

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

**“PROPUESTA DE RECUPERACION DEL AGUA RESIDUAL  
PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TEXTIL”**

PRESENTADO POR:

**RENÉ ADEMIR BOLAÑOS AVALOS**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO QUIMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2010.



**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR

:

**MSC. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO

:

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO

:

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**

DIRECTOR

:

**ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:  
**INGENIERO QUIMICO**

Título

:

**“PROPUESTA DE RECUPERACIÓN DEL AGUA RESIDUAL  
PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TEXTIL”**

Presentado por

:

**RENÉ ADEMIR BOLAÑOS AVALOS**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director

:

**ING. y MTI. MIGUEL FRANCISCO ARÉVALO MARTÍNEZ**

San Salvador, Mayo de 2010.



Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**ING. y MTI. MIGUEL FRANCISCO ARÉVALO MARTÍNEZ**





## AGRADECIMIENTOS

A la empresa tipo, por haberme brindado la oportunidad de trabajar durante estos tres años como Jefe de la **Planta de Tratamientos de Aguas Residuales (PTAR)**; además de brindarme su confianza para ejercer mis funciones como encargado del control de calidad de químicos, colorantes, suministro y tratamiento de aguas. Así como también, por permitirme la oportunidad de realizar el presente trabajo de graduación en sus instalaciones, esperando que su contenido sea de gran beneficio para mantener nuestros objetivos de calidad y sigamos buscando la forma de ser más amigables con nuestro medio ambiente.

A la **Escuela de Ingeniería Química (EIQ)**, en especial a todos sus **docentes** por el apoyo brindado hacia mi persona, por la excelente calidad de personas y la excelente calidad de enseñanza que los caracterizan en todos los niveles.

Docente director de la EIQ **Ing. y MTi. Miguel Francisco Arévalo Martínez** por todo su apoyo, tiempo, observaciones y sugerencias realizadas en el presente trabajo de graduación. Con su ayuda este proyecto adquirió un mayor peso en el desarrollo de todos sus contenidos.

Al personal de la PTAR por su apoyo en la elaboración de las estructuras metálicas y su disponibilidad en las pruebas de recuperación de agua las cuales se llevaron a cabo en horas de descanso.

**“Una persona no vale por sus éxitos, si no de las veces que se ha levantado de sus fracasos”**

## DEDICATORIA

A **Dios** por su infinita sabiduría y toda su gracia derramada sobre mi persona al cual le dedico todo el esfuerzo depositado en este proyecto, esperando siempre contar con su guía ante las adversidades que se presenten en nuestro camino, con su ayuda podemos superar todas las pruebas marcadas en nuestro destino.

A mi **mamá** María Imelda Avalos que con mucho esfuerzo y sacrificio me ayudó a culminar mi carrera profesional; para defenderme en la vida como un hombre honrado y de buenos principios. A mi **familia** Ovidio Elvir, Carlos Alberto, Paula Avalos, Carmen Meléndez, Marta Alicia, María Elena, Nevaeh Avalos, Charlene, Jessica Mayerlín, Julio César, Erick Ernesto, José Ernesto, Oscar Carpio, Mathew, Andrés, Christopher, Luis Enrique, Brian, José Alfredo, Montana; por todo su apoyo que reciban muchas bendiciones para ellos y sus seres queridos.

Al pueblo **salvadoreño** a pesar de los momentos de crisis, pobreza e incertidumbres; nunca se da por vencido; esperando que un día en El Salvador reine la paz y la justicia.

**“Hay dos formas de ver la vida: una es creer que no existen milagros, la otra es creer que todo es un milagro.”**

**Albert Einstein.**



## INDICE GENERAL

## INTRODUCCIÓN i

### 1 PRODUCCION MÁS LIMPIA APLICADA A LOS PROCESOS TEXTILES, TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DEL AGUA 1

#### 1.1 GENERALIDADES Y CONCEPTOS BASICOS DE LA INDUSTRIA TEXTIL 2

- 1.1.1 Fibras textiles 2
- 1.1.2 Propiedades de las fibras textiles 3
  - 1.1.2.1 Propiedades de las fibras vegetales 3
  - 1.1.2.2 Propiedades de las fibras químicas 3
- 1.1.3 Flujo de procesos de las fibras textiles 4
  - 1.1.3.1 Hilatura 4
  - 1.1.3.2 Tejido 6
- 1.1.4 Concepto y teoría del color 8
  - 1.1.4.1 Fotometría 9
  - 1.1.4.2 Colorimetría textil 9
- 1.1.5 Productos químicos y auxiliares utilizados en la industria textil 11
- 1.1.6 Colorantes 12
  - 1.1.6.1 Colorantes para fibras celulósicas 12
  - 1.1.6.2 Colorantes para poliamida, lana y seda 13
  - 1.1.6.3 Colorantes para poliéster 13

#### 1.2 PRETRATAMIENTO 13

- 1.2.1 Proceso de chamuscado 14
- 1.2.2 Desengomado 15
- 1.2.3 Descrude y Blanqueo 15
  - 1.2.3.1 Productos químicos utilizados para el descrude y blanqueo 16
  - 1.2.3.2 Descrude y preblanqueo de fibras de algodón 17
  - 1.2.3.3 Descrude y blanqueo de fibras sintéticas 18
- 1.2.4 Termofijado 20

#### 1.3 ASPECTOS GENERALES Y CONCEPTO DE TINTURA 20

- 1.3.1 Consumo y características del agua requerida en el proceso de tintura 21
- 1.3.2 Procesos de tintura 23
- 1.3.3 Tintura de fibras celulósicas con colorantes directos 26
- 1.3.4 Tintura de fibras celulósicas con colorantes reactivos 27
- 1.3.5 Tintura de poliéster 29

#### 1.4 ACABADO 30

#### 1.5 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL 32

- 1.5.1 Características de tipo físicas 32
- 1.5.2 Características de tipo químicas 34
- 1.5.3 Características de tipo biológicas 35

#### 1.6 PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL 35

1.7 PROCESOS DE TRATAMIENTO PRELIMINAR	36
1.7.1 Cribado	37
1.8 CLARIFICACIÓN	37
1.8.1 Teoría de la sedimentación	37
1.8.2 Tipos de tanques de sedimentación	40
1.8.3 Flotación	40
1.9 COAGULACIÓN	41
1.10 OXIDACIÓN BIOLÓGICA AEROBIA	44
1.10.1 Tipos de plantas de oxidación aerobia	44
1.10.2 Filtro percolador	45
1.10.3 Lodos activados	46
1.10.4 Lagunas de oxidación	48
1.11 OXIDACIÓN BIOLÓGICA ANAEROBIA	49
1.11.1 Aplicaciones de la digestión	50
1.11.2 Operación de los digestores	50
1.12 TRATAMIENTO QUÍMICO	51
1.12.1 Precipitación química	51
1.12.2 Intercambio iónico	54
1.12.3 Adsorción	56
1.13 DESHIDRATACIÓN Y ELIMINACION DE LODOS	57
1.13.1 Principios de la deshidratación	58
1.13.2 Acondicionamiento de lodos	58
1.13.3 Deshidratación de lodos	60
1.13.4 Eliminación de lodos	62
1.14 DESINFECCION	63
1.14.1 Cloro	64
1.14.2 Ozono	65
1.14.3 Radiación ultravioleta	66
1.15 TRATAMIENTO Terciario y Recuperación de Agua	66
1.15.1 Tratamiento terciario	67
1.15.2 Recuperación de agua	70
1.16 PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA	72
1.16.1 Ventajas e inconvenientes ambientales de las tecnologías utilizadas en la Industria textil	73
1.16.2 Beneficios de la Producción Más Limpia dentro de la industria textil	74
1.16.3 Alcances al implementar un Programa de Producción Más Limpia dentro de la industria textil	75

1.16.4	Tecnologías Más Limpias de tratamiento	76
2	DETERMINACIONES PRELIMINARES PARA LA CONSTRUCCION Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE AGUA RESIDUAL	79
2.1	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TEXTIL	80
2.1.1	Análisis fisicoquímico del agua residual	80
2.1.2	Análisis de metales a la entrada del proceso de tintura	81
2.2	DESCRIPCION DE LA PTAR (PLANTA MODELO)	82
2.2.1	Cisterna de homogenización	82
2.2.2	Sistema de flotación C.A.F.	83
2.2.3	Tanque de aireación	83
2.2.4	Decantador secundario	84
2.2.5	Secado en prensa desaguadora	84
2.3	DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE PRODUCTOS QUÍMICOS EN EL TRATAMIENTO PREVIO A LA RECUPERACIÓN	85
2.3.1	Procedimiento de prueba de jarras	85
2.3.2	Resultados obtenidos en ensayo de prueba de jarras	86
2.4	SISTEMA ALTERNATIVO PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO EXISTENTE	94
2.4.1	Sistema de flotación D.A.F.	94
2.4.2	Características de las aguas tratadas por el sistema D.A.F.	96
2.4.3	Tratamiento biológico con Kaldnes	97
2.4.4	Línea Líquido residual	98
2.4.4.1	Cribado	98
2.4.4.2	Acumulación, homogenización	99
2.4.4.3	Neutralización	99
2.4.4.4	Dosificación de sales nutritivas	100
2.4.4.5	Oxidación biológica	100
2.4.4.6	Oxidación biológica MBBR (MOVING BED BIOFILM REACTOR) con Kaldnes	102
2.4.4.7	Sedimentación	103
2.4.5	Línea de fangos	105
2.4.5.1	Recirculación y extracción de los fangos	105
2.4.5.2	Almacenaje y espesamiento	105
2.4.5.3	Características de las aguas a tratar por el proceso biológico	107

2.4.5.4 Características de las aguas tratadas por el proceso biológico	107
2.4.5.5 Nastro prensa	109
2.5 SISTEMA DE FILTRACIÓN SOBRE CUARZO	110
2.6 SISTEMA DE RECUPERACIÓN CON RESINA	111
2.6.1 Intercambiadores de iones	111
2.6.2 Características de los intercambiadores aniónicos débiles	112
2.7 DISEÑO DEL SISTEMA DE FILTRACION E INTERCAMBIO IONICO A ESCALA DE LABORATORIO	113
2.7.1 Manejo del sistema de recuperación de agua a escala de laboratorio	116
2.8 APLICACIONES, ELIMINACION DEL COLOR	118
2.9 FACTORES QUE DETERMINAN EL CICLO DE TRABAJO Y CALIDAD DEL AGUA TRATADA	119
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA RESIDUAL	122
3.1 DESARROLLO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO A ESCALA DE LABORATORIO	123
3.2 TERMINOS ESTADISTICOS DE IMPORTANCIA	123
3.2.1 Prueba z con muchas muestras	128
3.2.2 Método de mínimos cuadrados	129
3.2.3 Cálculo de los coeficientes de regresión por el método de mínimos cuadrados	129
3.3 DATOS PREVIOS A LA PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE AGUA	130
3.4 PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO DE RECUPERACIÓN	134
3.5 OBTENCION DE DATOS EXPERIMENTALES	137
3.6 ANÁLISIS ESTADISTICO DE LOS DATOS	142
3.6.1 Cálculo de los coeficientes de regresión por el método de mínimos cuadrados	143
3.6.2 Cálculo de la desviación estándar para el intervalo de color en estudio	149
3.6.3 NSO 13.49.01:06 "Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor"	150
3.6.4 Resultados obtenidos en laboratorio acreditado	151
3.6.5 Prueba de hipótesis	152
3.7 ETAPAS DEL PROCESO EN LAS QUE SE PUEDE UTILIZAR EL AGUA	



PRODUCCION MÁS LIMPIA APLICADA A LOS PROCESOS TEXTILES, TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DEL AGUA.

RECUPERADA 155

CONCLUSIONES 156

RECOMENDACIONES	158
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	159
ANEXOS.....	160
A. EQUIPO PARA TRATAMIENTO PRELIMINAR	161
Anexo A .1	
Criba con rejilla de tambor	161
Anexo A. 2	
Criba con rejilla de banda	161
B. ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	162
Anexo B.1	
Regiones del espectro visible	162
C. ANALISIS REALIZADO POR LABORATORIO ACREDITADO	163
Anexo C.1	
Resultado de análisis químicos	163
D. ANALISIS DE ABSORBANCIAS PARA EL AGUA DE PROCESO DE TINTORERIA	164
Anexo D.1	
Absorbancia para el agua de teñido	164
E. NIVELES DE CONFIANZA CON DIVERSOS VALORES DE Z	164
Anexo E.1	
Valores para $Z_{\text{Crítico}}$	164
F. PRUEBA DE TEÑIDO EN FIBRA SINTETICA CON AGUA RECUPERADA	165
Anexo F.1	
Cantidades utilizadas en la tintura de poliéster	165
Anexo F.2	
Lectura de pasa falla, poliéster	166
G. PRUEBA DE TEÑIDO EN FIBRA ALGODON CON AGUA RECUPERADA	167
Anexo G.1	
Cantidades utilizadas en la tintura de algodón	167
Anexo G.2	
Lectura de pasa falla, algodón	168

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Composición química del algodón	2
Tabla 1.2	Iluminantes utilizadas en la industria textil	9
Tabla 1.3	Consumo anual de agua con una producción entre 20,000 y 30,000 kilos de tela teñida	22
Tabla 1.4	Parámetros límites del agua para el proceso de tintura	23
Tabla 1.5	Componentes de una tintura con colorantes directos	27
Tabla 1.6	Componentes de una tintura con colorantes reactivos	28
Tabla 1.7	Componentes de una tintura con colorantes dispersos	30
Tabla 2.1	Historial de resultados obtenidos a la salida de la PTAR.	80
Tabla 2.2	Análisis de metales del agua proveniente de pozo	81
Tabla 2.3	Valores promedios de parámetros proveniente de la industria textil	82
Tabla 2.4	Especificaciones técnicas del equipo de aireación	83
Tabla 2.5	Especificaciones técnicas del decantador secundario	84
Tabla 2.6	Cuadro resumen resultado de los diferentes ensayos	89
Tabla 2.7	Dosificación de los diferentes polímeros con sulfato de aluminio	90
Tabla 2.8	Valores iniciales de pH y color	91
Tabla 2.9	Resultados de turbidez y color con Cat Floc	92
Tabla 2.10	Resultados de turbidez y color con Centerfloc	93
Tabla 2.11	Resultados de turbidez y color con mezcla Cat Floc-Centerfloc	93
Tabla 2.12	Características del equipo de flotación D.A.F.	96
Tabla 2.13	Valores promedios alcanzados por el sistema D.A.F.	96
Tabla 2.14	Características del sistema biológico con Kaldnes	106
Tabla 2.15	Valores promedios de parámetros a tratar de la industria textil	107
Tabla 2.16	Valores promedios de parámetros proveniente de la industria textil	108
Tabla 2.17	Operación de filtración	116
Tabla 2.18	Operación de intercambio iónico	117
Tabla 2.19	Operación de filtrado e intercambio iónico	117
Tabla 2.20	Operación de retrolavado de filtro	117
Tabla 2.21	Operación de regeneración de resina	118
Tabla 3.1	Análisis de muestras tomadas en una semana a la entrada de la PTAR	131
Tabla 3.2	Análisis de muestras tomadas en una semana a la salida de la PTAR	133
Tabla 3.3	Datos de absorbancias y sólidos suspendidos para 30 muestras	139
Tabla 3.4	Datos de color y absorbancia	140
Tabla 3.5	Datos de absorbancias obtenidos del equipo de recuperación de agua	141
Tabla 3.6	Datos de sólidos suspendidos obtenidos del equipo de recuperación de agua	142
Tabla 3.7	Método de mínimos cuadrados, determinación de color aparente	144
Tabla 3.8	Resultados de color obtenidos con la ecuación 3.18 para el rango de longitud de ondas entre 610-700 nm	146
Tabla 3.9	Resultados de color obtenidos con la ecuación 3.16 para el rango de longitud de ondas entre 610-700 nm	147

Tabla 3.10	Cuadro comparativo de los resultados del experimento	148	
Tabla 3.11	Datos para el cálculo de la desviación estándar de la muestra	149	
Tabla 3.12	Parámetros para la industria textil NSO 13.49.01:06	150	
Tabla 3.13	Resultados a la salida del sistema de recuperación de residual	151	agua

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de flujo del proceso de hilandería	6
Figura 1.2 Esquema del proceso de tejido plano	7
Figura 1.3 Etapas del proceso de tejido de punto	8
Figura 1.4 Representación de la Ley de Beer	10
Figura 1.5 Incidencia de la llama en la etapa de chamuscado	14
Figura 1.6 Diagrama de flujo del proceso de tintura	21
Figura 1.7 Gráfico de un proceso de tintura por agotamiento	24
Figura 2.1 Muestras de agua residual a la entrada de la PTAR	86
Figura 2.2 Dosificación de Cat Flocc 8108 en 200, 300, 400 y 500 ppm	87
Figura 2.3 Dosificación de Cat Flocc 8108 en 450 y 600 ppm	87
Figura 2.4 Dosificación de Centerfloc en 700 ppm (a la izquierda)	88
Figura 2.5 Dosificación de sulfato de aluminio en 600 ppm	88
Figura 2.6 Mezclas de polímeros con sulfato de aluminio	90
Figura 2.7 Muestras de agua residual a la entrada de la PTAR	91
Figura 2.8 Dosificación de Cat Flocc en 200, 300, 400 y 500 ppm	91
Figura 2.9 Dosificación de Centerfloc en 300, 500, 700 y 900 ppm	92
Figura 2.10 Equipo de flotación D.A.F.	95
Figura 2.11 Reactor biológico con Kaldnes	103
Figura 2.12 Cuerpos de polietileno del reactor biológico Kaldnes	103
Figura 2.13 Instalación de paquetes lamelares en los clarificadores	104
Figura 2.14 Equipo para deshidratación de lodos.	109
Figura 2.15 Esquema general del sistema de recuperación de agua	113
Figura 2.16 Vista frontal del tanque	114
Figura 2.17 Rejilla para la retención del lecho en los tanques	114
Figura 2.18 Accesorios de PVC	115
Figura 2.19 Válvulas de control	115
Figura 2.20 Material de relleno	116
Figura 3.1 Muestras de agua residual a la entrada y salida de la PTAR	131
Figura 3.2 Curvas de absorbancia a la entrada de la PTAR	132
Figura 3.3 Curvas de absorbancia a la salida de la PTAR	133
Figura 3.4 Equipo de recuperación de agua residual	134
Figura 3.5 Medida de caudal, a la salida del sistema de recuperación de agua	135
Figura 3.6 Muestras a la entrada y salida del sistema de recuperación de agua	135
Figura 3.7 Equipo de filtración después de la prueba de recuperación	136
Figura 3.8 Equipo de intercambio iónico después de la prueba de recuperación	137
Figura 3.9 Entrada y salida de la etapa de filtración, salida del intercambiador	138
Figura 3.10 Toma de treinta muestras para el análisis de absorbancias y color	138
Figura 3.11 Gráficas obtenidas de la recuperación de agua en cada etapa	141
Figura 3.12 Tendencias del color obtenido en base al experimento	148



## INTRODUCCIÓN

La industria textil está conformada por una gran variedad de procesos los cuales se pueden analizar de forma individual, con ésta idea podemos visualizar sus diferentes fortalezas y debilidades; el presente trabajo de graduación pretende destacar todas las áreas que son susceptibles a posibles cambios que nos ayuden a mejorar el proceso productivo. Aplicando el concepto de tecnología más limpia como una herramienta de mejora continua, estaremos mitigando la generación de desperdicios y residuos (efluentes, emisiones, desechos sólidos etc.).

La generación de desperdicios contribuye a incrementar la carga de contaminantes que a la larga generan un grave impacto en el medio ambiente y encarecen el proceso productivo. Es por ello que debemos eliminarlos o disminuirlos desde su fuente.

Uno de los principales insumos del proceso textil es el agua, su demanda no es directamente proporcional a la cantidad de producto terminado, debido a la gran cantidad de reproceso que se genera en la elaboración del producto terminado; esto implica un mayor consumo de energía, productos químicos y tiempo.

La Producción más Limpia es una forma de mitigación de todos los contaminantes que desembocan a nuestro medio y a la vez es una forma de ahorro en todos los sentidos en cualquier proceso productivo.

En la actualidad la prevención de la contaminación del agua es posible si se definen técnicas apropiadas para su tratamiento con la debida disposición de todas las aguas residuales. Sin embargo estos esfuerzos se tornan en vano si no se cuenta con los recursos financieros por parte de la empresa privada y el Estado, ya que un proceso de recuperación de agua residual para una planta de tratamiento con capacidad de 2000 m<sup>3</sup>/día tendría un costo aproximado de un millón y medio de dólares, el ahorro es significativo si tomamos como base que el metro cúbico de agua suministrada por la red de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) tiene un costo de 90 centavos de dólar, suponiendo que recuperamos un 30% del agua al año tendremos un ahorro de \$194,400 y la inversión del proyecto se recupera en aproximadamente 7 años y medio, reduciendo al mismo tiempo los costos y el impacto ambiental de nuestro país.

La investigación culminó con un desarrollo experimental en donde se realizó la construcción de un sistema de recuperación de aguas residuales a escala de laboratorio. Se puso en funcionamiento y se determinó su eficiencia en la remoción de diversos contaminantes esperando que los resultados sean positivos contribuyendo de está forma a disminuir el impacto que tienen las aguas residuales sobre nuestro medioambiente. Fue necesario hacer una recolección de un número determinado de muestras las cuales deben ser representativas de la población sobre la cual se pretende hacer inferencia. Nuestras variables de interés fueron la reducción de los parámetros fisicoquímicos de la DQO y Color.

Debemos asegurar que el muestreo sea lo más representativo posible, es por ello que la toma de muestra se realizó de forma puntual ya que una toma de muestra del tipo compuesta implicaría la inversión de mucho tiempo en donde el equipo tendría que entrar en operaciones de retrolavado y regeneración lo cual podría afectar los valores de los parámetros de interés de análisis. La importancia del manejo de métodos instrumentales es de vital

importancia para la reproducción de datos exactos en el laboratorio.

Se llevó a cabo la prueba de hipótesis con un nivel de confianza del 95%, en donde se comprobó que con valores por abajo de 200 unidades de Pt-Co de color aparente si es posible recuperar agua en condiciones adecuadas para ser utilizada en el proceso de tintura; además se especificaran otras etapas donde podría ser empleada.





# 1

## **PRODUCCION MÁS LIMPIA APLICADA A LOS PROCESOS TEXTILES, TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DEL AGUA**



## 1. GENERALIDADES Y CONCEPTOS BASICOS DE LA INDUSTRIA TEXTIL

El sector textil abarca una gran variedad de procesos de gran complejidad, tanto que se encuentra en constante evolución por ser uno de los sectores más dinámicos dentro de las industrias a nivel mundial.

### 1. Fibras textiles

Cuando hablamos de fibras textiles nos referimos a cualquier tipo de material, el cual puede ser transformado en un sustrato textil (hilo, tejido de punto ó plano), estas fibras se pueden clasificar como naturales o químicas, las primeras se encuentran en animales, vegetales, minerales y las químicas son producidas por el hombre.

La fibra que se consume en mayor cantidad en la industria textil es el algodón que es de origen natural y sus características varían según su tiempo de cosecha, si colectamos estas fibras antes de su periodo de maduración pueden presentar muchas torsiones debido a su lumen muy pronunciado, caso contrario cuando estas se encuentran en su etapa de maduración las fibras presentan menos torsiones debido a que su lumen es muy reducido. Otros ejemplos de fibras naturales de origen vegetal son: lino, cáñamo, yute, sisal, abacá, coco, etc.

Tabla 1.1 Composición química del algodón

Porcentaje	Composición	Macro y micronutrientes
94 %	Celulosa	Nitrógeno, hierro, potasio, calcio, magnesio, azufre, manganeso, cobre, cinc, molibdeno
2.2 %	Proteínas u otras sustancias pépticas	
1.7 %	Ceras, ácidos y azúcares	
1.2%	Cenizas	
0.9 %	No calculados	

Fuente: Ennoblecimiento textil en la práctica (2008).

Las fibras naturales de origen animal se obtienen de su pelaje como la lana de la oveja, alpaca, llama, caballo, etc. ó pueden ser producidas por medio de sus glándulas como la seda de la oruga.

Las fibras químicas son el resultado de un proceso industrial y son conocidas como fibras artificiales o sintéticas; algunas de ellas son la poliamida (nylon), poliéster (tergal), acrílico (crylor), elastán (lycra). Por lo general en la industria textil este tipo de fibras son combinadas con las fibras naturales para formar mezclas adquiriendo las características de ambos materiales.

## **2. Propiedades de las fibras textiles**

### **1. Propiedades de las fibras vegetales**

1. Fibra polar de carga negativa.
2. Presenta una alta absorción a la humedad.
3. Presentan alta resistencia a la tensión y la abrasión.
4. Tienen baja resistencia a los ácidos fuertes como el ácido sulfúrico especialmente cuando está caliente.
5. Se tornan amarillas a altas temperaturas.
6. Presentan buena resistencia al álcali.

### **2. Propiedades de las fibras químicas**

1. Fibras sin carga eléctrica (apolar).
2. Resistencia a la tensión y abrasión.
3. Baja absorción a la humedad.
4. Alta resistencia al calor, funde a 250 °C.
5. No se arruga.
6. Alta resistencia a la luz, a las bacterias y ácidos.
7. Alta resistencia a la termofijación y texturización.
8. Su tintura es con colorantes dispersos.

## **3. Flujo de procesos de las fibras textiles**

Por lo general la materia prima, ya sean estas fibras naturales ó químicas vienen en pacas y pueden estar en forma continua ó discontinua; las fibras se tuercen entre si alcanzando una gran longitud formando lo que comúnmente conocemos como hilos, los cuales pueden destinarse para la fabricación de tejido de punto o plano. Los hilos tienen su propia identidad y se pueden caracterizar en base a las siguientes propiedades: composición, diámetro, índice de torsión, resistencia, regularidad (variaciones en el diámetro que experimenta a lo largo de su extensión), alargamiento, acabado y aspecto.

### **1. Hilatura**

En la hilatura mecánica se trabaja con fibras cortas y es la etapa dentro del proceso industrial textil donde las fibras adquieren su nuevo carácter como hilo, la hilatura está conformada por las siguientes fases:

- a) Desempacado: la materia prima viene en forma de pacas las cuales son transportadas por montacargas hasta la zona de apertura de fibras en donde se inicia la disgregación y limpieza de la misma, eliminando las impurezas que está pueda traer por medio de sistemas neumáticos a alta velocidad.
- b) Cardado: es un proceso de disgregación posterior en donde las fibras quedan tan

sueltas hasta el punto que pueden recuperar su forma natural en donde las fibras están próximas entre sí. En esta etapa la fibra se encuentra relativamente limpia y con las condiciones físicas adecuadas para entrar al proceso de hilado, el hilo cardado es el más común, de menor costo y por ende de menor calidad.

- b.1) Mechado: se adelgaza el conglomerado de fibras por medio de dos rodillos enderezando las fibras parcialmente, formando una trama a la cual se le llama mecha ó cinta.
- b.2) Estirado: al salir del mechado pasa nuevamente por otros rodillos que operan a mayor velocidad obligando a que la mecha adelgace más y adquiera una mejor homogeneidad.
- c) Peinado: la cinta cardada es ordenada y orientada en una dirección dejándola de forma paralela. Este proceso es conveniente cuando las fibras son más largas ya que presentan mayor resistencia, los hilos peinados se caracterizan por ser más limpios y de mayor calidad debido a que pasan por un peinador.
- d) Trenzado o primera torsión: este proceso se lleva a cabo en máquinas llamadas mecheras y consiste en entrelazar las fibras para alcanzar una mayor cohesión entre ellas reduciendo su volumen, incrementando su suavidad debido a que hay menos fibras sueltas y además aumenta su tenacidad.
- e) Hilatura (para hilos de un cabo): es la operación donde pasa de ser un simple hilo a un hilado de fibras discontinuas donde se adquiere un mayor estiramiento y torsión.
- f) Acabado: se lleva a cabo la retorsión, cuando se trata de hilos de varios cabos.
- g) Enconado: los hilos son devanados en bobinas en forma de conos.
- h) Texturizado: operación mecánica que se da a los hilos de filamento continuo, destinado a modificar su estructura y obtener un aspecto rizado. Se emplean principalmente en estos hilos las fibras sintéticas de poliéster (PES), poliamida (PA), fibras artificiales de acetato (CA), y triacetato (CT).

En la figura 1.1 se describe de forma esquemática el proceso de las hilanderías.

Figura 1.1 Diagrama de flujo del proceso de hilandería

Fuente: Construcción propia, marzo (2009).

## **2. Tejido**

Cuando ya tenemos clasificada la producción de hilos en sus respectivos lotes y especificadas sus propiedades es hora de conformar los tejidos; estos se pueden catalogar en dos grandes grupos ó clases:

a) Tejido Plano: son producidos en telares y se encuentran constituidos por trama y urdimbre, los hilos de trama son aquellos que están a lo ancho del tejido y los hilos de urdimbre son aquellos que están a lo largo del tejido como se puede observar en la figura 1.2. Son empleados en el revestimiento de muebles, jeans, ropas sociales, cortinas etc.

Figura 1.2 Esquema del proceso de tejido plano  
Fuente: Construcción propia, marzo (2009).

- i. La primera etapa consiste en la preparación del rodillo de urdimbre en el urdidor.
  - ii. Luego los rollos de urdimbre son engomados para incrementar la resistencia de los hilos y puedan soportar la tracción que se da en el telar.
  - iii. En las enconadoras los hilos son preparados para la inserción de la trama en el telar.
  - iv. El telar es donde se ensambla el tejido plano donde serán usados los hilos ya engomados en el sentido de la largura del tejido (urdimbre) y los hilos que estarán en el sentido de la anchura del tejido (trama).
- b) Tejido de Punto: los artículos de tejido de punto son cada vez más utilizados debido a que proporcionan un gran confort al usuario debido a su elasticidad. Son empleados en ropas informales, prendas deportivas, ropa interior y de baño.

A diferencia de los tejidos planos, los artículos de tejido de punto no tienen urdimbre y trama, siendo producidos por lazadas mediante agujas y estas pueden ser distintas de acuerdo con la puesta a punto de las máquinas. En la figura 1.3 se da un breve esquema de las etapas del procesamiento del tejido de punto tubular.

Figura 1.3 Etapas del proceso de tejido de punto  
Fuente: construcción propia, marzo (2009).

El tejido de punto puede ser abierto ó tubular y se producen en máquinas rectilíneas y circulares respectivamente. En estas máquinas se aplica aceite para evitar la fricción entre el hilo y el metal.

#### 4. Concepto y teoría del color

La sensación "color" es el producto conceptual elaborado por nuestro cerebro a partir de los datos emitidos por el ojo que ve un objeto iluminado, un objeto sobre el cual incide la energía que llamamos luz. Entonces para ver un objeto colorido es necesario contar con los siguientes elementos:

- a. Fuente de luz.
- b. Objeto observado.
- c. Observador (vista humana).
- d. Observador (cerebro).

La luz que incide sobre el objeto se denomina luz blanca o visible, que en realidad está compuesta por diversas longitudes de onda como se puede apreciar en un arco iris. El color de un objeto varía de acuerdo al cambio de la fuente de luz.

#### 1. Fotometría

Es el estudio de las diferentes fuentes luminosas ligada a las frecuencias que capta el receptor. Dentro de la industria textil se hace uso de diferentes iluminantes para verificar los tonos de los colores y la Comisión Internacional de la Energía (CIE) recomienda el uso de las siguientes iluminantes que se muestran en la tabla 1.2. En donde la letra D representa la luz del día, la letra A se refiere a la luz incandescente y la letra F es asignada a la luz fluorescente.

Tabla 1.2 Iluminantes utilizadas en la industria textil

Patrones	Referencia
D50, D55, D65	Para la determinación del color
D65, A	Para la determinación del índice de metamerismo
F2, F7, F11	Para luces fluorescentes

Fuente: *Wyszecki, Günter. Stiles, W. S. (1982).*

#### 2. Colorimetría textil

La colorimetría en la industria textil consiste en medir las diferencias entre el color de una muestra (color a reproducir según las exigencias de los clientes) y el color duplicado. La cuantificación del color en una solución tintórea se lleva a cabo aplicando



la Ley de Beer, según la cual un rayo de luz monocromática al pasar por una solución coloreada pierde intensidad según el grado de concentración de la sustancia absorbente que en ella existe. En la solución tintórea, esa sustancia absorbente es el colorante, y este fenómeno es aprovechado para determinar cuantitativamente la concentración de ese colorante, comparándola con un patrón de color preexistente. La apreciación de esas diferencias, en la práctica de la tintura, debe ser llevada a cabo de forma rápida y precisa utilizando los aparatos llamados colorímetros.

La medida de color por medio del colorímetro consiste en producir, mediante un filtro, un rayo de luz monocromática que se hace incidir sobre una cubeta calibrada en la que se ha depositado la solución tintórea. El rayo de luz, después de atravesar la cubeta es recogido por una célula fotoeléctrica (en el colorímetro), que convierte su intensidad luminosa en intensidad eléctrica y que se mide en el galvanómetro de alta sensibilidad que el colorímetro posee; la lectura de esa intensidad eléctrica sobre una escala que traduce los valores eléctricos, cuantificándolos en valores cromáticos. La tecnología digital y la informática ofrecen la solución óptima para la colorimetría textil, ofreciendo medidas mucho más completas, más precisas y con mayor rapidez.

Figura 1.4 Representación de la Ley de Beer  
Fuente: Tecnología de la confección textil (1997).



Ecuación (1.1)

Donde:



: Absorbancia de la luz al atravesar la cubeta.



: Intensidad de la luz que entra a la cubeta de líquidos.



: Intensidad de la luz después de atravesar la cubeta de líquidos.

*l*: Es la medida longitudinal que la luz recorre dentro de la cubeta.

## 5. Productos químicos y auxiliares utilizados en la industria textil

En la industria textil se hace uso de muchos productos químicos como lo son: ácidos, álcalis, sales, oxidantes y reductores. Es importante tener una idea de cuanto es la cantidad de contaminantes que irán a parar en las aguas residuales para establecer un balance de masa entre las entradas y salidas del proceso.

Se utilizan ácidos fuertes como el sulfúrico y muriático y débiles como el acético y fórmico, su empleo en la mayoría de los casos es para regular el pH y en ciertas etapas del proceso en donde se requiere un carácter ácido. Los álcalis son productos opuestos a los ácidos y son utilizados en el desgrude, blanqueo y en tinturas. Los que se utilizan principalmente son la sosa cáustica (hidróxido de sodio), carbonato de sodio y el amoníaco.

Las sales son usadas principalmente en los procesos de tintura; ejemplo de ellas tenemos el sulfato de sodio, cloruro de sodio, sulfato de amonio, bicromato de potasio y el sulfato de cobre.

Los oxidantes son usados en procesos de blanqueo, tintura y estampados; ejemplo de ellos tenemos el agua oxigenada, hipoclorito de sodio, clorito de sodio y dentro de los reductores el más importante es el hidrosulfito de sodio.

Los productos auxiliares se caracterizan por tener cargas eléctricas y se clasifican según su carga en aniónicos (carga negativa), catiónicos (carga positiva) y no iónicos (sin carga eléctrica). En general no se deben mezclar productos aniónicos con catiónicos ya que estos pueden precipitar; en el caso de los no iónicos estos si pueden ser mezclados con productos catiónicos o aniónicos. Es muy importante la forma en que estos productos son disueltos, se debe respetar las especificaciones técnicas que recomiendan los proveedores.

## **6. Colorantes**

Los colorantes son sustancias que proporcionan color a los artículos textiles. La división más elemental de los colorantes es la que distingue entre colorantes naturales y artificiales; hoy en día los más utilizados en la industria textil son los artificiales por no decir que en su totalidad. Sin embargo los colorantes naturales han sido tan importantes en la historia del vestido y la ornamentación que resulta imposible ignorarlos; la Cochinilla, el Índigo, el Palo Campeche, etc. Aparte de que las características de los colorantes artificiales son superiores a la de los naturales, y su solidez ha sido tan perfeccionada que en la vestimenta la vida del color es comparable a la propia vida del tejido. Debido a que la utilización de colorantes naturales ha disminuido pondremos especial énfasis en los colorantes artificiales.

### **1. Colorantes para fibras celulósicas**

En los procesos de tintura de fibras celulósicas existen una gran variedad de colorantes que pueden ser utilizados, cada uno de ellos tienen sus propias características químicas y comportamientos en los niveles de solidez dentro los cuales podemos mencionar:

- a. Colorantes directos.
- b. Colorantes reactivos.
- c. Colorantes sulfurosos (azufre).
- d. Colorantes a tina.
- e. Colorantes azoicos.

## **2. Colorantes para poliamida, lana y seda**

Los colorantes de la poliamida son los mismos utilizados en la tintura de la lana y la seda natural y estos se pueden clasificar en:

- a. Colorantes ácidos.
- b. Colorantes metálicos 1:1.
- c. Colorantes metálicos 1:2.

## **3. Colorantes para poliéster**

Se caracterizan por tener un alto grado de dispersión conocidos comúnmente como colorantes dispersos y son empleados en la tintura del rayón, acetato y poliéster. Mientras que por otra parte las fibras acrílicas son teñidas con colorantes catiónicos.

## **2. PRETRATAMIENTO**

Esta etapa consiste en la preparación del sustrato textil crudo con la finalidad de eliminar las suciedades, aceites y grasas, revisar las imperfecciones que pueda traer el tejido, así como dobleces ó quiebres.

Los tejidos ya sean estos planos o de punto vienen en forma de rollos con un peso específico los cuales deben ser desplegados debido a que en base a su gramaje es decir sus kilogramos por metro lineal; se estipulan las cantidades de productos a utilizar en su proceso de eliminación de impurezas. Los rollos ya desplegados son colocados en carros, estos deben estar completamente limpios y secos; en la mayoría de los casos se trabajan con máquinas continuas en donde la tela debe estar circulando en su interior; es por ello que los extremos de la tela se unen por medio de costuras paralelas a su trama, de quedar torcidas o superpuestas pueden ocasionar problemas posteriores en su proceso de tintura.

### **1. Proceso de chamuscado**

Cuando la tela presenta fibrillas en la superficie es necesario someterlas a un proceso de chamuscado con el fin de eliminarlas. Obteniendo como resultado un mejor aspecto en la superficie de la tela (limpias y lisas), con menos formación de bolillas (pilling). En una chamuscadora se debe controlar lo siguiente: presión del gas, intensidad, temperatura y calidad de la llama, ángulo de incidencia y altura de la llama (ver figura 1.5).

El proceso de chamuscado se puede realizar con los tejidos de fibras celulósicas cuando estas se encuentran en crudo, pero no es recomendable hacerlo con fibras sintéticas; debido a la formación de fibras fundidas las cuales se tornan más oscuras en el proceso de tintura.

Figura 1.5 Incidencia de la llama en la etapa de chamuscado  
Fuente: Construcción propia, marzo (2009).

## 2. Desengomado

El desengomado es el proceso de eliminación de las gomas contenidas en los hilos del tejido plano. La goma debe ser removida para promover la humectación del tejido y permitir un teñido uniforme. Existen varios tipos de gomas para diferentes fibras ejemplo de ellas tenemos: almidón, acrilato, CMC (carboxi metil celulosa); cada una de ellas exige un tratamiento específico de desengomado y por eso se debe conocer exactamente el tipo de goma presente en el hilo.

El almidón es la más utilizada en el tejido de algodón y la forma de retirar este tipo de goma es por medio de a) Enzimas, b) Con sosa cáustica y agua oxigenada.

Ambos métodos se pueden hacer por reposo o por agotamiento y requieren que el tejido se someta a una íntima impregnación y reposo. Cuando se emplean enzimas se debe tener el cuidado de mantener una temperatura, pH y tiempo acorde a la sensibilidad de la enzima.

Para comprobar que la goma fue realmente removida del sustrato se pueden realizar varios tipos de pruebas de las cuales podemos hacer mención de dos de ellas:

1. En el caso de la goma de almidón, se le agrega unas gotas de solución de yodo ó yoduro de potasio y se identifica la coloración.
2. En el algodón se puede realizar una prueba denominada hidrofiliidad.

### **3. Descrude y blanqueo**

Los sustratos textiles pueden contener innumerables impurezas o suciedades que cuando no son correctamente eliminadas pueden provocar en la tintura manchas, colores menos vivos, estas impurezas pueden ser de dos tipos:

1. Las preexistentes en las fibras en crudo, como es el caso de las fibras naturales. En el algodón por ejemplo, encontramos aceites, grasas, piojos, hierro, calcio, magnesio, suciedades y pigmentos naturales.
2. Las que son agregadas al sustrato durante el proceso de hilado, engomado y tejido.

Para la eliminación de esas impurezas existen tres tipos de procesos:

- a. Descrude: se eliminan las impurezas del sustrato y se mantienen los pigmentos naturales.
- b. Preblanqueo: se asocia al proceso normal de descrude un tratamiento que elimina los piojos y el color castaño (pigmentos naturales) del algodón. Normalmente hecho para teñir colores claros y medios.
- c. Blanqueo: Nombre dado al proceso de hacer blancos.

Al desarrollar un proceso de descrude, se debe considerar la presencia de aceites de la tejeduría de punto, grasas naturales y minerales existentes en el sustrato y eventuales suciedades en el tejido.

#### **1. Productos químicos utilizados para el descrude y blanqueo**

Se utilizan diversos productos químicos dependiendo de sus características y de las impurezas que se pretenden eliminar, estos también cambian según el tipo de sustrato textil que se esté procesando es por ello que se describen a continuación; los de uso general son:

1. Detergentes: remueven aceites del sustrato en forma de emulsión y dispersa las suciedades sólidas.
2. Secuestrantes o dispersantes de dureza: eliminan los minerales presentes en el algodón y el agua como el calcio, magnesio y hierro los cuales son perjudiciales en el proceso de tintura.
3. Deslizantes: evitan que se peguen las fases del tejido permitiendo que se mueva de forma más libre evitando la fricción consigo mismo o con la máquina, además permite que la tela se acomode mejor dentro de ella.

4. Antiespumantes: elimina la espuma que se forma en el interior de la máquina ya que su exceso provoca que el tejido se enrosque y cause manchas.

## **2. Descrude y preblanqueo de fibras de algodón**

La principal preocupación en el descrude del algodón es la eliminación de grasas naturales, para ello es necesario el uso de detergentes emulsionantes, sosa cáustica y secuestrantes de dureza.

En el blanqueo o preblanqueo la sosa cáustica reacciona con el agua oxigenada y juntos blanquean el tejido eliminando su coloración natural castaña. El peróxido de hidrógeno oxida los pigmentos naturales del algodón dejándolo más claro, en esta etapa se utiliza un estabilizador de agua oxigenada el cual regula la velocidad de descomposición química del agua oxigenada en presencia de sosa cáustica lo que provoca un mejor grado de blancura.

Anteriormente en el preblanqueo se usaba hipoclorito de sodio y su aplicación se daba en frío, hoy en día este producto se ha sustituido por el peróxido de hidrógeno por cuestiones ecológicas. En ocasiones se hace uso de productos auxiliares como los blanqueadores ópticos que ayudan a incrementar el grado de blancura del sustrato blanqueado químicamente.

La secuencia de adición de productos en un proceso discontinuo es el siguiente:

1. Se añaden los productos auxiliares, inclusive el estabilizador predisuelto en el tanque de adición.
2. Colocar los productos en la máquina.
3. Añadir el agua oxigenada en el tanque de adición.
4. Colocar el agua oxigenada en la máquina.
5. Añadir la sosa cáustica predisuelta en el tanque de adición.
6. Dosificar la sosa cáustica en el tiempo determinado.

La secuencia de adición de productos en procesos continuos es el siguiente:

1. Añadir en el tanque de adición:
  - a. Agua fría hasta por lo menos 1/3 del total.
  - b. Encender el agitador.
  - c. Los productos auxiliares prediluidos.
  - d. Sosa cáustica predisuelta.
  - e. Agua oxigenada.
2. Completar el volumen con agua fría.

## **3. Descrude y blanqueo de fibras sintéticas**

Al desarrollar un proceso de descrude de fibras sintéticas, se debe considerar la presencia de aceites de enzimaje y de tejeduría de punto, eventuales suciedades del tejido y la sensibilidad de las fibras a los productos. Fibras de poliéster, poliamida y principalmente elastán con altos contenidos de aceites. Es importante la perfecta remoción de estos aceites para una tintura bien igualada.

Las fibras sintéticas tienen en general un buen grado de blancura. Para procesos de

descrude y blanqueo son empleados, además de detergentes y emulsionantes seleccionados los productos que mencionaremos a continuación; para la remoción de aceites se lleva a cabo en medio alcalino utilizando normalmente carbonato sódico ó sosa cáustica ó incluso amoníaco. La elección del álcali depende del pH procesado, de los aceites presentes en el sustrato y del tipo de detergente/emulsionante utilizado y de la resistencia de la fibra.

Se pueden utilizar también diversos tipos de ácidos, cuya elección depende del pH deseado, de los aceites presentes en el sustrato y del tipo detergente/emulsionante; para aceites que son removibles en medio ácido se utiliza normalmente ácido acético.

La poliamida es sensible al agua oxigenada y también al cloro. Para mejorar el grado de blancura de la poliamida son usados productos reductores (hidrosulfito sódico), frecuentemente con blanqueadores ópticos.

El clorito sódico puede ser utilizado para el blanqueo de poliéster y poliamida, sin embargo no es muy usual pero si es empleado para el blanqueo de fibras acrílicas.

La secuencia de adición de productos químicos para fibras sintéticas en un proceso discontinuo es el siguiente:

1. Añadir productos auxiliares en el tanque de adición.
2. Introducir los productos a la máquina.
3. Añadir álcali ó ácido predisoluto en el tanque de adición.
4. Introducir el álcali o ácido en la máquina.

La secuencia de adición de productos químicos para fibras sintéticas en un proceso continuo es el siguiente:

1. Añadir en el tanque de adición:
  - a. Agua fría hasta por lo menos 1/3 del total.
  - b. Encender el agitador.
  - c. Agregar los productos auxiliares disueltos.
  - d. Álcali o ácido disuelto.
2. Completar el volumen con agua fría.

#### **4. Termofijado**

La termofijación se puede considerar un proceso de pretratamiento del tejido y se puede realizar antes ó después de tinte; es realizada en una máquina conocida comúnmente como rama y es exclusivo para fibras sintéticas como el poliéster y sus mezclas, poliamida y sus mezclas y artículos que contienen elastán (lycra).

El proceso de termofijación proporciona estabilidad dimensional al tejido o sea que define permanentemente el ancho y el gramaje del tejido y esto se lleva a cabo a temperaturas elevadas que pueden llegar a más de 200 °C variando en función de la fibra, por ejemplo el poliéster requiere una temperatura entre 180 a 210 °C y un tiempo entre 30 a 60 segundos para su termofijado.

### 3. ASPECTOS GENERALES Y CONCEPTO DE TINTURA

En pocas palabras teñir significa colorear el sustrato (tejido de punto, hilo o tejido plano) mediante el uso de colorantes o pigmentos, los colorantes son sustancias químicas que son solubles en agua o solventes y los pigmentos se caracterizan por ser insolubles en agua y estos son aplicados en la superficie del sustrato, un esquema general de todo lo que implica el proceso de tintorería se puede observar en la figura 1.6.

La tintorería implica fenómenos de transferencia de masa como lo es la difusión, absorción y describe un comportamiento cinético de tintura e involucra una gran cantidad de operaciones unitarias; estos puntos se podrían retomar en estudios posteriores más específicos ya que son áreas afines a la carrera de Ingeniería Química.

Figura 1.6 Diagrama de flujo del proceso de tintura

Fuente: Construcción propia, marzo (2009).

#### 1. Consumo y características del agua requerida en el proceso de tintura

La tintorería comprende el mayor consumo de agua dentro de todos los procesos que constituyen la industria textil; como se puede observar en la tabla 1.3. Este fenómeno se puede observar en la mayoría de empresas textiles a nivel mundial, es por ello que el agua es un recurso muy valioso que se debe administrar y cuidar con mucha responsabilidad.

Tabla 1.3 Consumo anual de agua con una producción entre 20,000 y 30,000 kilos de tela teñida

Mes \ producción	Producción buena (m3)	Reproceso (m3)	Lavado de máquina (m3)	Total de agua (m3)
Enero	22,201	395	944	23,540
Febrero	21,642	642	1,177	23,641
Marzo	30,538	989	1,216	32,743
Abril	26,697	1,777	807	29,281
Mayo	28,084	2,426	686	31,198
Junio	28,733	1,955	1,212	31,900
Julio	30,846	2,286	1,273	34,401
Agosto	30,853	2,101	1,714	34,668
Septiembre	30,195	2,643	1,130	33,398
Octubre	32,558	2,109	1,263	35,930
Noviembre	30,155	2,900	1,387	34,442
Diciembre	28,387	2,445	1,176	32,008

Fuente: Construcción propia, empresa tipo, noviembre (2008).

#### Promedio mensual para 20,000 kilos/día:

Producción buena                      28,407 m<sup>3</sup>/mes+



Reproceso	1,888 m <sup>3</sup> /mes
Lavado de máquina	1,165 m <sup>3</sup> /mes
Hilo	4,000 m <sup>3</sup> /mes =
	35,460 m <sup>3</sup> /mes

**Promedio mensual para 30,000 kilos/día:**

Producción buena	42,610 m <sup>3</sup> /mes +
Reproceso	2,832 m <sup>3</sup> /mes
Lavado de máquina	1,747 m <sup>3</sup> /mes
Hilo	4,000 m <sup>3</sup> /mes =
	51,190 m <sup>3</sup> /mes

Con la reutilización del agua podríamos disminuir el agua utilizada para los lavados de máquinas por lo menos en un 50%.

Por otro lado las características que debe poseer el agua para no afectar los procesos de tintura se especifican en la tabla 1.4.

**Tabla 1.4 Parámetros límites del agua para el proceso de tintura**

Parámetro	Concentración permisible
Color	Ausente
Olor	Inodora
pH	7-8
Dureza	<5 ° dh
Sólidos disueltos	< 500 ppm
Sólidos suspendidos	< 5 ppm
Substancias orgánicas	< 18 ppm
Calcio	< 350 ppm para substancias inorgánicas
Manganeso	< 0.05 ppm
Magnesio	< 0.02 ppm
Hierro	< 0.1 ppm
Cobre	< 0.05 ppm
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	< 40 ppm
Nitritos (NO <sub>2</sub> )	< 3 ppm

Fuente: Construcción propia, Sclavos (2007).

## 2. Procesos de tintura

Los sustratos textiles pueden ser teñidos de diferentes maneras, dependiendo del equipo disponible en la industria textil, los podemos clasificar en tres tipos de procesos de tintura:

- Proceso por agotamiento: se llama por agotamiento ya que el colorante es agotado en el baño de tintura, es decir que el colorante se transfiere del baño de tintura hacia la fibra textil a través de un fenómeno llamado substantividad y su

representación es en base a gráficos como lo describe la figura 1.7. Las máquinas de tintura presentan las siguientes características:

- Sustrato estático – baño en moviendo
- Sustrato en movimiento – baño estático
- Sustrato en movimiento - baño en movimiento

Figura 1.7 Gráfico de un proceso de tintura por agotamiento  
Fuente: Ennoblecimiento textil en la práctica (2008).

- b) Proceso semicontinuo: la tintura en el tejido es impregnado, exprimido en foulard y luego permanece en reposo a temperatura ambiente durante un tiempo determinado para que se lleve a cabo la reacción química entre el sustrato y colorante, después se pasa a un proceso de lavado continuo y el tejido sale teñido.
- c) Proceso continuo: consiste en pasar el tejido de forma continua por un baño y recibe un exprimido uniforme en un foulard después pueden pasar a otros procesos donde se de la fijación de los productos con el tejido. En el proceso continuo el sustrato permanece en movimiento y el baño permanece en estado estacionario.

En los procesos mencionados se utilizan diversos productos químicos de los cuales podemos mencionar los siguientes:

- Colorantes
- Productos químicos
  - Ácidos
  - Alcalis
  - Sales
  - Oxidantes o reductores
- Igualadores
- Aceleradores (carriers)
- Lubricantes
- Antimigrantes
- Secuestrantes
- Humectantes
- Dispersantes
- Fijadores
- Otros.

En los procesos de tintura se deben controlar parámetros que son muy importantes para

el desarrollo de un teñido, dentro de los cuales se encuentran:

- a. pH (ácidos y álcalis): es de vital importancia ya que algunos procesos ó etapas requieren condiciones ácidas ó básicas para que la tintura se lleve a cabo.
- b. Temperatura: la temperatura de una tintura es importante para que se dé el correcto montaje del colorante. Las diferencias de temperaturas pueden causar problemas de reproducibilidad de colores.
- c. Tiempo: cada colorante tiene su tiempo de tintura y cualquier cambio puede causar problemas como: diferencia de tonos, falta de agotamiento del colorante, reducción del colorante etc.
- d. Sales (electrólitos): ayudan a que se dé una mejor absorción de los colorantes sobre el sustrato.
- e. Relación de baño: se entiende por relación de baño a la cantidad de materia a teñir y la cantidad de agua a utilizar, el mal cálculo de la relación puede causar muchos problemas, demasiada agua implica que mucho del colorante no se fije en el sustrato y utilizar poca agua causaría que aumente la viscosidad en los baños de tintura.
- f. Adición correcta de productos y colorantes: la correcta adición de los productos es de vital importancia para una partida con calidad, el orden de colocación de los productos así como el tiempo de dosificación influye totalmente en el correcto montaje del colorante de forma uniforme sobre el sustrato. La disolución de un colorante es una de las etapas más importantes para la reproducción de los tonos, cada colorante tiene una forma de disolver y es en base a las especificaciones técnicas que dan los proveedores del producto, las cuales pueden ser: la cantidad de agua a utilizar, temperatura de disolución, velocidad de mezclado, si debe ser lenta o rápida etc.

### 3. Tintura de fibras celulósicas con colorantes directos

Con colorantes directos la disolución del colorante se puede hacer con agua hirviendo, algunos colorantes negros requieren que se les añada un poco más de carbonato de sodio y el volumen de agua debe ser conforme a la cantidad de colorante y su solubilidad; además es recomendable usar agua blanda; en la tabla 1.5 se indican los productos que se utilizan en su tintura y su respectiva función.

Tabla 1.5 Componentes de una tintura con colorantes directos

Producto	Función
Sal (sulfato ó cloruro sódico)	Montaje del colorante en la fibra
Igualadores	Mejora la igualación o migración del color, en ciertas tinturas no hay

	necesidad de usarlos.
Soda ash- carbonato de sodio	Aumenta el rendimiento y la solubilidad de ciertos negros directos.
Dispersante	Mejora la solubilidad del colorante, mantiene la dureza del baño en dispersión.

Fuente: Ennoblecimiento textil en la práctica, marzo (2009).

La sal auxilia mucho en el montaje del colorante directo en el tejido, es por ello que su dosificación debe ser hecha con mucha cautela. La sal debe ser de buena calidad es decir que sea baja en dureza (calcio y magnesio) y exenta de hierro, las cantidades a usar deben ser las correctas ya que el exceso puede provocar teñidos desiguales y con pésima solidez al frote.

Es preferible empezar la tintura sin la adición de sal y añadirla únicamente cuando la tintura está hirviendo, dosificada en tres o cuatro partes en periodos de 10 minutos.

#### 4. Tintura de fibras celulósicas con colorantes reactivos

Los colorantes reactivos se montan en las fibras de forma similar a los directos, es decir que la sal sirve de auxiliar para que el colorante se fije a la fibra. Aquí el colorante reactivo origina una reacción química con la fibra de celulosa en medio alcalino logrando que este quede impregnado en el algodón.

Los colorantes reactivos tienen un inconveniente, que además de reaccionar con la fibra celulósica también reaccionan con el agua, lo que se conoce como colorante hidrolizado; para asegurar una buena solidez húmeda al lavado es necesaria la remoción completa del colorante hidrolizado y se hace por medio del jabonado después de tintura.

Existen diversos tipos de colorantes reactivos y cada tipo tiene su propio proceso, tiempo, temperatura, cantidad de sal y álcali recomendada. En la tabla 1.6 se encuentran los componentes de una tintura con colorantes reactivos.

Tabla 1.6 Componentes de una tintura con colorantes reactivos

Producto	Función
Sal (sulfato ó cloruro sódico)	Montaje del colorante en la fibra
Álcali (sosa cáustica ó soda ash- carbonato de sodio)	Fijación del colorante
Lubricantes	Mejoran la acomodación de la tela en las máquinas y evita que las fases del sustrato se peguen.
Antiespumantes	Evitan que la tela se enrosque
Secuestrantes	Reduce la dureza
Agente de jabonado	Usado en los baños después de la tintura para la remoción del colorante no fijado.

Fuente: Ennoblecimiento textil en la práctica, marzo (2009).

Los colorantes aplicados en caliente son de baja reactividad, en los procesos de agotamiento necesitan de temperaturas altas para fijarse (80-98 °C).

Los colorantes aplicados en frío, son de alta reactividad, en procesos de agotamiento necesitan de temperaturas bajas para fijarse (30-60 °C).

Estos colorantes pueden encontrarse en polvo ó granulado y su dilución puede ser con agua blanda; con un máximo de temperatura de 60 °C y deben ser añadidos de forma lenta bajo agitación constante.

## **5. Tintura de poliéster**

El poliéster es una fibra que no tiene carga eléctrica y no reacciona químicamente con el colorante. Para este tipo de fibras se desarrollaron colorantes denominados dispersos. Estos colorantes se montan sobre la fibra cuando el baño de tintura empieza a calentarse y la fibra empieza a abrirse permitiendo la entrada del colorante. Al mantener la tintura por un determinado tiempo a cierta temperatura, el colorante será difundido en la fibra, ver tabla 1.7.

Los colorantes dispersos tienen las siguientes características:

1. No presentan carga eléctrica.
2. Son básicamente insolubles en agua, forman dispersiones homogéneas de partículas pequeñas.
3. En la termofijación de tinturas con colorantes dispersos puede haber una vaporización de colorantes ensuciando la rama o el sustrato; a este fenómeno se le conoce como sublimación.

Por lo general el proceso de teñido de poliéster se lleva a cabo a temperaturas de hasta 130 °C, con ayuda de productos denominados carriers que sirven como agentes para acelerar la fijación y el proceso se lleva a cabo en medio ácido a pH de 5.5.

Tabla 1.7 Componentes de una tintura con colorantes dispersos

Producto	Función
Dispersante	Distribución uniforme del colorante en el baño
Igualador	Uniformidad del colorante en la fibra
Carrier	Acelera el montaje de colorante, indispensable en tinturas abajo de 120 °C
Ácido acético o fórmico	Protege el colorante evitando su destrucción
Sulfato de amonio	Garantiza la estabilidad del pH en todo el proceso

Fuente: Ennoblecimiento textil en la práctica, marzo (2009).

Después de una tintura es recomendable hacer una limpieza reductiva para la remoción de colorante disperso, depositado en la superficie de la fibra, en general se utiliza hidrosulfito de sodio, sosa cáustica y algún dispersante no iónico.

#### 4. ACABADO

Es un conjunto de operaciones que se dan sobre el sustrato ya teñido ó estampado y tienen por objeto mejorar el aspecto, tacto y propiedades que debe llevar el producto terminado. Los procesos de acabados pueden ser por agotamiento y continuos y se pueden clasificar en dos tipos de acabado:

- a) Mecánicos: los acabados mecánicos modifican el aspecto físico del sustrato dependiendo del tipo de maquinaria usada; los procesos denominados en calandra proporcionan más brillo al teñido y en los procesos de felpado el tejido es afranelado en estas máquinas especiales.

En este tipo de acabado mecánico podemos encontrar varios tratamientos, dentro de los más importantes podemos mencionar por ejemplo los tejidos sintéticos denominados termofijados, los cuales a base de calor adquieren una mayor estabilidad dimensional. Los chamuscados ayudan a eliminar el pilling ó fibrillas superficiales y los sanforizados, los cuales son utilizados en los tejidos de algodón para ser preencogido y adquirir mayor estabilidad dimensional.

- b) Químicos: los acabados químicos modifican la característica final del sustrato con relación al tacto, estabilidad dimensional, resistencia al agua, aceite y fuego entre otros. En este tipo de acabado se utilizan diferentes productos de los cuales podemos mencionar los siguientes:

Resinas: mejoran la estabilidad dimensional y disminuyen el arrugado del tejido pero pueden debilitar el sustrato.

Encorpante: dan mayor rigidez al tejido.

Suavizantes: dan mayor suavidad y elasticidad a los sustratos los cuales pueden ser hilos y tejidos en general, los suavizantes pueden ser del tipo catiónicos los cuales presentan una gran afinidad con las fibras proporcionando un tacto voluminoso y suave recomendados en procesos continuos y discontinuos; los no iónicos no tienen afinidad con la fibra y son recomendables para procesos continuos; los suavizantes de silicona que proporcionan un tacto liso, sedoso, mayor elasticidad y mejoran la confección del tejido.

Lubricante para costuras: son productos especiales que evitan la formación de huecos en el sustrato, estiramiento y el aumento de calor en las agujas de las máquinas de coser evitando consigo el quiebre de estas.

Impermeabilizantes: productos que repelen el agua, para la elaboración de capas, paraguas y lonas.

Antillamas: evitan la combustión de los tejidos.

Antiestáticos: previenen la acumulación de la electricidad estática en los sustratos felpados.

Repelentes de manchas: su finalidad es la remoción de manchas de grasas de los tejidos.

Enzimas: utilizadas en la eliminación de fibrillas como las pelusas y permiten mantener el tejido con un aspecto vivo por más tiempo.

## **5. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL**

En la industria textil caracterizar el agua de una forma general no es una tarea sencilla debido a la gran diversidad de procesos que involucra. Como ya se expuso anteriormente la variabilidad de productos químicos y colorantes que se emplean en esta industria complica la tarea de establecer un solo procedimiento para el tratamiento del agua residual pero se pretende estipular los métodos y técnicas para la reducción de contaminantes en los efluentes de desechos y aprovechar cierto porcentaje de este para su reutilización en ciertas etapas que lo permitan.

### **1. Características de tipo físicas**

Para la recuperación del agua residual pondremos especial atención en ciertos parámetros de los cuales podemos mencionar los siguientes:

1. Temperatura: su efecto en otras propiedades es importante ya que esta contribuye a la aceleración de las reacciones químicas, reduce la solubilidad de los gases e incrementa los olores y sabores. Para nuestros fines de reutilización requerimos que el agua oscile entre 35 -37 °C.
2. Sabor: es un parámetro no determinado y no prescindible.
3. Olor: debido al arrastre de una cantidad considerable de fibras orgánicas es de esperar que el agua presente esta propiedad y su alternativa de eliminación nos indicaría el uso de filtros de carbón activado, pero esta decisión se realizará al final del tratamiento químico propuesto.
4. Color: pondremos una atención especial en este parámetro debido a que el agua a utilizar en el proceso textil debe ser incolora.
5. Turbidez: la presencia de sólidos coloidales le dá al líquido una apariencia nebulosa que es poco atractiva debido a la gran cantidad de desechos industriales o a la presencia de numerosos microorganismos.
6. Sólidos: los sólidos se pueden encontrar presentes en suspensión ó en solución; de preferencia para la reutilización del agua residual requerimos la menor cantidad de sólidos ya sean estos disueltos ó suspendidos debido a que pueden provocar problemas en los procesos de tintura.
7. Conductividad eléctrica: esta depende de las sales disueltas y para soluciones diluídas es aproximadamente proporcional al contenido de sólidos totales disueltos.

## **2. Características de tipo químicas**

Son de carácter más específico y son más útiles para evaluar las propiedades de una muestra.

1. pH: mide el grado de acidez o alcalinidad que contiene una muestra y su escala de medición es de 0 a 14 en donde 7 representa neutralidad, debajo de este valor representa acidez y arriba de 7 representa alcalinidad. El pH controla muchas reacciones químicas y su carácter ácido o básico son indeseables debido a que provocan corrosión y presentan dificultades en su tratamiento. Reuniendo todas las descargas a la salida de todos los procesos textiles en la mayoría de los casos presentan un pH de 10, y para su reutilización se requieren valores entre 7



y 8 unidades de pH.

2. Alcalinidad: es debido a la presencia de carbonatos  $\text{CO}_3^{=}$ , bicarbonatos  $\text{HCO}_3^-$ , o hidróxido  $\text{OH}^-$ . Para el abastecimiento de agua en muchos casos se hace a través de la explotación de aguas subterráneas por medio de pozos, la cual ya trae una alcalinidad natural a causa del bicarbonato producto de la acción del agua subterránea en piedra caliza o yeso. Dentro del proceso productivo es necesario que el agua no exceda de ciertos valores de bicarbonato de sodio ya que estos pueden reaccionar con ciertos colorantes formando complejos metálicos causando problemas en la tintura, para evitar este problema se requiere el uso de secuestrantes metálicos. La alcalinidad es útil en el agua natural y en las aguas residuales ya que proporciona un amortiguamiento para resistir los cambios de pH.
3. Acidez: debido a la gran cantidad de desechos industriales es probable encontrarnos con algún tipo de acidez mineral por debajo de 4.5 unidades de pH.
4. Dureza: se dá por la presencia de iones metálicos de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  y es el causante de la mayor parte de las incrustaciones en los sistemas de calentamiento y enfriamiento; para reutilizarla requerimos que el valor de dureza sea lo más bajo posible entre 50 y 60 ppm de  $\text{CaCO}_3$ .
5. Demanda de oxígeno: los compuestos orgánicos pueden oxidar de forma química o biológica para obtener productos finales más estables relativamente inertes tales como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . La indicación del contenido orgánico de un desecho se obtiene al medir la cantidad de oxígeno que se requiere para su estabilización.
  - a. DBO: es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para que puedan descomponer la materia orgánica.
  - b. DQO: es la cantidad de oxígeno necesaria para producir la oxidación química fuerte de sustancias de origen inorgánico y orgánico presentes en el agua.

### **3. Características de tipo biológicas**

Estas dependerán de la carga orgánica y las cantidades de microorganismos presentes en el agua y se requiere una evaluación previa para no introducir esta carga al proceso productivo, abordándose esta problemática en las etapas finales del proyecto.

## **6. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL**

El tratamiento de aguas residuales es una serie de operaciones físicas, químicas y biológicas que remueven el material suspendido, coloidal o disuelto. Para el

tratamiento de aguas residuales es necesario conocer los límites de descarga en los efluentes; estos varían según las normativas impuestas por cada país. Se utilizan diferentes tipos de tratamiento entre los cuales tenemos los *preliminares*, los cuales consisten en la eliminación de residuos fácilmente separables, seguido de los tratamientos *primarios* utilizados para la eliminación de los sólidos en suspensión y materiales flotantes. Posteriormente se utilizan los denominados tratamientos *secundarios* que comprenden procesos biológicos aerobios y anaerobios y físico-químicos (floculación), para reducir en su mayor parte la DBO y DQO. Y por último podemos mencionar el tratamiento *terciario* que nos lleva a la reutilización del agua.

Hay 3 tipos de procesos de tratamiento:

1. Procesos físicos: dependen de las propiedades físicas de las impurezas como lo es el peso específico, tamaño de partícula, viscosidad etc. Ejemplo de los procesos físicos son: cribado, sedimentación, filtración.
2. Procesos químicos: dependen de las propiedades químicas de una impureza. Ejemplo de los procesos químicos son: coagulación, precipitación e intercambio iónico.
3. Procesos biológicos: utilizan reacciones bioquímicas para quitar impurezas solubles o coloidales; los procesos biológicos aerobios incluyen el filtrado biológico y lodos activados. Los procesos de oxidación anaerobia se usan para la estabilización de lodos orgánicos y desechos orgánicos de alta concentración.

## **7. PROCESOS DE TRATAMIENTO PRELIMINAR**

Es frecuente que las bombas de alimentación de agua hacia la planta de tratamiento queden obstruidas por pedazos de tela, recipientes plásticos, ramas y otros materiales de mayor tamaño reduciendo el caudal de entrada y la eficiencia misma del tratamiento, es por ello que estos procedimientos buscan proteger los equipos para asegurar un procedimiento continuo.

### **1. Cribado**

El cribado ó tamizado es una operación simple y consiste en la eliminación de sólidos grandes. Se utilizan rejillas protectoras gruesas con aberturas de 75 mm evitando el paso de objetos grandes hasta la entrada de la PTAR. Cuando las instalaciones son pequeñas la limpieza se puede hacer de forma manual y de ser demasiado grandes se requieren de equipos automáticos que se activen según el tiempo transcurrido ó al acumularse una pérdida de carga a través de la rejilla. Los equipos de rejilla de tambor y de rejilla de banda se pueden observar en el anexo A.1 y anexo A.2 respectivamente.

## **8. CLARIFICACIÓN**

La mayoría de impurezas en el agua residual existen en forma de materia suspendida; por lo regular las partículas son más densas que el líquido circundante, donde ocurre la sedimentación pero en el caso del agua residual textil se trata de partículas muy pequeñas o de baja densidad y de forma coloidal debido a la gran cantidad de colorantes que no quedaron fijados en la tela.

### 1. Teoría de la sedimentación

La sedimentación supone la presencia de partículas discretas. Cuando tales partículas se ponen en un líquido de densidad más baja se aceleran hasta alcanzar una velocidad terminal entonces:

Fuerza gravitacional = Fuerza de arrastre debido a la fricción Ecuación (1.2)

Fuerza gravitacional =  $((\rho_s - \rho_w)gV$  Ecuación (1.3)

Donde:

$\rho_s$  : densidad de la partícula.

$\rho_w$  : densidad del fluido.

$g$  : gravedad.

$V$  : volumen de la partícula.



Fuerza de arrastre debido a la fricción = Ecuación (1.4)

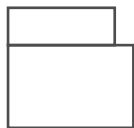
Donde:

$C_D$  : coeficiente de arrastre de Newton.

$A_C$  : área transversal de la partícula.

$V_s$  : velocidad de sedimentación de la partícula.

El coeficiente de arrastre no es constante y varía con el número de Reynolds (R).



Ecuación (1.5)



Ecuación (1.6)



En sedimentación

Ecuación (1.7)

Donde:

$d$  : diámetro de la partícula.

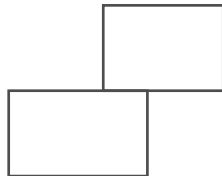
$\mu$  : viscosidad cinética del fluido.

Igualando las ecuaciones 1.3 y 1.4 para la condición de equilibrio tenemos:



$$((s - w)gV = \quad \text{Ecuación (1.8)}$$

Para esferas:



Despejando la velocidad de sedimentación de la ecuación 1.8 y sustituyendo el volumen y el área de la partícula se obtiene lo siguiente:



$$\text{Ecuación (1.9)}$$

Para flujos turbulentos  $C_D$  tiende a 0.4 y la ecuación 1.9 queda de la siguiente forma:



$$\text{Ecuación (1.10)}$$



Y para flujo laminar  $R < 0.5$  con  $\mu$ , de la ecuación 1.9 llegamos a la Ley de Stokes.



$$\text{Ecuación (1.11)}$$

Donde:

$S_s$  = peso específico de la partícula.

Cuando se trata de suspensiones floculentas no es posible aplicar la teoría anterior; debido a la aglomeración de las partículas de flóculo resulta en una mayor velocidad de sedimentación en el fondo; la mayoría de las suspensiones de las aguas residuales son de carácter floculenta.

## 2. Tipos de tanques de sedimentación

Existen diversos tipos de tanques de sedimentación, algunos remueven mejor los sólidos suspendidos que otros, pero en ocasiones su selección es debido a la cantidad de agua a tratar y otro factor que puede afectar es el espacio físico con el que se cuenta para su instalación.

Los tanques horizontales son compactos pero la longitud del efluente es corta. Los lodos se mueven por medio de un raspador de puente viajero o de banda.

Los tanques circulares tienen la ventaja de que la longitud del vertedero es mayor y los mecanismos de raspado de lodos son más simples.

Los tanques con fondo de tolva y flujo horizontal son preferidos en instalaciones pequeñas de agua residual donde el costo extra de su construcción está más que compensado por la ausencia de mecanismos de raspado.

Los tanques de sedimentación tienen dos funciones: la remoción de sólidos sedimentables para que el efluente sea aceptable y la concentración de los sólidos removidos en un volumen más pequeño. En base a estas dos funciones se establecen los parámetros de diseño de un tanque de sedimentación.

### **3. Flotación**

Es una técnica alternativa que se utiliza cuando las partículas suspendidas son pequeñas y tienen una densidad cercana a la del agua, utilizan tiempos de retención cortos y se requiere que se añada un agente de floculación y muchos de los equipos de flotación proporcionan finas burbujas de aire que se asocia con las partículas suspendidas para llevarlas hasta la superficie del tanque, pudiéndose remover por medio de bandas que las transportan a un tornillo sin fin donde se separa la fase sólida de la líquida. Una de las desventajas de estos equipos es su costo de operación que es elevado y son los más indicados cuando las velocidades de sedimentación son bajas.

## **9. COAGULACIÓN**

El agua puede contener una gran variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

1. Esencialmente químico: consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
2. Fundamentalmente físico: consiste en el transporte de especies hidrolizadas para

que hagan contacto con las impurezas del agua.

La coagulación es un proceso rápido, que toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos en realizarse, también depende mucho de las características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etc. La coagulación se emplea para la remoción de suspensiones coloidales que no sedimentan, las dosis varían de 30 a 100 ppm en todo el cuerpo de agua, llevándose a cabo en un tanque de mezcla rápida con una turbina de alta velocidad agregando el coagulante en un punto de turbulencia hidráulica. El coagulante es una sal metálica que reacciona con la alcalinidad del agua para producir un floculo insoluble de hidróxido del metal que incorpore a las partículas coloidales. Mediante la floculación de esta fina precipitación se producen sólidos sedimentables.

El coagulante más utilizado para el tratamiento de agua es el sulfato de aluminio (alumbre)  $Al_2(SO_4)_3$  y las reacciones complejas que tienen lugar después de su adición en el agua se simplifican de la siguiente manera:

[ ]

[ ]

[ ]

En general:

[ ]

Ecuación (1.12)

[ ]

Con el sulfato comercial se encuentra que 1 ppm de alumbre destruye 0.5 ppm de alcalinidad y produce 0.44 ppm de  $CO_2$ .

Para que se dé una buena coagulación debe haber suficiente alcalinidad que reaccione con el sulfato de aluminio, además de un pH adecuado entre 5 y 7.5. Otros coagulantes que pueden ser utilizados son el sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  ó caparrosa), sulfato férrico ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) ó cloruro férrico ( $FeCl_3$ ).

Las sales férricas presentan una buena coagulación a un pH por encima de 4.5, pero las sales ferrosas sólo son adecuadas por encima de un pH de 9.5. Las sales de hierro son más baratas que el alumbre pero si se dá una precipitación completa, el hierro residual puede causar manchas en las máquinas lavadoras.

A concentraciones bajas de materia coloidal la formación de floculos es difícil y se puede necesitar ayuda de co-coagulantes, los cuales pueden ser aditivos con partículas de arcillas que forman núcleos por precipitación del hidróxido, o poli electrólitos los cuales son polímeros pesados de cadenas largas que al agregarse en pequeñas cantidades alrededor de 1 ppm promueven la aglomeración y fortalecen el floculo.

Los floculos tienen un área superficial muy grande y son capaces de la adsorción de la materia disuelta en solución. El efecto de superficie activa resulta en que la coagulación

remueve el color disuelto y la turbidez coloidal del agua.

No es posible calcular la dosis de coagulante que se requiere ni los resultados que producirá, de modo que se deben efectuar ensayos de laboratorio con el uso del procedimiento de pruebas de jarras. Se coloca una serie de muestras de agua en un bastidor especial de agitación múltiple y se dosifican las muestras con una cantidad diferente de coagulantes por ejemplo 0, 10, 20, 30, 40 y 50 ppm y se agita vigorosamente posteriormente se floculan las muestras por 30 minutos y se dejan en reposo otros 60 minutos, luego se examina el agua sobrenadante en cuanto al color o turbidez y se anota la dosis más baja de coagulante que produce una remoción satisfactoria. Se prepara una segunda corrida ya con el pH ajustado a 5.0, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5 y 8.0 con la dosis de coagulante que se determinó anteriormente agregándose en cada jarra y nuevamente se evalúa el sobrenadante y se escoge el pH óptimo.

Cuando se utiliza la coagulación para quitar el color al agua, al parecer la reacción depende de la formación de precipitados a partir de la combinación de las sustancias orgánicas solubles y el coagulante; generalmente hay una relación directa entre la concentración del color y la dosis de coagulante que se requiere para removerlo.

Para tener una idea de la importancia de la calidad del agua cruda, es necesario comentar, por ejemplo, que un agua que presenta color (de origen coloidal) y turbiedad relativamente baja a temperatura superior a 15 °C, sin tomar en cuenta los demás parámetros de calidad, puede ser candidata potencial al uso de filtración directa y se obviará, en la mayoría de los casos la necesidad de floculación y sedimentación.

Por otro lado, casi siempre las aguas con color verdadero, turbiedad o número de algas relativamente elevados requieren un tratamiento completo. También las aguas con temperaturas generalmente bajas (10°C) pueden exigir el uso de un coagulante diferente al sulfato de aluminio, como un polímero catiónico y eventualmente, una sal de hierro.

## **10. OXIDACIÓN BIOLÓGICA AEROBIA**

La materia orgánica que queda disuelta y en suspensión así como el resto de las partículas sólidas que no se han eliminado en los tratamientos anteriores, son eliminadas mediante los denominados “procesos biológicos de depuración aerobia”, conocidos comúnmente como tratamientos secundarios. Podemos definir los procesos biológicos de depuración aerobia, como aquellos realizados por determinado grupo de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos) que en presencia de oxígeno, actúan sobre la materia orgánica e inorgánica disuelta, suspendida y coloidal existente en el agua residual, transformándola en gases y materia celular, que puede separarse fácilmente mediante sedimentación. La unión de la materia orgánica, bacterias y sustancias minerales forma los flóculos y dicho conjunto de flóculos es lo que todos conocemos como fango biológico.

Los objetivos que persigue este tipo de tratamiento son la transformación de la materia orgánica y la eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables. En el caso de algunas aguas residuales urbanas, también se persigue la eliminación del nitrógeno y fósforo. Por último, conseguimos además la disminución de los microorganismos

patógenos y fecales que habitan en el agua residual.

## **1. Tipos de plantas de oxidación aerobia**

Existen tres tipos básicos de unidades aerobias de las cuales podemos mencionar:

- a) Filtro percolador o lecho de bacterias.
- b) Lodos activados.
- c) Laguna de oxidación.

## **2. Filtro percolador**

Esta unidad de tratamiento biológico consiste básicamente de un lecho de piedra, circular o rectangular, con adición intermitente o continua en la superficie de agua residual sedimentada. En un filtro convencional, el medio tiene una graduación de 50-100 mm, de preferencia debe ser una piedra dura y con muchos ángulos, dosificada por un mecanismo distribuidor giratorio, con una profundidad normal del lecho de 1.8 m.

El líquido escurre por los intersticios que hay en el medio, donde crecen microorganismos en las áreas protegidas que forman un lógamo o película. El líquido fluye sobre dicha película y no a través de esta por la atracción de las fuerzas de Van der Waals. Así, aunque haya poca materia orgánica en solución en el efluente del filtro, las concentraciones de sólidos suspendidos pueden ser muy altas en forma de una película desplazada en cuyo caso el efluente requiere ser sedimentado en un tanque de humos para que el efluente tenga la calidad deseada. La oxidación más rápida tiene lugar en la parte superior del lecho donde el factor limitante es la cantidad de oxígeno que la ventilación natural pueda suministrar. Por debajo de este nivel disminuye la tasa de oxidación debido a la concentración decreciente de la materia orgánica en la fase líquida y normalmente hay poca diferencia si se usa un medio filtrante con una profundidad mayor a 2 m. La película líquida solo está en contacto con los microorganismos por un lapso de 20 a 30 segundos, pero debido a la gran área superficial disponible, este tiempo de contacto es suficiente para la adsorción y estabilización. La velocidad máxima de estabilización ocurre en la interfase de microorganismo-líquido ya que la difusión de las sustancias orgánicas a través de la película es lenta. Con una película biológica gruesa, la estabilización del desecho no es muy eficiente ya que gran parte de esta película experimenta respiración endógena.

## **3. Lodos activados**

Se requiere de una alta concentración de microorganismos presentes en forma de flóculos los cuales se mantienen suspendidos por medio de agitación, esta agitación se puede realizar por medio de compresores de aire o agitadores mecánicos; en cualquiera de los casos se obtiene altas tasas de transferencia de oxígeno, la cantidad de sustancias orgánicas a la salida del aireador es baja pero contiene una alta cantidad de sólidos suspendidos, de alrededor de 2000 a 8000 ppm los cuales serán retirados en



etapas posteriores de sedimentación. La efectividad del sistema dependerá de la recirculación de una parte de los lodos (microorganismos vivos) para reiniciar la estabilización. Una etapa con lodos activados requiere menos espacio que un filtro percolador.

Los sistemas que cuentan con aire difuso, la mayor parte se utiliza para la agitación y sólo una pequeña parte para las reacciones de oxidación; en los tanques de sedimentación los lodos no se agitan y los sólidos se asientan rápidamente en el fondo y pierden el contacto con la materia orgánica en el líquido, si los sólidos sedimentados no se regresan a la zona de aireación se convierten rápidamente en anaerobios. Se debe transferir suficiente aire para que el licor mezclado conserve una cantidad de 1 a 2 ppm de oxígeno disuelto. El licor mezclado debe ser de una concentración y actividad adecuada para proporcionar adsorción y oxidación rápida al desecho, así como para producir un lodo que sedimente fácilmente y pueda producir con rapidez un efluente clarificado y el lodo pueda retornarse a la zona de aireación sin tardanza.

De forma general podemos mencionar que por las plantas de tratamiento pasa un volumen del 25 al 50% de lodos que llegan al tanque de sedimentación y de un 50 a 90% de este se retorna a la zona de aireación, el resto se deshidrata y se desecha.

Existen dos situaciones, una de ellas es que la cantidad de lodo que se recircule sea insuficiente y los sólidos suspendidos en el licor mezclado será bajo y por el contrario puede que las cantidades de lodos sean excesivas lo que resultará que los sólidos suspendidos en el licor mezclado sean muy altos y no sedimenten bien y se requiera una mayor cantidad de oxígeno disuelto la cual es probable que no se pueda satisfacer. Si los lodos no se quitan rápidamente de los tanques de sedimentación estos emergen debido a la producción de nitrógeno por la reducción de nitratos en condiciones anaerobias; cuando esto ocurre el efluente que se obtiene es muy pobre. Se han desarrollado diferentes índices para controlar una buena calidad de los lodos en los procesos de aireación, los cuales son:

1. Índice de volumen de lodos (IVL): un IVL que se maneje entre 40 y 100 indica una buena calidad de lodos, si excede de 200 se considera deficiente y tiende a esponjarse, presenta una mala sedimentación, producen microorganismos filamentosos, y se da una baja concentración de nitrógeno y oxígeno disuelto.

$$\text{IVL} = \frac{\text{Volumen sedimentado de lodos en 30 min (\%)}}{\text{Sólidos suspendidos en el licor mezclado (\%)}} \quad \text{Ecuación (1.13)}$$

2. Índice de densidad de los lodos (IDL): un lodo de buena calidad maneja un IDL de 2 y una deficiente de 0.3.

$$\text{IDL} = \frac{\text{Sólidos suspendidos en el licor mezclado (\%)}}{\text{Volumen sedimentado de lodos en 30 min (\%)}} \quad \text{Ecuación (1.14)}$$

3. Tiempo de residencia medio ( $t_c$ )

$$t_c = \frac{\text{Volumen de la zona de aireación (m}^3\text{)}}{\text{SVSLM (ppm)}} \quad \text{Ecuación (1.15)}$$

Tasa de pérdida de lodos ( $m^3/d$ )x SSV de lodos (ppm)

#### 4. Lagunas de oxidación

Las lagunas de oxidación son sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales con un costo mínimo de operación, reconocidos mundialmente como el más adaptable a todas las capacidades económicas de poblaciones con pocos recursos financieros.

Las lagunas son construcciones poco profundas que reciben el agua residual cruda y se tratan con procesos de estabilización natural en condiciones climáticas cálidas y requieren suficiente terreno para su instalación, pueden alcanzar una buena remoción de la materia orgánica y microorganismos patógenos, en ocasiones no producen demasiados efluentes debido a la evaporación que se presenta en el sistema pero su diseño es a base de un sistema de flujo continuo y se encuentran en cuatro tipos de lagunas diferentes:

1. Lagunas facultativas: son las más comunes y combinan la actividad aerobia y la anaerobia en la misma unidad, los microorganismos y algas que se encuentran en la laguna utilizan las sales inorgánicas y el bióxido de carbono que resultan de la descomposición bacteriana de la materia orgánica. Debido a la fotosíntesis en horas de la tarde la cantidad de oxígeno disuelto oscila entre 15 y 30 ppm y disminuye a 0 por la noche; las lagunas facultativas tienen una profundidad de 1 a 2 m, con una carga superficial de 0.02 a 0.05 Kg de DBO/ $m^2$ día, y tiempos de retención de 5 a 30 días; con la temperatura se alteran estos valores. Cuando los tiempos de retención son relativamente largos y las concentraciones de sustancias orgánicas son bajas se da una remoción considerable de bacterias debido a la sedimentación; si en la laguna hay una proliferación alta de algas se incrementan los sólidos suspendidos y disminuyen la remoción de DBO, las lagunas pueden alcanzar la remoción del 70 al 80% de la DBO.
2. Lagunas de maduración: son aerobias y de poca profundidad con una carga orgánica baja, menores a 0.01 Kg de DBO/ $m^2$ día y se utiliza como etapa secundaria después del paso por una laguna facultativa o de otro tipo de tratamiento biológico; en esta etapa se elimina gran cantidad de bacterias patógenas debido a las condiciones, las cuales no son favorables para su subsistencia.
3. Lagunas anaerobias: operan con cargas orgánicas altas de 0.5 Kg de DBO/ $m^2$ día, con profundidades de 3 a 5 m para mantener las condiciones anaerobias, remueven un 50 a 60% de la DBO en un tiempo de retención de 30 días y son adecuadas para el pretratamiento de desechos orgánicos fuertes antes de introducirlas a una laguna facultativa; uno de los problemas es que pueden producir olores desagradables.
4. Lagunas aireadas: son similares al proceso de lodos activados, mantienen una carga

orgánica de 0.2 Kg de DBO/m<sup>2</sup>día, con tiempos de retención de unos cuantos días; estas lagunas pueden tener aplicaciones en las áreas urbanas de los países en vía de desarrollo.

## **11. OXIDACIÓN BIOLÓGICA ANAEROBIA**

Cuando existen desechos orgánicos muy fuertes con alto contenido de sólidos suspendidos, provenientes de los lodos de la sedimentación primaria y tratamiento aerobio, es muy difícil mantener las condiciones aerobias. Las limitaciones del equipo de transferencia de oxígeno evitan que se satisfaga la demanda de oxígeno y en consecuencia se presentan las condiciones anaerobias. En tales circunstancias es posible lograr la estabilización parcial por oxidación anaerobia o digestión.

### **1. Aplicaciones de la digestión**

Su principal función es la estabilización de los lodos primarios y secundarios que tienen contenidos de 20,000 a 60,000 ppm de los cuales el 70% son volátiles; los lodos primarios entran en putrefacción rápidamente y generan un fuerte olor fecal. El resultado de la digestión es reducir el contenido volátil a un 50% y los sólidos totales al 70% de sus valores originales. Los sólidos orgánicos restantes son de carácter homogéneo relativamente estables y su olor es de alquitrán. Sin embargo es difícil desaguar el lodo digerido.

La digestión anaerobia convencional es un proceso que se lleva a cabo en dos etapas: en la primera se lleva a la temperatura deseada para que se dé la producción de gas y en la segunda ocurre la sedimentación estática y separación de sólidos. El líquido sobrenadante contiene una alta concentración de sustancias orgánicas solubles (hasta 10,000 ppm de DBO), las cuales se retiran para su tratamiento aerobio en la planta principal y se separan los sólidos sedimentables en forma de lodo.

Un avance importante en los procesos anaerobios es el uso de filtros anaerobios, donde el crecimiento biológico se mantiene en medios de arena o plástico, lo que permite que se establezca un buen contacto entre los organismos y la materia orgánica de desecho.

## 2. Operación de los digestores

El proceso anaerobio es sensible a condiciones ácidas y requiere un estricto control; para una buena digestión el pH debe estar entre 6.5 y 7.5; un descenso en el pH significa que el proceso está desbalanceado, la producción excesiva de ácidos volátiles destruye la capacidad de amortiguamiento de la alcalinidad en los lodos, baja el pH y reduce la producción de gas. Mientras que el lodo tenga una alcalinidad muy alta, el aumento en la producción de ácido puede causar al principio poco efecto en el pH; por esta razón se prefiere medir los ácidos volátiles lo que dan un mejor parámetro de control. El control normal de ácidos volátiles es de 250 a 1000 ppm; si excede de 2000 ppm es probable que existan problemas. Frecuentemente se usa cal para ayudar a la recuperación de la digestión después de una producción alta de ácidos.

## 12. TRATAMIENTO QUÍMICO

Varios constituyentes del agua natural y de la residual no responden a los procesos de tratamiento convencionales ya descritos. Por esta situación, se deben usar formas alternas de remoción en su tratamiento. La materia inorgánica soluble se puede remover con técnicas de precipitación o intercambio iónico; las sustancias orgánicas solubles no biodegradables se remueven por adsorción.

### 1. Precipitación química

La remoción de ciertos materiales inorgánicos solubles se puede lograr al agregar reactivos adecuados para convertir las impurezas solubles en precipitados insolubles que pasan así a la fase de floculación y se pueden remover por sedimentación. El grado de remoción que se logre depende de la solubilidad del producto. Factores tales como el pH y la temperatura normalmente afectan.

Se usa la precipitación química en el tratamiento de agua residual de origen industrial para remover, por ejemplo, metales tóxicos de efluentes. Es común que tales efluentes contengan cantidades considerables de cromo hexavalente que es dañino para los sistemas biológicos. Si se agrega sulfato ferroso y cal, el cromo se reduce a la forma trivalente que se puede precipitar como un hidróxido.



Ecuación (1.16)



Ecuación (1.17)



Ecuación (1.18)

Para un tratamiento eficiente, es esencial agregar la dosis correcta de reactivos. Para la reducción del cromo, el requerimiento teórico es como se indicó antes, pero a este nivel la reacción procede muy lentamente y en la práctica, para asegurar la reducción completa, es necesario agregar de 5 a 6 átomos de hierro ferroso por cada

átomo de cromo hexavalente. Una característica de los procesos de precipitación química es la producción de volúmenes relativamente grandes de lodos.

El uso más extendido de la precipitación química es para el ablandamiento de agua. Las aguas duras contienen calcio y magnesio en cantidades importantes, frecuentemente requieren ablandamiento para mejorar su calidad para usarlas en el lavado o para calefacción. Para abastecimientos potables, el agua con una dureza (como el  $\text{CaCO}_3$ ) de hasta 75 ppm, se considera normalmente como blanda, pero algunas aguas superficiales y muchas aguas subterráneas pueden tener niveles de dureza de varios cientos de partes por millón.

Normalmente se consideraría indeseable una dureza superior a las 300 ppm. La necesidad de ablandar los abastecimientos domésticos se debe más a razones de comodidad y economía que de salud, ya que aún en concentraciones muy altas (> 1000 ppm) la dureza es inofensiva, aunque es verdad que hay cierta evidencia estadística que muestra que las aguas ablandadas artificialmente tienden a aumentar la incidencia de algunas formas de enfermedades cardíacas.

El ablandamiento por precipitación consiste en la inversión del proceso a través del cual la dureza ingresó al agua inicialmente; esto es, la conversión de compuestos solubles en compuestos insolubles que luego se precipitarán y permitirán su remoción por floculación y sedimentación. El método de ablandamiento por precipitación adoptado dependerá de la forma de dureza presente.

1. Ablandamiento con cal: para una dureza debida al calcio y con la forma de carbonato. La adición de cal es equivalente a la cantidad de bicarbonato presente; este formará carbonato de calcio insoluble.



Ecuación (1.19)

La solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  a temperaturas normales, es de 20 ppm y por el tiempo de contacto tan limitado que es posible en una planta normal, generalmente se obtiene un agua residual de 40 ppm de  $\text{CaCO}_3$ . El agua ablandada se satura con  $\text{CaCO}_3$  y hay probabilidad de que las escamas se depositen en el sistema de distribución. Esto se puede evitar mediante la carbonatación que produce  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  soluble ó mediante la adición de fosfatos que secuestran el calcio y evitan la formación de escamas.



Ecuación (1.20)

2. Ablandamiento con soda cálcica: para todas las formas de dureza debida al calcio. Al agregar ceniza de soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) la dureza no debida al carbonato se convierte en  $\text{CaCO}_3$ , el cual entonces se precipitará



Ecuación (1.21)

Se agrega tanta ceniza de soda en una proporción igual a la dureza no debida al carbonato y asociada al calcio.

3. Ablandamiento por exceso de cal: para la dureza debida al carbonato de magnesio. Los métodos anteriores no son efectivos para la remoción del magnesio porque el carbonato de magnesio es soluble.

Ecuación (1.22)

Para un pH cerca de 11 tenemos:

Ecuación (1.23)

Como un efecto secundario, el alto nivel de pH produce una buena desinfección y la cloración puede ser innecesaria después de tal ablandamiento. La carbonatación es indispensable para quitar el exceso de cal y reducir el pH después del tratamiento.

4. Ablandamiento por exceso de soda cálcica: para todas las formas de dureza debida al magnesio. Este proceso implica el uso de cal y ceniza de soda. Todas las formas de ablandamiento por precipitación producen volúmenes considerables de lodos. La recuperación de cal es posible al calcinar el lodo con  $\text{CaCO}_3$  y apagar con agua, de esta manera se produce más cal de la que se requiere en la planta y el excedente se puede vender, resolviéndose al mismo tiempo el problema de la eliminación de los lodos.

## 2. Intercambio iónico

Ciertos materiales naturales, especialmente las zeolitas son silicoaluminatos sódicos complejos y las arenas verdes, tienen la propiedad de intercambiar un ión en su estructura por otro ión en solución. Se han desarrollado materiales sintéticos de intercambio iónico que ofrecen mayores capacidades de intercambio que los componentes naturales.

El tratamiento mediante intercambio iónico tiene la ventaja de que no se producen lodos, aunque se debe tener presente que cuando se ha agotado la capacidad de intercambio iónico, es necesario regenerar el material, lo que dá lugar a una corriente de desecho concentrado del contaminante original. Se puede tratar con intercambio iónico como una alternativa a los métodos de precipitación; sin embargo, el uso más común del intercambio iónico es en el ablandamiento de agua o desmineralización en el caso de aguas para calentadores de alta presión, donde es esencial la alta pureza del agua.

Cuando se usan para el ablandamiento del agua, las zeolitas naturales intercambian sus iones de sodio por los iones de calcio y magnesio en el agua, lo que permite la eliminación total de la dureza.

El agua así obtenida tiene un alto contenido de sodio, que no es probable que cause problema, a no ser que el agua fuera originalmente muy dura. Cuando se han intercambiado todos los iones de sodio en la estructura, ya no hay remoción de dureza. La regeneración se logra con el uso de una solución de sal que suministre una alta concentración de iones de sodio para invertir la reacción de intercambio, con lo que se libera la dureza como una corriente concentrada de cloruro.

Una zeolita de ciclo de sodio natural tendrá una capacidad de intercambio de 200 equivalentes gramo/m<sup>3</sup> con un requerimiento de material de regeneración de 5 equivalentes/equivalente intercambiado. Las resinas de ciclo de sodio sintéticas pueden tener una capacidad de intercambio dos veces mayor con la mitad del requerimiento de material regenerante, pero tienen un costo más alto.

También se dispone de intercambiadores de catión de ciclo de hidrógeno obtenidos de compuestos carbonosos naturales o sintéticos con los que se produce agua de dureza cero. Para tal fin, intercambian todos los cationes por iones de hidrógeno de modo que la corriente del producto es ácida y su uso principal es la primera etapa de las operaciones de desmineralización y su regeneración es por tratamiento ácido.

Las características comunes de rendimiento para un intercambiador de ciclo de hidrógeno son 1000 equivalentes gramo/m<sup>3</sup> de capacidad de intercambio y un requerimiento de material de regeneración es cerca de 3 equivalentes/equivalente intercambiado. Los intercambiadores de iones normalmente son derivados sintéticos del amoníaco, aceptarán el agua, producto de un intercambiador de ciclo de hidrógeno y producirán agua desmineralizada para laboratorio y otros usos especializados, así como agua para alimentación de calderas.

Un intercambiador de aniones potente, removerá todos los aniones; se necesita una base fuerte para la regeneración, los intercambiadores de aniones débiles quitan aniones fuertes pero no los carbonatos ni silicatos.

El rendimiento típico de un intercambiador de iones sería 800 equivalentes gramo/m<sup>3</sup> de capacidad de intercambio y 6 equivalentes/equivalente de la capacidad del material de regeneración intercambiado. Normalmente se usan materiales de intercambio iónico en unidades similares a los filtros de presión y es posible combinar resinas catiónicas y aniónicas en una misma unidad de lecho mezclado.

El agua de alimentación para una planta de intercambio iónico debe estar libre de materia suspendida, ya que esto tendería a recubrir las superficies del medio de intercambio, lo que reduce su eficiencia. La materia orgánica en la alimentación también puede causar la obstrucción del intercambiador, aunque el desarrollo de materiales macroporosos con su área de superficie interna inaccesible a las moléculas orgánicas grandes reduce el problema de la obstrucción orgánica.

### **3. Adsorción**

Por las actividades industriales o agrícolas hay trazas de concentraciones de compuestos orgánicos sintéticos en el agua de abastecimiento cruda, lo que causa problemas de sabor y olor en el agua procesada. Aunque el tratamiento biológico convencional del agua residual permite una alta remoción de la materia orgánica, hay un residuo importante de compuestos orgánicos no biodegradables en el efluente final. Este

residuo es motivo de preocupación en lugares donde se extrae agua que contiene cantidades considerables de efluente de agua residual. Es por esto que hay un interés creciente en utilizar la adsorción para reducir la concentración de sustancias orgánicas en el agua.

La adsorción es la acumulación de partículas disueltas de un solvente en la superficie de un adsorbente. Debido a que la adsorción es un fenómeno superficial, los buenos adsorbentes deben tener una estructura muy porosa para que exista una relación alta de área superficial a volumen. El adsorbente más satisfactorio es el carbón activado que se produce de ceniza de madera, lignina, cáscaras de nuez y materiales similares. La deshidratación y la carbonización se logran por el calentamiento lento en la ausencia de aire y la formación de una estructura muy porosa con la aplicación de vapor, aire o bióxido de carbono a altas temperaturas.

Cuando un adsorbente se deja en contacto con una solución, la cantidad de soluto adsorbido aumenta en la superficie del adsorbente y disminuye en el solvente. Después de algún tiempo se alcanza un equilibrio de adsorción, cuando el número de moléculas que dejan la superficie del adsorbente es igual al número de moléculas que la superficie adsorbe. Se puede describir la naturaleza de la reacción de adsorción al relacionar la capacidad de adsorción (masa de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente) con la concentración de equilibrio de soluto que permanece en solución.

Los solutos de un alto peso molecular no se adsorben tan fácilmente como las sustancias de un bajo peso molecular y conforme la solubilidad aumenta, disminuye la capacidad de adsorción de los compuestos orgánicos. Cuando la capacidad de adsorción ha sido totalmente utilizada se tiene que descartar el carbón si está en forma de polvo ó regenerarse por tratamiento de calor, si está en la forma granular que es más costosa. El uso de carbón en polvo es común que se restrinja a operaciones que requieren remoción intermitente o sólo ocasional de concentraciones bajas de materia orgánica. Donde es necesaria la remoción continua de concentraciones importantes de sustancias orgánicas se requiere carbón granular en los lechos y regenerarlo en el mismo lugar donde se usa.

### **13. DESHIDRATACIÓN Y ELIMINACION DE LODOS**

Uno de los principales problemas en el tratamiento de agua natural o agua residual es el de la eliminación de los lodos. En los tanques de sedimentación se producen grandes volúmenes de lodos con alto contenido de agua y su deshidratación y eliminación final pueden representar casi la mitad del costo del tratamiento.

#### **1. Principios de la deshidratación**

Son cinco los tipos de lodos que se producen en los procesos de tratamiento:

1. Lodos primarios de la sedimentación del agua residual.
2. Lodos secundarios del tratamiento biológico del agua residual.
3. Formas digeridas de los dos anteriores en forma separada o mezclada.
4. Lodos de hidróxido por la coagulación y sedimentación de las aguas y desechos industriales.
5. Lodos de precipitación de las plantas de ablandamiento y del tratamiento de desechos industriales.



Todos estos lodos tienen bajos contenidos de sólidos (1-6%) y por eso se requiere manejar grandes volúmenes de lodos para obtener una masa de sólidos relativamente pequeña. En consecuencia, la principal preocupación en el tratamiento de los lodos es concentrar los sólidos por medio de la remoción de tanta agua como sea posible. La densidad y la naturaleza de las partículas de sólidos tienen una influencia considerable en el grosor del lodo producido.

## **2. Acondicionamiento de lodos**

Para mejorar la eficiencia del proceso de deshidratado es útil aplicar una etapa preliminar de acondicionamiento para liberar tanta agua como sea posible de las partículas de lodo. El objeto de este tratamiento preliminar es facilitar la aglomeración de sólidos y aumentar su contenido. Para este fin se emplean varios métodos de acondicionamiento, lo que depende de las características del lodo que se va a tratar:

1. **Espesamiento:** con muchos lodos floculentos, especialmente los excedentes de lodos activados, el agitado a baja velocidad en un tanque con un mecanismo del tipo de cerca con estacas estimula una floculación mayor y puede aumentar significativamente el contenido de sólidos y la capacidad de sedimentación, al mismo tiempo que permite el retiro del sobrenadante.
2. **Acondicionamiento químico:** los coagulantes químicos pueden ser útiles en la promoción de la aglomeración de las partículas de flóculos y en la liberación de agua. Los más comunes son: sulfato de aluminio, clorhidrato de aluminio, sales de hierro, cal y polielectrólitos o ambos. El costo de estos reactivos está más que compensado por el aumento en el contenido de sólidos y la mejora en las características de deshidratado que resultan de su uso.
3. **Elutriación:** el requerimiento químico para el acondicionamiento se puede reducir si se mezcla el lodo con agua o efluente, se permite que se sedimente y se retira el sobrenadante antes de agregar las sustancias químicas. Este proceso de lavado quita mucho de la alcalinidad que en los lodos digeridos ejerce una alta demanda química.
4. **Tratamiento con calor:** se han empleado varios procesos para calentar los lodos de agua residual bajo presión con el fin de estabilizar la materia orgánica y mejorar su capacidad de deshidratación. Una operación común es calentar a una temperatura de 190 °C por 30 minutos a una presión de 1.5 MPa y luego pasar el lodo a tanques de espesamiento. El sobrenadante tiene un alto contenido orgánico soluble y se debe regresar a la planta principal de oxidación para su estabilización, lo que no siempre es fácil debido a su biodegradabilidad limitada. Los problemas de corrosión y los altos costos de energía han hecho que las plantas de tratamiento con calor no sean muy atractivas en la mayoría de los casos.

## **3. Deshidratación de lodos**

En muchos de los métodos de eliminación de lodos, la deshidratación preliminar es esencial para que los costos de la eliminación se mantengan bajo control. Se emplean varios métodos de deshidratación lo que depende del terreno disponible y los costos relacionados con una situación particular.

1. Lecho de secado: el proceso de deshidratación más antiguo y más sencillo es el que usa lechos rectangulares poco profundos con fondos porosos arriba de una red de drenaje subterráneo. Los lechos se dividen en áreas convencionales con paredes bajas. El lodo se pasa a los lechos hasta que la profundidad es de 125 a 250 mm; la deshidratación tiene lugar debido al drenaje de las capas inferiores y a la evaporación de la superficie bajo la acción del sol y el viento. La pasta se agrieta a medida que se seca, lo que permite mayor evaporación y el escape del agua de lluvia de la superficie. En buenas condiciones, el contenido de sólidos que se obtiene es casi del 25 % en unas cuantas semanas; en climas templados un período más común es de 2 meses. Se obtienen mejores resultados con la aplicación frecuente de capas de lodo poco profundas en vez de capas profundas e intervalos más largos. La remoción del lodo seco se hace manualmente en plantas pequeñas pero en otros lados se tiene que instalar una planta mecánica para el levantamiento de los lodos. El terreno que se requiere para el lodo de agua residual es 0.25 m<sup>2</sup>/persona. Este gran requerimiento hace difícil que los lechos de secado sean factibles a menos que se disponga de terreno a bajo costo. En muchas circunstancias se utiliza alguna forma de deshidratado mecánico, para el cual las necesidades de terreno son mínimas y cuyo rendimiento no es afectado por el clima.
2. Filtrado de presión: el filtrado de presión es un proceso intermitente en el que se bombea lodo acondicionado con presión creciente en cámaras revestidas con telas de fieltro; estas cámaras retienen los sólidos pero permiten que el líquido escape por las estrías que tienen las placas metálicas de apoyo. A medida que escapa el líquido, la pasta adyacente a la tela actúa como un filtro adicional para el resto del lodo y la pasta se deshidrata hacia el centro. El tiempo durante el cual se somete a presión varía de 2 a 18 horas, con presiones de 600 a 850 kPa, lo que da una pasta con un contenido de sólidos del 25 al 50%. La carga de sólidos depende de la naturaleza del lodo y de la duración del ciclo de presión. Una mejora del proceso de filtrado de presión es una prensa sin fin de operación continua que introduce el lodo acondicionado en la abertura entre dos bandas sin fin a las que se aplica presión por medio de rodillos. La deshidratación ocurre por una combinación de drenaje por gravedad, filtrado de presión y efecto de corte.
3. Filtrado al vacío: este es un proceso continuo en el cual un tambor giratorio segmentado cubierto con tela de fieltro se sumerge parcialmente en lodo acondicionado. Se forma un vacío de 90 kPa en los segmentos sumergidos para que el lodo se adhiera a la superficie de la tela. A medida que gira el tambor y la capa de lodo emerge del tanque, se succiona aire a través de éste por el vacío para ayudar a la deshidratación. Un raspador quita la pasta de lodo con la ayuda de un cambio a presión positiva en el segmento de tambor correspondiente. Los sólidos en la pasta normalmente son del 20 al 25 %, con rendimientos de filtro aproximados de 20 kg de sólidos secos/m<sup>2</sup>h.

4. Centrifugación: las centrifugas de operación continua tienen aplicación en el deshidratado de lodos. La mayoría son del tipo de carcasa sólida en el cual se alimenta lodo acondicionado al centro de una carcasa que gira rápidamente. Los sólidos son lanzados a la orilla exterior de donde son removidos por un raspador-transportador. Las centrifugas son relativamente compactas pero no pueden lograr concentraciones de sólidos mayores del 20% y en muchos casos es difícil separar en forma económica sólidos mayores a un 12 ó 15% de los lodos del agua natural o residual.

Es importante observar que en todas las operaciones de deshidratado de lodos el líquido que se separa requiere arreglos adecuados para poder eliminarlo. El líquido de los lodos del agua residual es altamente contaminante y se debe regresar a la planta principal de tratamiento para su estabilización.

#### **4. Eliminación de lodos**

El lodo de agua residual tiene valor como acondicionador de suelos ya que contiene cantidades importantes de nitrógeno y fósforo. Los lodos que provienen de instalaciones sin descargas industriales importantes pueden ser destinados de inmediato a los terrenos agrícolas. Con lodos que contienen materiales potencialmente tóxicos, como metales pesados, no es posible utilizar la tierra agrícola para su desecho. Frecuentemente se requiere una digestión anaerobia de los lodos anterior a la disposición en tierra, para asegurar la destrucción de los microorganismos patógenos que pudieran estar presentes en el lodo crudo. La aplicación del lodo a la tierra agrícola se hace cuando está aún húmedo. Se transporta en un carro-tanque o por un sistema de irrigación por aspersión. Como las condiciones climáticas pueden impedir la aplicación en ciertos períodos, se debe contar con suficiente capacidad de almacenaje para cubrir estas situaciones.

Una gran cantidad de lodos se arroja en canteras viejas y sitios similares. Esta práctica de rellenar con lodo deshidratado hace posible la recuperación de terrenos agotados. Siempre se debe tener en mente la posibilidad de que el agua subterránea se contamine como resultado de tales prácticas. En áreas costeras es muy común desechar el lodo líquido en el mar en lugares de aguas profundas; hay poca evidencia de daño ambiental importante causado por tales acciones cuando se controlan apropiadamente. Sin embargo, algunas autoridades prohíben arrojar lodos de agua residual en el mar.

El compostaje de lodos de agua residual con basura doméstica produce un material estable con buenas propiedades como acondicionador de suelos, pero con poca reducción en volumen. Por esta razón, la fabricación de composta sólo es justificable si hay un mercado para el producto. Todo el lodo del agua residual y toda la basura de una comunidad producen una mezcla muy húmeda para hacer la composta y es necesario deshidratar el lodo para tener un 25 % de sólidos y que el proceso opere satisfactoriamente.

Cuando no se cuenta con sitios para desechar los lodos a una distancia que resulte económica, o si el lodo contiene materias tóxicas, la mejor solución es

incinerarlo. Esta operación se lleva a cabo en hornos de hogar múltiple; la operación es normalmente autosustentable cuando los lodos de agua residual se deshidratan hasta un 25 % en sólidos (los sólidos de agua residual tienen un valor calorífico que comúnmente es 20 MJ/kg). Después de la incineración, la ceniza residual equivale únicamente al 5 ó 10% de los sólidos originales, con lo que disminuye en gran parte el problema de la eliminación. Sin embargo, desechar los lodos de esta manera significa un gran costo de capital y un costo de operación considerable.

El volumen y naturaleza de los lodos producidos en las operaciones de tratamiento de agua son tales que su disposición no causa normalmente grandes problemas. Son prácticas comunes desecharlos en la tierra, lagunas o por medio de filtrado de presión con eliminación en tiraderos. Los lodos con hidróxido de aluminio no tienen valor como fertilizante, pero los lodos de cal que se obtienen de las operaciones de ablandamiento tienen un valor considerable en la agricultura.

## **14. DESINFECCION**

Debido a lo pequeño de muchos microorganismos, no es posible garantizar que su remoción sea completa con los tratamientos de coagulación o filtrado. Por esa razón, es necesario efectuar una desinfección para asegurar la eliminación de microorganismos potencialmente dañinos en las aguas potables. La mayoría de las aguas residuales y efluentes tratados contienen gran cantidad de microorganismos por lo que puede ser conveniente desinfectar tales líquidos, aunque en general no se recomienda la desinfección rutinaria de los efluentes. La desinfección de un efluente antes de la descarga tenderá a retardar las reacciones de auto purificación en el agua receptora; asimismo, la formación de productos de reacción que resultan de las interacciones de compuestos orgánicos y desinfectantes suele ser indeseable en aguas que se usan como fuentes de abastecimiento potable.

Es importante observar la diferencia entre la esterilización (la muerte de todos los organismos), que rara vez se practica o se necesita y la desinfección (la muerte de organismos potencialmente dañinos), que es el requerimiento normal.

### **1. Cloro**

El cloro (y sus compuestos) se usa ampliamente para la desinfección del agua debido a que:

1. Se obtiene fácilmente como gas, líquido o polvo.
2. Es barato.
3. Es fácil de aplicar debido a una solubilidad relativamente alta (7000 ppm).
4. Deja un residuo en solución que no es dañino para el hombre y protege el sistema de distribución.
5. Es muy tóxico para la mayoría de los microorganismos, ya que detiene las actividades metabólicas.

Tiene algunas desventajas como el ser un gas venenoso que requiere un manejo cuidadoso y puede causar problemas de sabor y olor, especialmente en presencia de fenoles.

El cloro es un poderoso agente oxidante que se combina rápidamente con

agentes reductores y compuestos orgánicos no saturados; esta demanda inmediata de cloro se debe satisfacer antes que el cloro esté listo para la desinfección. 1 ppm de cloro oxida 2 ppm de DBO, pero este método no es factible en el tratamiento de agua residual.

## **2. Ozono**

El ozono ( $O_3$ ) es una forma alotrópica del oxígeno que se produce al pasar oxígeno seco o aire por una descarga eléctrica (5000 a 20000 V, 50 a 500 Hz). Es un gas azul inestable y altamente tóxico con un olor picante de heno recién cortado. Es un poderoso agente oxidante así como un desinfectante, es útil en el blanqueado del color y en la remoción de sabores y olores. Como el oxígeno, es sólo ligeramente soluble en el agua y debido a su forma inestable, no deja residual. A menos que se disponga de energía barata, el tratamiento con ozono es mucho más caro que la cloración, pero tiene la ventaja de remover bien el color. En estas circunstancias, el filtrado y la ozonización pueden dar un agua terminada similar a la producida por una planta más compleja de coagulación, sedimentación, filtrado y cloración. Debido a la ausencia de residuales de ozono en el sistema de distribución, puede haber un crecimiento biológico con sus problemas contaminantes de color, sabor y olor. Tales crecimientos en el sistema de distribución se pueden evitar si se agrega una pequeña dosis de cloro después de la ozonización. El ozono tiene aplicación en la oxidación de ciertas aguas residuales industriales que no son asequibles a la oxidación biológica.

El ozono debe manufacturarse en el sitio con el paso de aire seco por una descarga eléctrica de alto voltaje y alta frecuencia. Hay dos tipos principales de ozonizador; el tipo de placa con electrodos planos y dieléctricos de vidrio y el tipo de tubo con electrodos cilíndricos coaxiales con cilindros de dieléctrico de vidrio. El lado de alta tensión se enfría por convección y el lado de baja tensión por agua. El aire pasa entre los electrodos y se ozoniza por la descarga a través del claro de aire. La producción de ozono es normalmente hasta de un 4 % del peso del aire, con una demanda de energía de 25 kWh/kg de ozono producido. El ozono reacciona con la materia orgánica para formar ozónidos en ciertas condiciones y cuya importancia de su presencia en el agua todavía no se entiende completamente.

## **3. Radiación ultravioleta**

Varias formas de radiación se consideran agentes desinfectantes efectivos; la radiación UV se ha venido utilizando por muchos años para el tratamiento de pequeños abastecimientos de agua. La acción desinfectante de la radiación UV en una longitud de onda de cerca de 254 nm es bastante fuerte siempre que los organismos estén efectivamente expuestos a la radiación. Por esta razón, es necesario asegurarse que no haya turbidez y que la dosis se incremente para permitir la absorción de la radiación UV por los compuestos orgánicos presentes en el flujo. El agua que se va a desinfectar fluye entre tubos de descarga de arco de mercurio y tubos reflectores de metal pulido, lo que

dá una desinfección eficiente con un tiempo de retención de unos cuantos segundos, aunque la demanda de energía es más bien alta, de 10 a 20 W/m<sup>3</sup> h. Como ventajas de la desinfección UV se pueden mencionar que no hay formación de sabores y olores, su mantenimiento es mínimo y un control automático sencillo, sin peligro de una sobredosis. Sus desventajas son que no queda ningún residuo y su alto costo.

## **15. TRATAMIENTO TERCIARIO Y RECUPERACION DE AGUA**

Debido a una creciente preocupación por la presencia de sustancias orgánicas solubles no biodegradables, nutrientes inorgánicos, sales y trazas de contaminantes de diferentes tipos en efluentes convencionalmente tratados, existe ahora un gran interés en el tratamiento más avanzado de desechos o en las técnicas para la recuperación del agua. Tales técnicas pueden tener aplicaciones en el control de la reutilización del agua en la industria textil.

### **1. Tratamiento terciario**

La mayoría de las formas de tratamiento terciario que se utilizan, están encaminadas a la remoción de parte del exceso de sólidos suspendidos en el efluente obtenido en instalaciones convencionales bien operadas. El tratamiento terciario debe considerarse como una técnica para mejorar la calidad de un buen efluente y no como un método para tratar de convertir un efluente malo en una descarga de buena calidad. La remoción de sólidos suspendidos de un efluente tiene también una remoción asociada de DBO debido a que la materia ejerce una DBO. Hay evidencia que muestra que con efluentes normales de agua residual, la remoción de 10 ppm de sólidos suspendidos probablemente remueva también cerca de 3 ppm de DBO.

1. Filtración rápida: hay diferentes métodos de tratamiento terciario, pero el que tiene mayor aplicación en instalaciones grandes es el método de filtrado rápido por gravedad. La mayoría de las instalaciones se basan en el filtro de arena de flujo hacia abajo que por muchos años se ha usado en las plantas de tratamiento de agua. También se utilizan con cierto éxito formas más eficientes de filtro, entre las que se incluyen lechos de medios mezclados y unidades de flujo ascendente, pero en muchos casos se adopta la unidad de flujo hacia abajo debido a su simplicidad. La naturaleza variable de los sólidos suspendidos presentes en el efluente de los tanques de sedimentación final hace difícil predecir el rendimiento de cualquier unidad de tratamiento terciario. Debido a la amplia variación en las características de filtrado de la materia suspendida, siempre es aconsejable llevar a cabo pruebas experimentales para cada efluente en particular antes de proseguir con el trabajo de diseño. Generalmente se supone que los filtros rápidos de gravedad que operan a una carga hidráulica de 200 m<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup> día, deben quitar del 65 al 85 % de SS y del 20 al 35 % de DBO de un efluente. Debido al tiempo relativamente corto que pasa entre retrolavados (de 24 a 48 h), hay poca actividad biológica. La carga hidráulica no afecta significativamente la remoción de sólidos suspendidos en variaciones muy amplias y hay poca ventaja si se usa

arena más pequeña que la graduación de 1.0 a 2.0 mm.

2. Filtración lenta: en instalaciones pequeñas algunas veces se emplean filtros de arena lentos para dar tratamiento terciario con cargas de 2 a 5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> día. Los filtros lentos tienen bajos costos de operación y mantenimiento, pero sus requerimientos de área relativamente grandes por lo regular los descartan cuando las instalaciones son pequeñas. Con estos filtros se pueden esperar remociones del 60 al 80% de sólidos suspendidos y del 30 al 50% de DBO. Los filtros lentos se caracterizan por tener actividad biológica importante lo que favorece a la remoción de la DBO.
3. Microfiltración: desde 1948 se han utilizado los microfiltros para el tratamiento terciario y actualmente están en operación en un número considerable de instalaciones. Tienen como ventaja su tamaño pequeño y que se pueden colocar fácilmente bajo techo. Las remociones de sólidos suspendidos y DBO dependen de la trama del tejido que se use y de las características de filtración de la materia suspendida. Las remociones registradas varían de un 35 a un 75% de sólidos suspendidos y del 12 al 50% de DBO. Con la microfiltración se puede obtener con seguridad un efluente de 15 ppm de sólidos suspendidos; es posible que los sólidos suspendidos sean de 10 ppm con un buen efluente del tanque final. Los crecimientos biológicos en el tejido, que podrían causar obstrucción y pérdida excesiva de carga, normalmente se pueden controlar con lámparas UV.
4. Clarificador con flujo ascendente: esta técnica se desarrolló originalmente como un medio para obtener efluentes de mejor calidad de tanques de humus convencionales en instalaciones pequeñas de lecho de bacterias. El proceso se basa en el paso del efluente del tanque a través de una capa de 150 mm de grava de 5 a 10 mm soportada por una placa perforada cerca de la parte superior de un tanque de humus de flujo horizontal con tasas de desbordamiento superficial de 15 a 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>día. El paso a través del lecho de grava causa la floculación de la materia suspendida y el flóculo se sedimenta en la parte superior de la grava. Los sólidos acumulados se remueven en forma intermitente al reducir el nivel del líquido por debajo del lecho de grava. Las remociones son del 30 al 50% de SS, lo que depende del tamaño de la grava y del tipo de sólidos. Se han logrado resultados similares con alambre apretado en lugar de grava y hay evidencia de que se pueden usar muchos tipos de materiales porosos para promover la floculación.
5. Parcelas de pasto: la irrigación de parcelas de pasto puede ser una forma muy efectiva de tratamiento terciario, especialmente adecuado para comunidades pequeñas. El efluente se distribuye sobre un prado y se recolecta en canales en la parte inferior de la parcela. Las cargas hidráulicas deberán estar en el rango de 0.05 a 0.3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>día. De esta forma se pueden lograr remociones del 60 al 90% de sólidos suspendidos y 70% de la DBO. Se prefieren los pastos cortos, pero no parece que haga mucha diferencia la siembra de mezclas especiales. El área deberá dividirse en varias parcelas para tener acceso y cortar el pasto o deshierbar. Es

probable que el crecimiento sea prolífico por los nutrientes presentes en los efluentes.

6. Lagunas: el almacenaje del efluente en lagunas conduce a una combinación de sedimentación y oxidación biológica, lo que depende del tiempo de retención. Cuando el tiempo de retención es corto (2 a 3 días) el efecto de purificación se debe principalmente a la floculación y la sedimentación, con remociones probables de sólidos suspendidos del 30 al 40%. Con tiempos de retención mayores (14 a 21 días), la mejora en la calidad puede ser marcada, con remociones del 75 al 90% de sólidos suspendidos, 50 al 60% de DBO y 99% de coliformes.

Sin embargo, puede haber grandes crecimientos de algas en lagunas más extensas: a veces, el desbordamiento de algas de la laguna puede provocar niveles relativamente altos de sólidos suspendidos y DBO en la descarga final. La mejora en la calidad bacteriológica en las lagunas es mayor que la que se obtiene en todas las otras formas de tratamiento terciario, con la posible excepción de las parcelas de pasto, un tiempo de retención de cerca de 8 días tiene un rendimiento general más satisfactorio ya que es probable que con tiempos de retención más prolongados el crecimiento de algas sea excesivo.

## **2. Recuperación de agua**

Las demandas crecientes de agua requerirán en el futuro nuevas fuentes de abastecimiento, algunas de las cuales serán de una calidad inferior a aquella que se juzgó aceptable en el pasado para ese propósito. En zonas densamente pobladas, gran parte de la demanda creciente tendrá que satisfacerse con extracciones de ríos de tierras bajas que probablemente contendrán proporciones importantes de agua proveniente de efluentes de aguas residuales y de procesos industriales.

La reutilización directa de un efluente de agua residual para cubrir varios requerimientos de agua industrial es ya una práctica aceptada. Esta práctica también sirve para liberar abastecimientos de agua de mejor calidad que de otra manera se usarían industrialmente. El uso del agua residual como una fuente de agua potable es ya técnicamente factible, pero tal uso sería relativamente costoso y tendría objeciones de tipo psicológico de los consumidores. Para que el agua se volviera a utilizar directamente requeriría la adopción de procesos adicionales, principalmente de naturaleza físico-química, que con seguridad serían muy costosos. Es por eso que, la adopción de tales técnicas deberá ser el resultado de un análisis cuidadoso de la relación costo beneficio de su aplicación.

El tratamiento convencional de agua (coagulación, sedimentación, filtración y desinfección) originalmente tuvo como objeto la remoción de sólidos suspendidos y coloidales de aguas junto con el retiro limitado de las sustancias orgánicas solubles que dan el color natural al agua de las cuencas altas. Ciertos constituyentes solubles como los responsables de la dureza se pueden remover por la incorporación de procesos de precipitación o de intercambio iónico. El uso de tales técnicas hace posible la producción de agua aceptable de fuentes con contaminación relativamente fuerte. Sin embargo, se



debe observar que dentro de ciertos límites en los niveles de algunos tipos de impureza, el tratamiento convencional los puede enfrentar satisfactoriamente. No obstante aunque es probable que por la aplicación de procesos de tratamiento convencional haya una mejora marcada en la calidad del efluente de agua residual, parece poco probable en forma regular. Sin embargo, se debe mencionar que la simple coagulación del efluente de agua residual puede producir agua que se considera adecuada para muchos propósitos industriales.

Los comentarios anteriores indican claramente que para obtener un abastecimiento de agua potable saludable de fuentes fuertemente contaminadas, como lo es un efluente de agua residual, el tratamiento convencional por sí solo no es suficiente. Para lograr la calidad final deseada se pueden tomar varios cursos alternos de acción.

1. Establecer etapas adicionales de tratamiento en plantas de agua residual y plantas de tratamiento de agua, o en ambas, para que se manejen los contaminantes que el tratamiento normal no afecta.
2. Dar un tratamiento completamente nuevo al agua residual y al agua cruda.
3. Usar procesos de tratamiento convencional y mezclar el agua tratada con otra agua de más alta calidad para que la mezcla sea de calidad aceptable.
4. Construir una instalación integrada de recuperación de agua.

Las alternativas 3 y 4 son factibles desde un punto de vista tecnológico en la actualidad. El uso de la destilación o de la ósmosis inversa permite la producción de agua aceptable a un costo similar que tendría producir agua dulce a partir de agua de mar. Con tales técnicas se podrían efectuar el reciclado directo del efluente de agua residual, aunque sería necesaria una cierta cantidad de agua para conservar el volumen debido a pérdidas en la instalación.

Las sustancias orgánicas disueltas, que en su mayoría son no biodegradables o tienen descomposición lenta por medios biológicos, se encuentran en los efluentes de agua residual en la forma de muchos compuestos diferentes cuya presencia se indica por valores altos de COT y DQO, con valores relativamente bajos de DBO. Se cree que algunas de las sustancias orgánicas en los efluentes de agua residual son similares a los compuestos que producen color natural en las cuencas altas. Sin embargo, es cierto que otros compuestos orgánicos pueden causar más problemas en el agua, particularmente en relación con la formación de sabores y olores. Es probable que incrementen la demanda de cloro y también se debe considerar sus posibles efectos tóxicos.

El nivel de los sólidos totales es un parámetro vago para la evaluación de la calidad del agua, ya que no da un indicio del origen o naturaleza de las impurezas. Es claro que unas cuantas ppm de ciertos compuestos pueden ser tóxicos, mientras que

varios cientos de ppm de otros compuestos son inofensivos.

## **16. PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA**

En general en cada etapa del proceso productivo textil se generan desechos sólidos como hilos, cortes de tela, materias de empaque, tortas de material floculado, partículas, cenizas y hollín provenientes de los sistemas de generación de vapor.

Uno de los problemas que enfrenta el sector textil en la actualidad, tiene que ver con el uso eficiente y efectivo de materias primas y el destino de los desechos que generan sus actividades económicas. Es porque se requiere un manejo adecuado de los recursos.

Como ya se mencionó, los efluentes generados por el proceso de tintorería representa la mayor fuente de contaminación al medio ambiente, sin embargo estableciendo cambios por medio del uso de buenas prácticas y reformulaciones en su proceso se pueden disminuir en gran medida la cantidad de contaminantes en los vertidos que llegarán a la planta de tratamiento de aguas residuales.

### **1. Ventajas e inconvenientes ambientales de las tecnologías utilizadas en la industria textil**

Al hacer un examen del proceso de producción desde la hilandería hasta el secado y acabado para la obtención de los productos finales se identifican las siguientes ventajas e inconvenientes ambientales.

#### **Ventajas:**

1. La hilandería en la actualidad debe contar con un sistema especializados de extracción de mota, impurezas, polvo, micro polvo, fibra de algodón; estos últimos pueden ser reciclados o vendidos.
2. La hilandería cuentan con sistemas de humidificación que mantiene el clima a 55% de humedad relativa y una temperatura entre 28 a 30 °C, lo que evita que la contaminación por partículas se reduzca.
3. El proceso de teñido se realiza en forma de batch, que tiene la ventaja de procesar pequeños lotes de tela de acuerdo a la demanda del mercado.
4. El proceso de acabado y secado se realiza con aceite térmico el cual es menos contaminante y más eficiente desde el punto de vista energético.

#### **Inconvenientes:**

1. En la hilandería se presenta riesgo de explosión por la carga estática; por lo que se necesita polarizar todas las instalaciones y tener un sistema contra incendios.
2. La alimentación de los colorantes y químicos al momento de ser preparados es manual, lo cual produce pérdidas y derrames, además de riesgos a la salud.
3. Desde el punto de vista ambiental las aguas de los procesos húmedos son altamente contaminantes. Es indispensable contar con plantas de tratamiento de agua.
4. Se genera hollín producto de la combustión en los generadores de vapor.
5. Los niveles de ruido en los departamentos de continuas, coneras y cardado son altos.

## **2. Beneficios de la Producción Más Limpia dentro de la industria textil**

1. Reducción del consumo de materias primas e insumos.
2. Reducción en los costos de operación.
3. Mejorar la calidad de los productos y la eficiencia de los procesos.
4. Disminución de los volúmenes de desechos generados.
5. Mejora de las condiciones de trabajo.
6. Disminución en accidentes de trabajo.
7. Acceso a nuevos mercados.
8. Mejor aceptación por parte de los clientes.

## **3. Alcances al implementar un Programa de Producción Más Limpia dentro de la industria textil**

**Manejo adecuado de desechos:** la compra de insumos implica una gran cantidad de materiales de empaque y embalaje como lo es el plástico, papel, cartón etc. estos pueden ser clasificados, reutilizados o incluso pueden venderse.

**Establecimiento de balances de materia:** consiste en relacionar las entradas y las salidas de los procesos con la finalidad de cuantificar la carga de contaminantes generados en las diversas etapas productivas.

**Documentación de los procesos:** su contribución es el manejo adecuado de todos los procesos, es una descripción sencilla de la forma correcta de realizar las operaciones evitando con esto desperdicios innecesarios.

**Optimización de los productos químicos:** es otra práctica importante en la producción más limpia, una de las formas de reducir los químicos en los efluentes, es el uso de dosificación automática de los productos químicos y los colorantes.

**Manejo de productos:** existe una gran cantidad de colorantes en el mercado, pero una forma de disminuir la carga de contaminantes es haciendo uso de colorantes bireactivos los cuales son más amigables con el medio ambiente, ya que se utilizan menores concentraciones de químicos con respecto a otros colorantes de diversa naturaleza.

**Uso eficiente del agua:** es necesario relacionar el uso del agua por unidad de producción en los procesos de tintorería principalmente. Esto está relacionado con los diferentes ciclos de lavado programados en las máquinas, el uso eficiente del agua conduciría a reducir el volumen de los efluentes; esta práctica podría llegar a reducir un 25% de agua utilizada. Lo anterior se logra implementando una reducción de agua en las operaciones de lavado y un mantenimiento permanente en las tuberías, válvulas, control de derrames, etc. La instalación de medidores de agua en los puntos críticos de alimentación, conducirá a un mejor control del agua utilizada en los procesos.

**Reutilización del agua:** eliminando una buena parte de los contaminantes desde su origen contribuye a que su tratamiento sea más barato, contribuyendo en gran medida al acondicionamiento óptimo para la reutilización.

#### **4. Tecnologías Mas Limpias de tratamiento**

Las investigaciones y desarrollos de tecnologías de tratamiento de aguas conducen a la implementación de soluciones diversas a las diferentes problemáticas que involucran el sector agua, los resultados de diferentes investigaciones arrojan las siguientes conclusiones en relación al desarrollo futuro de tecnologías y aplicaciones de las mismas:

##### **Tratamientos biológicos:**

1. Funcionamiento de los sistemas aerobios y anaerobios de cultivo fijo.
2. Uso de biofiltros.
3. Uso de cultivos termófilos.
4. Eliminación de grasas y aceites.
5. Conocimiento del metabolismo y enzimología de la destrucción de contaminantes complejos.
6. Adición de productos que mejoran la sedimentación de los fangos en sistemas de cultivo en suspensión.
7. Uso de membranas en el seno del reactor de fangos activos aerobio o anaerobio y solución de sus actuales desventajas: ensuciamientos, elevados caudales de circulación, materiales, aireaciones, etc.
8. Inmovilización enzimática.
9. Nitrificación-desnitrificación y eliminación de fósforo.
10. Adición a los fangos de cepas microbianas selectivas.

##### **Tratamientos con membranas:**

1. Recuperación de cromo y cloruro sódico en la industria del curtido.
2. Recuperación de agua de torres de refrigeración, sector minero, textil e industria papelera.
3. Recuperación de nitratos para riego en sistemas de abastecimiento.
4. Recuperación de desengrasantes en baños de recubrimiento de superficies metálicas.

### **Tecnologías de oxidación:**

1. Ozono, como pretratamiento a etapas biológicas y oxidación.
2. Radiación UV.
3. Combinaciones binarias y ternarias de ozono, UV.
4. Fotocatálisis (luz solar o UV).
5. Irradiación con chorro de electrones.
6. Oxidación por vía húmeda.

### **Tecnologías de intercambio iónico:**

Serán de mayor aplicación en sistemas de recuperación de metales y agua sobre efluentes procedentes del sector de acabado de superficies.

### **Tecnologías electroquímicas:**

Además de las ya mencionadas tecnologías de membranas que hacen uso de la electricidad, aparecen numerosas citas que hacen referencia al uso de técnicas como: electrooxidación, electrólisis, electrocoagulación, electroflotación, electroadsorción, etc.

### **Tecnologías de adsorción:**

La búsqueda actual se centra en el uso de productos más económicos y de fácil obtención, con la mínima manipulación o transformación. Algunos ejemplos de materiales objeto de estudio en la actualidad son: arenas modificadas, vermiculita, carbones de cáscara de coco, carbones derivados de residuos textiles, zeolitas, bentonita, sepiolita en combinación con alúmina, carbones combinados con arcillas, arcillas modificadas, etc.

### **Filtros verdes:**

Esta tecnología es un ejemplo del interés por simplificar en muchos casos las soluciones a diversas problemáticas de tratamiento. Esta es una manera de facilitar a la naturaleza que suministre el aporte de energía necesario para llevar a cabo la descontaminación de los efluentes. Las aplicaciones futuras son numerosas, desarrollándose el modelo con efluentes de diferentes procedencias. Como ejemplos se pueden citar: el sector metálico, escorrentías de carreteras y ciudades.

# **2**

## **DETERMINACIONES PRELIMINARES PARA LA CONSTRUCCION Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE AGUA RESIDUAL**

## 1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TEXTIL

Para caracterizar el agua residual de la industria textil es necesario evaluar sus propiedades fisicoquímicas a la entrada de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), los análisis deben ser proporcionados por un laboratorio certificado o en el mejor de los casos los análisis se pueden realizar de forma in situ con equipo especializado ó se puede desarrollar marchas experimentales que sean adecuadas a las normativas reconocidas mundialmente.

### 1. Análisis fisicoquímico del agua residual

Tabla 2.1 Historial de resultados obtenidos a la salida de la PTAR

Análisis	13-08-08	20-11-08	12-03-09	Método de análisis
DQO (ppm O <sub>2</sub> )	455.7	406	143.3	ref.APHA5220C(1)
DBO (ppm O <sub>2</sub> )	78.8	93	48	ref.APHA5210B(1)
Aceites y grasas (ppm)	48.8	35	6.8	Extracción de Hexano(2)
Sulfatos (ppm SO <sub>4</sub> =)	1803	1233.3	1967.6	ref.APHA1963(5)
Sólidos sedimentables (mL/L)	ND	0.1	0.3	ref.APHA2540F(1)
Sólidos suspendidos totales (ppm)	103.4	153.3	64.5	ref.APHA2540D(1)
Color verdadero (Pt-Co)	85.9	808.4	293	ref.APHA2120C(4)
Turbidez (NTU)	86.5	83	33.1	ref.APHA2130B(1)
Detergentes (ppm LAS)	3	1.3	2.7	Azul de metileno(3)

Fuente: Análisis realizados por el laboratorio de ESPINSA, (2008-2009).

<b>ND:</b>	No detectable.	
<b>ppm:</b>	mg/L.	
<b>Metodologías de análisis:</b>	APHA-AWWA-WEF, 1998.	(1)
	EPA, N° 1664,1999	(2)
	ORBECO ANALYTICAL SYSTEMS, INC	(3)
	APHA-AWWA-WPCF, 2005	(4)
	APHA-AWWA-WPCF, 1963	(5)

Los análisis de la tabla 2.1 indican el comportamiento variable de los parámetros que se verifican en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Para la recuperación del agua manejaremos rangos que estén por debajo de la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.49.01:06 de aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor.

### 2. Análisis de metales a la entrada del proceso de tintura

Tabla 2.2 Análisis de metales del agua proveniente de pozo

Análisis	03-02-09	10-03-09	22-04-09	Método de análisis
Hierro total (ppm Fe)	0.01	0.01	ND	ref.APHA3500Fe(1)

Manganeso total (ppm Mn)	ND	ND	ND	periyodato(2)
Arsénico (ppm As)	0.03	0.06	0.01	refAPHA3500As(5)
Cromo (ppm Cr+6)	ND	ND	ND	Difenilcarbazida(4)
Aluminio (ppm Al)	ND	ND	ND	Eriocromo Cianina(5)
Zinc (ppm Zn)	0.03	0.06	0.03	Zincon(6)
Cadmio (ppm Cd)	ND	ND	ND	Ditizona(5)
Calcio (ppm Ca)	33.6	33.9	74.7	refAPHA3500CaB(1)
Magnesio (ppm Mg)	7.1	8.3	36.1	refAPHA3500MgE(1)
Cobre (ppm Cu)	ND	ND	0.04	Bicinchoninate(5)

Fuente: Análisis realizados por el laboratorio de ESPINSA, (2009).

<b>ND:</b>	No detectable.	
<b>ppm:</b>	mg/L.	
<b>Metodologías de análisis:</b>	APHA-AWWA-WEF, 1998.	(1)
	EPA, N° 1664,1999	(2)
	ORBECO ANALYTICAL SYSTEMS, INC	(3)
	APHA-AWWA-WPCF, 2005	(4)
	APHA-AWWA-WPCF, 1963	(5)

Los análisis de metales de la tabla 2.2 indican las cantidades que podrán ser permisibles para los resultados a la salida de la planta de recuperación de aguas.

## 2. DESCRIPCION DE LA PTAR (PLANTA MODELO)

### 1. Cisterna de homogenización

Las aguas que se descargan en esta etapa son vertidos del tipo industrial provenientes del proceso textil; la función de este sistema es la homogenización de todas las acometidas que llegan a la PTAR. Los valores medios de las aguas a tratar en base a los análisis fisicoquímicos realizados a la entrada de la PTAR se describen en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores promedios de parámetros proveniente de la industria textil

Parámetro	Valor promedio
DBO5 (mg/lt)	700
DQO (mg/lt)	1400
Temperatura (°C)	30-32
pH	9.0-9.5
Sólidos suspendidos (mg/lt)	9-100
Sólidos sedimentables (mg/lt)	5-10
Nitrógeno total (mg/lt)	30-40
Nitrógeno amoniacal (mg/lt)	20-30
Fósforo (mg/lt)	3-5
Sólidos disueltos totales (mg/lt)	3500-4000
Color máximo (Pt-Co)	1000-1100
Aceites y grasas (mg/lt)	10



Fuente: Construcción propia, en base a análisis realizados por el laboratorio de ESPINSA, febrero (2008).

## 2. Sistema de flotación C.A.F.

El proceso de flotación es un tratamiento de tipo físico, que tiene como objetivo principal la extracción de los aceites y las grasas no emulsionadas del agua, en general de todas aquellas sustancias de bajo peso específico y de difícil sedimentación, que se encuentran presentes en el líquido que debe ser tratado.

## 3. Tanque de aireación

El tanque de aireación tiene una forma irregular y está equipado con un sistema de aireación de fondo por difusores con membrana, alimentados por un soplador de aire, el cual tiene la finalidad de suministrar oxígeno proveniente del aire cuya capacidad de transferencia es de 1,656 Kg O<sub>2</sub>/día; las especificaciones del equipo se pueden observar en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Especificaciones técnicas del equipo de aireación

Caudal	115 m <sup>3</sup> /h	
Sólidos suspendidos en el reactor	3.33 Kg MS/m <sup>3</sup>	
Carga orgánica total	552 Kg DBO5/día	
Volumen del reactor	1,104 m <sup>3</sup>	
Caudal de recirculación	115 m <sup>3</sup> /h	
Índice volumétrico de lodo	120 ml/g MS	
Producción de lodo	0.15 Kg MS/m <sup>3</sup> día	
Lodo excedente	165.6 Kg MS/día	
Oxígeno necesario	3 Kg O <sub>2</sub> /Kg DBO5	
Oxígeno a mantener en el reactor	2 mg/L	
Tasa de transferencia del aireador	2.5 Kg O <sub>2</sub> /kwh	
Potencia a instalar	45 Hp	

Fuente: Datos obtenidos del manual de operación de la PTAR, empresa tipo (2009).

## 4. Decantador secundario

Esta es básicamente la última etapa del tratamiento que actualmente se utiliza; de aquí se hacen las descargas del agua tratada hacia la canaleta de aguas lluvias.

Tabla 2.5 Especificaciones técnicas del decantador secundario

Caudal de tratamiento	115 m <sup>3</sup> /h	
Área del decantador	124.69 m <sup>2</sup>	
Volumen útil del decantador	420 m <sup>3</sup>	
Tiempo de retención	3.65 h	
Diámetro del decantador	12.6 m	

Fuente: Datos obtenidos del manual de operación de la PTAR, empresa tipo (2009).

## 5. Secado en prensa desaguadora

Los lodos provenientes del decantador secundario se retiran por medio de la prensa desaguadora la cual realiza la deshidratación de los lodos diluídos, produciendo una torta de volumen considerablemente reducido en relación al lodo inicial con una consistencia adecuada para su manipulación y transporte.

El proceso de deshidratación es efectuado en dos etapas. Primeramente se procesa un drenaje por gravedad, removiéndose así gran parte del agua presente en el lodo. Después, es aplicada al lodo remanente una presión positiva continua y progresiva, completándose la deshidratación.

La aplicación de floculantes orgánicos hace posible la formación de copos voluminosos en la masa de lodo a ser filtrada, perfectamente separados del agua intersticial. El lodo a ser secado es distribuido de forma uniforme sobre una telera, orientado por dos conjuntos de rastrillos de barras verticales y por la acción de rodillos se logra una buena compactación.

### **3. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE PRODUCTOS QUÍMICOS EN EL TRATAMIENTO PREVIO A LA RECUPERACIÓN**

Cuando se determinan las cantidades óptimas de productos a utilizar también se evalúan las opciones para mejorar los costos y resultados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). En el mercado existen muchos productos para el tratamiento de agua, pero en nuestro caso se hará uso de los químicos que actualmente se están utilizando en la PTAR de la empresa tipo.

#### **1. Procedimiento de prueba de jarras**

Se realizaron varios ensayos de jarras con muestras tomadas a la entrada de la PTAR en la cisterna de homogenización como se puede apreciar en la figura 2.1; esta es la zona donde se colectan toda las aguas residuales provenientes de los diferentes procesos de la industria textil, evaluando la turbidez y el color tanto de manera cualitativa y cuantitativa.

Los productos probados fueron los siguientes decolorantes: Cat Flocc 8108 Plus (Producto en prueba) y el producto Centerfloc utilizado actualmente en planta en base al siguiente procedimiento:

1. Preparación de soluciones al 5% en volumen de los decolorantes.
2. A partir de la solución al 5% se dosifican en las muestras de agua residual concentraciones que van de 200 a 700 ppm del decolorante.
3. Tiempo de agitación de 5 minutos con una velocidad al 100% del equipo de jarras para su homogenización y mezcla rápida de los químicos.
4. Tiempo de agitación de 5 minutos con una velocidad al 30% del equipo de jarras para dar paso a la coagulación (mezcla lenta).
5. Se apaga el equipo de jarras por 15 minutos para simular el proceso de sedimentación.

#### **2. Resultados obtenidos en ensayo de prueba de jarras**

Durante los ensayos se probaron los decolorantes mencionados anteriormente y algunas combinaciones de estos con sulfato de aluminio, con el objetivo de encontrar la mejor opción costo-efectiva comparando un producto utilizado actualmente y otro por el cual puede ser sustituido para mejorar el rendimiento de la PTAR. A continuación detallamos las diferentes pruebas y sus resultados cualitativos, A pesar de que se realizaron muchas pruebas, en el presente reporte aparecen únicamente las más relevantes.

Figura 2.1 Muestras de agua residual a la  
entrada de la PTAR  
Fuente: Empresa tipo, abril (2009).

- a) Ensayo 1: Se dosificaron distintas dosis de decolorantes a 500 ml de muestra de agua residual (ver figura 2.1). El procedimiento a seguir es el que se describe en la sección 2.3.1. Inicialmente se evaluó el producto Cat Flocc 8108 Plus a 200, 300, 400 y 500 ppm, con los resultados que se observan a continuación en la figura 2.2.

Figura 2.2 Dosificación de Cat Flocc 8108 en  
200, 300, 400 y 500 ppm  
Fuente: Empresa tipo, abril (2009).

En base a los resultados se decide realizar la siguiente evaluación con 450 ppm y 600 ppm de Cat Flocc 8108, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación, en la figura 2.3.

Figura 2.3 Dosificación de Cat Flocc 8108 en  
450 y 600 ppm  
Fuente: Empresa tipo, abril (2009).

- b) Ensayo 2: en la figura 2.4 se presenta el resultado de la aplicación de 700 ppm de Centerfloc, comparados con la muestra original (a la derecha):

Figura 2.4 Dosificación de Centerfloc en 700 ppm (a la izquierda)  
Fuente: Empresa tipo, abril (2009).

c) Ensayo 3: la siguiente evaluación corresponde a 600 ppm de sulfato de aluminio comparado a la muestra original (a la izquierda), ver figura 2.5.

Figura 2.5 Dosificación de sulfato de aluminio en 600 ppm  
Fuente: Empresa tipo, abril (2009).

En la tabla 2.6 se presenta el resumen de las observaciones de los diferentes ensayos, así como los valores de turbidez para algunas de las muestras más representativas.

Tabla 2.6 Cuadro resumen resultado de los diferentes ensayos

Producto	Dosis (ppm)	Observaciones	Turbidez final (NTU)
8108	200	No hay cambio apreciable	-
8108	300	Cambio leve	-
8108	400	Buena sedimentación y reducción de color aceptable.	48.7
8108	450	Buena sedimentación y reducción de color.	24.1
8108	500	Sedimentación lenta, buena reducción de color.	21.6
8108	600	Disminución en sedimentación y reducción de color	26.4
Centerfloc	700	Buena sedimentación y reducción de color.	29
Sulfato de aluminio	600	No hay cambio apreciable	57.5

Fuente: Construcción propia, abril (2009).

Los resultados anteriores muestran una mayor efectividad en la clarificación lograda al emplear el Cat Floc 8108 en dosis entre 450 y 600 ppm, con el óptimo en 450 ppm, donde se obtuvo una turbidez de 24.1 NTU.

La evaluación de Centerfloc produjo una turbidez alta, reportando el óptimo en 700 ppm,

donde se obtuvo una turbidez de 29 NTU.

El ensayo con 600 ppm de sulfato de aluminio no provocó cambio apreciable en el agua.

- d) Ensayo 4: a continuación se evaluaron distintas combinaciones empleando sulfato de aluminio, el decolorante Cat Flocc 8108 Plus y Centerfloc. En la figura 2.6 podemos comparar las diferentes dosis y las mezclas como se indican en la tabla 2.7.

Figura 2.6 Mezclas de polímeros con sulfato de aluminio

Fuente: Empresa tipo, abril (2009).

Tabla 2.7 Dosificación de los diferentes polímeros con sulfato de aluminio

Producto	Dosis (ppm)				
Sulfato de aluminio	100	100	100	100	100
Centerfloc	250	400	-	-	-
Cat Flocc 8108	-	-	250	300	400

Fuente: Construcción propia, abril (2009).

Los mejores resultados se obtienen al emplear 100 ppm de sulfato de aluminio junto con 400 ppm de Cat Flocc 8108. Al emplear 100 ppm de sulfato de aluminio con 400 ppm de Centerfloc no se obtiene un cambio apreciable en el agua.

- e) Ensayo 5: pruebas con polímeros al 1% para una muestra diferente; como se puede observar en la figura 2.7, se representan los valores de color aparente y verdaderos corregidos a un pH de 6.4 como lo indica la tabla 2.8; su objetivo es evaluar la capacidad de los productos bajo las diferentes condiciones cambiantes en la PTAR en cuanto a color, carga de sólidos y contaminantes se refiere.

Figura 2.7 Muestras de agua residual a la entrada de la PTAR

Fuente: Empresa tipo, abril (2009).

Tabla 2.8 Valores iniciales de pH y color

pH	Color aparente	Color verdadero
6.4	1800 Pt-Co	940 Pt-Co

Fuente: Construcción propia, abril (2009).

Figura 2.8 Dosificación de Cat Floc en 200, 300, 400 y 500 ppm

Fuente: Empresa tipo, abril (2009)

.En la figura 2.8 podemos apreciar los resultados de una solución al 1% del producto Cat Floc 8108 Plus a 200, 300, 400 y 500 ppm, con los resultados tabulados en la tabla 2.9.

Tabla 2.9 Resultados de turbidez y color con Cat Floc

	Dosis (ppm)			
Cat Floc 8108	200	300	400	500
Turbidez (NTU)	52	22	14	8
Color aparente (Pt-Co)	>550	436	354	297
Color verdadero (Pt-Co)	233	254	206	202

Fuente: Análisis realizado con equipo DR/890 colorimeter a 420 nm, abril (2009).

La evaluación anterior muestra que se obtiene mayor sedimentación y remoción de color a 500 ppm de 8108. Sin embargo, se obtienen resultados similares a 400 ppm, que se consideran óptimos.

La siguiente evaluación se realizó con el producto Center Floc a 300, 500, 700 y 900 ppm, con los resultados que se presentan a continuación (ver figura 2.9 y tabla 2.10):

Figura 2.9 Dosificación de Centerfloc en 300, 500, 700 y 900 ppm

Fuente: Empresa tipo, abril (2009).

Tabla 2.10 Resultados de turbidez y color con Centerfloc

	Dosis (ppm)			
	300	500	700	900
Centerfloc				
Turbidez (NTU)	77	52	18	11
Color aparente (Pt-Co)	>550	>550	258	172
Color verdadero (Pt-Co)	271	166	91	87

Fuente: Análisis realizado con equipo DR/890 colorímetro a 420 nm, abril (2009).

El resultado observado indica que a 900 ppm de Center Floc se obtiene la mejor sedimentación y remoción de color en la muestra de agua tratada.

f) Ensayo 6: las siguientes evaluaciones corresponden a combinaciones del Cat Floc 8108 y Centerfloc, en las concentraciones indicadas en la tabla 2.11.

Tabla 2.11 Resultados de turbidez y color con mezcla Cat Floc-Centerfloc

Producto	Combinaciones (ppm)			
	1	2	3	4
Centerfloc	200	150	250	100
Turbidez (NTU)	40	33	32	21
Color aparente (Pt-Co)	>550	525	487	415
Color verdadero (Pt-Co)	198	213	177	240

Fuente: Análisis realizado con equipo DR/890 colorímetro a 420 nm, abril (2009).

En conclusión, uno de los objetivos de las tecnologías más limpias implica la sustitución de productos químicos en los diferentes procesos; para este caso en específico el producto en prueba resultó ser más efectivo que el producto que está en línea de operación.

El polímero Cat Floc 8108 por sí solo a una dosis de 450 ppm mostró los mejores resultados cualitativos y cuantitativos de color y turbidez, la mejor combinación se obtuvo al emplear 100 ppm de sulfato de aluminio y 400 ppm de Cat Floc 8108.

Sin embargo, las combinaciones entre polímeros no dieron resultados que se acercaran a los logrados con los coagulantes por separado, quedando la posibilidad de nuevas evaluaciones.

Con la combinación adecuada de productos, podemos mejorar sustancialmente los



resultados en la PTAR a un menor costo de operación comparado con el tratamiento actual.

#### **4. SISTEMA ALTERNATIVO PARA MEJORAR EL TRATAMIENTO EXISTENTE**

##### **1. Sistema de flotación D.A.F.**

El sistema de flotación D.A.F. es un equipo más completo que el C.A.F. El proceso de flotación, si es precedido por una floculación efectuada con sales de hierro o de aluminio, productos desmenuzantes y con una dosificación de polielectrólito, puede remover notablemente un porcentaje de las sustancias en suspensión presentes y con eso una parte de la carga contaminante o sea la DBO<sub>5</sub> y la DQO como se especifica en la tabla 2.13. Para mejorar el rendimiento operativo de la sección de flotación, está prevista la emisión de los siguientes reactivos químicos:

1. Floculante a base de sales de hierro o aluminio.
2. Ácido o soda para la corrección del pH.
3. Polímero aniónico de alto peso molecular para favorecer la agregación de los copos de fango.

Dichos reactivos se preparan en tanques para obtener una buena mezcla además se debe manejar el tiempo suficiente para que se dé un buen contacto entre el agua que debe ser tratada y los reactivos químicos. En el tanque de flotación los copos de fango, los aceites y las grasas libres serán separados mecánicamente del agua a través de la acción de micro burbujas de aire que se liberan en el interior del mismo tanque por medio de la acción de despresurización del agua previamente presurizada.

El proceso provee una primera fase que una parte del agua tratada, que sale del tanque de flotación, sea bombeada con electro-bombas centrífugas a alta presión, mezclada y presurizada con aire a 6 bar, con el objetivo de llevar en solución la mayor cantidad posible de aire. Las micro burbujas causan un lento movimiento ascensional no turbulento, las cuales llevan hacia la superficie grasas y aceites libres, copos de fango y en general las sustancias en suspensión que se encuentran presentes. Las grasas, los aceites y todos los sólidos suspendidos, condensados en la superficie, serán extraídos de forma continua a través de un rascador de tipo cuchara, los cuales se pueden conducir hacia una etapa de deshidratación mecánica. Los copos de fango serán extraídos por gravedad desde el fondo del tanque de flotación y enviados a eliminación junto a los fangos de superficie.

Características principales de la unidad D.A.F.: caudal de trabajo 85 m<sup>3</sup>/h, material de construcción: acero inoxidable AISI 304, forma geométrica: rectangular (ver figura 2.10 y tabla 2.12).

Figura 2.10 Equipo de flotación D.A.F.

Fuente: Proveedor Company, (2008).

Tabla 2.12 Características del equipo de flotación D.A.F.

Caudal diario	2000 m <sup>3</sup> /día
Caudal horario	83.5 m <sup>3</sup> /h
Número de horas de descarga por día	24
Superficie aproximada	16.5 m <sup>2</sup>
Ancho aproximado	3.3 mt.
Largo aproximado	5 mt.
Altura aproximada	2.3 mt.
Tensión de alimentación y frecuencia	60 HZ - 440 V
Potencia total instalada	39.45 kW
Potencia total empleada	18.91 kW
Consumo energético por m <sup>3</sup> de agua	0.212 kWh./m <sup>3</sup>

Fuente: Proveedor Company, (2008).

## 2. Características de las aguas tratadas por el sistema D.A.F.

Tabla 2.13 Valores promedios alcanzados por el sistema D.A.F.

PARAMETRO	VALOR
DBO5 (mg/lt)	<550
DQO (mg/lt)	<1200
Temperatura (°C)	30-32
pH	7.0-8.0
Sólidos suspendidos (mg/lt)	<10
Sólidos sedimentables (ml/lt)	1
Nitrógeno total (mg/lt)	30-40
Nitrógeno amoniacal (mg/lt)	20-30
Fósforo (mg/lt)	5-10
Sólidos disueltos totales (mg/lt)	3500-4000
Color máximo (Pt-Co)	<600
Aceites y grasas (mg/lt)	<1

Fuente: Proveedor Company, (2008).

Durante el ciclo depurativo serán empleados los siguientes aditivos químicos:

1. Ácido sulfúrico, para la corrección del pH.
2. Floculante y coagulante para aumentar el rendimiento del proceso de flotación.

## 3. Tratamiento biológico con Kaldnes

Los objetivos que se logran con las instalaciones de tratamiento biológico descrito a continuación son múltiples y pueden resumirse en los siguientes puntos principales:

1. Reducción de costos, obtenidos a través de la adopción de tecnologías que operan a bajos consumos energéticos con equipos automatizados capaces de rendir con la mínima demanda de mano de obra para la gestión de la instalación.
2. Eficiencia constante debido a la aplicación de equipos y materiales de alta calidad y larga vida.
3. Flexibilidad de la instalación, es decir la capacidad de adaptarse a variaciones de las cargas hidráulicas y orgánicas de ingreso.
4. Facilidad y simplicidad en su manejo.

La instalación de depuración biológica de vertidos, está constituida por dos líneas, unidas desde el punto de vista funcional: la línea de líquido residual y la línea de fangos.

Línea de líquido residual:

1. Cribado.
2. Acumulación, homogenización.
3. Neutralización.
4. Dosificación de sales nutritivas.
5. Oxidación biológica con Kaldnes.
6. Sedimentación.

Línea fangos

1. Extracción fangos en exceso.
2. Almacenaje, espesamiento y secado.

#### **4. Línea líquido residual**

##### **1. Cribado**

Separa los sólidos gruesos y medios-finos a la entrada de la PTAR, evitando de este modo la sedimentación de los mismos en las fases sucesivas y episodios de atascamientos en las maquinarias (bombas, mixers, etc.).

En todos estos equipos la rejilla está realizada en acero inoxidable y con materiales aptos para estar constantemente en contacto con el agua sin sufrir corrosiones.

Los sólidos se separan del agua y se recolectan en contenedores apropiados que deben ser periódicamente vaciados.

La limpieza de la superficie de la rejilla es continua y automática, se realiza por medio de cepillos, peines o chorro de agua a presión en contracorriente. Estas máquinas están comandadas por temporizadores, pausa y trabajo que se puede establecer con sensores de nivel. En el caso de las rejillas estáticas la limpieza es manual.

##### **2. Acumulación, homogenización**

El líquido residual se debe acumular en un tanque especial en donde es mezclado adecuadamente para poder lograr un óptimo grado de homogeneidad capaz de obtener una distribución de las características fisicoquímicas en el interior de la masa lo más equitativamente posible. El objetivo es alimentar el tanque de oxidación lo más uniforme posible para proceder correctamente a la realización de oxidación que allí se produce. La mezcla evita además la formación de sedimentaciones indeseadas ya que pueden iniciar en este caso fenómenos anaerobios y comprometer seriamente las fases sucesivas del proceso.

En el tanque de homogenización se procede a una moderada oxidación a través de un sistema bomba-eyector u otro sistema, con el objetivo de predisponer de la biomasa a la fase sucesiva de intensa aireación y para evitar malos olores. La alimentación a la fase biológica sucesiva está asegurada por una bomba que transporta el agua acumulada, asegurando un aporte constante y balanceado al tanque de oxidación. Este tipo de alimentación continua permite que la oxidación sea de manera constante, favoreciendo así que la relación de descarga  $DBO_5/SST$  quede invariante y además contribuye a que los tiempos de permanencia medios se cumplan.

### **3. Neutralización**

La fase de neutralización ocurre debido a la amplia gama de pH en las aguas residuales. La oxidación biológica necesita un potencial de hidrógeno neutro o ligeramente alcalino para su correcto funcionamiento.

La neutralización es realizada automáticamente dosificando soda o ácido sulfúrico, dependiendo de las características de las aguas residuales, utilizando bombas dosificadoras y un medidor de pH equipado con mandos de señal analógica.

Las bombas toman los reactivos de los tanques de almacenaje de una capacidad conveniente.

Su principio es automático garantizando un potencial de hidrógeno entre 7 y 8, de las aguas de alimentación al reactor biológico

La medida de pH es realizada por medio de una sonda, equipada de un potenciómetro, de fácil calibración.

### **4. Dosificación de sales nutritivas**

Las aguas residuales provenientes de industrias carecen a veces en su composición química de algunos alimentos que se requieren para la supervivencia de las bacterias, por esta razón es necesario instalar un sistema para dosificar esos alimentos.

### **5. Oxidación biológica**

Constituye el corazón de la instalación. En ésta efectuamos el llamado “proceso de fangos activos” mediante el cual logramos eliminar las sustancias orgánicas e inorgánicas ya sean en suspensión o disueltas.

El principio se basa sobre la utilización de la flora bacteriológica aeróbica naturalmente presente en el líquido residual, la cual posee tres características fundamentales:

1. Cumple el propio ciclo vital metabolizando las sustancias orgánicas.
2. Se reproduce con un crecimiento rapidísimo.
3. Tiende a vivir y a formar colonias.

El metabolismo que permite a las bacterias asimilar y transformar las sustancias orgánicas se efectúa utilizando el oxígeno como comburente. Los productos finales de dichas transformaciones son  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{O}$  y la nueva vida bacteriológica.

El oxígeno, en parte será aquel que ya se encuentra presente en forma natural en el líquido residual y en parte aquel que conduciremos desde el exterior introduciendo en modo oportuno y continuo aire en la biomasa. De este modo aceleramos el proceso biológico natural, que de otra forma necesitaría de tiempos mucho más largos y por lo tanto inaceptables. La alimentación con oxígeno del aire hace que las bacterias se multipliquen con una velocidad muy alta, se reúnan en colonias y se agreguen en “copos”. En éstos se concentran protoplasma celular derivado del proceso de síntesis orgánica cumplido por las bacterias, sustancias orgánicas metabolizadas y sustancias orgánicas residuales del ciclo vital de las mismas bacterias. Luego sobre los copos se adhieren por un fenómeno de absorción, sustancias orgánicas e inorgánicas no separables de otro modo.

Los copos de fango adquieren de este modo dos características:

1. Sedimentabilidad.
2. Alta concentración de sustancia activa, de la cual deriva el término “copo de fango activo”.

El líquido residual es alimentado con aire a través de un sistema constituido por dos elementos fundamentales:

1. Un manto de difusores con disco a membrana, con redes de tuberías y accesorios los cuales yacen sobre el fondo del tanque que produce finas burbujas.
2. Una estación de compresión de aire, en la cual trabajan compresores volumétricos o centrífugos.

Dicho sistema es el más eficiente desde el punto de vista de la transferencia de oxígeno y por lo tanto resulta ser energéticamente el que dá menos costos. Lo anterior resulta ser muy importante desde el punto de vista en que el sector de oxidación es aquel en el cual se concentra el mayor consumo energético de toda la instalación.

### **6. Oxidación biológica MBBR (MOVING BED BIOFILM REACTOR) con Kaldnes**

Un reactor de lodos biológicos con movimiento de cama ha sido desarrollado por una empresa noruega (Kaldnes) el cual se puede observar en la figura 2.11. El proceso consiste en añadir pequeños cuerpos de polietileno figura 2.12 con forma cilíndrica (con una densidad específica de  $0.96 \text{ g/cm}^3$ ) en reactores aireados o no aireados para

fomentar el crecimiento de los lodos. Los cuerpos de polietileno son de aproximadamente diez milímetros de diámetro y siete milímetros de altura con una especie de cruz interior en el cilindro y aletas longitudinales en el exterior.

Los cuerpos de polietileno son mantenidos en el reactor por medio de una placa perforada (ranuras de 5x25 mm.) en la salida del tanque. El aire es aplicado por medio de sopladores para que éste circule de una manera continua en el paquete laminar.

El paquete laminar puede llegar a llenar del 25 al 50 por ciento del volumen del tanque. El área específica del volumen del paquete laminar es de  $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$  del volumen total. El paquete laminar no requiere ninguna corriente de retorno de lodos activados o retro lavado.

Este proceso de paquete laminar provee una ventaja para la mejora de la planta al reducir la carga de sólidos en reactores biológicos existentes.

La presencia del material empacado previene el uso de mayor equipamiento para el proceso de aireamiento, el cual requeriría un drenado periódico del mismo y la desinstalación de los paquetes laminares para limpieza de los difusores de aire, este tipo de mantenimiento se lleva a cabo aproximadamente cada 5 años.

Figura 2.11 Reactor biológico con Kaldnes  
Fuente: Proveedor Company, (2008).

Figura 2.12 Cuerpos de polietileno

del reactor biológico Kaldnes  
Fuente: Proveedor Company, (2008).

## **7. Sedimentación**

El sedimentador es una balsa oportunamente realizada para tener las justas condiciones de quietud para permitir la sedimentación de los flóculos de lodos. Las paredes inferiores del decantador, son realizadas en forma cónica, para permitir que los lodos se precipiten en un pozuelo de recolección mientras el agua superficial decantada sale del sedimentador sin lodos biológicos, lista para ser descargada en el ambiente en el pleno respeto de las leyes vigentes. En muchos casos puede ser enviada a una fase de recuperación (filtración) y volverse a utilizar en el proceso productivo.

Figura 2.13 Instalación de paquetes lamelares  
en los clarificadores

Fuente: Proveedor Company, (2008).

La implementación de los paquetes lamelares en los decantadores circulares, ofrecen la ventaja de aumentar el área de sedimentación hasta 11 m<sup>2</sup> por m<sup>3</sup> de paquete lamelar instalado; el volumen total necesario de paquetes lamelares, es calculado de acuerdo a la velocidad de descarga de un decantador a sección circular convencional, lo cual es de 0.30 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> hora. Esta tecnología es adoptada cuando se requiere de una ampliación de la planta de tratamiento de agua residual y no se cuenta con el espacio suficiente para construir otro decantador adicional, y al mismo tiempo reduce notablemente el costo de inversión, ya que no se requiere de obra civil.

## **5. LÍNEA DE FANGOS**

### **1. Recirculación y extracción de los fangos**

Asume particular importancia la operación de recirculación del fango decantado. Este es retirado del pozo de recolección del decantador siendo introducido continuamente mediante electro bombas en el reactor biológico.

Dicho reciclo constituye una ulterior fuente de equilibrio de la masa bacteriana, permitiendo un crecimiento regular e intenso independientemente del contenido en sustancias biodegradables del líquido residual de ingreso en el tanque de oxidación. Durante la fase inicial de la instalación, será necesario incrementar rápidamente la flora bacteriana, el fango se reciclará completamente. Una vez que la instalación haya alcanzado una satisfactoria condición de régimen, gran parte del fango será reciclado mientras que el resto, fangos en exceso, será destinado a ser tratado y espesado con distintos métodos antes de ser descargado en los vertederos controlados. Las electro bombas usadas para el reciclo pueden ser empleadas también para la extracción periódica de los fangos.

## 2. Almacenaje y espesamiento

Los fangos en exceso, no pudiendo ser eliminados directamente en el ambiente, deben sufrir un tratamiento de compactación (lecho de desecación, filtro prensa u otro medio ver tabla 2.14).

Tabla 2.14 Características del sistema biológico con Kaldnes

Caudal diario	4000 m <sup>3</sup> /día	
Caudal horario	166.6 m <sup>3</sup> /h	
Número de horas de descarga por día	24	
Nº de tanques punto de colecta	1 Existente	
Volumen del tanque punto de colecta	19 m <sup>3</sup>	
Altura del nivel del agua	2 m <sup>3</sup>	
Tiempo de retención	0.11 horas	
Nº de tanques homogenización	1 Existente	
Volumen del tanque de homogenización	260 m <sup>3</sup>	
Altura nivel de agua	6.5 m	
Tiempo de retención	1.58 horas	
Nº de tanques homogenización	1 Existente	
Volumen total tanques oxidación	660 m <sup>3</sup>	
Altura nivel de agua	6.4 m	
Tiempo de retención	4 horas	
Nº de sedimentadores	1 Existente	
Diámetro del sedimentador	12.6 m	
Área de sedimentación	556 m <sup>2</sup>	
Velocidad de descarga	0.3 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	
Caudal de aire necesario	2800 m <sup>3</sup> /h	
Oxígeno realmente cedido al líquido residual	115 Kg/h	
Tensión de alimentación y frecuencia	60 Hz - 440 V	



Potencia total instalada	71.62 kW
Potencia total empleada	39.18 kW
Consumo energético por m3 de agua	0.234 kWh./m <sup>3</sup>

Fuente: Proveedor Company, (2008).

Para lograr la degradación orgánica con un tiempo de retención de 4.0 horas, el reactor biológico será llenado por un 30% aproximadamente de cuerpo de llenado Kaldnes.

### 3. Características de las aguas a tratar por el proceso biológico

Los valores medios de las aguas a tratar resultado de los análisis realizados en la PTAR, han proporcionado los siguientes valores de los parámetros característicos (ver tabla 2.15).

Tabla 2.15 Valores promedios de parámetros a tratar en la industria textil

Parámetro	Valor
DBO5 (mg/lt)	550
DQO (mg/lt)	1200
Temperatura (°C)	60-62
pH	7.0-8.0
Sólidos suspendidos (mg/lt)	10
Sólidos sedimentables (ml/lt)	1
Nitrógeno total (mg/lt)	30-40
Nitrógeno amoniacal (mg/lt)	20-30
Fósforo (mg/lt)	5-10
Sólidos disueltos totales (mg/lt)	3500-4000
Color máximo (Pt-Co)	600
Aceites y grasas (mg/lt)	1

Fuente: Construcción propia, (2009).

### 4. Características de las aguas tratadas por el proceso biológico

Haciendo referencia a instalaciones análogas ya operativas y construidas, los parámetros medios, a la salida de la instalación biológica, pueden ser clasificados de la siguiente manera (ver tabla 2.16).

Tabla 2.16 Valores promedios de parámetros proveniente de la industria textil

Parámetro	Valor
DBO5 (mg/lt)	<75
DQO (mg/lt)	<150
Temperatura (°C)	25-35
pH	7.0-8.0
Sólidos suspendidos (mg/lt)	<5
Sólidos sedimentables (ml/lt)	0.1
Nitrógeno total (mg/lt)	6-12
Nitrógeno amoniacal (mg/lt)	2-4
Fósforo (mg/lt)	3-5
Sólidos disueltos totales (mg/lt)	5000-5500
Color máximo (Pt-Co)	<200
Aceites y grasas (mg/lt)	<1

Fuente: Construcción propia, (2009).

Durante el ciclo depurativo serán empleados los siguientes aditivos químicos:

1. Ácido sulfúrico, para la corrección del pH.
2. Hipoclorito de sodio, para la eliminación de la eventual formación de filamentos.
3. Antiespumante, en caso de presencia de espuma en el reactor biológico.
4. Polielectrolito, para aumentar el peso molecular de los lodos en el tanque espesador.
5. Sales nutritivas para mejorar las características químicas de las aguas residuales.

Como podemos observar en la tabla 2.16, la calidad del agua que se obtiene después del tratamiento biológico, cuenta con las características fisicoquímicas necesarias para poder descargarse al medio ambiente de acuerdo a las normas vigentes.

### 5. Nastro prensa

La nastro prensa es un equipo compacto para la deshidratación de los lodos, equipado con una doble banda diseñada para concentrar el lodo de diversa naturaleza, por medio de la compresión progresiva entre dos correas permeables.

El lodo líquido es acondicionado previamente agregando los productos químicos (polímeros) para obtener una separación neta entre la fase líquida y la sólida (floculación).

Esta operación se realiza en un tanque mezclador con un agitador a velocidad variable. Una vez que los lodos estén floculados, se descargan por la parte superior del tanque y son transportados por el canal de alimentación.

El sistema es totalmente automático y de ciclo continuo, gracias a un sistema de limpieza por medio de agua a presión la cual mantiene las bandas de filtración limpias.

Figura 2.14 Equipo para deshidratación de lodos.  
Fuente: Proveedor Company, (2008).

## 5. SISTEMA DE FILTRACIÓN SOBRE CUARZO

Para la recuperación de aguas y en cualquier tipo de sistema, la primera fase es siempre la filtración sobre un lecho de arena y cuyo objetivo es la eliminación de las sustancias en suspensión presentes en el agua.

Los materiales más usados para el lecho filtrantes son arena y grava, las dos de origen de cuarzo. Durante el ejercicio, las sustancias retenidas en el lecho, provocan un aumento de cargas y cuando este alcanza el valor prefijado por el operador, es necesario proceder al lavado en contracorriente con agua filtrada para eliminar dichas sustancias del filtro.

Teniendo en cuenta que el material filtrante es más bien pesado, un lavado en contracorriente, generalmente no es suficiente para levantarlo y consentir una buena limpieza de cada gránulo. Es por esta razón que normalmente se recurre al lavado en contracorriente con aire y agua. La velocidad del agua de contralavado y aire va de 10 a 20 m/h, para el contralavado con una introducción de 50 m<sup>3</sup>/h de aire a presión por metro cuadrado de superficie filtrante.

Un material filtrante con la correcta granulometría garantiza una buena filtración, pero hace necesario frecuentes interrupciones del ejercicio para el lavado en contracorriente.

Como consecuencia, filtros de este tipo, tienen un ciclo de ejercicio más bien breve, sobre todo en presencia de fangos; el uso de material filtrante de granulometría gruesa garantiza ciclos de ejercicios más largos, pero al mismo tiempo suministra agua filtrada menos limpia.

La eficiencia de un filtro, depende largamente de una buena distribución del agua en la entrada, como también del agua y del aire del lavado en contracorriente y de un drenaje homogéneo en cada punto de la superficie filtrante. En los filtros a presión, la mejor distribución del agua de retrolavado se obtiene con el uso de un fondo doble. La lámina superior de doble fondo está dotada al menos de 40-50 boquillas filtrantes por metro cuadrado para que pase el agua y retenga el material filtrante. Las fisuras de dichas boquillas, realizadas en polipropileno, son normalmente de 0.25 mm., es decir, inferior a las dimensiones del más pequeño grano de arena.

La eficiencia de este tipo de filtración, constituida por las dimensiones de las partículas que se logran eliminar, puede alcanzar los 100 micrones.

Las operaciones del lavado, en las instalaciones de una cierta dimensión, están divididas en el siguiente modo:

- A) Contra lavado con aire a través de un soplador (aproximadamente 15 minutos).
- B) Contra lavado aire + agua filtrada (aproximadamente 15 minutos).
- C) Contra lavado con agua sola (aproximadamente 15 minutos).
- D) Enjuague en corriente (aproximadamente 15 minutos).

En caso de filtros de pequeñas dimensiones, es posible efectuar el lavado sin soplador,

haciendo uso solamente del agua filtrada.

## 6. SISTEMA DE RECUPERACIÓN CON RESINA

La segunda fase del proceso está constituida por una filtración sobre resinas aniónicas débiles; la cual se lleva a cabo sobre filtros muy similares a los de cuarzo, pero con algunas diferencias.

### 1. Intercambiadores de iones

Los intercambiadores de iones (o resinas de intercambio iónico) están constituidos por copolímeros sintéticos modificados químicamente. La presencia de grupos iónicos en la matriz polimérica condiciona las actividades de intercambio hacia los iones presentes en las soluciones acuosas con las cuales éstos son puestos en contacto.

La estructura específica del grupo iónico determina la subdivisión de los intercambiadores en las siguientes clases principales:

- a) Intercambiadores catiónicos fuertemente ácidos caracterizados por grupos funcionales sulfónicos  $-\text{SO}_3^-$ .
- b) Intercambiadores catiónicos débilmente ácidos caracterizados por grupos carboxílicos  $-\text{COOH}$ .
- c) Intercambiadores aniónicos fuertemente básicos caracterizados por grupos cuaternarios: de tipo I  $-\text{CH}_2-\text{N}(\text{CH}_3)_3$ , de tipo II  $-\text{CH}_2-\text{N}(\text{CH}_3)_2$ ,  
$$\begin{array}{c} | \\ \text{CH}_2-\text{CH}_2\text{OH} \end{array}$$
- d) Intercambiadores aniónicos débilmente básicos caracterizados por grupos amínicos  $\text{CH}_2-\text{N}(\text{R}_2)$

### 2. Características de los intercambiadores aniónicos débiles

La función de tales intercambiadores utilizados de forma amínica, con regeneración alcalina, es aquella que fija aniones de ácidos libres fuertes. En este caso el control del efluente se realiza midiendo analíticamente la acidez libre residual titulable y la conductibilidad electrolítica.

La función de estos intercambiadores en forma salificada (por ejemplo  $\text{Cl}^-$ ) es aquella de fijar selectivamente aniones dotados de afinidad hacia los intercambiadores. El control del efluente se conduce midiendo la concentración residual del anión que se pretende eliminar por intercambio selectivo. En este caso la regeneración se efectúa a través de una solución de soda cáustica seguida por un lavado y por una salificación en la forma deseada mediante, una solución de  $\text{NaCl}$ .

El empleo de  $\text{NaOH}$  como regenerante facilita la re-elución de sustancias orgánicas absorbidas durante el ciclo de agotamiento.

El intercambiador, gracias a sus características de porosidad estructural permite efectivamente fijar sustancias orgánicas de elevado peso molecular presentes en el agua que debe ser tratada.

## **7. DISEÑO DEL SISTEMA DE FILTRACION E INTERCAMBIO IONICO A ESCALA DE LABORATORIO**

Los recursos para la elaboración del sistema en su mayoría son accesorios de PVC y plástico, los cuales resultan ser muy económicos para fines demostrativos. El esquema general del sistema de recuperación de agua residual se representa en la figura 2.15.

Figura 2.15 Esquema del sistema de recuperación de agua  
Fuente: Construcción propia, (2009).

- a. Tanque:** es un recipiente plástico con capacidad de almacenar un volumen de un poco más de 5 litros, conforma el cuerpo principal del sistema de filtración e intercambio iónico en donde su interior se encuentra ya sea el material filtrante o de intercambio iónico (ver figura 2.16).

Figura 2.16 Vista frontal del tanque

Fuente: Construcción propia, (2009).

- b. Rejilla:** está formada de acero inoxidable, se encuentra ubicada en el fondo de los tanques para evitar la pérdida del material de relleno en la descarga del agua tratada por el sistema de recuperación (ver figura 2.17).

Figura 2.17 Rejilla para la retención del lecho en los tanques

Fuente: Construcción propia, (2009).

- c. Accesorios de PVC:** toda la red de tuberías y empalmes por donde se transporta el fluido tratado es de PVC debido a que es de fácil manipulación y resulta ser el más indicado; dentro de estos tenemos codos a 90°, tee, adaptadores machos y hembras, reductores bushing y uniones universales (ver figura 2.18).

Figura 2.18 Accesorios de PVC

Fuente: Construcción propia, (2009).

- d. Válvulas:** este accesorio juega una parte esencial en el sistema ya que con ellas se puede entrar en el ciclo de recuperación de agua, ciclo de retrolavado ó ciclo de regeneración de resina (ver figura 2.19).

Figura 2.19 Válvulas de control  
 Fuente: Construcción propia, (2009).

**e. Material de relleno:** conforma el corazón del sistema de filtración como lo es también del sistema de intercambio iónico; para el filtro se utilizó arena silíceo con la cual se pretende eliminar en su mayoría los sólidos suspendidos presentes en el efluente y con la resina eliminar el color (ver figura 2.20).

Figura 2.20 Material de relleno  
 Fuente: Construcción propia, (2009).

### 1. Manejo del sistema de recuperación de agua a escala de laboratorio

Basados en la figura 2.15 las diferentes operaciones que puede realizar el equipo de recuperación son (ver tablas 2.17, 2.18, 2.19, 2.20 y 2.21):

Tabla 2.17 Operación de filtración

Válvulas	Estado
V1	Abierta
V2	Cerrada
V3	Cerrada
V4	Cerrada
V5	Cerrada
V6	Abierta
V7	Abierta

Fuente: Construcción propia, (2009).

Tabla 2.18 Operación de intercambio iónico

Válvulas	Estado
V1	Cerrada
V2	Cerrada
V3	Abierta
V4	Abierta
V5	Cerrada
V6	Cerrada
V7	Abierta

Fuente: Construcción propia, (2009).

Tabla 2.19 Operación de filtrado e intercambio iónico

Válvulas	Estado
V1	Abierta
V2	Cerrada
V3	Cerrada
V4	Abierta
V5	Cerrada
V6	Cerrada
V7	Abierta

Fuente: Construcción propia, (2009).

Tabla 2.20 Operación de retrolavado de filtro

Válvulas	Estado
V1	Cerrada
V2	Abierta
V3	Abierta
V4	Cerrada
V5	Cerrada
V6	Cerrada
V7	Cerrada

Fuente: Construcción propia, (2009).

Tabla 2.21 Operación de regeneración de resina

Válvulas	Estado
V1	Cerrada
V2	Cerrada
V3	Abierta
V4	Cerrada
V5	Abierta
V6	Abierta
V7	Cerrada

Fuente: Construcción propia, (2009).

## 8. APLICACIONES, ELIMINACION DEL COLOR

Las características peculiares de esta resina, se adaptan particularmente a las aplicaciones de procesos en los cuales se quiera obtener la eliminación del color del agua o de otras soluciones.

El caso particular que a nosotros nos interesa es eliminar el color de las descargas de tintorería para que puedan ser reutilizadas en los baños de tintura o en los lavados, enjuagues, limpieza de máquinas y otros.

Este tipo de proceso se realiza según una cinética de reacción que sigue un mecanismo mixto de absorción e intercambio iónico: las moléculas de color, efectivamente, en parte son absorbidas en el retículo poroso del intercambiador y en parte fijadas a los grupos iónicos funcionales (base libre o anión de ácido fuerte).

Pruebas experimentales realizadas en plantas pilotos de recuperación con resinas han



llevado a perfeccionar este proceso, permitiéndonos detectar las condiciones óptimas, por ejemplo la velocidad de flujo y el tiempo de contacto, como de regeneración (fase, concentración y tipos de regenerantes).

Naturalmente la eficiencia de las resinas en la eliminación del color como para el intercambio iónico varía en función de las características fisicoquímicas del agua que debe ser tratada; los resultados obtenidos son sintetizados en las características de aguas tratadas por el sistema de recuperación sobre resina, los cuales mencionamos más adelante.

## **9. FACTORES QUE DETERMINAN EL CICLO DE TRABAJO Y CALIDAD DEL AGUA TRATADA**

Los factores que determinan la duración del ciclo y la calidad del agua tratada, además de un correcto procedimiento de regeneración son los siguientes:

1. DQO (Demanda Química de Oxígeno): la DQO es absorbida en parte por la resina y por lo tanto contribuye a la saturación de la resina y ejercita una acción de competencia respecto al color. Un aumento de DQO determina una disminución del ciclo y puede provocar un aumento de la cantidad de color en el agua tratada. Se considera como límite máximo para la DQO en el agua que debe ser tratada con resina el valor de 400 mg/l.; dicho valor siendo muy elevado puede provocar problemas durante las fases de reutilización del agua y por lo tanto desaconsejado para la recuperación. Cuando se tienen valores altos de DQO en ingreso a la planta de recuperación es necesario optimizar el funcionamiento de la planta de tratamiento biológico llevando los valores a los niveles normalmente obtenibles (100 – 120 mg/l).
2. Color: obviamente también las concentraciones de color presentes en el agua que deben ser tratadas determina una disminución del ciclo. Teniendo en cuenta los distintos tipos de colorantes utilizados en los procesos de tintura, tanto la disminución del ciclo como la cantidad de color dejado en el agua tratada es variable: se puede establecer que un valor de 500 unidades Pt-Co en el agua que debe ser tratada con una cantidad de color a la salida al filtro de resina igual a 50 – 80 unidades Pt-Co, como valor medio en el ciclo; la finalización del ciclo está determinada por la cantidad máxima aceptable de color en el agua que debe ser reciclada. El abatimiento del color debe ser efectuado y obtenido ya sea en la planta de tratamiento biológico antes de la salida del decantador, utilizando los oportunos productos correctamente dosificados. En este punto es necesario precisar que es preferible producir la eliminación física de la molécula de color y no solamente la eliminación de tipo colorimétrica; en este último caso, efectivamente, se modifica solamente su estructura molecular y por lo tanto la interacción con las radiaciones luminosas, como por ejemplo sucede en el caso de la ozonificación o se podría dosificar hidrosulfito de sodio o hipoclorito de sodio. La eliminación colorimétrica y no física de las moléculas del color provoca como resultado final la presencia constante de la molécula en el agua

recuperada. Asimismo, si la molécula ha sido oxidada y aparentemente no produce un efecto visual del color, su presencia puede provocar alteraciones en las operaciones sucesivas, por ejemplo cuando entre en contacto con sustratos textiles y se active nuevamente la molécula de color. La eliminación física de la molécula, como sucede con las resinas igual que usando carbón activado, evita que se presenten interferencias sucesivas en la reutilización del agua después de la eliminación de la fuente del problema. Un ulterior abatimiento del color de ser necesario puede ser efectuado en el filtro de cuarzo colocado antes del filtro de resinas dosificando un decolorante en cantidades tales de optimizar el abatimiento del color bajo forma de sal insoluble, y por consiguiente modificando la frecuencia de los lavados del mismo filtro; es preferible y más barato lavar el filtro de cuarzo cuatro o cinco veces por día, lo que alarga en manera apreciable el ciclo del filtro de resinas.

3. pH: un pH alcalino influye negativamente sobre el abatimiento del color. Normalmente el filtro de resinas debe trabajar a valores de pH absolutamente neutro: ya a pH 8–8.5 se evidencia un aumento del valor de unidades de Pt-Co en el agua tratada y es necesario proceder a una regeneración reducida utilizando una solución ácida. El ciclo de regeneración reducida puede ser automáticamente accionada con la superación del valor de pH establecido en función de la fuga de color. Es posible efectuar dos regeneraciones reducidas antes de la finalización del ciclo de trabajo.
4. Salinidad: también la salinidad influye sobre la calidad del agua tratada, la cinética de reacciones de eliminación del color se reconduce a un mecanismo mixto de absorción – intercambio iónico con prevalencia en la absorción; ya en caso de presentar una salinidad superior a 1000 ppm inicia un fenómeno de re-elución del color debido al antagonismo con la reacción de intercambio iónico debida a la concentración de aniones de ácidos fuertes como los cloruros y los sulfatos. Normalmente el agua que debe ser tratada en este tipo de aplicación tiene una salinidad media de 2000 ppm. Obviamente una concentración mayor de sales tiene efectos de empeoramiento de la eficiencia de la eliminación del color a cargo de la misma resina y se reduce sensiblemente el ciclo de trabajo. La salinidad del agua que debe ser tratada se estabiliza en el valor medio de alrededor de 2000 ppm cuando se atienden a los porcentajes de recuperación alrededor del 50% respecto al agua tratada por la planta biológica.

# **3**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA RESIDUAL**

## 1. DESARROLLO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO A ESCALA DE LABORATORIO

El diseño del experimento en pocas palabras es la planificación de lo que se pretende realizar, en donde se recolecta una serie de datos los cuales los traduciremos a información pertinente al problema que se tiene bajo investigación haciendo uso de técnicas estadísticas para su debida interpretación.

## 2. TERMINOS ESTADISTICOS DE IMPORTANCIA

En los análisis estadísticos de muchos experimentos es frecuente escuchar términos como la media y desviación estándar de la muestra, estos términos se describen a continuación:

- a) Media: es la medida de tendencia central más utilizada conocida también comúnmente como media aritmética ó promedio, es el resultado de sumar todas las medidas o datos dividido entre el número de medidas realizadas como se describe en la ecuación 3.1.



Ecuación (3.1)

En donde:



Media de la muestra.



Valores que componen el conjunto de datos.

$N$  = Número de medidas realizadas por el experimentador.

- b) Precisión: indica la capacidad de reproducción de una medida, en general para determinar la precisión de un conjunto de datos replicados, se describe por medidas de dispersión, dentro de ellas se encuentra la desviación estándar, varianza y coeficiente de variación, estos tres términos dan información de cuanto difiere la media de un resultado  $x_i$ , lo que se llama desviación de la media  $d_i$ .

Ecuación (3.2).

c) Exactitud: indica la cercanía de la medida al valor verdadero y se expresa por medio del error, el cual puede ser absoluto (ecuación 3.3) o relativo (ecuación 3.4).

Ecuación (3.3)

En donde:

Valor verdadero o aceptado de la cantidad.

Ecuación (3.4)

d) Desviación estándar: al igual que la media, la medida más utilizada de la variabilidad (dispersión) es la desviación estándar de la muestra,  $s$  la cual se define con la siguiente fórmula:

Ecuación (3.5).

Cuando  $N$  es demasiado grande el término  $-1$  en el denominador se vuelve despreciable.

e) Desviación estándar de la población ( $\sigma$ ): es una medida de la precisión de una población de datos y se calcula mediante la ecuación:



Ecuación (3.6)

Donde:

N: es el número de datos que conforma la población.

Cuando no existe la presencia de errores sistemáticos, la media de la población ( es el valor verdadero de la cantidad medida.

f) Estadístico de prueba z: representa la desviación de un resultado respecto a la media de la población relacionada con la desviación estándar. Por lo general se indica como una variable representada en tablas estadísticas debido a que es una cantidad adimensional.



Ecuación (3.7).

g) Intervalo de confianza de la media: son los valores dentro de los cuales se espera que se encuentre la media poblacional con una probabilidad dada; en otras palabras es un intervalo en torno a una media muestral determinada experimentalmente dentro del cual se espera con cierta probabilidad que se incluya la media poblacional.

h) Nivel de confianza (IC de ()): se representa en porcentaje y es la probabilidad de que la media verdadera se ubique dentro del intervalo de confianza especificado. Una expresión general del IC de la media verdadera con base en la medida de un solo valor x se representa con la siguiente fórmula:



Ecuación (3.8).

Es raro la estimación del IC con una medida, con mucha frecuencia se sustituye la medida por la media experimental de N medidas como una mejor estimación de la (,



es decir que se sustituye  $\bar{x}$  por  $\mu$  y  $s$  ( por el error estándar de la media  $\frac{s}{\sqrt{n}}$  sustituyendo en la ecuación 3.8 resulta lo siguiente:



Ecuación (3.9).



La ecuación 3.9 es aplicable cuando no hay sesgo y se puede suponer que  $\bar{x}$  es una buena aproximación de  $\mu$  ( esto indica que  $\bar{x}$  es una buena estimación).

- i) Nivel de significación: es la probabilidad de que un resultado no se encuentre dentro del intervalo de confianza.
  
- j) Prueba de hipótesis: la prueba de hipótesis es la base en la toma de decisiones en las áreas de estudio de ingeniería y en el ámbito científico. Con la finalidad de explicar una observación se propone un modelo hipotético, el cual se pone a prueba experimental para determinar su validez. Cuando los resultados no sustentan el modelo se rechaza y se busca una nueva hipótesis. En el caso de haber concordancia el modelo establecido sirve como base para experimentos posteriores.

En las pruebas de este tipo es común escuchar los siguientes términos:

- k) Hipótesis nula ( $H_0$ ): es una afirmación acerca de un valor de un parámetro poblacional.
  
- l) Hipótesis alterna ( $H_a$ ): es una afirmación que se aceptará si los datos de la muestra proporcionan información de que la hipótesis nula es falsa.
  
- m) Nivel de significancia: es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando esta es

verdadera.

- n) Errores en las pruebas de hipótesis: la elección de una región de rechazo para la hipótesis nula se efectúa de manera que puedan advertirse fácilmente los posibles errores. Así por ejemplo para un nivel de confianza del 95% se tiene un 5% de probabilidad de rechazar la hipótesis nula aunque sea verdadera. Esto podría ocurrir si se presenta un resultado que ponga a la variable estadística  $z$  en la región de rechazo, por consiguiente los errores de la prueba de hipótesis los podemos definir de la siguiente manera.
- o) Error tipo I: implica rechazar la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera.
- p) Error tipo II: resultaría al aceptar la hipótesis nula cuando en realidad es falsa.
- q) Estadístico de prueba: es el valor que se obtiene a partir de la información muestral, se utiliza para determinar si se rechaza o no la hipótesis.
- r) Valor crítico: es el punto que divide la región de la aceptación y la región de rechazo de la hipótesis nula.

El análisis estadístico de los datos de un experimento se basa comúnmente en que los errores aleatorios siguen una distribución normal ó Gaussiana y la aproximación a la distribución normal se logra obteniendo un número considerable de repeticiones de los experimentos.

Según J.C. Miller (1993), la distribución normal no sólo se aplica cuando se hacen mediciones repetidas de un mismo espécimen; también los resultados obtenidos a menudo se adaptan a la distribución normal cuando se mide la misma magnitud para diferentes muestras.

Las curvas de Gauss se pueden representar por medio de una ecuación que contiene solo dos parámetros: la media de la población ( $\mu$ ) y la desviación estándar de la población ( $\sigma$ ). El término *parámetro* se refiere a las cantidades como  $\mu$  y  $\sigma$  que definen una población o distribución. El término *variable estadística* se refiere a la estimación de un parámetro, en donde la media de una muestra y la desviación estándar de la muestra son ejemplos de variables estadísticas que estiman los parámetros de  $\mu$  y  $\sigma$  respectivamente (Skoog, West, Holler).



## 1. Prueba z con muchas muestras (Skoog, West, Holler, 2008)

La prueba z es apropiada si se tienen resultados numerosos, de modo que  $s$  es una buena estimación de  $\sigma$ . El procedimiento utilizado se resume de la siguiente manera:

1. Expresé la hipótesis nula:  $H_0: \mu = \mu_0$ .

2. Forme la variable estadística de prueba:

3. Expresé la hipótesis alterna,  $H_a$ , y determine la región de rechazo:

a. Para  $H_a: \mu < \mu_0$ , rechace  $H_0$  si  $z < -z_{crit}$  o si  $z > z_{crit}$ .

b. Para  $H_a: \mu > \mu_0$ , rechace  $H_0$  si  $z > z_{crit}$ .

c. Para  $H_a: \mu \neq \mu_0$ , rechace  $H_0$  si  $z > z_{crit}$  o si  $z < -z_{crit}$ .

Es importante tener en cuenta que con  $H_a: \mu \neq \mu_0$ , es posible rechazar los valores positivos o negativos de  $z$  que excedan el valor crítico. Esto es lo que se llama **prueba de dos colas o extremos**. Se dice que se realiza una **prueba de una cola o extremo cuando**  $H_a: \mu > \mu_0$ . Aquí es posible el rechazo solo cuando  $z > z_{crit}$ .

## 2. Método de mínimos cuadrados

Este método se emplea para generar una curva de calibración, partiendo de dos suposiciones. La primera es que existe una relación lineal entre la variable dependiente y la variable independiente. La relación matemática que describe esta suposición se denomina modelo de regresión, representada por la ecuación 3.10 y la segunda suposición es que no existe error por parte de la variable independiente.

Ecuación (3.10).

Donde:

: intercepto en  $y$ .

: es la pendiente de la recta.

### 3. Cálculo de los coeficientes de regresión por el método de mínimos cuadrados

La desviación vertical de cada punto respecto de la recta se conoce como residual. La línea generada por el método de mínimos cuadrados es aquella que reduce al mínimo la suma de los cuadrados de los residuales para todos los puntos. Además proporciona la línea que mejor se ajusta a los puntos experimentales y para su cálculo se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación (3.11).

Ecuación (3.12).

Ecuación (3.13).

Para el cálculo de la pendiente y la intercepción se utilizan las siguientes ecuaciones:

Ecuación (3.14).

Ecuación (3.15).

### 3. DATOS PREVIOS A LA PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE AGUA

Se tomaron muestras en un período de una semana comprendida entre el 17 y 21 de agosto del 2009 (ver figura 3.1), para las cuales se realizó un estudio de absorbancias y sólidos suspendidos como parámetro de interés, los resultados se encuentran tabulados en la tabla 3.1. En cada una de las muestras analizadas se pueden observar diferencias considerables en cuanto a color y sólidos presentes en las muestras; en esta ocasión las cinco muestras presentan un color rojizo, es por ello que para el análisis de absorbancias se tomó la región del espectro electromagnético comprendida entre las longitudes de ondas de 610 a 700 nm (ver anexo B.3).

Como ya se mencionó anteriormente el comportamiento del agua residual textil es muy variable; una forma de alcanzar una uniformidad en el efluente sería de contar con áreas de homogenización demasiado extensas para que las variaciones en el color sean despreciables y se mantengan todos los parámetros de forma casi constantes.

Figura 3.1 Muestras de agua residual a la entrada y salida de la PTAR  
Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

Tabla 3.1 Análisis de muestras tomadas en una semana a la entrada de la PTAR

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Sólidos suspendidos (ppm)	>5000	>5000	>5000	3750	4100
Longitud de onda (nm)	A B S O	R B A	N C I A	S	
610	0.385	0.102	0.532	0.119	0.237
620	0.380	0.091	0.523	0.111	0.221
630	0.364	0.084	0.487	0.102	0.198
640	0.335	0.085	0.454	0.098	0.179
650	0.323	0.080	0.364	0.094	0.157
660	0.340	0.076	0.280	0.087	0.136
670	0.340	0.072	0.209	0.081	0.121
680	0.288	0.072	0.164	0.078	0.112
690	0.219	0.066	0.012	0.070	0.102
700	0.170	0.065	0.101	0.068	0.096

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

En la figura 3.2 se aprecian varios de los muchos comportamientos de la absorbancia presentes en el agua residual proveniente de la industria textil, las

tendencias son parecidas debido a que diariamente se programan diversos procesos de carácter similar en cuanto a desarrollo se refiere, sobre todo en el área de tintorería; por ejemplo se puede interpretar en la figura 3.2 que durante los días lunes y miércoles se observaron valores altos de absorbancias con picos de 0.385 y 0.532 respectivamente a 610 nm, esto significa que en esos días los colores que se trabajaron eran muy intensos y no es atribuible al volumen de producción ya que en este caso en particular el valor de sólidos suspendidos se mantiene constante.

Este tipo de información podría ser de mucha importancia en instalaciones de tratamientos de agua con espacios físicos reducidos ya que darían la pauta para realizar cambios inmediatos en las concentraciones de dosificación de productos químicos en la PTAR, teniendo como resultado un mejor control sobre el proceso y con ello lograr mantener las condiciones necesarias a la entrada del sistema de recuperación de agua ya que si alteramos dichas condiciones también necesitaremos modificar los ciclos de lavado para el filtro y los ciclos de regeneración en el intercambiador iónico; una mala operación provocaría que el agua no cumpla con las condiciones necesarias para su reutilización.



Figura 3.2 Curvas de absorbancia a la entrada de la PTAR

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

Tabla 3.2 Análisis de muestras tomadas en una semana a la salida de la PTAR

Día	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Sólidos suspendidos (ppm)	2700	1500	1800	2000	2100
Longitud de onda (nm)	A B S O	R B A	N C I A	S	
610	0.141	0.079	0.066	0.130	0.156
620	0.134	0.072	0.066	0.125	0.151
630	0.132	0.067	0.062	0.130	0.145
640	0.131	0.068	0.063	0.123	0.140
650	0.126	0.063	0.059	0.116	0.134
660	0.121	0.061	0.059	0.108	0.124
670	0.135	0.063	0.059	0.104	0.121
680	0.116	0.061	0.056	0.102	0.120

690	0.111	0.055	0.056	0.098	0.114	
700	0.103	0.053	0.052	0.094	0.109	

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

En la tabla 3.2 y en la figura 3.3 podemos apreciar un comportamiento más ordenado en cuanto a los datos y tendencias, además los valores de absorbancias se reducen considerablemente alrededor de un 80%.



Figura 3.3 Curvas de absorbancia a la salida de la PTAR  
Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

#### 4. PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO DE RECUPERACIÓN

En la figura 3.4 se muestra el equipo de recuperación de agua residual en su primera fase de operación; aquí la alimentación se hace por medio de una manguera que está adaptada a la tubería principal de descarga. En donde se requiere que el sistema de filtración adquiriera un nivel considerable de agua residual, ya que los tanques no son completamente herméticos en donde la diferencia de presión que se ejerce en su interior es únicamente debida a la columna de agua residual multiplicada por la fuerza de gravedad y la diferencia de altura que existe entre los tanques, es por ello que el caudal de agua se ve reducido al pasar a la segunda etapa del proceso en donde se da el intercambio iónico dando como resultado a la salida del sistema un caudal nominal de 1 litro por minuto, el cual se determinó midiendo el tiempo que tardó en llenar una

probeta de 1 litro (ver figura 3.5).

Figura 3.4 Equipo de recuperación de agua residual  
Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

Figura 3.5 Medida de caudal, a la salida del  
sistema de recuperación de agua  
Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

Figura 3.6 Muestras a la entrada y salida del  
sistema de recuperación de agua

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

En la figura 3.6 se demuestra que el color se reduce de forma considerable a pesar de las limitantes que presenta el sistema, como es el hecho del material plástico del que están contruidos los tanques son de carácter frágil pero resultaron ser prácticos y económicos para fines didácticos.

El material filtrante resulta ser el adecuado ya que no absorbe en lo absoluto el color como se puede ver en la figura 3.7, únicamente se puede apreciar material suspendido producto de la etapa de sedimentación a la salida de la PTAR. En la figura 3.8 se puede apreciar que la remoción del color se llevó a cabo por la resina quedando la superficie de la parte superior oscurecida mientras la que se encontraba en la base del tanque, casi intacta; esto se debe a que en esa región se dá el mayor tiempo de contacto entre la resina y el agua a depurar.

Figura 3.7 Equipo de filtración después de la prueba de recuperación  
Fuente: Construcción propia, agosto (2009).



Figura 3.8 Equipo de intercambio iónico después  
de la prueba de recuperación  
Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

## 5. OBTENCION DE DATOS EXPERIMENTALES

Para el análisis de datos se tomaron dos muestras representativas del tipo puntual con un volumen de 5 litros, una de ellas se envió a un laboratorio certificado para su análisis y la otra se analizó en el laboratorio de control de químicos, colorantes, suministro y tratamiento de agua de la empresa tipo.

En la figura 3.9 se observan tres muestras de agua en las diferentes etapas del sistema de recuperación donde las primeras dos muestras de izquierda a derecha representan la entrada y salida del sistema de filtración respectivamente; la reducción del color se hace efectiva en la etapa de intercambio iónico.

Para la medición de la absorbancia y sólidos suspendidos se tomaron 30 muestras (ver figura 3.10), los resultados se encuentran tabulados en la tabla 3.3.

Figura 3.9 Entrada y salida de la etapa de filtración,  
salida del intercambiador  
Fuente: Construcción propia, agosto (2009).



Figura 3.10 Toma de treinta muestras para el análisis de absorbancias y color

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

Tabla 3.3 Datos de absorbancias y sólidos suspendidos para 30 muestras

Longitud onda	610				620
1	0.07	0.07	0.07	0.067	0.065
1	171	0.109	16	278	0.166
2	191	0.117	17	278	0.180
3	223	0.136	18	270	0.152
4	236	0.150	19	248	0.143
5	189	0.116	20	275	0.168
6	193	0.121	21	258	0.144
7	238	0.144	22	247	0.155
8	186	0.105	23	280	0.176
9	210	0.140	24	303	0.172
10	220	0.135	25	261	0.167
11	178	0.122	26	249	0.157
12	200	0.113	27	277	0.164
13	199	0.121	28	250	0.152
14	203	0.124	29	244	0.148
15	243	0.142	30	238	0.145

Fuente: Construcción propia (2009), análisis realizado con equipo DR/890 colorímetro a 420 nm.

Los datos de la tabla 3.5 se tomaron únicamente para verificar si en la etapa de filtración se presenta remoción de color en algún sentido, lo que se puede comprobar que es falso, ya que solo en la etapa de intercambio iónico la absorbancia se reduce por lo menos un 50%; estos datos se representan gráficamente en la figura 3.11. La tabla 3.6 indica el comportamiento de los sólidos suspendidos en las diferentes etapas.

Tabla 3.5 Datos de absorbancias obtenidos del equipo de recuperación de agua

Longitud (nm)	Alimentación	Filtrado	Filtrado e I. Iónico
	Absorbancias		
620	0.140	0.146	0.089
625	0.134	0.145	0.097
630	0.135	0.135	0.085
635	0.130	0.137	0.087
640	0.126	0.129	0.086
645	0.123	0.129	0.087
650	0.122	0.127	0.084
655	0.117	0.122	0.082

660	0.114	0.120	0.079
665	0.112	0.118	0.081
670	0.110	0.108	0.077
675	0.108	0.111	0.076
680	0.105	0.107	0.071
685	0.104	0.106	0.070
690	0.102	0.106	0.073
695	0.099	0.101	0.068
700	0.097	0.102	0.074

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

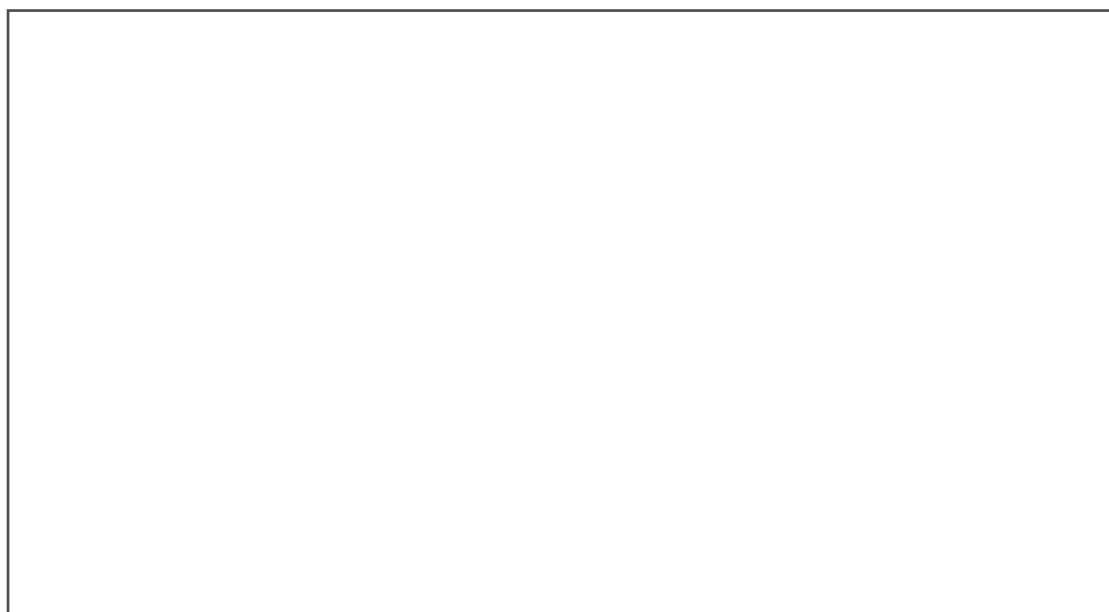


Figura 3.11 Gráficas obtenidas de la recuperación de agua en cada etapa  
Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

Tabla 3.6 Datos de sólidos suspendidos obtenidos del equipo de recuperación de agua

Muestra	Alimentación	Filtrado	Filtrado e I.   Ionico
	Sólidos Suspendidos (ppm)		
1	1950	1900	2200
2	1900	1900	2200
3	1950	1850	2200
4	2000	1900	2150
5	1975	1900	2200
6	1990	1900	2200
7	1950	1900	2200
8	1950	1900	2200
9	1950	1950	2200
10	1900	1950	2200
11	1925	1900	2200

12	1990	1920	2200	
13	1950	1950	2150	
14	1950	1950	2200	
15	1990	1900	2200	
16	1900	1900	2200	
17	1940	1900	2200	

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

## 6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Para comprobar la hipótesis del proyecto y teniendo en cuenta los datos experimentales con que se cuenta necesitamos una ecuación que nos relacione el color aparente con la absorbancia, en este caso se han hecho dos suposiciones para relacionar estas variables:

1. En base a los datos obtenidos en la tabla 3.4 podemos relacionar el color aparente a una absorbancia de 420 nm. En este caso podemos aplicar el método de mínimos cuadrados para generar una ecuación la cual nos indique la proporcionalidad existente entre la variable color aparente con respecto a la variable absorbancia.
2. Manteniendo la suposición de que el valor de absorbancia de la muestra es proporcional al color aparente que está presente en el agua para un rango determinado dentro del espectro electromagnético y los datos de color con los que contamos son para una longitud de onda definida con un valor de 420 nm, asumiremos que el color de una región específica del espectro es relativo con respecto al valor obtenido a 420 nm, con lo que obtendremos valores del color de la muestra para cualquier región del espectro y lo relacionaremos con la siguiente (ecuación 3.16):

$$\boxed{\phantom{Ecuación (3.16).}}$$

Ecuación (3.16).

La ecuación anterior se formuló en base a la aplicación espectrofotométrica para la determinación de proteínas totales por el método de Biuret y por simple analogía con los datos con que se cuenta se plantea la ecuación 3.16 en caso de ser necesario una ecuación adicional pero debe quedar en claro que no se hará mucho énfasis en esta

ecuación por no ser este el objetivo principal del estudio.

### 1. Cálculo de los coeficientes de regresión por el método de mínimos cuadrados

Utilizando los datos de la tabla 3.4 y haciendo uso del método de mínimos cuadrados se obtienen los siguientes resultados (ver tabla 3.7).

Sustituyendo en las ecuaciones 3.11, 3.12 y 3.13

Tabla 3.7 Método de mínimos cuadrados, determinación de color aparente

Muestra	Absorbancia a Xi	Color (Pt-Co) Yi	Xi <sup>2</sup>	Yi <sup>2</sup>	XiYi
1	0.109	171	0.011881	29241.00	18.639
2	0.117	191	0.013689	36481.00	22.347
3	0.136	223	0.018496	49729.00	30.328
4	0.150	236	0.022500	55696.00	35.400
5	0.116	189	0.013456	35721.00	21.924
6	0.121	193	0.014641	37249.00	23.353
7	0.144	238	0.020736	56644.00	34.272
8	0.105	186	0.011025	34596.00	19.530
9	0.140	210	0.019600	44100.00	29.400
10	0.135	220	0.018225	48400.00	29.700
11	0.122	178	0.014884	31684.00	21.716
12	0.113	200	0.012769	40000.00	22.600
13	0.121	199	0.014641	39601.00	24.079
14	0.124	203	0.015376	41209.00	25.172
15	0.142	243	0.020164	59049.00	34.506
16	0.166	278	0.027556	77284.00	46.148
17	0.180	278	0.032400	77284.00	50.040
18	0.152	270	0.023104	72900.00	41.040
19	0.143	248	0.020449	61504.00	35.464

20	0.168	275	0.028224	75625.00	46.200	
21	0.144	258	0.020736	66564.00	37.152	
22	0.155	247	0.024025	61009.00	38.285	
23	0.176	280	0.030976	78400.00	49.280	
24	0.172	303	0.029584	91809.00	52.116	
25	0.167	261	0.027889	68121.00	43.587	
26	0.157	249	0.024649	62001.00	39.093	
27	0.164	277	0.026896	76729.00	45.428	
28	0.152	250	0.023104	62500.00	38.000	
29	0.148	244	0.021904	59536.00	36.112	
30	0.145	238	0.021025	56644.00	34.510	
Sumatoria	4.284	7036	0.624604	1687310.00	1025.421	

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

Al sustituir estas cantidades en las ecuaciones 3.14 y 3.15 se obtiene:



Por tanto la ecuación para relacionar el color y la absorbancia tiene un coeficiente de correlación de  $r^2 = 0.9$  y esta queda de la siguiente manera:

Ecuación (3.17)

Con un coeficiente de correlación entre 0.8 y 0.9 se dice que la correlación es aceptable; es por ello que se utilizará dicha ecuación para determinar el color aparente presente en los datos obtenidos en la tabla 3.4 y además la representaremos de la siguiente forma:



Ecuación (3.18)

La ecuación 3.18 será la base para el análisis de los datos y sobre la cual tomaremos la información pertinente en base al color aparente. Los análisis solicitados al laboratorio certificado nos proporcionaron cierto criterio para validar la aceptación o rechazo de las pruebas de hipótesis.

Tabla 3.8 Resultados de color obtenidos con la ecuación 3.18 para el rango de longitud de ondas entre 610 - 700 nm			
Longitud de onda	1	2	3
610	117.36	117.36	117.36
620	109.8	127.072	124.921
630	103.500	129.110	127.059
640	98.602	122.190	119.937
650	97.536	117.468	115.022
660		112.103	109.605
670		106.148	103.500
680		107.650	104.967
690		102.876	100.055
700		101.320	98.602

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).



Figura 3.12 Tendencias del color obtenido en base al experimento

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

En la figura 3.12 la serie 1 indica la tendencia del color por el método de mínimos cuadrados y la serie 2 indica la tendencia con la ecuación 3.16.

## 2. Cálculo de la desviación estándar para el intervalo de color en estudio

El mejor valor promedio de color aparente que arroja la regresión lineal es de 100.14 unidades de Pt-Co, y el valor promedio más retirado es de 129.11 unidades de Pt-

Co. Utilizando la ecuación 3.5 se calculan las desviaciones estándar para los datos a 620 nm y 700 nm.

Tabla 3.11 Datos para el cálculo de la desviación estándar de la muestra

MUESTRA	MEJOR DE LOS CASOS (700 nm)	PEOR DE LOS CASOS (620 nm)	MUESTRA	MEJOR DE LOS CASOS (700nm)	PEOR DE LOS CASOS (620 nm)
1	90.00	117.36	16	94.83	118.97
2	93.22	118.97	17	110.92	125.41
3	102.88	135.07	18	90.00	115.75
4	88.39	117.36	19	98.05	131.85
5	91.61	118.97	20	101.27	127.02
6	96.44	122.19	21	96.44	125.41
7	94.83	123.80	22	93.22	115.75
8	91.61	117.36	23	88.39	114.14
9	98.05	133.46	24	90.00	115.75
10	96.44	178.52	25	96.44	122.19
11	93.22	155.99	26	98.05	120.58
12	155.99	212.32	27	90.00	117.36
13	118.97	139.89	28	90.00	115.75
14	147.94	122.19	29	114.14	146.33
15	90.00	114.14	30	102.88	133.46

Fuente: Construcción propia, agosto (2009).

Para el mejor de los casos a 700 nm tenemos: ,

Para el peor de los casos a 620 nm tenemos:

Nota: estos datos se utilizaron para realizar la prueba de hipótesis.

### 3. NSO 13.49.01:06 “Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor”

Esta norma ha sido editada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT (ver tabla 3.12); la cual es una adaptación de la Propuesta de Norma de Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor en donde se destacan las características y valores físico-químicos, microbiológicos y radiactivos permisibles que debe presentar el agua para no afectar los cuerpos receptores.

Tabla 3.12 Parámetros para la industria textil NSO 13.49.01:06

Actividad: hilados, tejidos y acabados textiles	Parámetro
DQO (mg/l)	400
DBO5 (mg/l)	200



Sólidos sedimentables (ml/l)	15	
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	150	
Aceites y grasas (mg/l)	35	
Color	No debe incrementar el color	
	visible al cuerpo receptor	

Fuente: CONACYT, Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor (Pág. 5).

En cuanto al color, según indica la normativa salvadoreña no debe incrementar el color visible al cuerpo receptor, pero deberían especificar un valor puntual en unidades de Pt-Co ya que el color no se podría apreciar a simple vista si el volumen del cuerpo es demasiado grande por efectos de dilución.

#### 4. Resultados obtenidos en laboratorio acreditado

En la tabla 3.13 se registran los resultados obtenidos de la muestra de agua que se enviaron al laboratorio especializado para su respectivo análisis.

Tabla 3.13 Resultados a la salida del sistema de recuperación de agua residual

Análisis	28-08-0	Método de	
	9	análisis	
DQO (ppm O <sub>2</sub> )	79.6	ref.APHA5220C(1)	
DBO (ppm O <sub>2</sub> )	15	ref.APHA5210B(1)	
Aceites y grasas (ppm)	15.8	Extracción de	
		Hexano(2)	
Sulfatos (ppm SO <sub>4</sub> =)	6.3	ref.APHA1963(5)	
Sólidos sedimentables	ND	ref.APHA2540F(1)	
(mL/L)			
Sólidos suspendidos	18	ref.APHA2540D(1)	
totales (ppm)			
Color verdadero (Pt-Co)	9.7	ref.APHA2120C(4)	
Turbidez (NTU)	13.2	ref.APHA2130B(1)	
Detergentes (ppm LAS)	1.53	Azul de	
		metileno(3)	

Fuente: Resultados de los análisis realizados por el laboratorio  
ESPINSA (2009)[1].

<b>ND:</b>	No detectable.	
<b>ppm:</b>	mg/L.	
<b>Metodologías de Análisis:</b>	APHA-AWWA-WEF, 1998.	(1)
	EPA, N° 1664,1999	(2)
	ORBECO ANALYTICAL SYSTEMS, INC	(3)
	APHA-AWWA-WPCF, 2005	(4)
	APHA-AWWA-WPCF, 1963	(5)

## **5. Prueba de hipótesis**

Para llevar a cabo el análisis de prueba de hipótesis se hizo uso del conjunto de datos de color aparente contenidos en la tabla 3.8, donde podemos mencionar que el rango de color aparente se encuentra entre 100.14 y 129.11 unidades de Pt-Co, y según los análisis realizados por un laboratorio especializado nos confirma que la muestra de agua recuperada tiene un valor de color verdadero equivalente a 10 unidades de Pt-Co (ver tabla 3.13). En otras palabras para que la recuperación de agua sea efectiva a la salida de la PTAR debemos controlar que el valor de descarga contenga un color verdadero de 80 unidades de Pt-Co, para que posteriormente el sistema de recuperación de agua se encargue de reducir el color en más de un 75%.

Con respecto a la normativa salvadoreña de aguas residuales, ésta no especifica un valor puntual del color verdadero permitido para la descarga a un cuerpo receptor y mucho menos menciona los parámetros permitidos para que el agua pueda ser reciclada, por lo que nos vemos en la necesidad de suponer en base a nuestra experiencia que es necesario considerar que el agua para los procesos industriales no está exenta de impurezas y por ello no es completamente incolora. Haciendo un análisis de absorbancias para el agua utilizada en el proceso de tintorería (ver anexo D.1), resulta que a 620 nm y 700 nm tiene una absorbancia de 0.044, dato que al sustituirlo en la ecuación 3.18 da como resultado un color aparente de 75.5 unidades de Pt-Co, por lo que fijaremos un valor de color aparente considerado como aceptable para lograr la recuperación de agua en 200 unidades de Pt-Co como valor máximo permitido; si los valores son superiores a este, el reciclaje no se podrá realizar. En cuanto a la DQO y sólidos suspendidos totales, por no contar con el equipo necesario para su medición nos quedamos cortos en la recolección de información pertinente para hacer una conjetura con respecto a dichos parámetros; es por ello que el proyecto de tesis queda de forma abierta para estudios posteriores y replanteando la hipótesis inicial del anteproyecto de la siguiente manera:

### **A. HIPOTESIS NULA.**

La recuperación del agua no se puede lograr debido a que el sistema de filtración no reduce los sólidos suspendidos totales a menos de 150 ppm y con el sistema de resinas de intercambio iónico no se alcanza a reducir la DQO a menos de 400 ppm y el agua mantiene un color aparente no aceptable equivalente a 200 unidades Pt-Co.

### **B. HIPOTESIS ALTERNATIVA.**

La recuperación del agua se puede lograr si el sistema de filtración reduce los sólidos suspendidos totales a menos de 150 ppm y con el sistema de resinas de intercambio iónico alcanza a reducir la DQO a menos de 400 ppm y el agua mantiene un color aparente aceptable es decir valores menores a 200 unidades Pt-Co.

### C. RESULTADO DE PRUEBA DE HIPOTESIS PARA EL MEJOR DE LOS CASOS.

$H_0: (\geq 200 \text{ Pt-Co})$

Con los datos obtenidos en la sección 3.6.2 se formula la variable estadística z de la siguiente forma:

$z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$

Nivel de confianza: 95%

$H_a: (< 200 \text{ Pt-Co})$

Con el nivel de confianza del 95% tenemos que  $z_{\text{crítico}} = -1.96$  [2]

Ya que -34.25 es menor que -1.96 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

### D. RESULTADO DE PRUEBA DE HIPOTESIS PARA EL PEOR DE LOS CASOS.

$H_0: (\geq 200 \text{ Pt-Co})$

Con los datos obtenidos en la sección 3.6.2 se formula la variable estadística z de la siguiente forma:

$z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$

Nivel de confianza: 95%

$H_a: ( < 200 \text{ Pt-Co}$

Con el nivel de confianza del 95% tenemos que  $z_{\text{crítico}} = -1.96$

Ya que  $-18.42353$  es menor que  $-1.96$  se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

## **7. ETAPAS DEL PROCESO EN LAS QUE SE PUEDE UTILIZAR EL AGUA RECUPERADA**

Basados en los resultados anteriores podemos afirmar que la recuperación se puede llevar a cabo en un buen grado, los parámetros fisicoquímicos presentes en el agua recuperada son aptos para la utilización en etapas de lavado de máquinas, lavado de pisos y limpieza de sanitarios. Se estima que el ahorro mensual equivale a  $2000 \text{ m}^3/\text{mes}$ , esta cifra puede mejorar pero para ello se considera que se debe implementar dos etapas más al sistema de recuperación, las cuales podrían ser a base de carbón activado para la eliminación de partículas, olor, sabor, etc., y una última con la cual se pretenda la eliminación de microorganismos ya sea a base de ozono ó con rayos UV.

Por último se llevó a cabo unas pruebas de teñido con el agua recuperada como se explica en el apéndice F y G, obteniendo resultados satisfactorios. Esto implica un ahorro mayor en la cantidad de agua que supera los  $2000 \text{ m}^3/\text{mes}$ .

## CONCLUSIONES

1. La prueba de hipótesis con un nivel de confianza del 95%, nos indica que es posible recuperar el agua residual; y podemos afirmar que a valores de color aparente menores de 200 unidades Pt-Co a la salida del sistema de recuperación de agua es posible llevar a cabo determinados procesos de tintura sin afectar en gran medida los tonos en fibras celulósicas y sintéticas.
2. Las tecnologías más limpias aplicadas a la industria textil contribuyen a disminuir los volúmenes de desechos generados, sobre todo en el área de materia prima de productos químicos, colorantes y agua. Los reprocesos son considerados en la actualidad como el 40% del costo total del producto; generan inconformidad con los clientes ya que afectan la calidad del producto y demora en los tiempos de entrega.
3. El agua es un recurso muy valioso el cual debemos cuidar, el nivel freático del recurso hídrico no tiene la capacidad suficiente para recuperarse debido al incremento en el desarrollo industrial. Mientras más agua extraemos de los pozos, más se degrada su calidad, a medida que pasa el tiempo las concentraciones en sales y minerales aumentan.
4. Para que una PTAR cumpla con las condiciones necesarias para llevar a cabo la recuperación de agua residual se requiere que cuente con las siguientes etapas de tratamiento: tratamiento preliminar (cribas), tratamiento primario (tanque de mezcla rápida, sistema de flotación, clarificador), tratamiento biológico (oxidación aerobia con lodos activados). Si se cuenta con suficiente espacio físico es recomendable contar con lagunas de estabilización. Las etapas finales constarían de un sistema de filtración y uno de intercambio iónico.
5. El sistema de recuperación de agua en su proceso experimental logró reducir en un 75% el color en la muestra, mientras que los otros parámetros fisicoquímicos como la DQO, DBO etc. permanecen en valores muy por debajo de lo que establece la Norma Salvadoreña. Estimando la recuperación de un volumen de 2000 m<sup>3</sup>/mes el cual se puede destinar en el proceso de lavado de máquinas, pisos y sanitarios.
6. Las pruebas con agua recuperada para el proceso de tintura de tonos fuertes ó intensos y con fibras de poliéster nos indican que es posible realizarla para los

siguientes colores; negros, cafés, marino, hunters, charcol, burgundy etc. Con esto alcanzaremos un volumen superior a los 2000 m<sup>3</sup>/mes.

7. Es posible teñir fibras de algodón a partir del agua recuperada, ya que la prueba se realizó con un tono medio que es de difícil reproducción como lo es el whisper white.

- **RECOMENDACIONES**

1. La etapa de filtración puede mejorar si se utilizan diversos materiales de relleno que contengan un micraje que sea adecuado para el tipo de agua a tratar.
2. Para la captación de agua residual recuperada, es conveniente contar con dos cisternas para incrementar el tiempo de retención en donde en la primera se le dá tiempo para que sedimente el material coloidal que aún sigue reaccionando con los polímeros utilizados para la remoción del color; mientras que en la segunda cisterna tendremos un agua con características aceptables para su reutilización. Este sería el mayor inconveniente en plantas de tratamiento que cuenten con procesos puramente fisicoquímicos.
3. Para los procesos de tintura es conveniente realizar un ensayo de laboratorio con el agua recuperada con todas las diferentes gamas de colorantes con los que cuentan para determinar cual de ellos son más sensibles a las condiciones del agua.
4. Es conveniente realizar estudios posteriores en lo que respecta a metales pesados para descartar la presencia de estos contaminantes en el agua reciclada.
5. Con el diseño a escala de laboratorio se tiene la pauta para su realización a nivel de escala industrial, donde se debe tomar en cuenta la cantidad de efluente a tratar además de dimensionarlo con un 10% o 20% más, considerando posibles expansiones en planta.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, Agencia Suiza para el Desarrollo y Cooperación (COSUDE); "Norma Salvadoreña Obligatoria para La Calidad del Agua Potable ", San Salvador, El Salvador, 1999.
2. T. H. Y. Tebbutt, "Fundamentos de Control de la Calidad del Agua", Novena reimpresión, Editorial Limusa, México, 2002.
3. Romero Rojas, Jairo Alberto, "Tratamiento de Aguas Residuales por Lagunas de Estabilización", Tercera Edición, Editorial Alfaomega, México, 1999.
4. De Marchi, Alessandro, de Menezes, Felipe "Ennoblecimiento Textil en la Práctica", Seminario 2008.
5. Skoog D., West D., Holler F. Crouch S, "Fundamentos de Química Analítica", Octava Edición, Editorial Thomson, México, 2005.
6. Mansor I., "Textil Dye", Primera Edición, University of Karachi, 2008.
7. Water Pollution Control Federation, "Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales", Décimo Séptima Edición, Ediciones Diaz de Santos, Madrid, España, 1992.
8. Nemerrow N., Dasupta A., "Tratamiento de Vertidos Industriales y Peligrosos", Ediciones Diaz de Santos, Madrid, España, 1998.
9. Fred W., Bilmeyer Jr., "Ciencia de los Polímeros", Editorial Reverté, España, 2004.

# **ANEXOS**

## **A. EQUIPOS PARA TRATAMIENTO PRELIMINAR**

Anexo A .1: Criba con rejilla de tambor

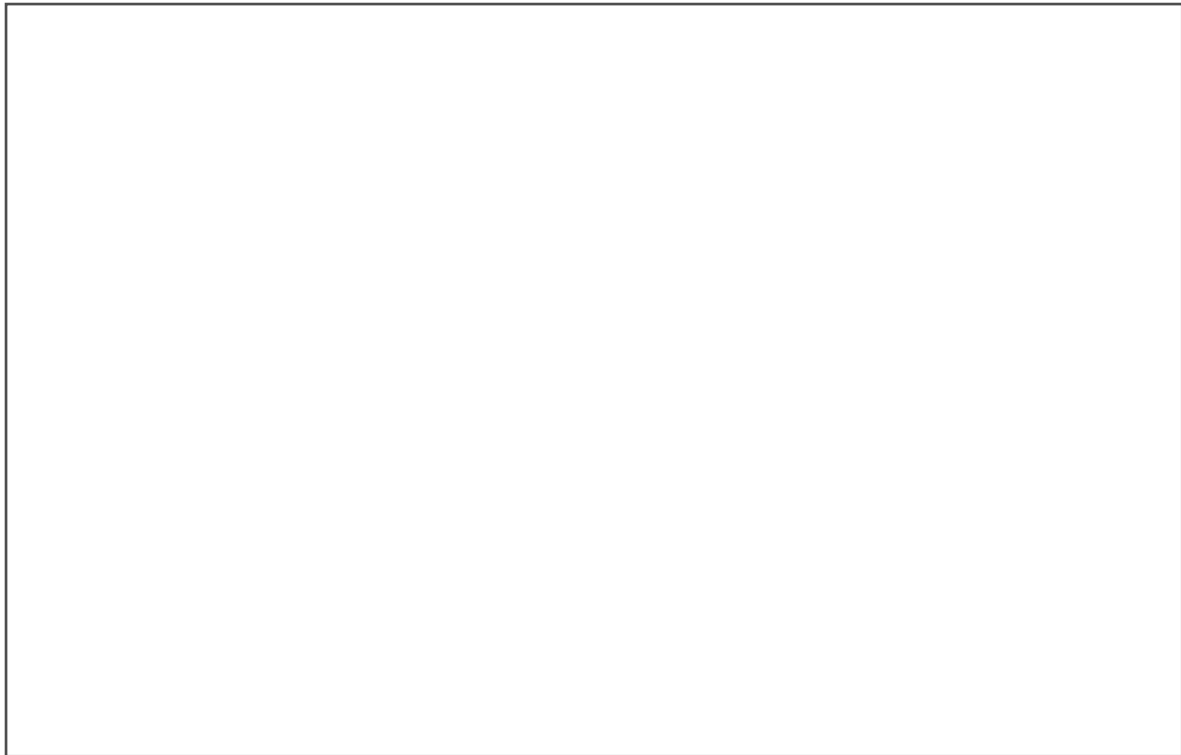
Fuente: <http://lucia.iies.es/primario.html>, marzo (2009).

Anexo A. 2: Criba con rejilla de banda

Fuente: <http://lucia.iies.es/primario.html>, marzo (2009).

## **B. ESPECTRO ELECTROMAGNETICO**

El color de las muestras tomadas para realizar el experimento presentó una tonalidad anaranjada-rojiza, es por ello que el rango de estudio de absorbancias se encuentra comprendido entre la región del espectro visible comprendidas entre 610 nm a 700 nm; si la muestra a analizar presenta una tonalidad violeta el rango de longitud de onda estará comprendida entre 400 nm a 430 nm. Así sucesivamente para las diferentes regiones; de estar muy fuerte el color en la muestra, esta deberá ser diluída con agua destilada para no alterar sus características.



Anexo B.1: Regiones del espectro visible  
Fuente: <http://agaudi.wordpress.com/2008/06/05/>, octubre  
(2009).

## **C. ANALISIS REALIZADOS POR LABORATORIO ACREDITADO**

San Salvador, 10 de Septiembre de 2009

SEÑORES



**CODIGO DE MUESTRA** : 586S  
**NÚMERO DE PÁGINAS DE REPORTE** : 1/2  
**FECHA DE RECIBO DE MUESTRA** : 28-8-09  
**ATENCIÓN** : ING. RENE BOLAÑOS

Estimado ING. BOLAÑOS:

Por medio de la presente estamos informando los resultados de Análisis Químicos efectuados a:

**RESULTADO DE ANALISIS QUIMICOS**

**TIPO DE MUESTRA** : AGUA RESIDUAL  
**FECHA DE TOMA DE MUESTRA** : 08/28/09  
**FECHA DE FINALIZACIÓN DEL ANALISIS** : 7-9-09  
**PROCEDENCIA DE LA MUESTRA** : PRUEBA DE RECUPERACION PTAR TEXTUFIL  
T=35°C  
**TIPO DE TOMA DE MUESTRA** : PUNTUAL  
**MUESTRA TOMADA POR** :  
**APARIENCIA DE LA MUESTRA** : CLARA, TRANSPARENTE, LIGERAMENTE  
TURBIA, CON MUY ESCASOS SOLIDOS

<u>ANALISIS</u>	<u>Resultado</u>	<u>Expresado como</u>	<u>Método de Análisis</u>
Demanda Química de Oxígeno*	: 79.6	ppm O <sub>2</sub>	ref.APHA5220C(1)
Demanda Bioquímica de Oxígeno*	: 15.0	ppm O <sub>2</sub>	ref.APHA5210B(1)
Solidos Sedimentables*	: ND	ml/L	ref.APHA2540F(1)
Solidos Suspendedos Totales*	: 18.0	ppm	ref.APHA2540D(1)
pH*	: 7.12 (25.7°C)	Unidades	ref.APHA4500HB(1)
Turbidez*	: 13.2	Unidades NT	ref.APHA2130B(1)
Aceites y Grasas*	: 15.8	ppm	Extracción hexano(2)
Color Verdadero	: 9.7	unidades Pt-Co	ref.APHA2120C (3)
Sulfatos*	: 6.3	ppm SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	ref.APHA1963(4)
Detergentes	: 1.53	ppm LAS	Azul de metileno(5)
Aluminio	: ND	ppm Al	Eriocromo Cianina(6)

Especialidades Industriales, S.A. de C.V. Calle Gabriela Mistral No. 171. PBX: (503) 2226-1216 FAX: (503) 2225-4350 e-mail: espinsa@espinsa.com.sv, San Salvador, El Salvador, C.A.

Anexo C.1: Resultado de análisis químicos

**D. ANALISIS DE ABSORBANCIAS PARA EL AGUA DE PROCESO DE TINTORERIA**

## Anexo D.1: Absorbancia para

el agua de teñido

Longitud (nm)	Absorbancia
610	0.042
620	0.044
630	0.057
640	0.057
650	0.044
660	0.053
670	0.038
680	0.040
690	0.040
700	0.044

Fuente: Construcción propia, (2009).

## E. NIVELES DE CONFIANZA CON DIVERSOS VALORES DE Z

### Anexo E.1: Valores para $Z_{\text{Crítico}}$

Nivel de confianza %	Z
50	0.67
68	1.00
80	1.28
90	1.64
95	1.96
95.4	2.00
99	2.58
99.7	3.00
99.9	3.29

Fuente: Skoog, West, Holler, (2008).

## F. PRUEBA DE TEÑIDO EN FIBRA SINTETICA CON AGUA RECUPERADA

Se realizó una prueba de teñido para dos muestras de tela (poliéster P-2161) color hunter green; donde el estándar fue la muestra con el agua de proceso de uso común, mientras que la otra tintura se realizó con el agua recuperada; el proceso consiste en agregar la tricromía de colorantes dispersos y productos en las diferentes concentraciones listadas en la tabla del anexo F.1. Estos son colocados en un recipiente hermético de acero inoxidable con una relación de baño 1:8, es decir que por 1 gramo de tela utilizamos 8 mililitros de agua. Luego elevamos la temperatura a 90°C con un gradiente de 3°C/min. Posteriormente subimos a 130°C con un gradiente de 1.5°C/min permaneciendo a esta temperatura durante 45 minutos.

En el anexo F.2 se muestra la comparación entre las dos tinturas con el equipo CieLab en donde en la parte superior derecha en letras verdes menciona la palabra “Pasa” con un valor de 0.34; un tono de color es aceptable cuando dicho valor es menor a 0.5.

#### Anexo F.1: Cantidades utilizadas en la tintura de poliéster

Colorante Disperso	Concentración	Cantidad
	g/l	%
Amarillo Auxiester	25	0.88
K6GLS		
Amarillo Oro Foron	5	0.75
SWF		
Azul Marino Foron	20	1.55
S2GRL		
Productos químicos	Concentración	Cantidad
	g/l	%
Dispergal Top	100	1.66
Auxitex HTN	25	0.83
Secuestrante FA	50	0.83
Goldwet RB	100	1.3

Fuente: Empresa tipo, octubre (2009).

Anexo F.2: Lectura de pasa falla, poliéster

Fuente: Empresa tipo, octubre (2009).



## G. PRUEBA DE TEÑIDO EN FIBRA ALGODON CON AGUA RECUPERADA

Se realizó una prueba de teñido para dos muestras de tela (algodón ALP-1325) color whisper white; donde el estándar fue la muestra con el agua de proceso de uso común, mientras que la otra tintura se realizó con el agua recuperada; el proceso consiste en agregar la tricromía de colorantes reactivos y productos en las diferentes concentraciones listadas en la tabla del anexo G.1. Estos son colocados en un recipiente hermético de acero inoxidable con una relación de baño 1:8, es decir que por 1 gramo de tela utilizamos 8 mililitros de agua. Luego elevamos la temperatura a 60°C y se lleva a cabo el proceso de agotamiento durante 30 minutos.

En el anexo G.2 se muestra la comparación entre las dos tinturas con el equipo CieLab en donde en la parte superior derecha en letras verdes menciona la palabra “Pasa” con un valor de 0.18; un tono de color es aceptable cuando dicho valor es menor a 0.5.

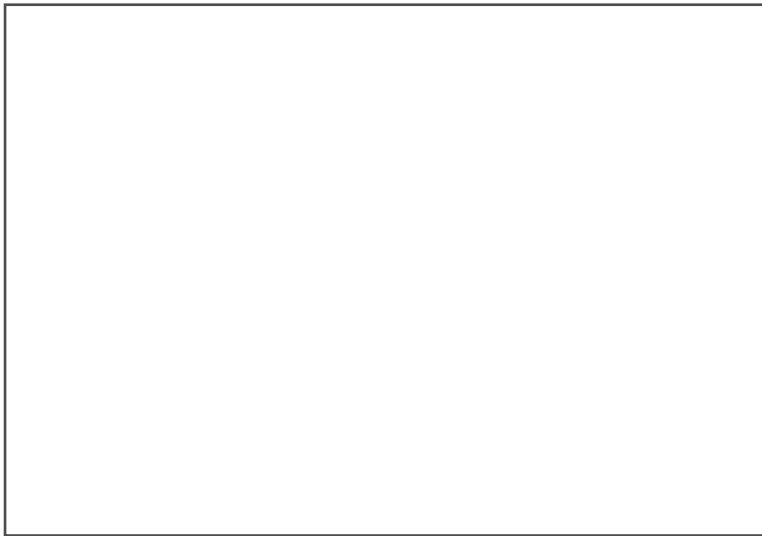
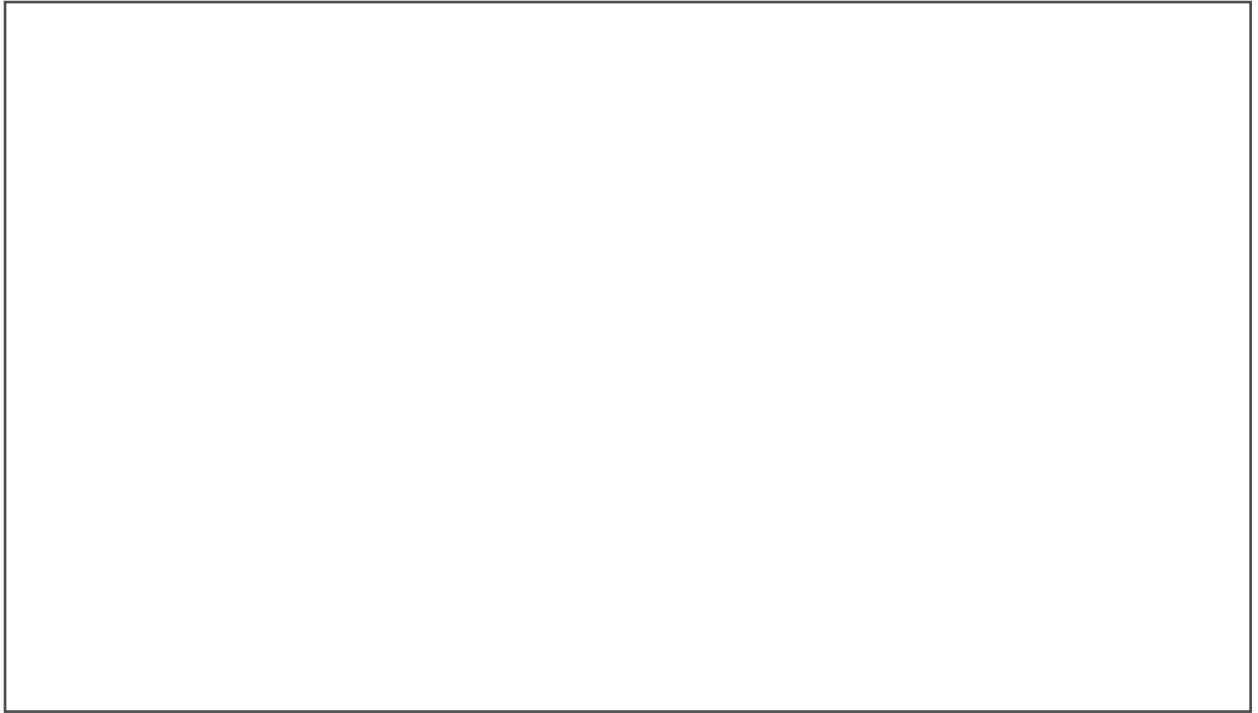
Anexo G.1: Cantidades utilizadas en la tintura de algodón

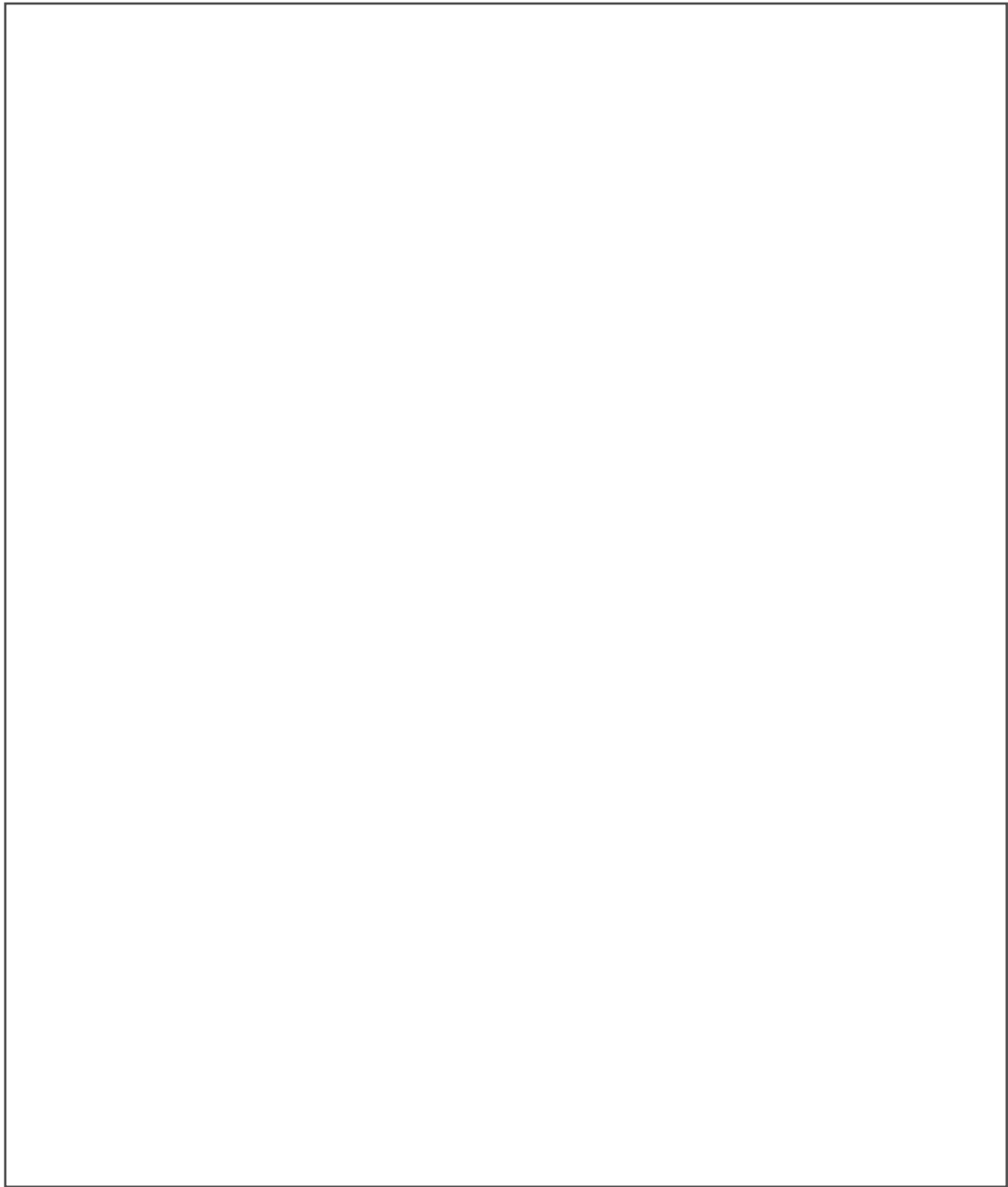
Colorante Disperso	Concentración	Cantidad	
	g/l	%	
Amarillo synozol KHL	0.5	0.0037	
Rojo synozol KHL	0.020	0.0017	
Azul synozol KHL	0.10	0.0009	
Productos químicos	Concentración	Cantidad	
	g/l	%	
Secuestrante FA	100	0.83	
Avcogen E2G	75	0.5	
Farmaprint RG	50	0.415	
Blandet DEH	100	0.83	

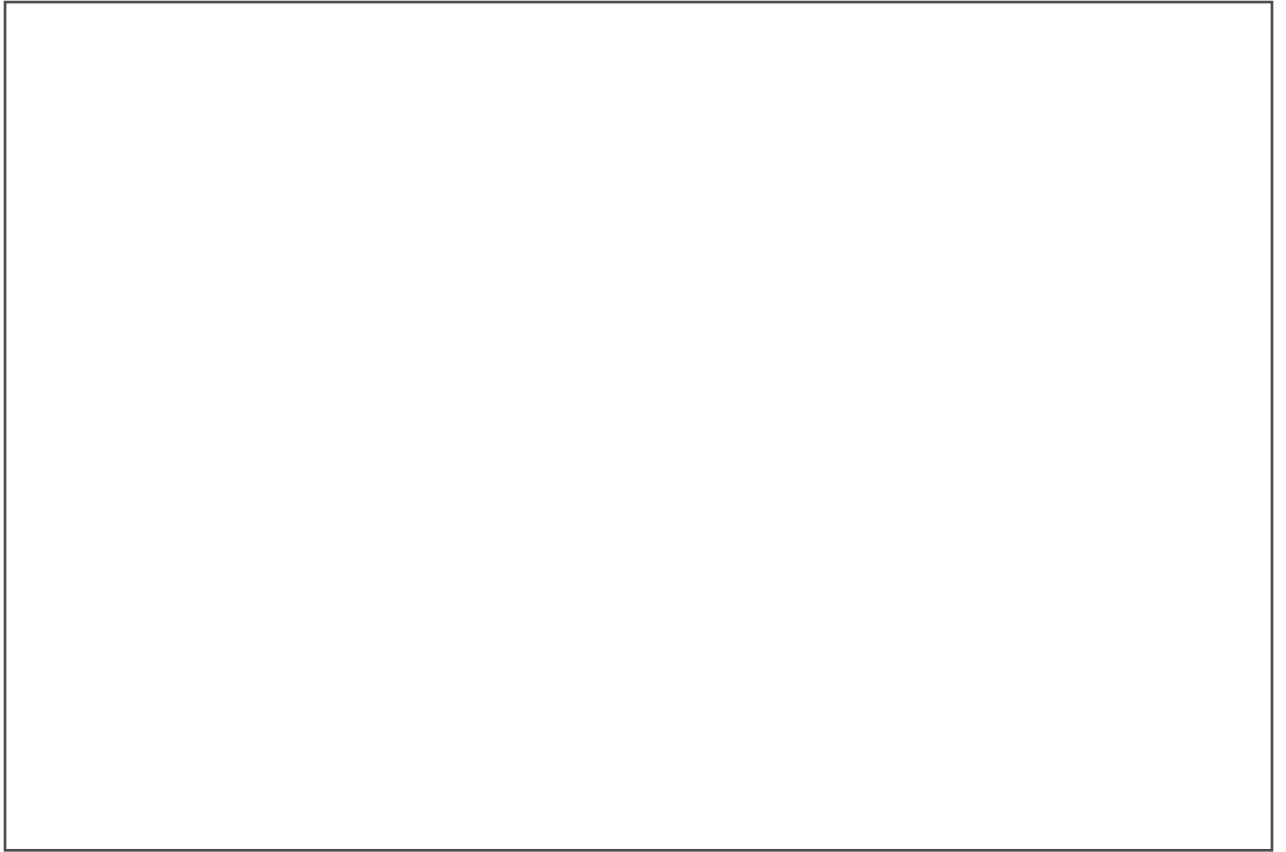
Fuente: Empresa tipo, octubre (2009).

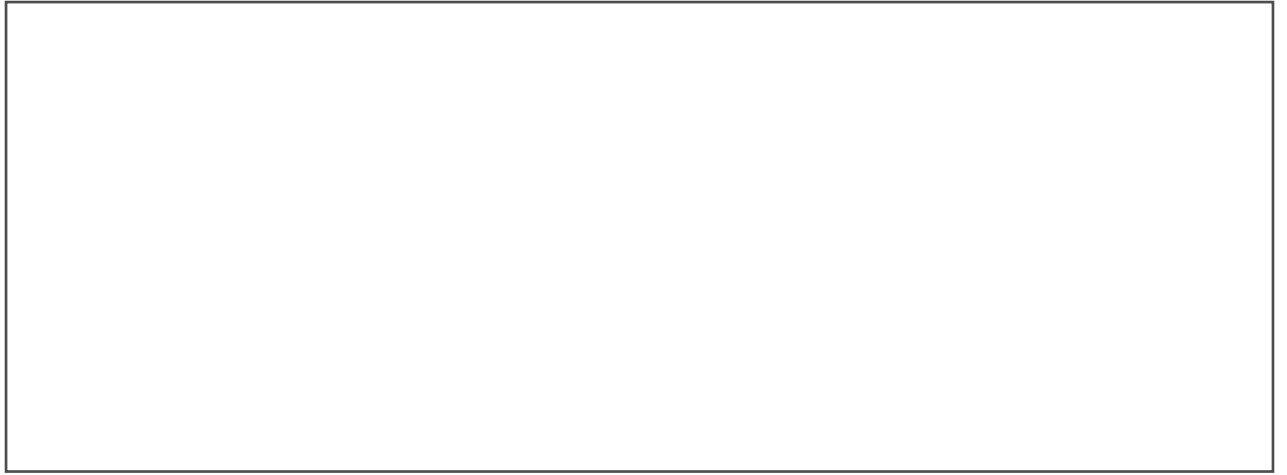
Anexo G.2: Lectura de pasa falla, algodón  
Fuente: Empresa tipo, octubre (2009).

-----  
[1] Ver anexo C.1  
[2] Ver anexo E.1  
-----









Tintura agua recuperada

Tintura agua normal

Tintura agua recuperada

Tintura agua normal