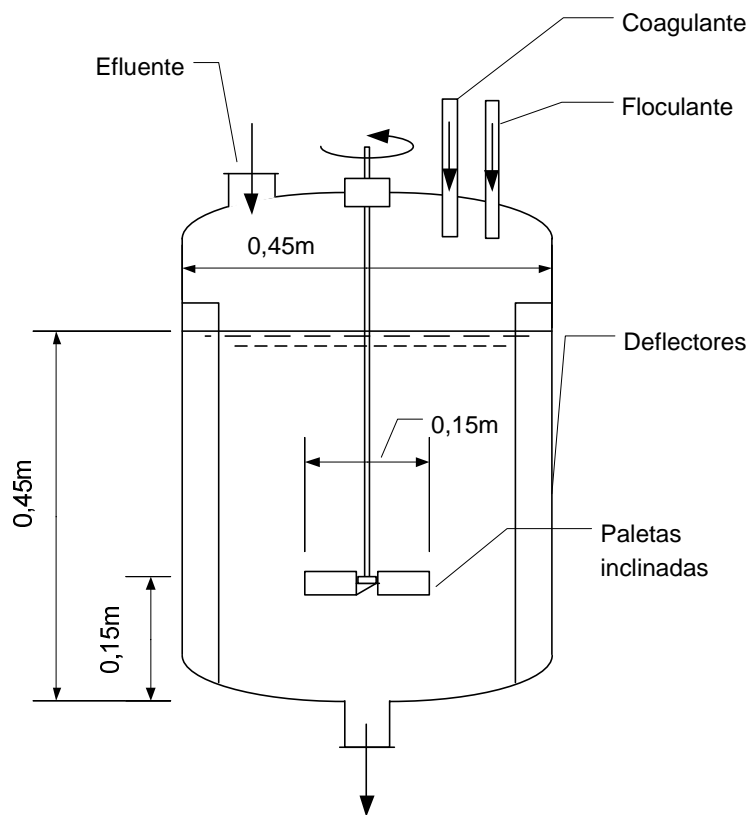
Cuadro 9.14. Cálculo de diseño del agitación rápida, coagulación

Pasos	Dato	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal $Q_0 = 6,72 \times 10^{-3}\ m^3/s$ Tiempo de residencia $\theta = 10\ s$	$V = \theta \times Q_0$	Volumen del tanque, V $V = 10 \times 6,72 \times 10^{-3}$ $V = 0,067\ m^3$
2	-----	$H = D$ $V = D \cdot \pi \times D^2 / 4$ $D^3 = V \times 4 / \pi$ $D = \sqrt[3]{(V \times 4 / \pi)}$	Diámetro del tanque, D $D = \sqrt[3]{(0,067 \times 4 / \pi)}$ $D = 0,45\ m$ Altura del tanque, H $H = 0,45\ m$
3	-----	$B = H / 3$	Altura entre el agitador y la base del tanque, B $B = 0,45 / 3$ $B = 0,15\ m$
4	-----	$Da = D / 3$	Diámetro del agitador $Da = 0,45 / 3$ $Da = 0,15\ m$

Pasos	Dato	Criterios	Cálculo y resultados
5	Viscosidad del caudal $\mu = 0,719 \times 10^{-3}$ Pa.s Gradiente de velocidad $G = 300 \text{ s}^{-1}$	$P = G^2 \times \mu \times V$	Potencia suministrada, $P = 300^2 \times 0,719 \times 10^{-3} \times 0,067$ $P = 4,336 \text{ W}$
6	Eficiencia de la mezcla $\eta = 80\%$	$P_m = P / \eta$	Potencia del motor, P_m $P_m = 4,336 / 0,8$ $P_m = 5,42 \text{ W}$
7	Tiempo de operación $t_{op} = 2 \text{ horas} = 7\,200 \text{ s}$ Tiempo de consumo $t = 360 \text{ días}$	$C_{Pa} = t_{op} \times P_m / (\theta \times 1000)$	Consumo de energía $C_{Pa} = 7\,200 \times 360 \times 5,42 / (10 \times 1\,000)$ $C_{Pa} = 1\,404,86 \text{ kWh/año}$

Fuente: Elaboración basada de Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. 2010.

Figura 9.3. Diseño de un mezclador mecánico para el proceso de mezcla rápida



9.6 Floculador hidráulico tubular

Cuadro 9.15. Criterios de diseño del floculador hidráulico tubular

Datos	Símbolo	Valores numéricos	Unidades
Caudal	Q_0	$6,72 \times 10^{-3}$	m^3/s
Densidad	ρ	994,0	kg/m^3
Viscosidad	μ	$0,719 \times 10^{-3}$	Pa.s

Elaboración propia.

Cuadro 9.16. Criterios de diseño del floculador hidráulico tubular

Material	Acero comercial
Coeficiente de rugosidad, ϵ	0,06 mm = 0,00006 m
Coeficiente K para codos de 90°	0,6
Espesor de los tubos*	1/4 pulg
Tiempo de retención, t	20 minutos
Velocidad del flujo, v	0,1 – 0,8 m/s
Gradiente de velocidad, G	20 - 70 s^{-1}
Producto Gxt	60 000 – 200 000

Fuente: Elaboración basada de Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. 2010.

Cuadro 9.17. Cálculo de diseño del floculador hidráulico tubular

Pasos	Datos	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal $Q_0 = 6,72 \times 10^{-3} m^3/s$ Tiempo de residencia $t = 20 \text{ min} = 1\,200 \text{ s}$	$V = t \times Q_0$	Volumen del floculador hidráulico, V $V = 1\,200 \times 6,72 \times 10^{-3}$ $V = 8,06 m^3$
2	Velocidad del flujo $v_0 = 0,1 m/s$	$A = Q_0 / v_0$ $D = \sqrt{(A \times 4 / \pi)}$	Sección transversal, A $A = 6,72 \times 10^{-3} / 0,1$ $A = 0,067 m^2$ Diámetro de la sección $D = \sqrt{(0,03 \times 4 / \pi)} = 0,3 m$
3	-----	$l = v_0 \times \theta$	$l = 0,1 \times 1200$ $l = 120 m$

* El material seleccionado será de acero comercial por tener coeficiente de rugosidad bajo y resistente a las temperaturas del efluente (Ver Apéndice E). El coeficiente de rugosidad está dado por Miliarium.com: ingeniería Civil y Medio Ambiente, 2008.

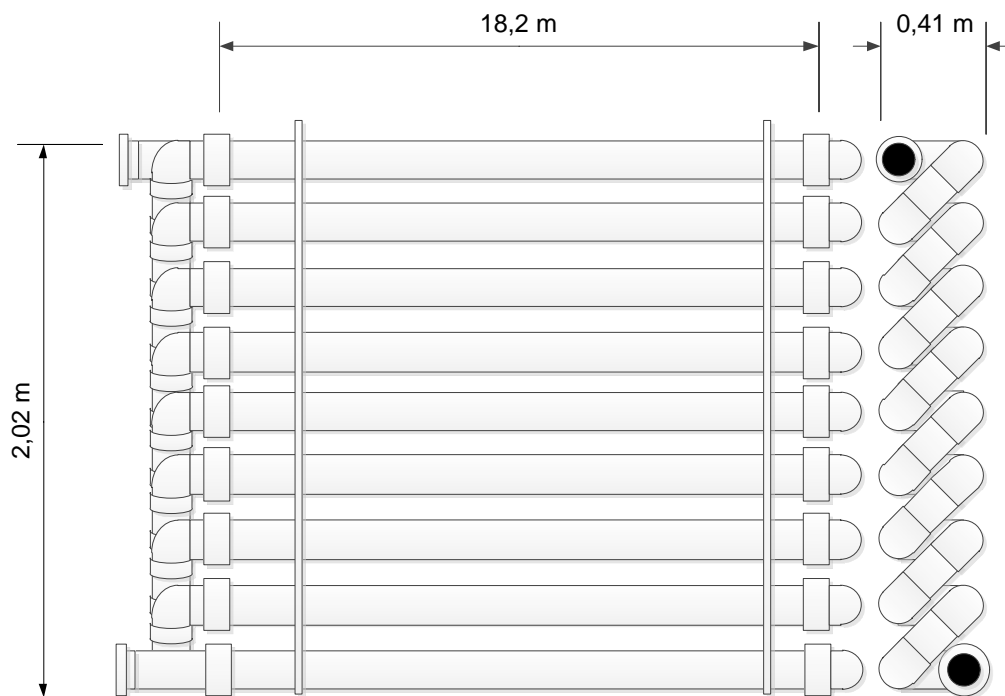
Pasos	Datos	Criterios	Cálculo y resultados
4	Densidad del fluido $\rho = 994,0 \text{ kg/m}^3$ viscosidad del fluido $\mu = 0,719 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$	$Re = D \times v \times \rho / \mu$	Numero de Reynolds, Re $Re = 0,3 \times 0,1 \times 994,0 / 0,719 \times 10^{-3}$ $Re = 41\ 474$
5	Coefficiente de rugosidad $\varepsilon = 0,00001 \text{ m}$	Flujo turbulento $1/\sqrt{f} = -2(\log(\varepsilon/3,7D + 2,51/Re\sqrt{f}))$	Factor de fricción de la tubería, f $f = 0,0224$
6	Gravedad $g = 9,8 \text{ m/s}^2$	$h_1 = f \times (l/D) \times (v^2/2g)$	Perdida de carga en los tubos, h_1 $h_1 = 0,0224 \times (120/0,3) \times (0,1^2/(2 \times 9,8))$ $h_1 = 0,00457 \text{ m}$
7	Numero de codos $nc = 18 \text{ codos}^\dagger$ Coefficiente de pérdida de carga de los codos 90° $K = 0,6$	$h_2 = nc \times K \times (v^2/2g)$	Perdida de carga en los codos de 90° , h_2 $h_2 = 17 \times 0,6 \times (0,1^2/(2 \times 9,8))$ $h_2 = 0,00551 \text{ m}$
8	-----	$h_t = h_1 + h_2$	Perdida de carga total, h_t $h_t = 0,00457 + 0,00551$ $h_t = 0,01 \text{ m}$
9	-----	$P = \rho \times g \times Q \times h_t$	Potencia disipada unitaria $P = \rho \times g \times Q \times h_t$ $P = 994,0 \times 9,8 \times 6,72 \times 10^{-3} \times 0,01$ $P = 0,66 \text{ W}$
10	-----	$G = (P/(\mu \times V))^{1/2}$ $G_t = G \times t$	Gradiente de velocidad, G $G = (0,66 / (0,719 \times 10^{-3} \times 8,06))^{1/2}$ $G = 10,671 \text{ s}^{-1}$ $G_t = 10,508 \times 1200$ $G_t = 12\ 805,5$ No coincide con el rango Por lo tanto se deberá probar con otra velocidad obteniendo los resultados.
11	$v = 0,273 \text{ m/s}$	$D = 0,18 \text{ m}$ $nc = 34 \text{ codos, 9 niveles}$ $L = 327,6 \text{ m}$ $G = 50,061 \text{ s}^{-1}$ coincide con el rango $G_t = 60\ 073,74 \text{ m}$ coincide con el rango	

[†] El número de codos "nc" depende del número de niveles "n" de cada tramo de tuberías: $nc = 4 \times n - 2$, donde la resta 2 indicando que representan la entrada y salida del floculador.

Pasos	Datos	Criterios	Cálculo y resultados
12	Número de niveles del floculador $n = 9$ Espaciamiento entre tuberías $e_t = 0,05 \text{ m}$	$H = n \times (D + e_t) - e_t$ $W = 2 \times D + e_t$ $L = l / (2 \times n)$	Altura del equipo, H $H = 9 \times (0,18 + 0,05) - 0,05$ $H = 2,02 \text{ m}$ Ancho del equipo, W $W = 2 \times 0,18 + 0,1$ $W = 0,41 \text{ m}$ Longitud del equipo $L = 327,6 / (2 \times 9)$ $L = 18,2 \text{ m}$

Fuente: Elaboración basada de Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. 2010.

Figura 9.4. Diseño del floculador hidráulico de tuberías.



En la figura 9.4 se aprecia el floculador hidráulico tubular de flujo horizontal, que deriva su energía para la agitación del agua residual tratada.

9.7 Clarificador

Cuadro 9.18. Criterios de diseño del clarificador

Datos	Símbolo	Valores numéricos	Unidades
Caudal	Q_0	24,2	m^3/h
Tiempo de residencia*	θ	17,7	min
Velocidad de sedimentación*	V_s	2,0067	cm/min
Temperatura	T	35	$^{\circ}C$
Densidad	ρ	994,0	kg/m^3
Viscosidad dinámica	μ	$0,719 \times 10^{-3}$	Pa.s

Elaboración propia

Cuadro 9.19. Criterios de diseño del clarificador

Longitud, L	3 – 20 m
Altura sobre la fase sedimentada	$0,5 \times D$
Diámetro de cierre a la admisión de partículas de la fase dispersa, D_p	0,1 mm
Velocidad terminal, v_t	$< 0,004$ m/s
Caída de presión, Δp	0,05 bar

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. México D.F. 1992.

Cuadro 9.20. Cálculo de diseño del clarificador

Pasos	Datos	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal $Q = 24,2$ m^3/h Tiempo de residencia $\theta = 25$ min	$V = \theta \times Q$	Volumen de la cámara, V $V = (25/60) \times 24,2$ $V = 10,08$ m^3
2	Velocidad de sedimentación $V_s = 2,0067$ cm/min a m/s: $V_s = 3,34 \times 10^{-4}$ m/s	$A = Q/V_s$	Área y diámetro del clarificador, A $A = (24,2/3600)/(3,34 \times 10^{-4})$ $A = 20,1$ m^2
3		$D = (4 \times A/\pi)^{1/2}$	Diámetro del clarificador, D $D = (4 \times 20,1/\pi)^{1/2}$ $D = 5,06$ m

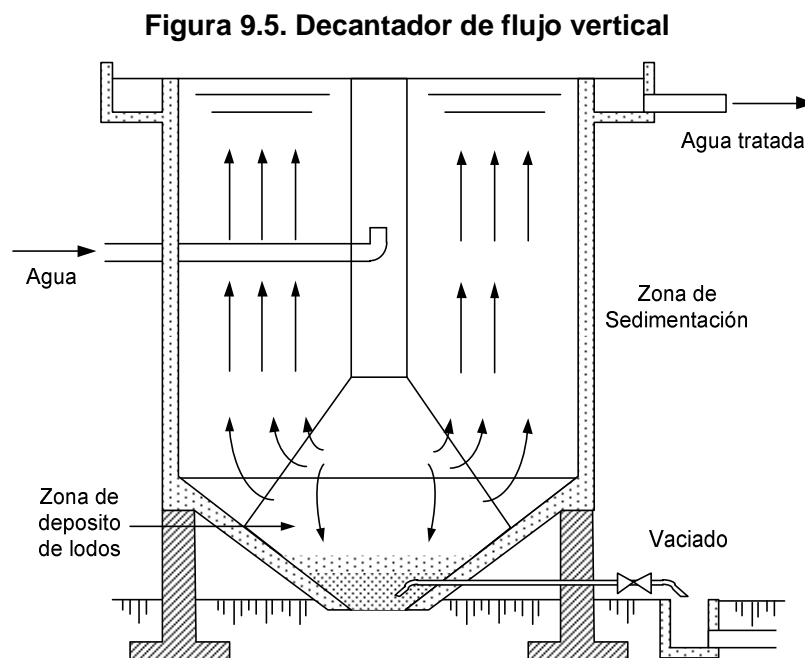
* El tiempo de residencia y la velocidad de sedimentación son experimentales de las pruebas de sedimentación (ver Apéndice S).

Fuente: Elaboración basada en el libro de Ulrich, 1992.

Se tiene en la figura 9.4 el diseño de la unidad de sedimentación el cual presenta las siguientes características de diseño.

En la parte inferior se ubica la zona del lodo, y la recolección del lodo se realiza en la parte periférica superior de la unidad (Vargas, 2006).

Este decantador de flujo vertical se utiliza para instalaciones de pequeño caudal, hasta unos $20 \text{ m}^3/\text{h}$. La pendiente de la parte cónica suele tener entre 45 y 60° , y la velocidad ascensional media suele estar comprendida entre $0,5$ y 1 m/h . También se utiliza en el tratamiento de aguas residuales (en decantación primaria) para poblaciones menores de 2000 habitantes: allí la velocidad suele ser desde 1 hasta 2 m/h .



Fuente: Vargas, L. d. Tratamiento de Agua para el Consumo Humano (Vol. II). Lima, 2006

9.8 Manejo y almacenamiento de materiales

Los químicos utilizados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria textil deben ser resistentes a la corrosión. Su material está compuesto de acero y cubierto con resinas, tales como el asfalto, fibra de vidrio, caucho o epóxido resistentes a ácidos.

9.8.1 Ácido sulfúrico

A. Características

- Inodoro
- Incoloro
- Concentrado al 96-98%
- Denso
- Volátil a temperatura ambiente
- Altamente corrosivo.

B. Manipulación y transporte

El manejo adecuado de esta sustancia evita peligros tales como ataques a la piel y los ojos. El personal asignado debe contar con equipos de protección personal autorizado y supervisado con la alta dirección; los equipos de protección son los siguientes:

- Botas de hule
- Guantes de hule
- Mandil de hule
- Chaqueta y pantalón de hule o de otro material resistente al ácido
- Gafas de protección contra sustancias químicas
- Pantallas faciales

- Máscara con cartucho para vapores orgánicos y gases ácidos
- Máscara o capuchón con suministro de aire forzado
- Cinturones o arneses.

C. Consumo del ácido sulfúrico y diseño del tanque de almacenamiento

El material requerido para los equipos de almacenamiento para el ácido es el acero al carbono, pues, a estas condiciones concentradas no atacan a estos materiales a temperatura ambiente. Los cálculos de diseño y consumo diario y anual se aprecian en el siguiente cuadro

Cuadro 9.21. Cálculo del diseño del tanque de almacenamiento y consumo del ácido sulfúrico concentrado.

Pasos	Datos	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal promedio $Q = 24,2 \text{ m}^3/\text{h}$ Dosis del ácido $D_{op} = 0,9 \text{ ml/l}$ Tiempo de consumo diario $t_{op} = 2 \text{ h}$	$C_d = Q \times D_{op} \times t / 1000$ $C_a = C_d \times 360$	Consumo diario, C_d $C_d = 24,2 \times 0,9 \times 2 / 1000$ $C_d = 0,04 \text{ m}^3/\text{d}$ Consumo anual, C_a $C_a = 360 \times 0,04$ $C_a = 14,4 \text{ m}^3/\text{año}$
2	Tiempo de almacenamiento $t_a = 30 \text{ días}$ factor de seguridad $f_s = 1,5$	$V = f_s \times C_d \times t_a$	Volumen del tanque de almacenamiento, V $V = 1,5 \times 0,04 \times 30$ $V = 1,8 \text{ m}^3$
3	-----	$H = D$ $V = D^3 \times \pi \times D^2 / 4$ $D^3 = V \times 4 / \pi$ $D = \sqrt[3]{(V \times 4 / \pi)}$	Diámetro del tanque, D $D = \sqrt[3]{(1,8 \times 4 / \pi)}$ $D = 1,32 \text{ m}$ Altura del tanque, H $H = 1,32 \text{ m}$
4	factor de espaciamiento $f_e = 1,2$	$V_e = f_e \times V$	Volumen de espaciamiento $V_e = 1,2 \times 1,8$ $V_e = 2,16 \text{ m}^3$

Fuente: Elaboración basada de Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. 2010.

El tanque de almacenamiento será de orientación vertical y con un espesor de 1/4 pulg., por su espaciamento del límite de batería y su capacidad determinada, respectivamente. Se ubicará en una zona segura con el espaciamento determinado para retener las posibles fugas o roturas.

9.8.2 Sulfato de aluminio

A. Características

- Coagulante metálico, se presenta de tipo A y B.
- En su estado sólido es un polvo blanco grisáceo de apariencia cristalina
- En solución está hidrolizada.

B. Manipulación y transporte

El sulfato de aluminio en soluciones es fácilmente manejable, viene en soluciones de 45-48% en tanques cerrados y son transportados en camiones, siempre y cuando los encargados del transporte cumplan con los requisitos de la misma.

C. Consumo del sulfato de aluminio y diseño del tanque de almacenamiento

El sulfato de aluminio en tanques de material plástico reforzado con fibra de vidrio, por su inercia química y por tener resistencia a la corrosión de los suelos más agresivos, y al ser un material dieléctrico, está excluido de los casos de corrosión electroquímica.

Cuadro 9.22 Cálculo del diseño del tanque de almacenamiento y consumo del sulfato de aluminio al 45%.

Pasos	Dato	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal promedio $Q = 24,2 \text{ m}^3/\text{h}$ Dosis del coagulante $D_{op} = 20,0 \text{ mg/l}$ Tiempo de consumo diario $t_{op} = 2 \text{ horas}$ Porcentaje de pureza % pureza = 45% p/p	$C_d = Q \times D_{op} \times t$ $/(\%p \times 1\,000)$ $C_a = C_d \times 360$	Consumo diario, C_d $C_d = 24,2 \times 20 \times 2$ $/(0,45 \times 1\,000)$ $C_d = 2,15 \text{ kg/d}$ Consumo anual, C_a $C_a = 2,15 \times 360$ $C_a = 774,4 \text{ kg/año}$
2	Tiempo de almacenamiento $t_a = 60 \text{ d}$ Densidad $\text{dens} = 1\,340,0 \text{ kg/m}^3$ Factor de seguridad $f_s = 1.5$	$V = f_s \times C_d \times 60 / \text{dens}$	Volumen del tanque de almacenamiento, V $V = 1,5 \times 2,15 \times 60 / 1\,340,0$ $V = 0,14 \text{ m}^3$
3	-----	$H = D$ $V = D^3 \times \pi \times D^2 / 4$ $D^3 = V \times 4 / \pi$ $D = \sqrt[3]{(V \times 4 / \pi)}$	Diámetro del tanque, D $D = \sqrt[3]{(0,14 \times 4 / \pi)}$ $D = 0,56 \text{ m}$ Altura del tanque, H $H = 0,56 \text{ m}$
4	factor de espaciamiento $f_e = 1,2$	$V_e = f_e \times V$	Volumen de espaciamiento, V_e $V_e = 1,2 \times 0,144$ $V_e = 0,17 \text{ m}^3$

Fuente: Elaboración basada de Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. 2010.

El tanque de almacenamiento del coagulante será de forma vertical y con un espesor de 1/4 pulg. Se ubicará en una zona segura con el espaciamiento determinado para retener las posibles fugas o roturas.

* La densidad del Sulfato de Aluminio al 45% es obtenido de libro de Mackenzie, 2010.

9.8.3 Poliacrilamida

A. Características

- Sólido blanco de estructura cristalina
- En solución es viscoso.

B. Manejo y transporte

La poliacrilamida es fácilmente manejable, no son tóxicos e irritables a la piel y los ojos. Estos floculantes vienen en estado sólido en bolsas de 25 kg y pueden ser transportados en camiones siempre y cuando los encargados del transporte cumplan con los requisitos de la misma.

C. Consumo de la poliacrilamida y diseño del tanque de almacenamiento

Los materiales requeridos para el tanque de almacenamiento son el reforzado de fibra de vidrio (FRP), polietileno de alta densidad (PE) o acero inoxidable 316 recubierto con plástico o caucho. Las tuberías y sistemas de bombeo deberán ser de acero inoxidable. Se recomienda que el tanque del floculante sea agitado periódicamente para uniformizar la solución.

Cuadro 9.23. Cálculo del diseño del tanque de almacenamiento y consumo de la poliacrilamida al 1% de solución.

Paso	Dato	Criterios	Cálculo y resultados
1	Caudal promedio $Q = 24,2 \text{ m}^3/\text{h}$ Dosis optima $D_{op} = 10,0 \text{ mg/l}$ Tiempo de consumo diario $t = 2 \text{ h}$	$C_d = Q \times D_{op} \times t / 1\ 000$ $C_a = Q \times D_{op} \times t \times 0,36$	Consumo diario, C_d $C_d = 24,2 \times 10 \times 2 / 1\ 000$ $C_d = 0,484 \text{ kg/d}$ Consumo anual, C_a $C_a = 0,484 \times 360$ $C_a = 174,24 \text{ kg/año}$
2	% Solución = 1% [†]	$V_{\text{agua}} = 360 \times C_d / (\% \text{Sol} \times 1\ 000)$	Consumo anual de agua para la solución de poliacrilamida $V_{\text{agua}} = 360 \times 0,484 / (0,01 \times 1\ 000)$ $V_{\text{agua}} = 17,424 \text{ m}^3/\text{año}$
3	Tiempo de almacenamiento $t_a = 60 \text{ d}$ Factor de seguridad $f_s = 1,5$	$V = f_s \times C_d \times t_a / (\% \text{Sol} \times 1\ 000)$	Volumen del tanque de almacenamiento, V $V = 1,5 \times 0,484 \times 60 / (0,01 \times 1\ 000)$ $V = 4,37 \text{ m}^3$
4	-----	$H = D$ $V = D^3 \times \pi \times D^2 / 4$ $D^3 = V \times 4 / \pi$ $D = \sqrt[3]{(V \times 4 / \pi)}$	Diámetro del tanque, D $D = \sqrt[3]{(4,37 \times 4 / \pi)}$ $D = 1,77 \text{ m}$ Altura del tanque, H $H = 1,77 \text{ m}$
4	Factor de espaciamento $f_e = 1,2$	$V_e = 1,2 \times V$	Volumen de espaciamento, V_e $V_e = 1,2 \times 4,37$ $V_e = 5,24 \text{ m}^3$

Fuente: Elaboración basada de Mackenzie, L. D. Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice. 2010.

El tanque de almacenamiento del floculante será de forma vertical y con espesor de 1/4 pulg., por su espaciamento del límite de batería y su capacidad determinada, respectivamente. Se ubicará en una zona segura con el espaciamento determinado para retener las posibles fugas o roturas.

[†] El porcentaje de solución de 1% en peso fue obtenido en Xitao polymer.

D. Preparación y dosificación del floculante

La poliacrilamida tiene una solubilidad límite, por lo que es recomendable disolver al 2% como solubilidad máxima. Es recomendable utilizar un agitador por 30 min para garantizar la uniformidad. Para la preparación se requiere utilizar agua de alta calidad; en tanto que para la dosificación de la solución del polímero es recomendable un anillo o cabezal de distribución en el tratamiento de coagulación.

9.9 Operación y mantenimiento

El tiempo de operación del tratamiento no será igual para cada día por la cantidad de descarga que produce según el Apéndice E. La energía de mezcla apropiada es una parte importante de la optimización de la dosis de los químicos. La dosificación en exceso compensa la ineficiencia de mezcla en términos económicos y la producción de lodos. Los mezcladores deben comenzar con baja velocidad para evitar la potencia perdida de los agitadores. A su vez, el mantenimiento se centra en el funcionamiento de los motores, instrumentos de medición y la observación de la corrosión de los tanques.

En la sedimentación, la actividad de operación y mantenimiento más importante es la optimización de retirada de lodos. La producción de lodos depende de la turbiedad y la velocidad del flujo de agua. Otras características operativas, tales como la turbidez en el depósito y la igualdad de cargas hidráulicas en los tanques deben ser observadas con los ajustes apropiados. El mantenimiento se centra principalmente en el mantenimiento preventivo en el colector y la observación de la corrosión de los equipos.

X. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica determina la inversión del proyecto que constituye el capital fijo, costos de operación y financiación, donde esta última juega un papel muy importante. Para la planta de aguas residuales textiles, se debe llevar a cabo un intervalo de caudales y ciertos parámetros requeridos para tratar. En cuanto a los costos de inversión o capital fijo se estima lo siguiente:

10.1 Capital fijo

El capital fijo para el sistema de tratamiento de efluentes está constituido por los equipos de proceso, las instalaciones y mano de obra de la planta, y otros gastos que influyen la construcción e instalación del sistema. Los costos son estimados en el Apéndice O.

10.1.1 Costos directos

Los costos directos conforman los equipos diseñados para el tratamiento.

Cuadro 10.1. Costos directos de equipos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de teñido

Equipos	Costos
Tanque de Homogenización	\$ 37 180,95
Sistema de bombeo	\$ 3 718,10
Tanque de neutralización	\$ 7 436,19
Tanque de agitación rápida	\$ 2 230,86
Clarificador	\$ 5 205,33
Costo total de equipos, C_P	\$ 55 771,43

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. 1992

A partir de los costos de los equipos, se determina los costos de los materiales C_M . Estos costos representan el porcentaje del costo total de los equipos de planta, por lo que se tiene los siguientes resultados.

Cuadro 10.2 Costos de materiales directos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de teñido

Materiales directos	Porcentaje	Costos
Tuberías [‡]	45%	\$ 25 097,14
Concreto (cimientos)	5%	\$ 2 788,57
Acero (apoyo para la construcción)	3%	\$ 1 673,14
Instrumentos	10%	\$ 5 577,14
Materiales eléctricos	2%	\$ 1 115,43
Aislamientos	5%	\$ 2 788,57
Pintura	1%	\$ 557,71
Costo total de materiales, C_M		\$ 50 157,10

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. 1992

Después se determina el costo de mano de obra que es el 37% de los costos de equipos y materiales, y, finalmente, el costo directo del capital fijo.

Cuadro 10.3. Costos directos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de teñido

Costos fijos	Costos
Costo de equipos, C_P	\$ 55 771,43
Costo de materiales directos, C_M	\$ 39 597,71
Costo de mano de obra, $C_L = 0,37(C_P + C_M)$	\$ 35 286,58
Costos directos	\$ 130 655,73

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. 1992

[‡] La tuberías incluye también el diseño del floculador hidráulico tubular.

10.1.2 Costos indirectos

Los costos indirectos están relacionados con los costos directos como los impuestos, gastos generales en construcción y de ingeniería, por lo que representan un porcentaje como se ve el siguiente cuadro:

Cuadro 10.4. Costos indirectos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de teñido

Costos indirectos	Porcentaje	Costos
Impuestos	18% C_P	\$ 10 038,86
Gastos generales en construcción	70% C_L	\$ 24 700,61
Gastos de ingeniería	15% C_M y C_P	\$ 14 305,37
Costos indirectos		\$ 62 123,46

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. 1992

10.1.3 Costos fijo total

Por lo tanto se tiene el capital fijo que se tiene en el cuadro 10.5.

Cuadro 10.5. Capital fijo de los costos directos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de teñido

Costos fijos	Costos
Costos directos	\$ 130 655,73
Costos indirectos	\$ 49 044,84
Capital fijo, C_{GR}	\$ 179 700,56

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. 1992

10.2 Costo de operación

Son los gastos de un periodo de la operación del tratamiento de agua residual. Estos gastos comprenden la materia prima, gastos energéticos, servicios, administraciones, impuestos, seguros y otros que implica la operación.

Se tiene el costo de operación con el periodo anual.

10.2.1 Gastos directos

Los costos de operación directos se componen de los relacionados a materiales, consumo eléctrico, mano de obra que están físicamente en un producto que ha estado en contacto tangible con el producto durante la evolución, tales como el ácido, coagulante, floculante, mantenimiento, recolección de lodos.

Cuadro 10.6. Consumo eléctrico anual para cada uno de los equipos.

Equipos	Consumo eléctrico anual kWh/año
Bombas	221,80
Tanque de neutralización	272,16
Tanque de agitación rápida	1 404,86
Consumo energético anual, C_{EA}	1 898,82

Elaboración propia

Luego se tiene los gastos directos anuales de la planta.

Cuadro 10.7. Gastos directos anuales de la planta

Gastos directos	Consumo anual	Costo	\$/año
Ácido sulfúrico concentrado	14,4 m ³	300,00 \$/m ³	\$ 4 320,00
Coagulante (sulfato de aluminio)	774,4 kg	1,23 \$/kg	\$ 952,51
Floculante (poliacrilamida)	174,24 kg	3,42 \$/kg	\$ 595,90
Agua para floculante	17,424 m ³	0,38 \$/m ³	\$ 6,62
Mano de obra de operación, C _{MO}	-----	3322,2 \$/año [§]	\$ 3 322,20
Supervisión, 15% C _{MO}	-----	498,33 \$/año	\$ 498,33
Gasto energético	1 898,82 kWh	0,45 \$/kWh	\$ 854,47
Mantenimiento, 6% C _{GR}	-----	-----	\$ 13 657,24
Suministros de operación, 15% C _L	-----	-----	\$ 6 704,45
Gasto de operación directo total, A _{DME}			\$ 30 911,72

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. 1992

10.2.2 Gastos indirectos

Cuadro 10.8. Gastos de manufactura total

Gastos indirectos	\$/año
Impuestos locales, 1,5% C _{GR}	\$ 2 695,51
Propiedad y seguro, 0,7% C _{GR}	\$ 1 257,90
Depreciación, A _{BD} , 10% C _{GR}	\$ 17 970,06
Total A _{IME}	\$ 21 923,47

Fuente: Elaboración basada de Ulrich, G. D. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. 1992

10.2.3 Gasto total anual

El gasto total es la suma de los gastos directos o indirectos operativos anuales, no incluye las depreciaciones y los gastos operativos.

[§] El salario es calculado tomando el sueldo mínimo vital de \$ 276,85 mensuales (750, en un año, la mano de obra de operación será: 12×276,85 = \$ 3 322,2.

$$\begin{aligned}
 \text{Gastos operativos} &= A_{DME} + A_{IME} \\
 &= \$ 30\,911,72 + \$ 21\,923,47 \\
 &= \$ 52\,835,19/\text{año}
 \end{aligned}$$

Luego se tiene el costo por cada metro cubico de agua que se tratara en la planta de teñido y acabado.

$$\text{Descarga anual de agua residuales textil} = (2 \text{ h}) \times (360 \text{ días/año}) \times 24,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Descarga anual de agua residuales textil} = 17\,424,0 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\text{Costo de tratamiento para el primer año} = (\$ 52\,835,19 + \$ 179\,700,56) / \text{año} / 17\,424,0 \text{ m}^3/\text{año} = \$ 13,35/\text{m}^3 \text{ de agua residual textil.}$$

$$\text{Costo de tratamiento a partir del segundo año} = (\$ 52\,835,19) / \text{año} / 17\,424,0 \text{ m}^3/\text{año} = \$ 3,03/\text{m}^3 \text{ de agua residual textil.}$$

Observaciones: En los gastos operativos no se incluyeron los gastos generales tales como los costos administrativos, distribución, investigación y desarrollo. La planta es operada por una persona desde la preparación de los reactivos hasta la culminación de su jornada. El costo de agua residual se puede recuperar si se aplica el agua tratada para generar ingresos.

10.2.4 Reutilización del agua tratada

Los tratamientos de aguas residuales textiles pueden devolver la condición de utilizables a las aguas mediante distintos procesos que ayudan a devolverles algunos grados de potabilidad. De esta manera el agua que ha sido sometida a tratamientos se puede utilizar para riego, para fuentes y para la reutilización como enjuague de hilos.

XI. CONCLUSIONES

- El presente trabajo de investigación, objeto de la tesis, tuvo como objetivo reducir la carga contaminante de agua residual de una planta textil, para lo cual se hizo en primer lugar una investigación bibliográfica para determinar los parámetros más óptimos del proceso y luego una serie de pruebas de laboratorio para determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante para obtener una agua de calidad adecuada para el proceso y el riego de áreas verdes.
- La investigación bibliográfica determinó que el tratamiento fisicoquímico era el más apropiado, teniendo en cuenta que las aguas vertidas del proceso textil contienen colorantes y detergentes, insumos utilizados por la industria textil y que fueron caracterizados como DQO, sólidos suspendidos y alcalinidad en la muestra líquida analizada. Por otro lado, también se investigó bibliográficamente, si se podía aplicar tratamientos del tipo biológicos, aspecto que luego de la caracterización del efluente industrial, fue descartada, conociendo la baja carga bioquímica (DBO_5), del líquido vertido, así como altas temperaturas, y un área de terreno insuficiente.
- A la fecha, no se tiene una norma peruana específica para los límites máximos permisibles de vertimiento de las aguas residuales textiles. Bajo este contexto se ha tomado como referencia una norma mexicana, para efectos de comparación de los resultados de las pruebas de laboratorio.
- Las pruebas de laboratorio han determinado, que el sulfato de aluminio es el mejor coagulante para el tratamiento fisicoquímico de aguas residuales de la industria textil. Por otro lado, la poliacrilamida es el mejor floculante para la clarificación del tratamiento.
- Las pruebas de jarras llevados a cabo en el laboratorio fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería Ambiental determinaron dosis adecuadas de coagulante y floculante para reducir el DQO (promedio) de 1 190 mg/l a 218 mg/l y la turbiedad de 33,3 NTU (promedio) a 1,6 NTU, valores muy

cercanos a los límites máximos permisibles de DQO (200 mg/l) que establece la norma mexicana, en lo que a DQO se refiere.

- Como se sabe, los vertidos del proceso de teñido y acabado de hilos de una planta textil es variable en su caudal y en su composición fisicoquímica. Por este motivo, se consideró dentro del diseño del proceso un tanque de almacenamiento que regule las cargas horarias y a partir de ello, estimar los volúmenes y áreas necesarios del proceso para las etapas de neutralización, coagulación, floculación y sedimentación.
- Para un caudal de 24,2 m³/d de efluente textil se han estimado las dimensiones de los equipos de proceso, así como los costos que demandaría la instalación de una planta.
- La evaluación económica, para tratar un promedio de 24,2 m³/día del efluente textil, determinó un costo de tratamiento de \$ 13,35/m³ para el final del primer año y \$ 3,03/m³ al final del segundo año.
- Finalmente consideramos que las investigaciones realizadas confirman la factibilidad del proceso de tratamiento físico químico (coagulación – floculación – sedimentación) de un efluente textil, producto que se puede reutilizar en el proceso textil y/o en el riego de áreas verdes de parque y jardines.

XII. BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- Aguilar, M. S. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales COAGULACION-FLOCULACION*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Alley, E. R. (2007). *Water Quality Control Handbook* (Segunda ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- Arbolera, V. J. (1981). *Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua* (Segunda ed.). Lima, Peru: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria - CEPIS.
- Christie, R. M. (2007). *Environmental aspect of textile dyeing*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- Colotta, G. S. (2003). Tratamiento Físico-Químico de Aguas Residuales de La Industria Textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 5(2), 73-80.
- Frayne, C. (1999). *Cooling Water Treatment: Principles and Practice*. New York, USA: Chemical Publishing.
- Gray, N. F. (2010). *Water Technology: An Introduction for Environmental Scientists and Engineers* (Tercera ed.). Londres, Reino Unido: Elsevier.
- Harrison, R. M. (2003). *El medio ambiente, introducción a la química medioambiental y a la contaminación*. Zaragoza, España: Acribia.
- Hauser, P. J. (2011). *Advance in Theatring Textile Effluent*. Rijeka, Croatia: Intech.
- Kurita. (1999). *Kurita Handbook of Water Treatment* (Segunda ed.). Tokio, Japon: Kurita.
- Mackenzie, L. D. (2010). *Water and Wastewater Engineering, Design Principle and Practice*. New York: McGraw-Hill.
- McCabe, W. L. (2002). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Sexta ed.). Mexico DF: McGraw-Hill.

- Metcalf & Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización* (Tercera ed., Vol. I). Madrid, España: McGraw-Hill.
- Perry, R. H. (1992). *Manual del Ingeniero Químico* (Sexta ed.). New York: McGrawHill.
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. (Segunda ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A.
- Sanchez, J. C. (1966). *Introducción al blanqueo de materia textil* (Primera ed.). Barcelona.
- Slater, K. (2003). *Environmental Impact of Textiles: Production, Processes and Protection*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited.
- Ulrich, G. D. (1992). *Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Vargas, L. d. (2006). *Tratamiento de Agua para el Consumo Humano* (Vol. II). Lima, Peru: CEPIS.
- Yayon, F. V. (1984). *Tratamiento de aguas industriales*. Lima: Kavi Editores.

INTERNET

- Fundación ICA. (2003). *Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de Aguas Residuales*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2012, de Cribado o rejillas:
http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca_virtual/doc003/
- Highbeam Business. (1 de Octubre de 2012). *Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI)*. Recuperado el 14 de Abril de 2013, de
<http://business.highbeam.com/408261/article-1G1-306862157/chemical-engineering-plant-cost-index>
- Instituto Nacional de Ecología. (2005). *NORMA oficial mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil*. Recuperado el 4 de Julio de 2012, de

- <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/215/cca14.html>
Miliarium.com Ingeniería Civil y Medio Ambiente. (2004). *Desbaste, Proceso de desbaste en la depuración de aguas residuales*. Recuperado el 12 de Octubre de 2012, de
<http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Aguas/Desbaste.htm>
- Miliarium.com: ingeniería Civil y Medio Ambiente. (2008). *Cálculo de pérdidas de carga en tuberías*. Recuperado el 13 de Abril de 2013, de
<http://www.miliarium.com/Prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.asp>
- Ntuli, F. (2009). *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. Recuperado el 5 de 25 de 2012, de Characterization of Effluent from Textile Wet Finishing Operations:
http://www.iaeng.org/publication/WCECS2009/WCECS2009_pp69-74.pdf
- Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. (2010). *Acueductos y Alcantarillados*. Recuperado el 21 de Enero de 2013, de Decantación:
[http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas\(b\)_continuacion2.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas(b)_continuacion2.htm)
- Xitao Polymer Co., Ltd. (2012). *Water-soluble polyacrylamide flocculant powder*. Recuperado el Agosto de 2012, de
http://xitao.en.alibaba.com/product/340731293-200858430/Water_soluble_polyacrylamide_flocculant_powder.html