

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES PARA
UNA PLANTA ECOLÓGICA PROCESADORA DE PAPEL RECICLADO EN
LA ZONA NORTE DEL ESTADO ANZOÁTEGUI**

Realizado por:

Freddy Jesús Macadan Campos

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial
para optar al título de

INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, abril de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES PARA
UNA PLANTA ECOLÓGICA PROCESADORA DE PAPEL RECICLADO EN
LA ZONA NORTE DEL ESTADO ANZOÁTEGUI**

ASESOR

Ing. Quím. Maritza Millán Silva, MSc.

Puerto La Cruz, abril de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES PARA
UNA PLANTA ECOLÓGICA PROCESADORA DE PAPEL RECICLADO EN
LA ZONA NORTE DEL ESTADO ANZOÁTEGUI**

JURADO

Ing. Quím. Maritza Millán Silva, MSc.
Asesor académico

Ing. Quím. Milena Amundaraín, MSc.
Jurado Principal

Ing. Quím. Hernán Raven, MSc.
Jurado Principal

Puerto La Cruz, abril de 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado:

Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario.

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso porque a su lado he crecido en este mundo maravilloso que me ha regalado para vivir.

A mis padres Yajaira Campos y Freddy Macadam, por darme la vida y enseñarme a explorarla como hasta ahora, enseñándome que nada es imposible, y que los sueños a veces tardan, pero si no se olvidan algún día los alcanzamos.

A mis hermanos Freya María y Freddy Rafael, porque gracias a ustedes soy lo que soy ahora, si he llegado lejos es porque ustedes me han dado la mano y el piso para ayudarme a seguir.

A ustedes

Mis eternas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Encontrar palabras para decir “Gracias” casi siempre es muy difícil; es más fácil dar un abrazo mientras el brillo de los ojos se encarga de hablar por nosotros, pero como ahora solo cuento con letras, es necesario explotar al máximo el corazón para dejar salir lo que ha guardado.

En primer lugar doy mil gracias a Dios por hacerme quien soy y por darme todo lo que tengo, desde el aire que respiro hasta el último rayo de sol que regala la tarde mientras la observo al lado de un ser especial.

A mi madre Yajaira Campos, por ser ejemplo de que se puede soñar y triunfar, y que ese sueño no se tiene que quedar allí, sino que puedo hacerlo realidad. A mi padre Freddy Macadam, por ser mi ejemplo de constancia, de no desmayar, de levantarse cada día aunque se tenga el mundo encima, para llevarme en sus manos y ayudarme a andar. A mis hermanos Freya y Freddy, por permitirme estar a su lado en cada noche de desvelo aprendiendo todo lo que quizá en ese momento no me tocaba, pero que me ha servido para alcanzar esta meta, y por luego desvelarse conmigo para asegurarse que no perdiera el camino.

A Aura Elena Campos, alguien que siempre me ha dado ese apoyo silente, siguiendo cada uno de mis pasos sin que yo siquiera lo notara, gracias por todo.

A todo el personal de la Universidad de Oriente, desde los mejores y más experimentados profesores, hasta el nuevo estudiante, pasando por administrativos, técnicos y obreros, porque todos ustedes hacen de esta La Casa más Alta, y un sitio donde no solo crecemos como profesionales sino como personas integrales.

A todos los que laboran en el Centro de Investigaciones Tecnológicas de Oriente por su invaluable apoyo en el desarrollo de este proyecto.

A mi asesora y amiga Maritza Millán Silva, por mostrarme el camino a seguir en todo momento, y por aumentar en mí el amor y respeto por este planeta que nos está llamando a gritos.

A la profesora Ana Rita Colmenares; a su lado aprendí lo gratificante que es compartir lo que se ha aprendido, y lo difícil que es lograrlo de la mejor manera, a usted, mis respetos y agradecimientos por siempre.

A los hermanos que escogí en la vida, Ramón, Jesús y Francisco; hemos compartido muchos años juntos y nos faltan muchos más, seguiremos siendo siempre “El Grupito”, que aunque no esté completo como se inició, se convirtió en un símbolo de nuestra existencia.

A Zoraida Castillo, no sabes todo lo que me has dado, convirtiendo mi vida en una luz que no deja ver oscuridad en ningún rincón, creciendo juntos, guardando cada mañana, tarde y noche compartida en una cajita especial en el fondo de mi corazón, decidiendo por convicción que compartiremos todo y que llegaremos hasta el cielo y más allá estando juntos, tal como lo hicimos en toda este tiempo. Dios te Bendiga y mantenga este amor por siempre.

A Zulivis Vívenes, por haberte convertido en parte de mi familia y yo en parte de la tuya, gracias por darme tanto apoyo cuando te necesité y cuando no también. Espero la vida jamás nos aleje y que luchemos porque así sea.

A Eileen Figueredo, por ser alguien que la vida decidió que nunca debía irse y permanecer allí hoy y siempre.

A Eileen T, quizá nuestros planes de vida nos lleven por caminos distantes, pero nunca opuestos y en ese camino nos veremos, gracias por dejar huellas.

A Krizia Lazzarini, por ser una persona con la que he enfrentado pruebas difíciles tal vez, pero que hemos demostrado que la amistad no se rompe con los golpes, solo se fortalece.

A Guillermo, José Ángel, Hendalys, Karla, Isabella Eilad, Yein y Ángel; gracias por hacer que aquellas tardes interminables en los laboratorios, fuera posible de aguantarlas, sin ustedes tal vez no lo habría logrado.

A mi segunda madre Marina Andrade, por dedicarme tiempo y darme un espacio en su vida.

A Migdalia Castillo por traer a este mundo a una mujer maravillosa y por dejarme entrar en su familia sintiéndome uno más de ustedes.

A Helen por hacerme saber lo que es ser un hermano mayor, espero que el destino no separe nuestros caminos y compartir también tus éxitos.

A Migdalia Andreina, estuviste en dos momentos claves de mi vida para darme el empuje que necesitaba, que Dios te guie siempre, y nunca tendré palabras para darte las gracias.

A Ana María, Audrey, Enidian, Dariana, Dayana, Floribel, Julio Mendoza, Kendel, Laurita, Lourdarelis (como siempre decimos: no te librarás de mí), Maria, Maylen, Mercedes, Nazareth, Noeglis, Quelin, Rosselyn, Scarlinis, Virginia (awwwww), Yolimar, mi hermano Pedro Castillo, Zorimar, Yurelia y Marisela; las

líneas son contadas acá, pero cada uno de ustedes en algún momento les he dicho y les repetiré lo importantes que son para mí, gracias a todos.

A Dios nuevamente y siempre lo diré, porque gracias a Él puedo escribir estas líneas a tantas personas que han puesto su grano de arena para este proyecto, y sin las cuales nada de esto tendría sentido.

Gracias a todos.

FREDDY JESÚS MACADAN CAMPOS

RESUMEN

La puesta en marcha de toda industria requiere de un plan de manejo de los desechos que generará dicha actividad. En este proyecto se describe el procedimiento seguido para el diseño preliminar de una planta de tratamiento para el manejo de los desechos líquidos de una planta ecológica para el reciclaje de papel en la zona norte del estado Anzoátegui. Para ello se comenzó por caracterizar las muestras de efluentes obtenidas en laboratorio, debido a que el proyecto global aún se encuentra en fase de diseño; a partir de ello se determinó que los sólidos suspendidos, la turbidez y las demandas química y bioquímica de oxígeno, eran los parámetros de calidad del agua que necesitaban especial atención por estar sobre los niveles permitidos en las legislaciones ambientales vigente, en base a esto se seleccionaron los siguientes equipos: tanque de homogeneización, mezclador estático en línea, floculador de pantallas, sedimentador y un filtro de arena, estableciéndose el diagrama de flujo de procesos así como la distribución en planta de los dichos equipos y su dimensionamiento. A través de una simulación de laboratorio se demostró la eficiencia del proceso seleccionado, obteniéndose tasas de remoción para la turbidez, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y demanda química de oxígeno en el orden de 99 %, 94 %, \approx 100 % y 80 % respectivamente. Finalmente se realizó un estudio de costos para determinar la inversión total para la instalación de la planta siendo ésta de 642.061,12 Bs.

CONTENIDO

	Pág.
RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN.....	x
CONTENIDO	xi
LISTA DE TABLAS	xvii
LISTA DE FIGURAS.....	xx
CAPÍTULO I.....	23
INTRODUCCIÓN	23
1.1 DESCRIPCIÓN TERRITORIAL	23
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.3 OBJETIVOS	27
1.3.1 Objetivo general.....	27
1.3.2 Objetivos específicos	27
CAPÍTULO 2	28
MARCO TEÓRICO.....	28
2.1 ANTECEDENTES.....	28
2.2 CONOCIMIENTOS GENERALES SOBRE LAS AGUAS RESIDUALES.....	29
2.2.1 Constituyentes de las aguas residuales.....	30
2.2.2 Contaminantes de importancia estudiados en el tratamiento de aguas residuales	32
2.2.3 Caracterización de aguas residuales.....	33

2.2.3.1	Características físicas	34
2.2.3.2	Características químicas inorgánicas.....	36
2.2.3.3	Características químicas orgánicas.....	38
2.2.4	Tratamiento de aguas residuales	40
2.2.4.1	Pretratamiento de las aguas residuales	41
2.2.4.2	Tratamiento primario de las aguas residuales.....	41
2.2.4.3	Tratamiento secundario de las aguas residuales	43
2.2.4.4	Tratamiento terciario/avanzado de las aguas residuales.....	44
2.2.5	Principales equipos y procesos empleados en el tratamiento de aguas residuales	45
2.2.5.1	Homogeneización de caudales.....	45
2.2.5.2	Desbaste.....	47
2.2.5.3	Coagulación.....	50
2.2.5.4	Floculación	53
2.2.5.5	Mezclado	54
2.2.5.6	Sedimentación	60
2.2.5.7	Filtración.....	66
2.3	DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS Y DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA (LAYOUT)	68
2.3.1	Diagrama de flujo de proceso	68
2.3.2	Distribución de la planta (layout).....	69
2.3.2.1	Elaboración del plano de distribución	69
2.4	ESTUDIO DE COSTOS.....	70

2.4.1 Costos de la planta	70
2.4.1.1 Costos de inversión.....	71
2.4.2 Inversión de capital	72
2.4.2.1 Estimación de la inversión de capital fijo.....	73
2.4.2.2 Métodos para estimar la inversión de capital	74
CAPÍTULO 3	76
DESARROLLO DEL PROYECTO	76
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES LÍQUIDOS DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE PAPEL	76
3.1.1 Estudio del diagrama de flujo de proceso de la planta de reciclaje de papel.....	77
3.1.2 Materia prima para la obtención de la muestra de efluente	80
3.1.2.1 Papel	80
3.1.2.2 Agua.....	81
3.1.2.3 Colorantes.....	81
3.1.2.4 Pegamentos.....	84
3.1.3 Determinación de la cantidad de materia prima a emplear en la preparación de las muestras para la caracterización.....	85
3.1.4 Proceso de obtención de las muestras de efluente	87
3.1.5 Definición de la cantidad de muestras a analizar.....	87
3.1.6 Análisis fisicoquímicos realizados a los efluentes líquidos del reciclaje de papel.....	88
3.1.6.1 Equipos, materiales, sustancias y herramientas.....	89

3.2 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS NECESARIOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE PAPEL.....	92
3.2.1 Regulación de los caudales de entrada a la planta de tratamiento de aguas residuales	93
3.2.2 Reducción de la turbidez.....	94
3.2.3 Reducción de sólidos suspendidos.....	94
3.2.3.1 Mezcla rápida	95
3.2.3.2 Aditivos coagulantes.....	95
3.2.3.3 Mezcla lenta (floculación).....	97
3.2.3.4 Sedimentación	97
3.2.3.5 Selección de la dosis óptima de coagulante.....	97
3.2.4 Reducción de DBO y DQO.....	99
3.2.5 Dimensionamiento de los equipos seleccionados	100
3.2.5.1 Establecimiento del caudal de la planta.....	100
3.2.5.2 Dimensionamiento del tanque de homogeneización	100
3.2.5.3 Características del mezclador estático.....	102
3.2.5.4 Dimensionamiento de la unidad de mezcla lenta (floculador)	103
3.2.5.5 Dimensionamiento del sedimentador	106
3.2.5.6 Dimensionamiento del filtro de arena seleccionado.....	111
3.2.5.7 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de agua tratada.....	112
3.2.6 Propuestas para la disposición de los efluentes tratados.....	112

3.3 PRESENTACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO SELECCIONADO Y SU DISTRIBUCIÓN EN PLANTA	113
3.3.1 Diagrama de flujo del proceso seleccionado.....	113
3.3.1.1 Descripción del diagrama de flujo de proceso.....	114
3.3.2 Simulación en laboratorio del proceso seleccionado	115
3.3.3 Distribución en planta de los equipos seleccionados	117
3.4 REALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE COSTOS PARA LA INSTALACIÓN DE LA PLANTA SELECCIONADA	118
3.4.1 Tanque de homogeneización.....	118
3.4.2 Mezclador estático	120
3.4.3 Unidad de floculación	121
3.4.4 Sedimentador	123
3.4.5 Filtro de arena	124
3.4.6 Tanque de almacenamiento de agua tratada.....	124
3.4.7 Costo del equipo entregado	125
3.4.8 Estimación del costo total para la instalación de la planta.....	125
CAPÍTULO 4.....	127
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	127
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES LÍQUIDOS DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE PAPEL	127
4.1.1 Proceso de obtención de las muestras de los efluentes líquidos del reciclaje de papel.....	127
4.1.2 Caracterización de los efluentes líquidos de la planta de reciclaje de papel.....	129

4.2 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS NECESARIOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE PAPEL.....	131
4.2.1 Selección de los aditivos químicos para la coagulación	132
4.2.2 Dimensionamiento de los equipos seleccionados	135
4.2.3 Propuestas para la disposición de los efluentes tratados.....	141
4.3 PRESENTACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO SELECCIONADO Y SU DISTRIBUCIÓN EN PLANTA	141
4.3.1 Descripción del diagrama de flujo del proceso seleccionado	141
4.3.2 Simulación del proceso en laboratorio.....	144
4.3.3 Distribución en planta de los equipos seleccionados (layout)	145
4.4 ESTUDIO DE COSTOS PARA LA INSTALACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	146
4.5 CONCLUSIONES	149
4.6 RECOMENDACIONES.....	149
BIBLIOGRAFÍA	151
ANEXO.....	¡Error! Marcador no definido.
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	155

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Descripción de las principales ciudades del estado Anzoátegui	24
Tabla 2.1 Principales características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales y su procedencia.....	30
Tabla 2.2 Contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales.....	32
Tabla 2.3 Operaciones y procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas residuales.....	42
Tabla 2.4 Tipos de sedimentación que intervienen en el tratamiento del agua residual.....	62
Tabla 2.5 Características de los medios filtrantes en filtros rápidos de gravedad	68
Tabla 2.6 Denominación de las estimaciones de costos.....	72
Tabla 2.7 Factores relativos para la estimación de la inversión de capital para los diversos rubros basados en el costo de los equipos entregados	75
Tabla 3.1 Equipos de laboratorio empleados para simular los procesos industriales a realizarse en la planta de reciclaje de papel	78
Tabla 3.2 Porcentajes en masa de las corrientes de materia prima involucradas en el proceso	80
Tabla 3.3 Colorantes naturales a emplear en la producción del papel reciclado	82
Tabla 3.4 Cantidades de materia prima requeridas para la producción en laboratorio de los efluentes a estudiar.	86
Tabla 3.5 Caracterización fisicoquímica realizada a las diferentes muestras de efluentes obtenidas en laboratorio.....	89
Tabla 3.6 Parámetros que exceden el límite permitido por la legislación ambiental vigente.....	90

Tabla 3.7 Parámetros de diseño obtenidos a partir de pruebas de jarra.	99
Tabla 3.7 Costo de construcción del tanque de homogeneización.....	120
Tabla 3.8 Costos asociados a la procura de equipos importados	121
Tabla 3.9 Costo total de la unidad de floculación seleccionada.	122
Tabla 3.10 Costo total del sedimentador seleccionado.	124
Tabla 3.11 Costo total del equipo entregado.....	125
Tabla 3.12 Costo total de inversión para la instalación de la planta de tratamiento propuesta.	126
Tabla 4.1 Combinación de materias primas realizadas para obtener la muestra de los efluentes del proceso de reciclaje.....	129
Tabla 4.2 Caracterización fisicoquímica realizada a las diferentes muestras de efluentes obtenidas en laboratorio.....	130
Tabla 4.3 Equipos seleccionados para el tratamiento de los efluentes de la planta de reciclaje	133
Tabla 4.4 Dimensiones de los equipos seleccionados.....	137
Tabla 4.5 Resultados de los análisis del agua tratada en el proceso simulado en laboratorio.	144
Tabla 4.6 Costo total del equipo entregado.....	148
Tabla 4.7 Costo total de inversión para la instalación de la planta de tratamiento propuesta.	148
Tabla B.1 Resultados de análisis fisicoquímicos realizados a la muestra 1. ¡Error! Marcador no defini	
Tabla B.2 Resultados de análisis fisicoquímicos realizados a la muestra 2. ¡Error! Marcador no defini	
Tabla B.3 Resultados de análisis fisicoquímicos realizados a la muestra 3. ¡Error! Marcador no defini	
Tabla B.4 Resultados de análisis fisicoquímicos realizados a la muestra 4. ¡Error! Marcador no defini	

Tabla B.5 Resultados de análisis fisicoquímicos realizados a la muestra 5. **Error! Marcador no definido.**

Tabla B.6 Resultados de análisis fisicoquímicos realizados a la muestra 6. **Error! Marcador no definido.**

Tabla C.1 Hoja de especificaciones para la selección del mezclador estático. **Error! Marcador no definido.**

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Situación geográfica del estado Anzoátegui. [2]	23
Figura 2.1 (a) Conos Imhoff para la determinación de sólidos sedimentables; (b) Fracción de sólidos sedimentada al transcurrir 60 minutos.	34
Figura 2.2 Diagrama de flujo para la homogeneización de caudal: (a) unidad en línea y (b) unidad en derivación [15].....	47
Figura 2.3 Rejas de limpieza manual [21].	49
Figura 2.4 Tamiz estático autolimpiante: (a) Vista frontal instalado en planta; (b) Esquema de funcionamiento [14].	50
Figura 2.5 Mezcladores por resalto hidráulico: (a) Resalto en canal horizontal; (b) Resalto en canales de fondo inclinado; (c) Canaleta Parshall; (d) Vertedero rectangular [22].	56
Figura 2.6 Mezcladores estáticos en línea: (a) Difusor en tubería; (b) Inyectores; (c) Mezclador estático [22].	58
Figura 2.7 Floculadores hidráulicos de pantallas [22].	59
Figura 2.8 Esquema de sedimentación en un sedimentador rectangular [14].....	64
Figura 2.9 Esquema de la zonificación de un sedimentador rectangular [22].	65
Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de reciclaje de papel [7].	77
Figura 3.2 Tipos de papel empleado como materia prima para la elaboración del papel reciclado: (a) papel bond, (b) periódico, (c) cartón y (d) cartulina.	81
Figura 3.3 <i>Índigofera tinctoria</i> [29].....	83
Figura 3.4 Proceso de obtención del colorante a partir de la planta <i>Indigofera tinctoria</i>	83

Figura 3.5 <i>Bixa Orellana</i> [31].....	84
Figura 3.6 Proceso de obtención del colorante a partir de la <i>Bixa orellana</i>	84
Figura 3.7 (a) almidón de yuca, (b) hoja del yagrumo.....	85
Figura 3.8 (a)Vista del árbol, follaje y fruto de moringa, (b) Semillas del fruto de moringa.	96
Figura 3.9 Inclinación del fondo del tanque de homogeneización.	102
Figura 3.10 Mezclador estático modelo 2-40C-4-6-2 [38].	102
Figura 3.11 Secuencia de los procesos seleccionados para el tratamiento.	114
Figura 3.12 Filtro de arena empleado para la simulación en laboratorio: (a) materiales empleados como medios filtrantes, (b) disposición de las capas en el lecho, (c) detalle de los orificios de salida de agua filtrada, (d) detalle del difusor superior del lecho.	117
Figura 4.1 Dimensiones del tanque de homogeneización seleccionado.	136
Figura 4.2 (a) dimensiones de la unidad de floculación, (b) dimensiones de las pantallas deflectoras.....	138
Figura 4.3 Dimensiones del sedimentador seleccionado: (a) vista de planta, (b) corte lateral.....	139
Figura 4.4 Dimensiones de la pantalla difusora del sedimentador con diámetro de orificio de $D = 0,05$ m.	139
Figura 4.5 Dimensiones del filtro de gravedad seleccionado.	140
Figura 4.6 Dimensiones del tanque de almacenamiento de agua tratada.....	140
Figura 4.7 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento seleccionado.	142
Figura A.1 Procedimiento experimental seguido para la determinación de temperatura en aguas.....	¡Error! Marcador no definido.

- Figura A.2** Procedimiento experimental seguido para la determinación de pH en aguas.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A.3** Procedimiento experimental seguido para la determinación de DQO en aguas.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A.4** Procedimiento experimental seguido para la determinación de la conductividad en aguas.**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A.5** Procedimiento experimental seguido para la determinación de alcalinidad en aguas.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A.6** Procedimiento experimental seguido para la determinación de dureza en aguas.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A.7** Procedimiento experimental seguido para la determinación de cloruros en aguas.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A.8**Procedimiento experimental seguido para la determinación de nitrógeno en aguas.....**¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C.1** Características de los mezcladores estáticos KOFLO [38].**¡Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN TERRITORIAL

El estado Anzoátegui se ubica en el noreste de Venezuela, y con un área territorial aproximada de 43.300 km² (4,7% del territorio nacional), está localizado entre las coordenadas 07°40'16", 10°15'36" de latitud norte y 62°41'05", 65°43'09" de longitud oeste en la región nor-oriental del país, delimitado por el estado Monagas y Sucre por el este, Bolívar por el sur, Guárico y Miranda por el oeste y al norte por el mar Caribe, figura 1.1, dividido en 21 municipios; los ríos principales son Amana, Cariz, Guanipa, Guere, Morichal Largo, Neverí, Pao, Tigre, Unare, Zuata y un sector del bajo Orinoco; su clima se caracteriza por altas temperaturas, entre los 25 y 33°C, el nivel de las precipitaciones fluctúa entre los 530 y 1400 mm al año [1].



Figura 1.1 Situación geográfica del estado Anzoátegui. [2]

La proyección de la población del estado para año 2008 se estimó en 2.961.160 habitantes, basándose en el censo del año 2001[3]. En la tabla 1.1 se describe brevemente las características de las ciudades de la zona norte del estado Anzoátegui [3].

Tabla 1.1. Descripción de las principales ciudades del estado Anzoátegui [1,4].

Ciudad	Barcelona	Puerto La Cruz	Lechería	Guanta
Municipio	Simón Bolívar	Juan A. Sotillo	Diego Urbaneja	Guanta
Código postal	6001	6023	6016	6014
Latitud	10°04'0" N	10°13' N	10°12'06 N	10°14'18 N
Longitud	64°43'0" O	64° 37' O	64°41'47 O	64°35'30 O
Superficie	1706 km ²	244 km ²	18 km ²	67 km ²
Altitud	13 msnm.	10 msnm	6 msnm.	14 msnm
Fundada (año)	1638	1862	1535	1800
Fundada como	Nueva Barcelona del Cerro Santo	Puerto de la Santa Cruz	San Miguel de Neverí	Guanta

La planta de reciclaje de papel, ubicará en el sector de La Pica del Neverí, parroquia el Carmen, municipio Simón Bolívar, en el estado Anzoátegui. Y en los mismos terrenos se contempla un área de 291,79 m², donde se procederá a la instalación de la planta tratamiento de efluentes diseñada en este proyecto.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Aunque el uso del papel se remonta aproximadamente a 2000 años antes de Cristo con el uso del papiro por parte de los egipcios, quienes lo obtenían a partir de una planta acuática del mismo nombre, fueron los chinos cerca del año 105 d.C. que desarrollaron el papel a partir de la corteza de la madera tal como se conoce hoy y lo difundieron alrededor del mundo, pasando primeramente a los árabes, quienes lo llevaron a España en el año 1151, desde donde se extendió a toda Europa. Sin embargo no fue hasta el siglo XV con la invención de la imprenta que el papel se convirtió en un producto de uso masivo entre la población mundial.

En la actualidad el consumo de papel alrededor del mundo es inmenso; como referencia se tiene que para el año 2005 el consumo anual aparente de papel y cartón por persona (determinado en función de la relación producción nacional – importaciones – exportaciones) en España fue de 168 kg, Estados Unidos 314 kg, Canadá 244 kg, Japón 241 kg, Alemania 228 kg y en Venezuela de 21 kg [5]; si se toma en consideración que para la producción de una tonelada de papel partir de la corteza de la madera es necesario derribar alrededor de 17 árboles, consumir cerca de 440.000 litros de agua potable, y un requerimiento energético de aproximadamente 7.600 kw/h [6], se puede tener una idea del nivel de degradación a la que se somete el ambiente para satisfacer el consumo mundial. Si se suma también que en muchas ocasiones durante el proceso de producción se emplean sustancias altamente tóxicas a base de cloro, los efluentes de estas industrias, generan una gran incidencia de contaminación en las aguas y los suelos donde se depositan, disminuyendo la posibilidad del desarrollo de la vida vegetal y animal.

En base a lo anterior se debe tomar conciencia e inculcar en la población la cultura del reciclaje, desarrollando industrias procesadoras de papeles y/o cartones ya usados que permitan disminuir la cantidad de árboles que se derriban cada año así como también la cantidad de efluentes contaminantes que son arrojados al ambiente.

El reciclaje es una alternativa ecológica de gran relevancia que no necesariamente conlleva a la disminución de la calidad del papel obtenido, pero que si tiene grandes aportes por cuanto se consumen mucho menos recursos tanto materiales como energéticos que los necesarios para la producción a partir de materia prima virgen.

En Venezuela es poco el desarrollo que se tiene en materia del reciclaje de papel, quedando las pocas plantas procesadoras de papel ya usado relegadas a la zona central del país, es por ello que se diseñó una planta ecológica para el reciclaje de papel en la zona norte del estado Anzoátegui que atendiera los requerimientos para el manejo de los desechos de papel de la población de los municipios Bolívar, Sotillo, Guanta y Urbaneja. Para obtener financiamiento y la permisología respectiva para la instalación de dicha planta procesadora, es necesario definir el destino que se le dará a los efluentes del proceso, lo cual impulsa la idea de realizar el diseño preliminar de una planta de tratamiento de efluentes que se encargue de manejarlos de manera segura y menos contaminante, reduciendo de ser posible los costos asociados a la operación de la planta de reciclaje. Para ello se comenzará por caracterizar los efluentes líquidos que provienen de la planta de reciclaje de papel, que se realizarán a nivel de laboratorio (en vista que la planta principal aun se encuentra en periodo de desarrollo se elaborará el papel a nivel de laboratorio en forma artesanal, utilizando las materias primas que se tiene previsto utilizar en la planta ya diseñada) y a partir de los resultados obtenidos seleccionar los equipos que serán necesarios para tratarlos, lo que a su vez permitirá definir el destino que se dará a estas aguas, con estos datos se desarrollará el diagrama de flujo del proceso, así como su ubicación y distribución dentro de la planta (layout), finalmente se realizará un estudio de costos para la instalación final de la planta de tratamiento de aguas residuales de la fábrica de papel reciclado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una planta de tratamiento de efluentes, para una planta ecológica procesadora de papel reciclado en la zona norte del estado Anzoátegui.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar los efluentes líquidos provenientes de la planta ecológica para el reciclaje de papel.
2. Seleccionar los equipos necesarios para el tratamiento de los efluentes líquidos provenientes de la planta ecológica para el reciclaje de papel y propuestas para la disposición de dichos líquidos.
3. Presentar el diagrama de flujo del proceso seleccionado y su ubicación en la planta de reciclaje de papel (layout).
4. Realizar un estudio de costos clase III para la instalación de la planta de tratamiento seleccionada.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Martínez y Mijares, realizaron el diseño conceptual de una planta ecológica procesadora de papel reciclado a partir de un estudio de mercado que justificara su ubicación en la zona norte del estado Anzoátegui, empleando en el proceso pegamentos y colorantes de origen vegetal que dieran el carácter ecológico a esta planta [7].

Reyes, realizó un estudio en la refinería Puerto la Cruz de PDVSA sobre las diferentes tecnologías de tratamiento que podrían aplicarse a los efluentes de dicha planta para permitir su reutilización, realizando el diseño del sistema de tratamiento a emplear y entregando a la vez el estudio sobre el beneficio económico que supone para la empresa el uso de las aguas residuales una vez tratadas [8].

Salazar, realizó el estudio de los efluentes de un planta procesadora de leche y productos pasteurizados, encontrando que las concentraciones de sólidos suspendidos y materia orgánica se encontraban muy por encima del límite establecido por las regulaciones ambientales vigentes, por lo cual se propuso el diseño de una planta de tratamiento de efluentes que permitiera procesar los efluentes hasta darles las características exigidas para su vertido en cuerpos de agua [9].

Vallee, realizó el diseño de una planta modular de tratamiento en la compañía Oxialquilados Venezolanos C.A., con una capacidad menor a las que ya

existían, se comenzó por determinar las cargas de diseño a manejar por la planta, basando en ello la selección de los equipos tomando también como referencia experiencias en plantas de mayor tamaño empleadas con el mismo fin, posteriormente se realizaron los diagramas de flujo correspondientes al proceso de tratamiento, y a partir de allí el estudio de costos para su construcción [10].

Fernandez, realizó el diseño preliminar de una planta de tratamiento de agua potable en el embalse San Juan para los municipios Gómez y Marcano del estado Nueva Esparta, inicialmente se realizó la caracterización del agua del embalse, obteniéndose que múltiples parámetros debían ajustarse a la normativa legal vigente, sobre la base de estos resultados se seleccionó el proceso de tratamiento requerido, dimensionando los equipos principales, a partir de lo cual se realizó el estudio de costos correspondiente [11].

Este proyecto se diferencia de los anteriores en que se presenta una planta que tratará los efluentes producidos en una planta ecológica procesadora de papel reciclado que no utilizará químicos dañinos al ambiente y por lo tanto el tratamiento que se le realizará a dichos efluentes también será amigable con el ambiente.

2.2 CONOCIMIENTOS GENERALES SOBRE LAS AGUAS RESIDUALES

Se define un agua residual como aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e industriales [12].

Una manera más completa de definir un agua residual es como aquellos líquidos que han sido utilizados en las actividades diarias de una ciudad (domésticas, comerciales, industriales y de servicios), y se clasifican de la siguiente manera [13]:

- *Aguas residuales municipales*: residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal
- *Aguas residuales industriales*: las aguas residuales provenientes de las descargas de industrias de manufactura

2.2.1 Constituyentes de las aguas residuales

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. La tabla 2.1 muestra las principales propiedades físicas de las aguas residuales, así como sus principales constituyentes químicos y biológicos, y la procedencia de cada uno según el tipo de agua residual [14].

Tabla 2.1 Principales características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales y su procedencia [15].

Características	Procedencia
Propiedades físicas	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica.
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales.
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales.
Constituyentes químicos	
Orgánicos	
Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Grasas animales, aceites y grasa	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Pesticidas	Residuos agrícolas.
Fenoles	Vertidos industriales.

Proteínas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.

Tabla 2.1 Continuación.

Agentes tensoactivos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Otros	Degradación natural de materia orgánica.
<i>Inorgánicos</i>	
Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Metales pesados	Vertidos industriales.
Nitrógeno	Residuos agrícolas y aguas residuales domésticas.
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de escorrentía.
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Azufre	Agua de suministro, aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
<i>Gases</i>	
Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de residuos domésticos.
Metano	Descomposición de residuos domésticos.
Oxígeno	Agua de suministro, infiltración de agua superficial.
<i>Contaminantes biológicos</i>	
Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
<i>Protistas</i>	

Eubacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.
Arqueobacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.
Virus	Aguas residuales domésticas.

2.2.2 Contaminantes de importancia estudiados en el tratamiento de aguas residuales

De las características mostradas en la tabla 2.1, son los sólidos, los compuestos orgánicos y los patógenos los que generalmente tienen mayor importancia a la hora de evaluar un agua residual para su tratamiento [15], sin embargo gran parte de las normas implantadas en los últimos años resultan más exigentes, incluyendo el control de la eliminación de nutrientes y de los contaminantes prioritarios. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, las exigencias normativas también incluyen la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y en algunos casos, sólidos inorgánicos disueltos [14]. En la tabla 2.2 se muestran algunos de los contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales, así como la razón de esa importancia.

Tabla 2.2 Contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales [14].

Contaminantes	Importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar a depósitos de lodo y de condiciones anaerobias cuando se vierte el agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas animales. Si se descarga al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitir enfermedades contagiosas por medio

	de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al medio acuático, estos nutrientes pueden favorecer al crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden causar contaminación de aguas subterráneas.
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en las aguas residuales.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento, ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas.
Metales pesados	Los metales pesados son frecuentemente añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y es necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se pretende reutilizar el agua residual.

2.2.3 Caracterización de aguas residuales

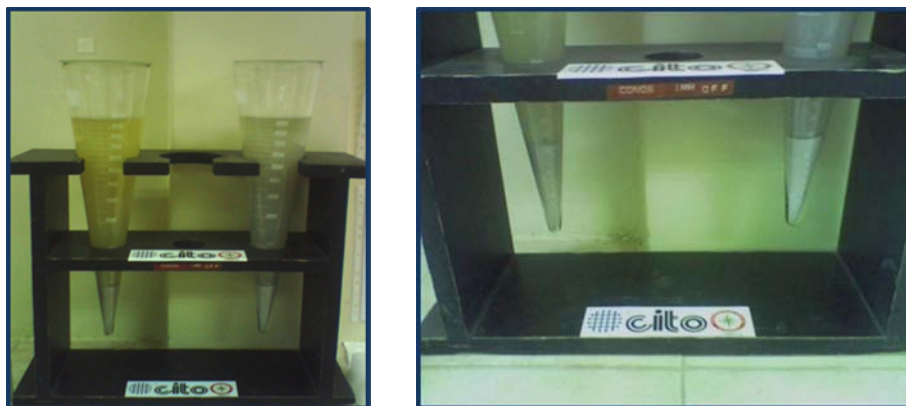
El diccionario Larousse define la palabra caracterizar como “*determinar a alguien o algo por sus cualidades peculiares*” [16], si se aplica esta definición a la caracterización de aguas residuales se puede decir que es que la determinación de las propiedades fisicoquímicas y bacteriológicas del efluente, así como las condiciones de captación del mismo para diferenciarlo de otros efluentes y facilitar su tratamiento.

2.2.3.1 Características físicas

Las características físicas más resaltantes son las referentes al contenido de sólidos, sin embargo características como la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad, también resultan de importancia al caracterizar un efluente [14].

- **Sólidos**

Analíticamente, se define el contenido de sólidos totales como la materia residual obtenida luego de someter al agua a un proceso de evaporación a una temperatura entre 103 y 105 °C y pueden clasificarse en filtrables y no filtrables (también llamados suspendidos) Lo sólidos sedimentables se definen como aquellos que se sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos (figura 2.1). Los sólidos sedimentables constituyen una medida aproximada de la cantidad de lodo que se obtendrá en la sedimentación primaria del agua residual. La fracción filtrable de los sólidos corresponde a sólidos coloidales y disueltos. Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas, e iones en disolución en el agua [14].



(a)

(b)

Figura 2.1 (a) Conos Imhoff para la determinación de sólidos sedimentables; (b) Fracción de sólidos sedimentada al transcurrir 60 minutos.

- **Temperatura**

La temperatura del agua es un parámetro muy importante dada su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción, así como sobre la aptitud del agua para ciertos usos útiles. Por otro lado, el oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. El aumento en las velocidades de las reacciones químicas que se produce por un aumento en la temperatura, combinado con la reducción del oxígeno presente en las aguas superficiales, es causa frecuente de agotamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto durante los meses calurosos [14].

- **Turbiedad**

La turbiedad es una medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, y representa otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión. La medición de la turbiedad se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones. La materia coloidal dispersa o absorbe la luz, impidiendo su transmisión [14].

- **Conductividad**

La conductividad eléctrica del agua es la media de la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. Como la corriente eléctrica es transportada por los iones en solución, el aumento en la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad. Por tanto el valor de la medida de conductividad es usado como un parámetro sustituto en la concentración de sólidos disueltos totales. En la actualidad la conductividad representa el parámetro más importante para determinar la posibilidad de uso de un agua para riego [17].

2.2.3.2 Características químicas inorgánicas

- **Nitrógeno**

La medición del nitrógeno es de suma importancia en la evaluación de aguas residuales, ya que representa un nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas, y de no controlarse puede ocasionar un grave desequilibrio ecológico. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato.

El contenido de nitrógeno orgánico se determina por el método Kjeldahl, en el cual se hierva la muestra con el objeto de eliminar el amoníaco, para dar paso al proceso de digestión en el que se el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco. El nitrógeno Kjeldahl total se determina del mismo modo que el nitrógeno orgánico, con la diferencia que no se elimina el amoníaco presente antes del proceso de digestión. Por tanto el nitrógeno Kjeldahl total incluye ambas formas de nitrógeno, el orgánico y amoniacal [14].

- **pH**

La concentración de iones hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo adecuado de pH para la existencia de la mayor parte de la vida biológica es relativamente estrecho, en general entre pH 5 y 9. El agua residual con concentraciones de ión hidronio inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos y el efluente puede modificar la concentración de ión hidrógeno en las aguas naturales si esta no se modifica antes de la evaluación de las aguas. El pH se mide generalmente en forma instrumental empleando un medidor electrónico con electrodos. También se emplean soluciones y papeles indicadores que cambian de color a diferentes intervalos de pH [14,15].

- **Alcalinidad**

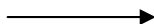
La alcalinidad del agua se define como su capacidad para neutralizar ácidos. La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco. De todos ellos, el bicarbonato de calcio y el bicarbonato de magnesio son los más comunes. La alcalinidad se determina por titulación con un ácido normalizado, expresándose los resultados en términos de carbonato de calcio CaCO_3 . La concentración de alcalinidad en un agua residual es importante en aquellos casos en los que empleen tratamientos químicos, en la eliminación biológica de nutrientes y cuando haya que eliminar el amoníaco mediante arrastre por aire [14,15].

- **Cloruros**

La concentración de cloruros en aguas residuales es un parámetro importante relacionado con su utilización. Los cloruros que se encuentran en el agua residual proceden de la disolución de los suelos, y rocas que los contengan y que están en contacto con el agua. En el caso de aguas costeras, su presencia también es debida a la intrusión de aguas saladas. Otra fuente de cloruros es la descarga de aguas residuales domésticas agrícolas e industriales a aguas superficiales [14,15].

- **Dureza**

Se refiere a la concentración de cationes polivalentes presentes en el agua, generalmente calcio y magnesio. Existen varias metodologías para su determinación siendo la más empleada la dureza total, la cual se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio expresadas como carbonato de calcio en miligramos por litro. Las aguas duras generalmente producen en tuberías de los intercambiadores de calor calderas y otras unidades en las cuales la temperatura del

**(Ec. 2.1)**

Ésta es una reacción de oxidación en donde se consume O_2 de la masa de agua. Si la demanda de oxígeno por parte del residuo es lo suficientemente alta, puede agotar el O_2 y en el peor de los casos el medio puede volverse anaerobio. La DBO se define como la cantidad de oxígeno que necesitan los organismos vivientes en la fase de estabilización de la materia orgánica de aguas / aguas residuales. En la prueba estándar de la DBO, una pequeña muestra de agua residual se coloca en una botella de DBO (volumen de 300 ml). La botella se completa usando agua saturada con oxígeno y con los nutrientes requeridos para crecimiento biológico. Antes de tapar la botella se mide la concentración de oxígeno disuelto. Después de incubar la botella por cinco días a 20 °C en ausencia de luz, la concentración de oxígeno disuelto se mide nuevamente. La DBO de la muestra es la diferencia entre los valores de oxígeno disuelto inicial y final, expresados en miligramos por litro, dividido por la fracción decimal del volumen de muestra usada. El valor calculado por este procedimiento se conoce como la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días y 20 °C [14,15,19].

- **Demanda química de oxígeno (DQO)**

La prueba de la DQO es usada para medir el material orgánico presente en las aguas residuales, susceptible de ser oxidado químicamente. La demanda química de oxígeno está basada en el hecho de que todos los compuestos orgánicos (con raras excepciones) pueden ser oxidados a dióxido de carbono y agua mediante la acción, en medio ácido, de agentes oxidantes. Por esta razón los valores de DQO son mayores a los correspondientes de la DBO de la muestra, y están en proporción a la mayor o menor cantidad de materia orgánica biológicamente resistente a ser oxidada [14,19].

Para el ensayo se emplea un agente químico fuertemente oxidante como lo es el dicromato de potasio. El ensayo debe hacerse a altas temperaturas. Para facilitar la oxidación de determinados tipos de compuestos orgánicos es preciso emplear un catalizador (sulfato de plata). Puesto que algunos compuestos orgánicos interfieren con el normal desarrollo del ensayo, deben tomarse medidas adecuadas para eliminarlos antes de realizarlo [14].

2.2.4 Tratamiento de aguas residuales

Se entiende por tratamiento de las aguas residuales como la serie de procesos que se llevan a cabo para disminuir la carga contaminante de los efluentes domésticos e industriales y cumplir con las regulaciones ambientales vigentes lo cual permita su posterior vertido al ambiente con el menor impacto posible, o para cumplir con especificaciones de procesos que hagan viable la reutilización de las aguas una vez tratadas [19].

El objetivo de un tratamiento de agua residual es proteger la calidad de las aguas receptoras del efluente tratado, y esto se logra (entre otros) con plantas depuradoras diseñadas para [19]:

- Reducir la DBO_5 y/o DQO.
- Reducir las concentraciones de sólidos.
- Reducir las concentraciones de nutrientes.
- Reducir los microorganismos patógenos.

En relación con la calidad del efluente existen otros objetivos que dependen del tipo de medio acuático a donde sean vertidos [19].

En la tabla 2.3 se muestran las operaciones y procesos unitarios para remover los principales contaminantes de las aguas residuales.

2.2.4.1 Pretratamiento de las aguas residuales

Se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Como ejemplos se puede citar el desbaste y dilaceración, para la eliminación de sólidos gruesos y trapos, la flotación para la eliminación de aceites y grasas, y el desarenado para la eliminación de materia en suspensión gruesa que pueda causar obstrucciones en los equipos y desgaste excesivo de los mismos. También puede haber necesidad cuando el caudal es inconsistente (por ejemplo el efluente de una planta que opera cinco días a la semana) de disponer de un equilibrado de caudales en un tanque de almacenamiento. Este tanque de equilibrio u homogeneización también puede emplearse para que se equilibre asimismo la carga contaminante si esta varía sustancialmente. [14,19].

2.2.4.2 Tratamiento primario de las aguas residuales

En esta etapa se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual. Esta eliminación suele llevarse a cabo mediante operaciones físicas tales como el tamizado y la sedimentación. El efluente del tratamiento primario suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una DBO alta. El objetivo es producir un efluente líquido de calidad aprovechable para la siguiente etapa de tratamiento y lograr una separación de sólidos que dé lugar a un lodo primario que pueda ser convenientemente tratado y vertido.

Entre los beneficios del tratamiento primario se incluyen [14,19]:

Tabla 2.3 Operaciones y procesos unitarios y sistemas de tratamiento utilizados para eliminar la mayoría de los contaminantes presentes en las aguas residuales [14].

Contaminante	Operación unitaria, proceso unitario, o sistema de tratamiento
Sólidos en suspensión	Desbaste y dilaceración Desarenado Sedimentación Filtración Flotación Adición de polímeros Coagulación / sedimentación Sistemas naturales (evacuación de terreno)
Materia orgánica biodegradable	Variantes de lodos activados Película fija: filtros percoladores Película fija: biodiscos Variantes del lagunaje Filtración intermitente en arena Sistemas físico – químicos Sistemas naturales
Compuestos orgánicos volátiles	Arrastre por aire Tratamiento de gases Adsorción en carbón
Patógenos	Cloración Hipocloración Cloruro de bromo Ozonización Radiación UV Sistemas naturales
Nitrógeno y fósforo	Eliminación biológica de nutrientes
Materia orgánica refractaria	Adsorción en carbón Ozonización terciaria Sistemas naturales
Metales pesados	Precipitación química Intercambio iónico Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno
Sólidos orgánicos disueltos	Intercambio iónico Ósmosis inversa Electrodialisis

- Reducción de los sólidos en suspensión.
- Reducción de la DBO.
- Separación del material flotante.

En el tratamiento primario se lleva a cabo una sedimentación en reposo con recogida de las materias flotantes y grasas así como la eliminación del lecho de lodo sedimentado. La sedimentación se lleva a cabo en decantadores con una geometría variada como puede ser circular, rectangular o cuadrada [20].

2.2.4.3 Tratamiento secundario de las aguas residuales

Esta etapa de tratamiento de las aguas residuales está principalmente encaminada a la eliminación de los compuestos biodegradables, aunque a menudo se incluye la desinfección como parte del tratamiento secundario. Se define como tratamiento secundario convencional como la combinación de diferentes procesos normalmente empleados para la eliminación de estos constituyentes, e incluye el tratamiento biológico con lodos activados, reactores de lecho fijo, los sistemas de lagunaje y la sedimentación [14].

El tratamiento secundario persigue la estabilización de distintos compuestos presentes en las aguas residuales por medio de la acción de microorganismos, principalmente bacterias. Una fracción de los compuestos se oxida por acción microbiana, librando energía mientras que el resto se utiliza para generar masa celular la energía liberada por el metabolismo se emplea para producir nuevas unidades de protoplasma. Por lo tanto, la razón de que la biomasa estabilice los compuestos presentes en el agua residual es que éstos proporcionan la energía y los compuestos químicos esenciales para su reproducción.

Otra finalidad del tratamiento secundario es la eliminación y control de nutrientes, la cual es de suma importancia entre otras razones por [14]:

- Vertido a cuerpos de agua receptores confinados, en los que se pueda crear o acelerar los procesos de eutrofización.
- Vertidos a cursos de agua en los que la nitrificación pueda limitar los recursos de oxígeno o en los que puedan proliferar el arraigamiento de plantas acuáticas.
- Recarga de aguas subterráneas que puedan ser usadas, indirectamente, para el abastecimiento público de agua.

Los principales nutrientes contenidos en las aguas residuales son el nitrógeno y el fósforo, y su eliminación puede llevarse a cabo por procesos químicos, biológicos o una combinación de ambos [14].

2.2.4.4 Tratamiento terciario/avanzado de las aguas residuales

Cuando las normativas ambientales para el vertido de efluentes en cuerpos de agua exigen parámetros específicos a cumplir por el agua residual tratada, y estas características no son alcanzadas por medio de los tratamientos convencionales, es necesario recurrir a procesos de tratamiento más específicos, y en ocasiones dirigidos a un tipo de contaminante en especial. Estos tratamientos o combinaciones de ellos son los que se conocen como tratamientos terciarios o avanzados del agua residual.

Los procesos y unidades que entran dentro de esta categoría incluyen la adsorción, el intercambio iónico, el arrastre, la oxidación química, la separación a través de membrana, coagulación floculación, filtración en medio granular, y cloración. Estos procesos se usan normalmente en combinación con los tratamientos biológicos, aunque en algunas ocasiones son los únicos procesos que están presentes en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales industriales [14,20].

2.2.5 Principales equipos y procesos empleados en el tratamiento de aguas residuales

2.2.5.1 Homogeneización de caudales

La homogeneización de caudales es una medida empleada para superar los problemas de tipo operativo que causan las variaciones de caudal y/o de cargas contaminantes de los afluentes de la planta de tratamiento. En general la homogeneización tiene como finalidad [15,19]:

- Homogeneización de caudales.
- Homogeneización de cargas contaminantes.
- Equilibrado de nutrientes.
- Equilibrado del pH.

La homogeneización del caudal es habitual en las industrias que operan cinco días a la semana. En ellas el caudal se iguala o se reparte en un periodo de siete días, así que el caudal que llega a la planta de tratamiento es el mismo durante toda la semana. De la misma manera, en el caso de la homogeneización orgánica o de carga contaminante, una industrial puede tener efluentes con valores altos de DQO varias veces durante la semana que se mantiene sólo unas pocas horas. La homogeneización puede emplearse como una medida de mejora en plantas ya existentes o en plantas nuevas. La decisión de diseño debe valorar si es más económica la instalación de depósitos de homogeneización o aumentar ligeramente las dimensiones de las unidades de procesos posteriores [19].

a) Ubicación del tanque de homogeneización

La ubicación de las instalaciones de homogeneización debe determinarse para cada caso concreto. Dado que la localización óptima variará en función del tipo de tratamiento, de las características de las redes de alcantarillado y de las del agua residual, es preciso realizar un estudio detallado de las diferentes posibilidades. Normalmente se sitúa después de las rejillas de desbaste y el desarenador y antes de la decantación primaria [14,19].

Existen dos tipos de unidades de homogeneización de caudales, denominados unidad en línea, o unidad en derivación, los cuales se muestran en la figura 2.2. En los primeros se hace pasar todo el caudal por el tanque de homogeneización, con lo que se logra la amortización importante del caudal y la carga contaminante. En el segundo tipo únicamente los caudales o cargas en exceso a los requeridos por el tratamiento se hacen pasar por el tanque de equilibrio, con lo que la amortiguación de caudales y cargas es menos efectiva, pero los costos de bombeo son mucho menores que para los sistemas en línea [15,19].

a) Dimensionamiento de tanques de homogeneización

Para dimensionar una unidad de homogeneización es necesario realizar un análisis basado en un balance de masas. En este método de balance de masas, el volumen de agua residual que ingresa a la planta en un intervalo de tiempo determinado se compara con el volumen de agua promedio horario, calculado para un periodo de 24 horas. Si el volumen entrante es menor que el valor promedio, el tanque de homogeneización comienza a ser drenado, mientras que si el volumen entrante es mayor que el valor promedio el tanque se comienza a llenar con el exceso de agua residual. La diferencia acumulada se usa para estimar el volumen necesario de almacenamiento de agua residual. Cabe destacar que no se tiene ninguna ventaja con el sobredimensionamiento de los tanques a la hora de equilibrar las variaciones que presentan las aguas residuales a tratar. La operación industrial sobre la base de

cinco días a la semana y 40 horas semanales hará que un tanque de homogeneización de dos días de almacenamiento tenga las dimensiones adecuadas para un funcionamiento continuo del sistema de tratamiento de aguas residuales bajo condiciones uniformes [15,20].

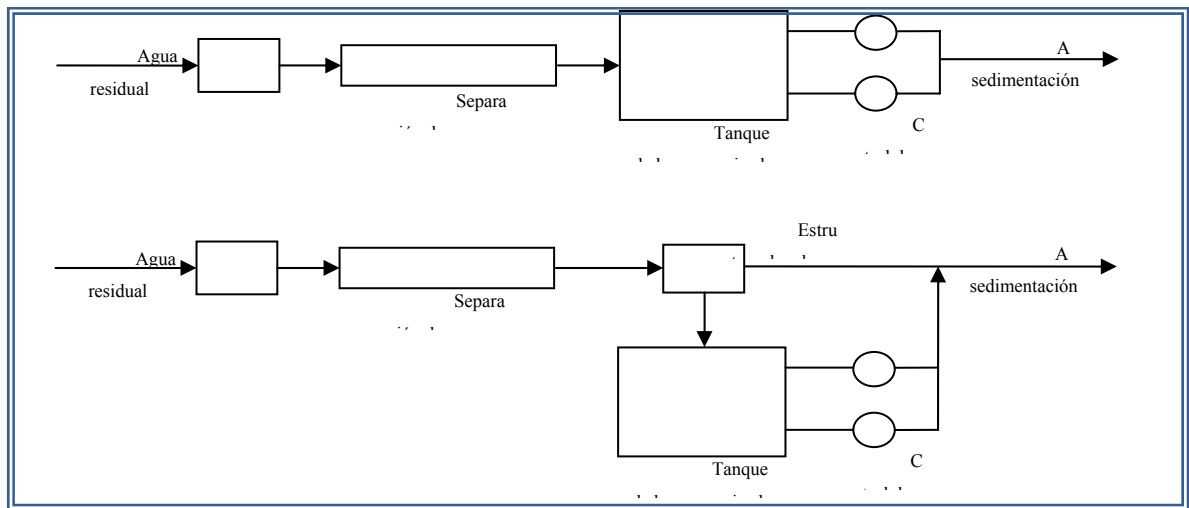


Figura 2.2 Diagrama de flujo para la homogeneización de caudal: (a) unidad en línea y (b) unidad en derivación [15].

2.2.5.2 Desbaste

Generalmente el primer paso en el tratamiento del agua residual consiste en la separación de los sólidos gruesos. El procedimiento habitual se basa en hacer pasar el agua residual bruta a través de rejillas de barras o tamices [14].

Los materiales retenidos en las rejillas y tamices se conocen con el nombre de residuos o basuras. Cuanto menor es la abertura libre del tamiz, mayor será la cantidad de residuos eliminada. A pesar de que no existe ninguna definición que permita identificar los materiales separables mediante rejillas y tamices, y de que no

existe ningún método reconocido para la medición de la cantidad de residuos eliminada, estos presentan ciertas propiedades comunes [14]:

- *Residuos retenidos en rejas de barras*: los residuos de tamaño grande (rejas de separación de 15 mm o superiores) consisten en desechos tales como piedras, ramas, trozos de chatarra, papel, raíces de arboles, plásticos y trapos. También se puede separar materia orgánica.
- *Residuos retenidos en tamices*: los residuos finos consisten en materiales retenidos en tamices con aberturas libres inferiores a 15 mm. Los tamices con aberturas entre 2 y 6 mm del 5 al 10% de los sólidos suspendidos afluentes, mientras que los tamices con aberturas entre 0,75 y 1,5 mm pueden retener entre el 10 y el 15 %, aunque se han obtenido porcentajes de remoción mayores. Los residuos finos contienen cantidades substanciales de grasas y espumas, razón por la que requieren similar atención.

a) Rejas de limpieza manual

Las rejas de este tipo como en la figura 2.3, se emplean por lo general en pequeñas estaciones de bombeo de agua residual antes de las bombas, válvulas, tuberías y otros elementos, para protegerlos de posibles daños y obturaciones ocasionados por objetos de gran tamaño como trapos y palos. En los casos en que se utilice rejas de limpieza manual, su longitud no deberá exceder de la que permita su correcta limpieza (aproximadamente 3m). Las barras que conforman la reja no suelen exceder los 10 mm de anchura por 50 mm de profundidad. Las barras van soldadas a unos elementos de separación situados en la cara posterior, fuera del recorrido del peine rascador [14,15].

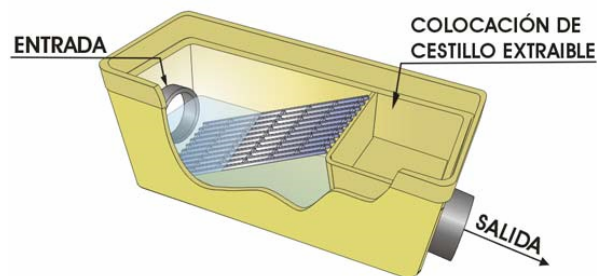


Figura 2.3 Rejas de limpieza manual [21].

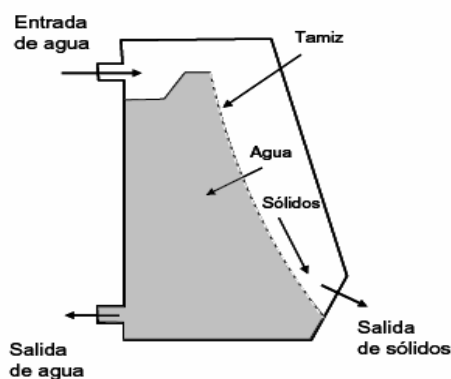
b) Rejas de limpieza mecánica

Las rejas de limpieza mecánica emplean cadenas sin fin, cables, o mecanismos con ruedas dentadas reciprocantes, que mueven un rastrillo empleado para remover los residuos acumulados por la rejilla. Muchos de los diseños más modernos incluyen la utilización de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable o los materiales plásticos. Estas rejas mecánicas se pueden dividir en cuatro tipologías principales [14,15]:

- Rejas de funcionamiento mediante cadenas.
- Rejas de movimiento oscilatorio.
- Rejas de catenarias.
- Rejas accionadas mediante cables.

c) Tamices

Los tamices modernos son del tipo estático (fijos) y de tambor giratorio, provistos de una malla fina de acero inoxidable o de un material no férreo. Normalmente las aberturas de los tamices oscilan entre 0,2 y 0,6 mm. El uso de este tipo de tamices queda limitado a plantas de pequeño tamaño en las que las pérdidas de carga no constituyan un problema [14]. En la figura 2.4 se muestra el esquema de un tamiz estático autolimpiante.



(a)

(b)

Figura 2.4 Tamiz estático autolimpiante: (a) Vista frontal instalado en planta; (b) Esquema de funcionamiento [14].

El en caso del tamiz de tambor, la malla se monta sobre un cilindro giratorio que se coloca en un canal. El agua residual puede circular, bien entrando en un extremo del tambor y saliendo del mismo a través de la malla filtrante, recogiendo los sólidos en la superficie interior de ésta, o bien entrando por la parte superior del elemento y saliendo por el interior del tambor, produciéndose la recogida de sólidos en la superficie exterior del tamiz. Como medio separador se emplea una malla ranurada o con sección de cuña construida en acero inoxidable [14].

2.2.5.3 Coagulación

El agua puede contener una 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. Por tanto la coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de las sustancias químicas y la aplicación de la energía de mezclado. La coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos. [22,23].

a) Coagulantes

Son productos químicos, (específicamente sales metálicas o polielectrolitos orgánicos) que al adicionarlos al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos de esta, para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando [22].

Los productos químicos comúnmente empleados como coagulantes en el tratamiento de aguas son el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, y el sulfato ferroso y férrico [21].

- *Sulfato de aluminio*: el sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas. Por esta razón, su almacenamiento debe hacerse en un lugar seco, libre de humedad. Es efectivo en intervalos de pH 6 a 8.

- *Sulfato ferroso*: el sulfato ferroso usado en el tratamiento de agua es un polvo de color verde muy soluble. Funciona de forma estable en un intervalo de pH de 4 a 11, uno de los más amplios conocidos.
- *Cloruro férrico*: se presenta en forma sólida o líquida; esta última es la más utilizada en el tratamiento del agua. Su aplicación es similar al anterior aunque de aplicación muy limitada por tener un intervalo de pH más corto. Es enérgico aunque puede presentar problemas de coloración en las aguas.
- *Sulfato férrico*: el sulfato férrico es un polvo blanco verdoso, muy soluble en el agua, su masa volumétrica aparente es 1.000 kg/m³. Debido a que en solución acuosa se hidroliza y forma ácido sulfúrico, es necesario prevenir los efectos de su acidez.

b) Factores que influyen en la coagulación

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación [23,24]:

- ✓ pH.
 - ✓ Turbiedad.
 - ✓ Sales disueltas.
 - ✓ Temperatura del agua.
-
- *Influencia del pH*

El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar [23].

- *Turbiedad*

La turbiedad del agua influye inversamente en la coagulación, es decir, a mayores niveles de turbiedad existen mayor número de partículas en suspensión lo que facilita la acción del coagulante sobre ellas por estar más próximas unas a otras y la desestabilización se da rápidamente. Cuando los niveles de turbiedad son bajos la dispersión del coagulante se requiere mayor tiempo para hacer contacto con las partículas coloidales y suspendidas, haciéndose más difícil el proceso de coagulación [23].

- *Influencia de las sales disueltas*

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las influencias siguientes sobre la coagulación y floculación [22]:

- ✓ Modificación del rango de pH óptimo.
- ✓ Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- ✓ Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos.
- ✓ Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente.

- *Influencia de la temperatura*

La variación de la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación. Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un flóculo [22].

2.2.5.4 Floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada para permitir el crecimiento y aglomeración de los

flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar. En esta etapa se tiene por objeto permitir los contactos entre los flóculos, la turbiedad y el color, la mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad pero no excesiva a fin de evitar que los flóculos ya formados puedan romperse; aún si el tiempo es no más del tiempo óptimo de floculación [22].

a) Parámetros de la floculación

Los parámetros que caracterizan la floculación son los siguientes [22]:

- ✓ Floculación ortocinética: se da por el grado de agitación proporcionada mecánica o hidráulica.
- ✓ Gradiente de velocidad: energía necesaria para producir la mezcla.
- ✓ Número de colisiones: choque entre microflóculos.
- ✓ Tiempo de retención: tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación.
- ✓ Densidad y tamaño de floculo.
- ✓ Volumen de lodos: los flóculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación.

2.2.5.5 Mezclado

El mezclado es una operación unitaria de gran importancia en muchas fases del tratamiento de aguas residuales, entre las que podemos citar: mezcla completa de una sustancia con otra, mezcla de suspensiones líquidas, mezcla de líquidos miscibles, floculación y transferencia de calor. En los procesos de coagulación floculación se diferencian dos tipos de mezclado según su intensidad: mezcla rápida y mezcla lenta [14].

a) Mezcla rápida

Se denomina mezcla rápida a las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, con la finalidad de que las reacciones de coagulación se den en condiciones óptimas correspondientes al mecanismo de coagulación predominante [22].

- *Tipos de mezcladores*

Existen muchos dispositivos para proporcionar una mezcla rápida para la dispersión de sustancias químicas en el agua. Pero en general se pueden dividir en dos clases principales: mecánicos e hidráulicos, como se describe a continuación:

- ✓ *Retromezcladores o mezcladores mecánicos*

Son equipos mecánicos de agitación en los que la turbulencia necesaria para la mezcla proviene de una fuente externa, generalmente un motor eléctrico y, de este modo, puede ser fácilmente controlable [23,25].

- ✓ *Mezcladores hidráulicos*

La mezcla rápida se produce cuando el flujo de un líquido pasa de un régimen rápido a un régimen lento, acompañado de agitación y grandes pérdidas de energía cinética. La potencia disipada en los mezcladores hidráulicos tiene origen en el trabajo interno del fluido y, por lo tanto, es función de la forma geométrica del mezclador y de las características del flujo. Un mezclador hidráulico bien diseñado puede resultar tan efectivo como un mezclador mecánico [22,25].

- *Resalto hidráulico*

El resalto hidráulico es un fenómeno que ocurre cuando la corriente líquida pasa de un régimen rápido a uno tranquilo, a través de una profundidad crítica, y

discurre de una profundidad menor a una mayor, mientras que la velocidad cambia de mayor a menor que la crítica. Los resaltos pueden producirse en canales horizontales o de fondo inclinado. Otro tipo de dispositivo muy utilizado en las plantas de tratamiento con la doble finalidad de medir el caudal y efectuar la mezcla rápida es la canaleta Parshall. También es posible utilizar un vertedero rectangular sin contracciones, instalado dentro de un canal de sección rectangular. Las representaciones de los distintos tipos de resaltos hidráulicos se muestran en la figura 2.5 [22].

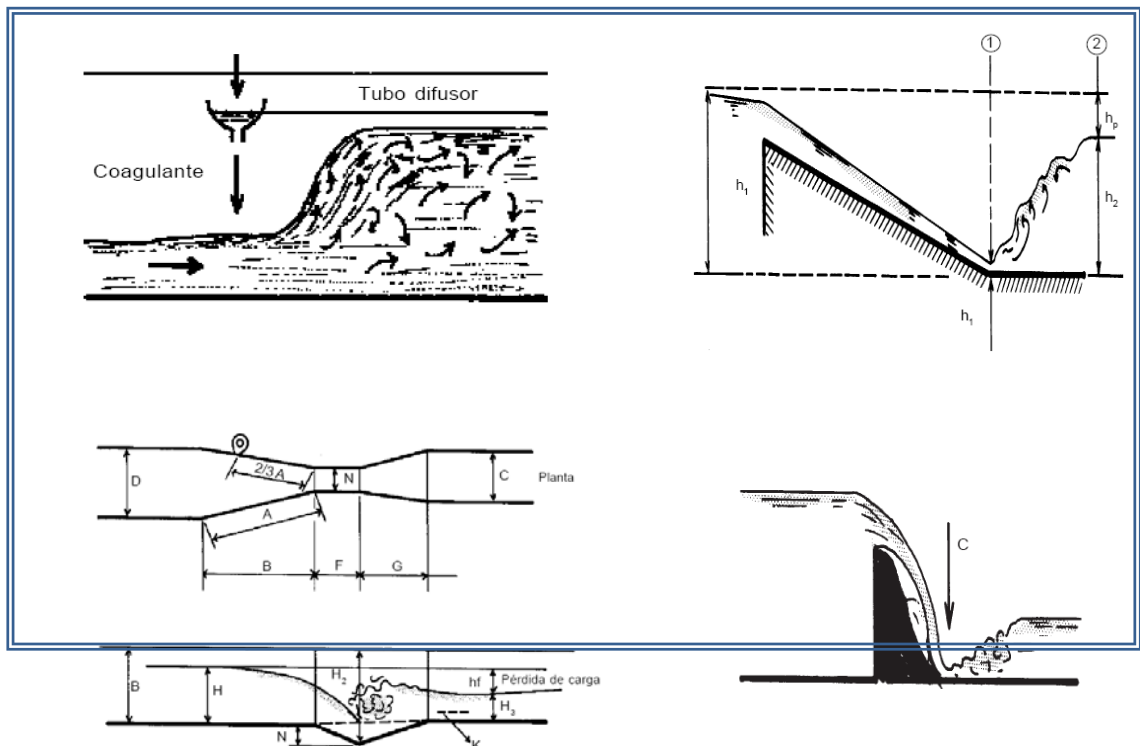


Figura 2.5 Mezcladores por resalto hidráulico: (a) Resalto en canal horizontal; (b) Resalto en canales de fondo inclinado; (c) Canaleta Parshall; (d) Vertedero rectangular [22].

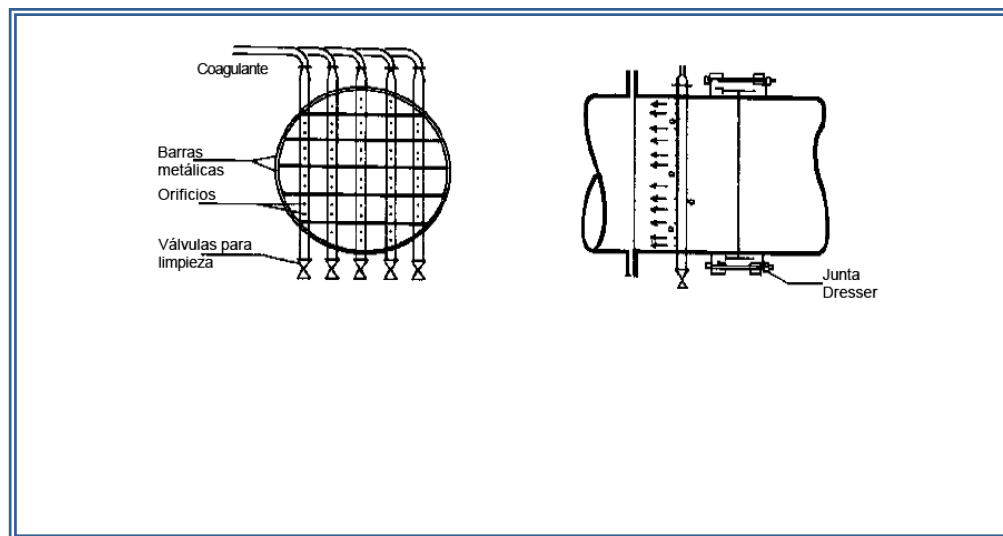
- Mezcladores en línea

Este tipo de unidades consisten en un dispositivo insertado en la tubería o canal de llegada de agua cruda a la planta de tratamiento. Con este tipo de unidades es posible conseguir tiempos de mezcla muy cortos, menores de un segundo, y elevadas intensidades de mezcla. La principal ventaja reside en que se reducen los costos al omitir la instalación de una unidad de mezcla rápida convencional. Según sus características se pueden clasificar en difusores, inyectoros, y estáticos, mostrados en la figura 2.6 [22].

Difusores: en estas unidades se trata de conseguir la mayor dispersión y mezcla del coagulante mediante el uso de múltiples puntos de descarga distribuidos en toda la sección de la unidad.

Inyectores: en este tipo de unidades la energía necesaria para la mezcla rápida se consigue sobre la base de la energía disipada por una multitud de chorros que producen un flujo turbulento en la tubería de conducción de agua.

Estáticos: estas unidades están constituidas por barras, perfiles o láminas corrugadas, instaladas dentro de una tubería, que forman una rejilla alargada y continua, las cuales producen una gran intensidad de turbulencia en una longitud deseada y originan una mezcla de alta eficiencia, con poca pérdida de energía y sin el uso de partes móviles.



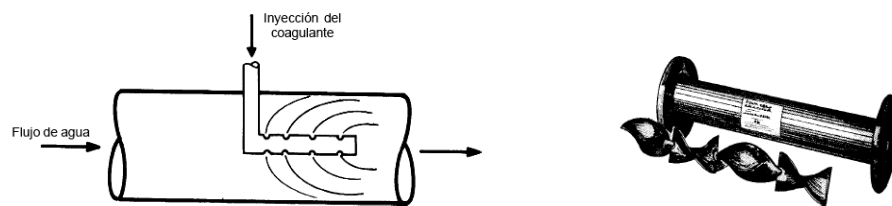


Figura 2.6 Mezcladores estáticos en línea: (a) Difusor en tubería; (b) Inyectores; (c) Mezclador estático [22].

b) Floculadores (unidades de mezcla lenta)

El objetivo del floculador es proporcionar a la masa de agua coagulada una agitación lenta aplicando velocidades decrecientes, para promover el crecimiento de los flóculos y su conservación, hasta que la suspensión de agua y flóculos formados salga de la unidad.

- *Tipos de floculadores*

Dependiendo del tipo de energía utilizado para agitar el agua, los floculadores se clasifican en los siguientes tipos [25]:

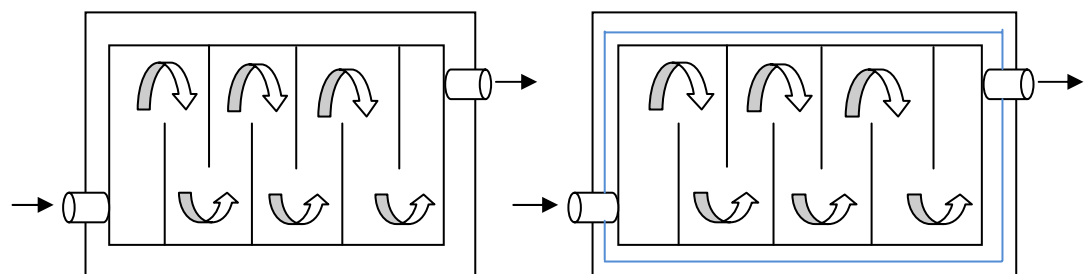
a) Floculadores hidráulicos:

- ✓ Floculadores de pantallas.
 - de flujo horizontal.
 - de flujo vertical.
- ✓ Floculadores de tipo Cox y Alabama.
- ✓ Floculadores de medios porosos.

b) Floculadores mecánicos:

- ✓ De eje vertical.
- ✓ De eje horizontal.
- ✓ Floculadores de manto de lodos.

- *Floculadores hidráulicos:* pueden ser de flujo horizontal o vertical. La agitación lenta se imparte mediante un conveniente diseño hidráulico, después de haber seleccionado en el laboratorio los parámetros que el agua requiere para formar un buen flóculo. La unidad está compuesta por una gran cantidad de canales o compartimentos, con interconexiones convenientemente ubicadas, a través de las cuales el agua se confina el tiempo necesario, con una intensidad de agitación gradualmente decreciente, para optimizar la formación del flóculo. La diferencia entre la unidad horizontal y la vertical está en la dirección del flujo. En ambas es muy importante conservar la especial distribución dada a las pantallas en su construcción para que los parámetros de diseño se cumplan y la eficiencia se mantenga [24]. En la figura 2.7 se presentan los tipos de floculadores hidráulicos de pantallas.



(a) Flujo vertical (vista lateral)

(b) Flujo horizontal (vista superior)

Figura 2.7 Floculadores hidráulicos de pantallas [22].

- *Floculadores mecánicos:* están compuestos, básicamente, de un sistema de paletas fijo a un eje horizontal o vertical. Cada eje puede estar accionado por un motor con reductores de velocidad para variar las velocidades en cada cámara. En este tipo de unidades la agitación lenta del agua se consigue

mediante energía mecánica. La unidad está constituida, idealmente, por tres a seis cámaras, cada una con agitadores, para impartir movimiento al agua. Los agitadores pueden ser de paletas o de turbina [25].

- *Parámetros y recomendaciones de diseño para floculadores de flujo horizontal*
 - Recomendables para caudales menores de 50 litros por segundo.
 - Se proyectará un mínimo de dos unidades, salvo que la planta tenga alternativa para filtración directa, porque en ese caso, podrá darse mantenimiento al floculador durante los meses en que la planta opera con filtración directa.
 - Se pueden utilizar pantallas removibles de concreto prefabricadas, fibra de vidrio, madera, plástico, asbesto-cemento u otro material de bajo costo disponible en el medio y que no constituya un riesgo de contaminación. De esta manera, se le da mayor flexibilidad a la unidad y se reduce el área construida, disminuyendo por consiguiente el costo de construcción.
 - El espaciamiento entre el extremo de la pantalla y la pared del tanque (es decir, el paso de un canal a otro) se deberá hacer igual a 1,5 veces el espaciamiento entre pantallas.
 - Dependiendo del tamaño de la unidad, deberá considerarse un punto de desagüe por unidad o uno por cada tramo.

2.2.5.6 Sedimentación

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido [22].

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada o lodos [22].

La sedimentación se usa para la remoción de arenas en unidades de pretratamiento, de sólidos suspendidos en sedimentadores primarios, de flóculos biológicos en sedimentadores de lodo activado y de flóculos químicos formados en los procesos de coagulación con agentes químicos. Asimismo se usa para la concentración de sólidos en espesamiento de lodos [15].

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Por consiguiente existen la sedimentación de partículas discretas (tipo 1), sedimentación de partículas floculentas (tipo 2) y sedimentación de partículas retardada o zonal (tipo 3) y sedimentación por compresión (tipo 4), las cuales se describen en la tabla 2.4 [14, 23].

En el tratamiento de aguas residuales los procesos de sedimentación que más se presentan son el tipo 1 y el tipo 3.

a) Unidades de sedimentación

La sedimentación o la decantación se realizan en reactores denominados sedimentadores o decantadores, de acuerdo con el tipo de partícula que se remueva en cada unidad. La clasificación más aceptada es la siguiente [21]:

- ✓ Sedimentadores o decantadores estáticos.
- ✓ Decantadores dinámicos.
- ✓ Decantadores laminares.

A continuación se describen las características de los sedimentadores estáticos rectangulares, por ser uno de los más comunes y económicos para su uso.

Tabla 2.4 Tipos de sedimentación que intervienen en el tratamiento del agua residual [14].

Tipo de sedimentación	Descripción	Aplicación / ocurrencia
De partículas discretas (tipo 1)	Se refiere a la sedimentación de partículas en una suspensión con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas.	Eliminación de arenas del agua residual.
Floculenta (tipo 2)	Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan, o flocculan, durante el proceso de sedimentación. Al unirse las partículas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad.	Eliminación de una fracción de sólidos en suspensión del agua residual bruta en los tanques de sedimentación primaria, y en la zona superior de los decantadores secundarios. También elimina flóculos químicos de los tanques de sedimentación.

<p>Retardada, o zonal (tipo 3)</p>	<p>Se refiere a suspensiones de concentraciones intermedias en las que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como una unidad. De desarrolla una interfase sólido – líquido en la parte superior de la masa que sedimenta.</p>	<p>Se presenta en los tanques de sedimentación secundaria empleados en las instalaciones de tratamiento biológico.</p>
<p>Compresión (tipo 4)</p>	<p>Se refiere a la sedimentación en la que las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación solo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de esta estructura. La compresión se produce por el peso de las partículas, que se van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante.</p>	<p>Generalmente se produce en las capas inferiores de una masa de lodo de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de lodos.</p>

- *Sedimentadores estáticos rectangulares*

En estas unidades la masa líquida se traslada de un punto a otro con movimiento uniforme y velocidad horizontal (V_H) constante. Cualquier partícula que se encuentre en suspensión en el líquido en movimiento, se moverá según la resultante de dos velocidades componentes: la velocidad horizontal del líquido y su propia velocidad de sedimentación (V_S), esto se ilustra en la figura 2.8. En un sedimentador ideal de forma rectangular y con flujo horizontal, la resultante será una línea recta. Asimismo, otras partículas discretas se moverán en lugares geométricos paralelos [22].

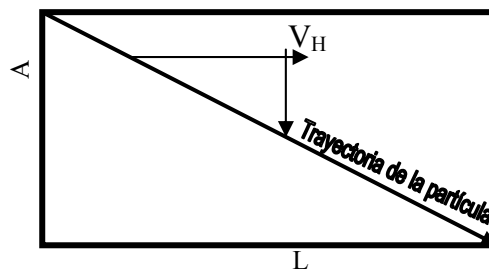


Figura 2.8 Esquema de sedimentación en un sedimentador rectangular [14].

b) Componentes de la unidad de sedimentación

Una unidad de sedimentación consta de las siguientes zonas, con diferentes funciones específicas, las cuales se muestran en la figura 2.9 [22]:

- a) *Zona de entrada*: la zona de entrada en un sedimentador es un conjunto de estructuras que debe permitir una distribución uniforme del flujo de agua hacia la zona de sedimentación. En una unidad de sedimentación convencional de flujo horizontal, esta distribución uniforme debe darse a todo lo ancho de la unidad y en profundidad.

- b) *Zona de sedimentación*: en esta zona se debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo. En esta zona las líneas de flujo no deben encontrarse con ningún tipo de obstrucciones que alteren su trayectoria de manera que las fuerzas que influyen sobre las partículas sean las de arrastre horizontal y la gravedad.
- c) *Zona de salida*: esta zona se caracteriza por permitir una recolección uniforme de agua sedimentada a una velocidad tal que evite arrastrar flóculos en el efluente. Canaletas de pequeña longitud, mal ubicadas, mal niveladas o impropriadamente diseñadas producen cortocircuitos hidráulicos y zonas muertas que pueden inutilizar grandes áreas de los sedimentadores.
- d) *Zona de lodos*: esta zona se encuentra en el fondo del tanque de sedimentación, la superficie presenta una inclinación o rascadores de modo que los lodos depositados sean llevados hasta un pozo o un canal, de donde son retirados por bombeo.

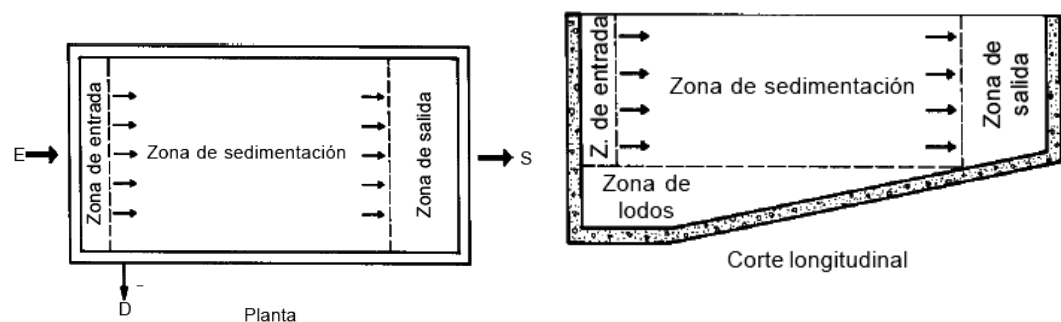


Figura 2.9 Esquema de la zonificación de un sedimentador rectangular [22].

2.2.5.7 Filtración

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que pasa a través de un medio poroso (generalmente arena). En general, la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares exigidos por las regulaciones ambientales [22].

Como las fuerzas que mantienen a las partículas removidas de la suspensión adheridas a las superficies de los granos del medio filtrante son activas para distancias relativamente pequeñas (algunos ángstroms), la filtración usualmente es considerada como el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: transporte y adherencia. El transporte de partículas es un fenómeno físico e hidráulico, afectado principalmente por los parámetros que gobiernan la transferencia de masas. La adherencia entre partículas y granos es básicamente un fenómeno de acción superficial, que es influenciado por parámetros físicos y químicos [22].

a) Clasificación de los sistemas de filtración

Hay muchas clasificaciones de los sistemas de filtración ya sea según la velocidad de filtración, el medio filtrante, el sentido del flujo o la carga sobre el lecho, la primera clasificación es la más empleada, y por ello se especifica a continuación [24]:

- *Lentos*: también llamados filtros biológicos, en ellos se produce una serie de reacciones orgánicas que eliminan hasta un 99 % de bacterias patógenas, protozoarios, estos filtros ofrecen una buena remoción de sólidos suspendidos y sedimentables, además son efectivos en la eliminación de olores y sabores,

sin embargo ocupan aproximadamente un área de 20 a 40 veces mayor que los filtros rápidos.

- *Rápidos*: son similares a los lentos en cuanto a remoción de turbiedad y color presentes en el agua, pero sin embargo ofrecen una mayor efectividad debido a la alta velocidad de la filtración a través de los lechos y por una granulometría más gruesa. La eficiencia de los filtros rápidos depende en primer lugar de la preparación adecuada del agua del afluente y también depende del régimen de operación, del tamaño de los granos de arena, del espesor de la capa, el carácter de la materia orgánica y el material en suspensión. Las características de diseño más comunes de este tipo de filtros se muestran en la tabla 2.5.

b) Medios filtrantes

- *Filtros de lecho simple*: en los medios de arena convencionales, la permeabilidad aumenta con la profundidad del filtro. En estas condiciones, los granos más pequeños quedan arriba y los más grandes abajo. Esto significa que a medida que el flóculo penetra dentro del lecho, encuentra poros más y más grandes por donde puede pasar con más facilidad. Es obvio que debido a esta estratificación inconveniente, el mayor porcentaje de partículas queda retenido en la superficie y, por lo tanto, la capacidad de almacenamiento de flóculos es limitada [22].
- *Filtros de lecho múltiple*: la solución lógica al problema de los filtros de lecho simple consiste en conseguir que la permeabilidad del lecho disminuya con la profundidad, de forma que los flóculos puedan penetrar y encontrar el medio más fino en las capas inferiores del filtro y el más grueso en las capas superiores [22].

Tabla 2.5 Características de los medios filtrantes en filtros rápidos de gravedad [19].

Tipo de medio	Medio	Parámetro			
		Espesor (m)	Tamaño efectivo (mm)	Coefficiente de uniformidad	Velocidad de filtración (m/h)
Simple	Arena	0,7	0,6	< 2	10
	Antracita	0,7	0,7	< 2	10
Dual	Antracita y	0,6	1,0	< 2	12
	Arena	0,15	0,5	< 2	
Múltiple	Antracita	0,5	1,0	< 2	15
	Arena y	0,2	0,5	< 2	
	Grava	0,1	0,2	< 2	

2.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS Y DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA (LAYOUT)

2.3.1 Diagrama de flujo de proceso

El proyecto de las plantas de tratamiento es uno de los aspectos más importantes de la ingeniería ambiental. Tanto el conocimiento teórico, como la experiencia práctica, son necesarios en la elección y análisis de los diagramas de flujo de procesos y tratamientos. Los diagramas de flujo son representaciones gráficas de las combinaciones de las operaciones y los procesos unitarios que se emplean para alcanzar los objetivos específicos del tratamiento. La experiencia práctica es fundamental para el proyecto y distribución física de las instalaciones y para la elaboración de planos y prescripciones técnicas. Para la elaboración de los diagramas de flujo de procesos deben tomarse en cuenta varios factores, entre los que destacan [14]:

- Necesidades del propietario de la instalación.
- Experiencias previas.
- Requisitos de las instituciones de control.
- Análisis y elección de los procesos.
- Compatibilidad con las instalaciones existentes.
- Costos.
- Consideraciones ambientales.
- Otras consideraciones como los equipos, el personal y las consideraciones energéticas.

2.3.2 Distribución de la planta (layout)

Un layout es la disposición física de las instalaciones de una fábrica, oficina o taller, orientada a minimizar los costos de manejo y transporte de materiales, de almacenamiento, de flujos de información y procesos de entrada y salida de productos [27].

2.3.2.1 Elaboración del plano de distribución

Se comienza por una distribución elemental. En ella aparecen las relaciones fundamentales entre el espacio necesario para el almacenamiento y para los equipos de proceso. En el paso siguiente se toma en cuenta la secuencia de las operaciones y se obtiene una primera distribución basada en el flujo de materiales, operaciones unitarias, almacenaje y futuras ampliaciones. Finalmente, el análisis de todos los factores que intervienen en la distribución, permite presentar un proyecto final detallado, que sirve de base para preparar los planos con distintos cortes de la planta, incluyendo planos isométricos del sistema de tuberías [28].

Como todas las plantas defieren y no hay dos ubicaciones exactamente iguales, no puede hablarse de una distribución ideal; sin embargo, una distribución

racional debe incluir diversas zonas: de producción, de almacenaje y de manipulación, eficientemente coordinadas de acuerdo a los siguientes pasos [28]:

- Desarrollo de un local nuevo o ampliación de locales previamente desarrollados
- Clase y cantidad de productos a elaborar o a fabricar
- Posibilidad de futuras ampliaciones
- Conveniencia desde el punto de vista de las operaciones y accesibilidad
- Tipos de procesos y control de producto
- Distribución económica de los suministros, servicios y servicios auxiliares
- Tipos de obras civiles (edificios) y exigencias del código de edificación
- Consideraciones referentes a la salud y a la seguridad
- Problemas de la eliminación de efluentes o residuos
- Equipos auxiliares
- Espacios disponibles y espacios necesarios
- Caminos de acceso.

2.4 ESTUDIO DE COSTOS

Antes de poner en marcha una planta industrial, se debe invertir determinada cantidad de dinero para adquirir e instalar la maquinaria y los equipos necesarios. Además debe contarse con dinero en efectivo para afrontar los gastos que origina la operación de la planta [28].

2.4.1 Costos de la planta

Los desembolsos de efectivo (costos), en el periodo de estudio del proyecto pueden ser inversiones o costos, propiamente dichos. Las inversiones son desembolsos que se hacen una sola vez, como la compra de equipos; mientras que a

los desembolsos repetidos se les llama costos, como en el caso de la materia prima y el mantenimiento [28].

2.4.1.1 Costos de inversión

El capital necesario para proveer los equipos e instalaciones de la planta se denomina costo de inversión. Las inversiones efectuadas antes de la puesta en marcha del proyecto se pueden agrupar en tres tipos: activos fijos o tangibles, activos diferidos o intangibles y capital de trabajo. La suma de estos se conoce como inversión total de capital o simplemente inversión total. De esta manera, el costo de capital total para un proyecto consiste en la sumatoria del costo de capital fijo, más el costo de capital de trabajo más costo de terrenos y otros conceptos no despreciables. Estos se definen de la siguiente manera [28]:

- *Inversiones en activos fijos*: son todas aquellas que se realizan en los bienes tangibles que se utilizarán en el proceso de transformación de los insumos o que sirvan de apoyo a la operación normal de proyecto; representa el capital necesario para adquirir e instalar los equipos necesarios para el funcionamiento del proceso completo; entre estos están los terrenos, equipos maquinarias, edificios, vehículos y otros. Para efectos contables, están sujetos a depreciación (excepto los terrenos).
- *Inversiones de activos intangibles*: son todas aquellas que se realizan sobre activos constituidos por los servicios o derechos adquiridos necesarios para la puesta en marcha del proyecto. A su vez, son susceptibles de amortizar. Los principales ítems que figuran en esta inversión son los gastos de organización, patentes y licencias, gastos preoperativos y de puesta en marcha, asistencia técnica y contratos de servicios.

- *Capital de trabajo*: son los insumos necesarios para la realización del proyecto. Está formado por la cantidad de dinero invertido en: (1) materias primas y abastecimientos que mantienen en el depósito, (2) productos terminados y semiterminados, (3) cuantas a cobrar, (4) dinero en efectivo para el gasto total de los gastos operativos. La mayoría de las plantas químicas utilizan un capital de trabajo que representa entre 10 y el 20 % de la inversión total.

2.4.2 Inversión de capital

El capital necesario para proveer los equipos e instalaciones de la planta se denomina inversión de capital fijo, mientras que el capital necesario para la operación de la planta se denomina capital de trabajo. La suma de la inversión de capital fijo y de capital de trabajo se conoce como inversión total de capital o simplemente inversión total [28].

La estimación del capital a invertir para un proceso varía desde una estimación preliminar hasta una estimación detallada; entre estos dos extremos pueden existir muchas otra clase de estimaciones, cuya exactitud varía de acuerdo con el grado del proyecto, éstas se explican en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Denominación de las estimaciones de costos [28].

<i>Clasificación</i>	<i>Tipos de costos</i>	<i>Descripción</i>
Clase V	Estimación del orden de magnitud (estimación relativa)	Basada en datos previos sobre costos similares; esta estimación tiene una exactitud por encima del 30 %
Clase IV	Estimación de estudio	Basada en el conocimiento de los equipos más importantes; tiene una exactitud hasta un 30 %
Clase III	Estimación preliminar	Se basa en suficiente información

	(de los márgenes)	como para que se pueda preparar un presupuesto; tiene una exactitud del 20 %
Clase II	Estimación definitiva (para el control del proyecto)	Su información es casi completa pero es anterior a los diseños y especificaciones definitivas; su porcentaje de exactitud es del 10 %
Clase I	Estimación detallada (del contratista)	Basada en los planos definitivos, especificaciones y estados del terreno; tiene una exactitud dentro del 5 %

2.4.2.1 Estimación de la inversión de capital fijo

Para el análisis del costo de inversión total es necesario tomar en cuenta dos rubros principales

[28]:

- *Costos directos*

Equipos adquiridos (equipos que figuran en un diagrama de flujo completo, piezas, repuestos, etc.), instalación de los equipos adquiridos (instalación de todos los equipos que figuran en el diagrama de flujo, aislaciones, pinturas, etc.), instrumentación y control (compra, instalación y calibración), tuberías (tuberías para el proceso, soportes, accesorios, válvulas, etc.), equipos y materiales eléctricos (llaves, motores, conductos, cables, etc.), obras civiles (edificios, talleres de mantenimiento, etc.), mejoras del terreno (preparación del terreno: limpieza, nivelación, caminos, etc.), instalaciones de servicios (vapor, agua, energía eléctrica, refrigeración, etc.), terreno (medición, deslinde y honorarios).

- *Costos indirectos*

Ingeniería y supervisión (costos de ingeniería, administrativos, de proceso, de diseño, etc.), gastos de construcción (construcción de operación, herramientas, equipos, etc.), honorarios del contratista, eventuales.

2.4.2.2 Métodos para estimar la inversión de capital

Existen varios métodos para estimar la inversión de capital. La elección del método depende de la cantidad de información disponible y la exactitud que se desea obtener.

- *Método del porcentaje del costo del equipo entregado*

Este método para la estimación de la inversión de capital fijo o total requiere la determinación del costo del equipo entregado, los componentes adicionales de la inversión de capital se basan en porcentajes promedio del costo directo total de la planta, en los costos totales directos e indirectos o en la inversión total del capital. Los promedios de los diversos porcentajes fueron determinados para plantas químicas típicas y los resultados se han reunido en la tabla 2.7. El método puede resumirse en la siguiente ecuación del costo [28]:

$$C_n = \left[\sum E + \sum (f_1 E + f_2 E + f_3 E + \dots) \right] (f_i) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

C_n : nueva inversión de capital

E : costo del equipo adquirido

$f_1, f_2, f_3 \dots$: factores multiplicadores para cañerías y tuberías, instalaciones eléctricas, instrumentación, instrumentación, etc.

f_i : factor de costos indirectos

Tabla 2.7 Factores relativos para la estimación de la inversión de capital para los diversos rubros basados en el costo de los equipos entregados [28].

Rubros	Porcentaje del costo del equipo entregado para		
	Procesar sólidos	Procesar sólido y fluidos	Procesar fluidos
Costos directos			
Equipo adquirido y entregado	100	100	100
Instalación del equipo adquirido	45	39	47
Instrumentación y controles	9	13	18
Cañerías y tuberías	16	31	66
Instalaciones eléctricas	10	10	11
Obras civiles	25	29	18
Mejoras del terreno	13	10	10
Instalaciones de servicio	40	55	70
Terreno	6	6	6
<i>Costo directo total de la planta</i>	<i>264</i>	<i>293</i>	<i>346</i>
Costos indirectos			
Ingeniería y supervisión	33	32	33
Gastos de construcción	39	34	41
<i>Total de costos directos e indirectos de la planta</i>	<i>336</i>	<i>359</i>	<i>420</i>
Honorarios del contratista	17	18	21
Eventuales	34	36	42
<i>Inversiones de capital fijo</i>	<i>387</i>	<i>413</i>	<i>483</i>
Capital de trabajo	68	74	86
<i>Inversiones total de capital</i>	<i>455</i>	<i>487</i>	<i>569</i>

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo de este proyecto fue necesaria la aplicación de una estrategia metodológica con la finalidad de cumplir con cada uno de los objetivos planteados al inicio del mismo. Por motivos explicados más adelante, las fuentes principales para obtener la información necesaria fueron pruebas y simulaciones de procesos a nivel de laboratorio, las cuales se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Biotecnología y Conservación Ambiental del Centro de Investigaciones Tecnológicas de Oriente (CITO), el Laboratorio de Estudios Ambientales y el Laboratorio de Fisicoquímica de la Universidad de Oriente, núcleo Anzoátegui; las fuentes secundarias fueron suministrados por publicaciones literarias, informes, revistas técnicas, trabajos de grado y otros. Este procedimiento se llevó a cabo de una forma sistemática y metódica, con el objeto de seguir un esquema de trabajo que permitió obtener resultados relevantes, concisos y confiables.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES LÍQUIDOS DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE PAPEL

Este proyecto está basado en el diseño preliminar de la planta de tratamiento de efluentes para una planta ecológica de reciclaje de papel que aún se encuentra en fase de diseño, por lo que no es posible obtener muestras de la fuente real. En términos generales, la planta papelera diseñada industrializó un método artesanal de reciclaje, y en base a ello se puede emplear este método con algunas modificaciones para la obtención de un efluente con características muy similares a lo que se espera exista en la planta industrial. Se comenzó por estudiar el diagrama de flujo del proceso de la

planta papelera mostrado en la figura 3.1 y así establecer los equipos de laboratorio que permitirán simular con la mayor exactitud lo que será realizado a escala industrial.

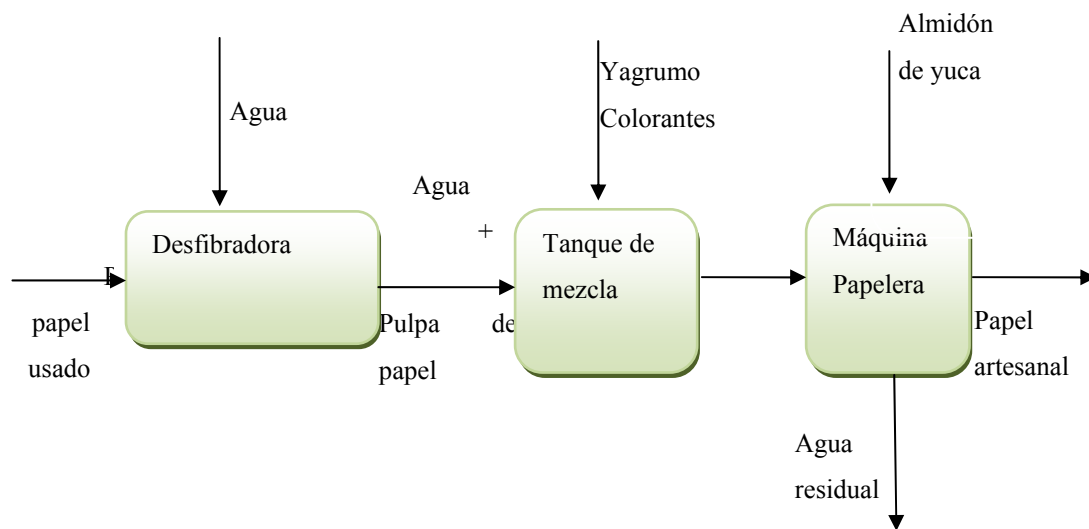


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de reciclaje de papel [7].

3.1.1 Estudio del diagrama de flujo de proceso de la planta de reciclaje de papel

El proceso de reciclaje comienza mezclando 10 toneladas diarias de papel usado con un gran volumen de agua en la desfibradora, un tanque con una hélice de mezclado que ayuda a desmenuzar el papel por agitación y corte al chocar con la hélice, a medida que las partículas de papel chocan entre si se van haciendo más pequeñas hasta formar fibras sueltas que representan la base del papel. De allí pasan a un tanque de mezcla donde se agrega el yagrumo para el encolado y los colorantes en los casos de producción de papeles decorativos, aquí durante la mezcla las fibras se van uniendo entre sí, y dependiendo del tiempo de mezclado se logran distintas tonalidades en la opacidad del papel al unir mayor o menor cantidad de fibras. Finalmente se llega a la máquina papelera donde se añaden 0,26 toneladas de almidón

de yuca y se da forma a las fibras para constituir las láminas de papel, durante esta etapa el papel se somete a filtrado, prensado y secado (procesos de donde se obtiene el efluente líquido que será enviado a la planta de tratamiento de efluentes); luego de cortar las láminas de papel queda el producto final para la venta [7].

Para llevar este proceso a una escala de laboratorio, se aprovechó la similitud de los equipos mostrados en la tabla 3.1 con los de tamaño industrial en cuanto a funcionamiento y tratamiento que ofrecerán a la materia prima (papel, colorantes, yagrumo y almidón), para obtener un efluente muy similar al que se obtendrá a escala industrial.

Tabla 3.1 Equipos de laboratorio empleados para simular los procesos industriales a realizarse en la planta de reciclaje de papel.

Equipo industrial	Equivalente en laboratorio
Desfibradora	Licuadora doméstica a alta velocidad
Tanque de mezcla	Licuadora doméstica a baja velocidad
Máquina papelera	Filtrado, prensado y secado manual en molde

Otro punto a estudiar son las relaciones en las cantidades de las materias primas ingresadas al proceso para conservar las proporciones y así producir un efluente que sea representativo del que se producirá en planta. Para ello, se determinaron los porcentajes máxicos de cada corriente del proceso y estos porcentajes se llevaron a escala de laboratorio en cantidades que permitieran obtener un volumen de líquido suficiente para realizar la caracterización. Se tiene entonces que para un día de producción se emplean 10 t de papel, 320 m³ de agua, y 0,26 t de almidón modificado de yuca.

Para ajustar las unidades de las corrientes se calcula la masa de agua en toneladas, considerando una densidad del agua de 1 t/m³:

$$\rho = 1 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

ρ = densidad del agua (t/m^3).

m = masa de agua (t).

V = volumen de agua (m^3).

Despejando la masa de la ecuación 3.1:

$$m = \rho \times V \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Reemplazando los valores de densidad y volumen de agua considerados anteriormente se obtiene:

$$m = 1 \frac{t}{m^3} \times 320m^3 = 320t \text{ de agua}$$

La masa total de materia prima que entra al proceso será:

$$\text{masa total del proceso} = \text{masa de papel} + \text{masa de agua} + \text{masa de almidón} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Entonces:

$$\text{masa total del proceso} = 10t + 320t + 0,26t = 330,26t$$

El porcentaje en masa que representa cualquier corriente en el proceso se determina por la expresión:

$$\% m/m = \frac{\text{masa de la corriente } i}{\text{masa total del proceso}} \times 100 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

$\% m/m$ = porcentaje en masa de la corriente i .

Empleando la ecuación 3.4 para la corriente de papel se tiene:

$$\% m/m = \frac{10t}{330,26t} \times 100 = 3,03\%$$

De igual modo se obtienen los porcentajes para el resto de las corrientes y los resultados se resumen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Porcentajes en masa de las corrientes de materia prima involucradas en el proceso.

Materia prima	Masa introducida (t)	Porcentaje másico (%)
Papel usado	10	3,03
Agua	320	96,89
Almidón	0,26	0,08
Total	330,26	100

Cabe destacar que las cantidades de yagrumo y colorantes son despreciables en comparación con las otras corrientes, además serán variables en función del tipo de papel a producir así como su tonalidad. Por lo que no fueron consideradas en los balances originales.

3.1.2 Materia prima para la obtención de la muestra de efluente

Para obtener el efluente a escala de laboratorio es necesario realizar el proceso de reciclaje con las materias primas que serán empleadas a nivel industrial, las cuales pueden clasificarse en cuatro grupos: (1) papel usado, (2) agua, (3) colorantes y (4) pegamentos, y se describen a continuación:

3.1.2.1 Papel

El papel a reciclar a nivel industrial será obtenido de los residuos de impresión, escritura y empaquetado de centros educativos y oficinas empresariales. Como el volumen a producir en este proyecto no es a gran escala, el papel empleado fue encontrado en las oficinas del departamento de Ingeniería Química de la Universidad

de Oriente, núcleo Anzoátegui. Serán empleados distintos tipos de papel los cuales se muestran en la figura 3.2.



Figura 3.2 Tipos de papel empleado como materia prima para la elaboración del papel reciclado: (a) papel bond, (b) periódico, (c) cartón y (d) cartulina.

3.1.2.2 Agua

Su función es servir como medio para ablandar el papel y dispersar las fibras. Para fines de generar la muestra de efluentes el agua será tomada directamente de las redes de distribución de la empresa potabilizadora del estado Anzoátegui, Hidrocaribe.

3.1.2.3 Colorantes

Los colorantes a emplear en planta serán pigmentos orgánicos obtenidos a partir del procesado de plantas seleccionadas en función de la cantidad de combinaciones de colores que ofrecen y por la facilidad de extracción del color. Es de resaltar que los colorantes serán empleados de manera esporádica en el proceso de producción del papel reciclado, ya que el producto principal será el papel blanco para aplicaciones de oficina el cual no precisa de colorante alguno para su producción. El papel coloreado

será procesado en función de los requerimientos de clientes específicos. Los colorantes a usarse en el proceso, así como la planta de donde se obtienen se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Colorantes naturales a emplear en la producción del papel reciclado [7].

Planta	Color resultante
Índigo	Azul brillante
Glasto	Blanco índigo y azul
Rubia	Rojo brillante, escarlata, rosa, naranja, lila, negro, pardos
Bija	Rojo o amarillo

En este proyecto serán empleados los colorantes obtenidos a partir de las plantas índigo y bija, por ser las plantas de más fácil adquisición en el mercado. Como se explicó anteriormente los colorantes no serán una constante del proceso, por lo que no será necesario evaluarlos todos.

- a) *Índigo*: (*Indigofera tinctoria*) también conocida como añil verdadero, es un arbusto de 1 a 2 m de altura. Puede ser una planta anual, bienal, o perenne, dependiendo del clima donde crezca. Tiene hojas verde clara pinnadas; y flores con manchitas rosa o violeta. Al ser una legumbre, su secuencia mejora el suelo como lo hacen otras leguminosas fijadoras de nitrógeno atmosférico [29]



Figura 3.3 *Indigofera tinctoria* [29].

La tintura se obtiene procesando las hojas. Se colocan en remojo con agua en una cuba y se hacen fermentar por un periodo de 48 horas para convertir el glicósido indican naturalmente presente en la hoja, en el colorante azul indigotin. Luego el agua es drenada de la cuba separando las hojas, para someter el líquido a un proceso de oxigenación por mezclado turbulento y desarrollar el color (esto se realizó empleando una batidora doméstica) [30]. Este proceso se muestra en la figura 3.4.

b) *Bija: (Bixa orellana)* conocido también como onoto es un arbusto pequeño de 2 a 5 m de altura de copa redondeada y densa. Sus hojas son ovadas, alternadas, terminadas en punta, sus frutos son capsulas ovoidales erizadas conteniendo aproximadamente 50 semillas. Originaria de América tropical, posiblemente del suroeste de la Amazonia. Se extiende desde México hasta Brasil y Argentina y en el Caribe. Actualmente se distribuye en los países tropicales de Europa y América [31].

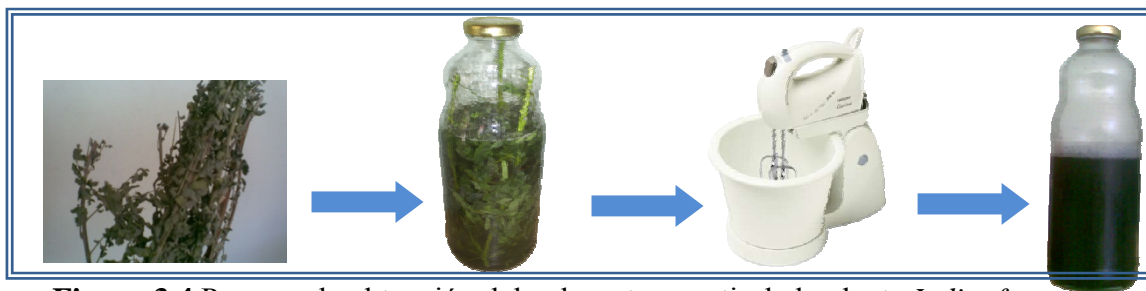


Figura 3.4 Proceso de obtención del colorante a partir de la planta *Indigofera tinctoria*.



Figura 3.5 *Bixa Orellana* [31].

El colorante se encuentra en la superficie de las semillas. Para su obtención, se extraen las semillas de la cápsula y se colocan en agua agitándolas fuertemente para que liberen el colorante de su superficie, se deja en reposo y se filtra el líquido que representará el colorante a emplear en la producción de papel reciclado [31].



Figura 3.6 Proceso de obtención del colorante a partir de la *Bixa orellana*.

3.1.2.4 Pegamentos

Se emplearán dos tipos de pegamento, el mucílago del yagrumo empleado para la unión de las fibras de papel durante la etapa de mezclado, y el almidón de yuca agregado en la etapa de prensado para lograr firmeza en el papel producido.

- a) *Almidón de yuca*: este será obtenido comercialmente. Su producción se realiza a partir de la raíz de la yuca, la cual es cortada y rallada para que libere los

gránulos de almidón. A continuación se separa de la pulpa el líquido que contiene los gránulos en suspensión, y estos se extraen por sedimentación o centrifugación. Finalmente se dejan secar al sol o mecánicamente para eliminar la humedad y posteriormente es envasado [32].

- b) *Yagrumo*: (*Cecropia peltata*) es un árbol de 5 a 20 m de altura, dioico, es decir que tiene flores masculinas y femeninas en distintos árboles de la misma especie. Las ramas salen casi en el ápice del tallo. Es común en clima cálido, aunque puede llegar a crecer a alturas de más de 2.000 metros en las laderas montañosas, en zonas conocidas como selva nublada. La extracción del pegamento se realiza por inmersión de las hojas en agua hirviendo durante algunos minutos, donde se libera el mucílago y luego por evaporación se logra un producto concentrado [33].

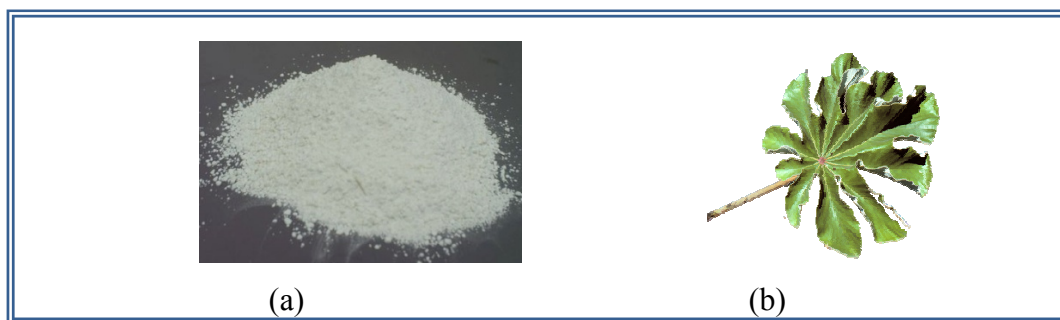


Figura 3.7 (a) almidón de yuca, (b) hoja del yagrumo.

3.1.3 Determinación de la cantidad de materia prima a emplear en la preparación de las muestras para la caracterización

Considerando que la corriente a estudiar es la correspondiente al agua que sale del proceso, éste fue el parámetro a partir del cual se calcularon las cantidades del resto de las materias primas, según los porcentajes máxicos mostrados en la tabla 3.2. La cantidad de agua seleccionada fue de 1.500 ml, (tomando en cuenta que la cantidad mínima requerida para una caracterización fisicoquímica es de 1.000 ml),

que es equivalente a 1500 g si se emplea la ecuación 3.1, este valor representa según la tabla citada un 96,89% de la materia prima empleada, con ello se determina el total y posteriormente los valores correspondientes a las otras corrientes que entran al proceso, es decir:

$$\text{total de materia prima} = \frac{\text{masa de la corriente } i}{\text{porcentaje másico de la corriente } i} \times 100 \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Reemplazando los datos correspondientes al agua en la ecuación 3.5:

$$\text{total de materia prima} = \frac{1.500\text{g}}{96,89} \times 100 = 1.548,14$$

Con este valor y los porcentajes másicos correspondientes a las otras corrientes entrantes, despejando la masa de corrientes de la ecuación 3.5 se obtiene:

Masa de papel = 46,91 g

Masa de almidón = 1,24 g

En vista de no tenerse información concreta de las cantidades de yagrumo y colorantes a emplear, se fijaron valores tomados de experiencias en reciclaje artesanal del papel [7], siendo estos: 10ml de yagrumo y 50 ml de colorante. Todos estos valores se resumen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Cantidades de materia prima requeridas para la producción en laboratorio de los efluentes a estudiar.

Materia prima	Cantidad requerida
Agua (g)	1.500
Papel (g)	46,91
Almidón (g)	1,24
Yagrumo (ml)	10
Colorante (ml)	50

3.1.4 Proceso de obtención de las muestras de efluente

Para la obtención de las muestras de efluente se llevó a cabo la simulación a escala de laboratorio del proceso industrial, empleando los equipos y procedimientos de la tabla 3.1 y con las cantidades de materia prima mostradas en la tabla 3.4.

Primeramente se coloca el papel en remojo con la cantidad de agua requerida durante unos minutos, para facilitar el rompimiento de los trozos de papel y la formación de las fibras, luego se traslada la mezcla a la licuadora para ser mezclado a alta velocidad durante un minuto, posteriormente se agrega el yagrumo y el almidón de yuca y se mezcla a baja velocidad por un minuto más. La pasta formada se coloca sobre un molde cuya base es una malla que hace la función de filtro para el agua, sobre esta misma malla se ejerce presión manual para extraer el agua atrapada entre las fibras. Toda el agua extraída es recolectada en un recipiente representando esta la muestra de efluente que se va a caracterizar. Este procedimiento será realizado con los distintos tipos de papel que se usarán como materia prima.

3.1.5 Definición de la cantidad de muestras a analizar

Para definir que muestras se debían caracterizar, se realizaron pruebas preliminares de reciclaje de papel a fin de verificar cuáles de las materias primas planteadas ofrecen un producto de la calidad esperada por medio del proceso planteado en el punto 3.1.4, resultando que cuando se recicla papel periódico, cartulina de colores y cartón, se obtiene un papel artesanal de tonalidad oscura que impide su uso como papel de escritura e impresión en aplicaciones de oficina, a la vez que las fibras resultan muy gruesas en el caso del cartón o cartulina, y muy débiles en el caso del papel periódico, lo cual descarta el uso de estas materias primas en el proceso de producción. Esto reduce la variedad de papel que se usará como materia prima, limitando solo a papel bond blanco o de colores claros en combinación con material blanco.

Otra prueba posterior demostró que la cartulina blanca o de colores claros también podía ser empleada como materia prima en combinación con papel bond en una relación papel bond – cartulina de 70:30, la cual fue obtenida luego de varias pruebas realizadas con distintos valores hasta obtener un papel con las características de tonalidad y firmeza deseadas. Finalmente se definieron 6 muestras a preparar para su caracterización, las cuales serían elaboradas según el procedimiento descrito en la sección 3.1.4.

3.1.6 Análisis fisicoquímicos realizados a los efluentes líquidos del reciclaje de papel

Con la finalidad de conocer la carga contaminante que presentan las corrientes de efluentes líquidos que se generarán en la planta de reciclaje de papel se realizaron los análisis mostrados en la tabla 3.5, donde también se presentan los límites permitidos por la normativa ambiental vigente (decreto 883) [34]. Estos análisis fueron realizados mediante la metodología de las normas COVENIN, y se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Biotecnología y Conservación Ambiental del Centro de Investigaciones Tecnológicas de Oriente (CITO), el Laboratorio de Estudios Ambientales y el Laboratorio de Fisicoquímica de la Universidad de Oriente, núcleo Anzoátegui. Los valores obtenidos se comparan con los límites permitidos a fin de determinar aquellos que merecen especial atención en el proceso de tratamiento que se definirá más adelante. En la tabla 3.6 se muestra un resumen de los parámetros que excedieron los límites permitidos por la legislación ambiental vigente. Los procedimientos seguidos para la caracterización se muestran en el anexo A.

3.1.6.1 Equipos, materiales, sustancias y herramientas

a) Equipos

- Espectrofotómetro. Marca Milton Roy, Modelo Spectronic 20. Rango de medición: 340 a 950. Exactitud: ± 5 nm.
- Medidor de pH/T/mV. Marca Orion. Modelo 920A. Rango de medición: -2 a 20 UpH / -5 a 105 °C / -1600 a 1600 mV. Exactitud: $\pm 0,001$ UpH / $\pm 0,1$ °C / $\pm 0,1$ mV.
- Turbidímetro. Marca Hf instruments. Modelo DRT 100B. Rango de medición: 0 a 1000 NTU. Exactitud: $\pm 0,001$ NTU.
- Unidad de agitación magnética/calentamiento. Marca Jenway. Modelo 1000. Rango: 0 a 2000 rpm / >450 °C. Exactitud: ± 5 °C.
- Espectrómetro de absorción atómica. Marca Perkin – Elmer. Modelo 2100. Rango de medición: depende del elemento a determinar.

Tabla 3.5 Caracterización fisicoquímica realizada a las diferentes muestras de efluentes obtenidas en laboratorio.

ENSAYO	Decreto 883*
Temperatura (°C)	--
pH	6-9
Conductividad (mS/cm)	--
Turbidez (NTU)	< 25
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	--
Dureza (mg CaCO ₃ /l)	500
Cloruros (mg/l)	1.000
DQO (mg/l)	350
DBO (mg/l)	60
Nitrógeno total (mg/l)	40
Sól. totales (mg/l)	--
Sól. disueltos (mg/l)	--
Sól. suspendidos (mg/l)	80
Sól. sedimentables (ml/l)	1,0

Hierro (mg/l)	1,0
Sódio (mg/l)	200
Potasio (mg/l)	--
Plomo (mg/l)	0,5
Zinc (mg/l)	5

* Límites máximos permitidos por la normativa ambiental vigente en Venezuela [34]

Tabla 3.6 Parámetros que exceden el límite permitido por la legislación ambiental vigente.

Parámetro	MUES TRA 1	MUES TRA 2	MUES TRA 3	MUES TRA 4	MUES TRA 5	MUES TRA 6	Decreto 883
Turbidez (NTU)	445	290	390	430	190,2	130,5	< 25
DQO (mg/l)	883,98	849,06	1.076,63	1.271,87	1.790,76	1.802,94	350
DBO (mg/l)	240	210	382,5	330	482,5	461,25	60
Sól. suspendidos (mg/l)	950	830	1.150	720	1.240	1.223,33	80
Sól. sedimentables (ml/l)	19	24	16	17	21	19	1,0

- Balanza analítica. Marca Ohaus. Modelo Adventure Pro. Rango de medición: 0 a 260 g. Exactitud: 0,1 mg.
- Campana de Extracción de gases. Marca La Vasconia. Modelo La Vasconia.
- Termoreactor. Marca Merck. Modelo TR – 300, Temperatura máxima 148 °C.
- Incubadora. GCA Corporation. Modelo Precision 815 – 115.
- ICP. Marca Perkim – Elmer, Modelo OPTIMA 2100.

b) Materiales

- Termómetro.
- Pipeta de $5 \pm 0,1$ ml.
- Cilindro graduado de 50 ± 1 ml.

- Beacker.
- Bureta de 50 ± 1 ml.
- Papel de filtro.
- Cápsula de porcelana.
- Espátula.
- Varilla de agitación.
- Tubo de ensayo.
- Conos Imhoff.
- Matraz Kjeldahl.
- Embudos.

c) Sustancias

- Agua destilada.
- Ácido sulfúrico concentrado.
- Ácido clorhídrico concentrado.
- Ácido nítrico concentrado.
- Hidróxido de sodio.
- Permanganato de potasio.
- Ácido etilendiaminotetraacético (EDTA).
- Hidróxido de amonio.
- Sulfato de plata.
- Sulfato de mercurio.
- Dicromato de potasio.
- Cloruro de sodio.
- Tetraborato de sodio.
- Sulfato de cobre.
- Ácido bórico.
- Indicadores.
- Soluciones buffer o patrones de pH para verificación del medidor de pH.

Los equipos, materiales y sustancias a utilizar durante el desarrollo de este proyecto se encuentran en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente en su núcleo de Anzoátegui, y en el Centro de Investigaciones Tecnológicas de Oriente (CITO), ubicados en la ciudad de Barcelona en el estado Anzoátegui.

3.2 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS NECESARIOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE PAPEL

La selección de los equipos para el tratamiento de un efluente se realiza en función de la carga contaminante, específicamente de aquellos parámetros que se encuentren sobre de los límites establecidos por la normativa ambiental vigente [14]. En Venezuela la normativa vigente considerada es el decreto 883 [34], referente a las normas para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos y es la referencia de este proyecto para la determinar que contaminantes deben ser atendidos y a partir de allí seleccionar los medios y equipos para su depuración.

En la tabla 3.6 se puede observar que los valores que exceden los valores máximos permitidos, son los correspondientes a la turbidez, los sólidos suspendidos y sedimentables, y las demandas química y bioquímica de oxígeno; y es en esos parámetros que se debe enfocar el proceso de tratamiento a diseñar.

La metodología a emplear para la selección es analizar los métodos de tratamiento recomendados para la reducción de cada contaminante y seleccionar cual es la opción que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto. Otro punto de suma importancia que se debe considerar es el tipo de proceso que se realiza en planta. El reciclaje de papel es un proceso que se realiza por lotes, por tanto se producen descargas de efluentes de manera intermitente, por otro lado una planta de tratamiento

de aguas debe trabajar con caudal continuo, por lo que se debe incluir un proceso donde se lleve las descargas intermitentes a un caudal constante con el cual será alimentada la estación depuradora.

3.2.1 Regulación de los caudales de entrada a la planta de tratamiento de aguas residuales

Para esta tarea se emplean los llamados tanques de homogeneización, en los cuales se reciben y acumulan las descargas intermitentes provenientes de la planta de reciclaje de papel, y desde donde son bombeados a caudal constante hasta la planta de tratamiento de efluentes. Estos tanques se diseñan generalmente de forma circular por razones de espacio y de ingeniería. Sus dimensiones dependerán en este caso del volumen de efluente líquido producido diariamente en el proceso de reciclaje de papel, lo cual permitirá acumular y distribuir el líquido a lo largo del día [19]. Un problema que se presenta al emplear este tipo de tanques en este proceso es la cantidad de sólidos sedimentables que se encuentra en el efluente, que al estar dentro del tanque de homogeneización caerían al fondo creando una capa de sedimento que reduciría la capacidad del tanque y que elevarían los costos de mantenimiento del tanque.

Para la remoción de los sólidos sedimentables aguas arriba del proceso de homogeneización se consideró el desbaste por tamizado, ya que un tanque de sedimentación requiere de un caudal constante de entrada, cosa que no se tiene antes de la homogeneización. Inicialmente se analizan las características del sólido a separar; está conformado por fibras de papel que han pasado las etapas de filtrado y prensado, y presentan diámetros y longitudes muy diversos, que dependen del tipo de papel que se haya empleado como materia prima y de los tiempos de desfibrado y mezclado del mismo.

El tamizado logra la separación por medio de la retención de sólidos con diámetro mayor al diámetro de abertura del tamiz. Si se analiza en función de que las

fibras no presentan un diámetro fijo, es difícil establecer una abertura óptima de tamiz, ya que de elegir un diámetro promedio las partículas de diámetro menor, pasarán a través de la malla llegando de igual manera al tanque de homogeneización, y en caso de partículas de diámetro mayor al promedio estas podrían saturar el tamiz haciendo que el mantenimiento deba hacerse con mayor regularidad a lo normal. Otra alternativa planteada fue la de remover los sólidos sedimentados directamente del tanque de homogeneización, lo cual se lograría a través del diseño de un fondo cónico que acumularía los lodos en un punto de donde podrían ser extraídos por bombeo. Esta última opción resultó ser la más adecuada si se considera que de emplear el tamizado, se tendría que eliminar sólidos igualmente dentro del homogeneizador.

3.2.2 Reducción de la turbidez

Este es un parámetro que está relacionado directamente con la existencia de sólidos en suspensión y su reducción se realiza por los mismos métodos de tratamiento, por lo que será considerado en el análisis de los equipos para la reducción de aquellos.

3.2.3 Reducción de sólidos suspendidos

El proceso por excelencia para la reducción de sólidos suspendidos es la coagulación – floculación, seguido por sedimentación. Este proceso consta de tres etapas comenzando por una mezcla rápida del líquido a tratar con los agentes químicos coagulantes que desestabilizan las partículas sólidas y coloidales que están presentes en el líquido, luego se pasa a la segunda etapa donde una agitación lenta logra la aglomeración de las partículas desestabilizadas para que aumenten su peso y en la tercera etapa que será la sedimentación éstas puedan descender fácilmente clarificando el agua residual.

3.2.3.1 Mezcla rápida

Para la mezcla rápida, luego de consulta bibliográfica y recomendaciones especializadas, se seleccionó un sistema de mezclador estático en línea, ya que el volumen de agua manejado por la planta de tratamiento será relativamente bajo, además de resultar mucho más económico que otras opciones por instalarse directamente en la tubería que alimenta la estación depuradora y aprovechando la misma potencia de bombeo para conseguir la mezcla de los aditivos químicos.

3.2.3.2 Aditivos coagulantes

Para mantener el carácter ecológico de la planta se realizó una investigación bibliográfica sobre coagulantes de origen natural, encontrándose que los mejores resultados los ofrece un extracto de la semilla de *Moringa oleífera* [35,36], sin embargo en la bibliografía consultada no se encontró referencias sobre su aplicación en el tratamiento de aguas residuales, teniéndose solo resultados óptimos para la potabilización.

Asimismo se estudió el uso de químicos coagulantes de uso común como el sulfato de aluminio, seleccionado porque su rango de pH óptimo se encuentra en el valor presentado por las aguas residuales a tratar, y por ser uno de los que mejores resultados ofrece con respecto a su costo.

- *Moringa oleífera*

Es un árbol originario de norte de India conocido como moringa. Crece en casi cualquier tipo de tierra, incluso en condiciones de sequía. Se ha introducido y adaptado en otras partes de la India, Paquistán, Afganistán, Bangladesh, Sri Lanka, el sudeste de Asia, Asia occidental, la península Arábica, Africa del este y oeste, el sur de la Florida, todas las Indias Occidentales, y desde México a Perú, Paraguay y Brasil. En Venezuela este árbol se ha adaptado a las condiciones climáticas creciendo

de manera óptima. Se valora principalmente por sus frutas, hojas, flores, raíces, todas comestibles, y por el aceite (también comestible) obtenido de las semillas. Se usa extensamente en la medicina tradicional en las áreas en donde es nativo y en donde ha sido introducido [37].

El componente activo que tiene efecto coagulante son las proteínas contenidas en las semillas del futo de esta planta, el cual se extrae por diversos medios. Como pueden ser la extracción usando solventes como el éter de petróleo, etanol, propanona y tolueno, o por extracción con agua. Estos procesos de extracción son los que limitan la posibilidad del uso de este aditivo natural como coagulante. Incrementando los costos operativos, o incluso los residuos contaminantes en caso de emplear los solventes orgánicos para la extracción.

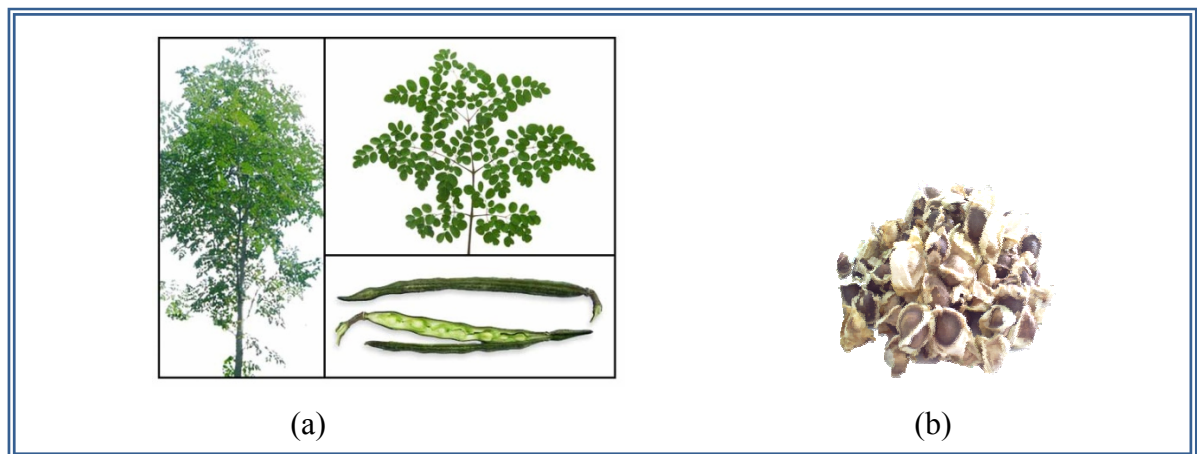


Figura 3.8 (a) Vista del árbol, follaje y fruto de moringa, (b) Semillas del fruto de moringa.

- *Sulfato de aluminio*

El sulfato de aluminio ha sido por muchos años junto con el sulfato ferroso uno de los coagulantes por excelencia en el tratamiento de aguas tanto de consumo como residuales. Las características de pH óptimo de acción, facilidad de adquisición en el

mercado y bajo costo en las instalaciones necesarias para su aplicación hacen que sean la selección más adecuada para el proceso. Su desventaja radica en las concentraciones de aluminio remanente en los lodos de desechos que se generan, pero se tiene amplia experiencia en su tratamiento que reduce el impacto del mismo en el ambiente donde se dispone [22].

3.2.3.3 Mezcla lenta (floculación)

Para el proceso de floculación se seleccionó un floculador hidráulico de flujo horizontal provisto de pantallas deflectoras para desviar el flujo en giros de 180°, y baja velocidad para asegurar la formación de un flóculo estable. Los datos necesarios para su dimensionamiento se obtienen a partir de ensayos de laboratorio conocidos como ensayos o pruebas de jarra. Una de las principales ventajas de este sistema es que no requiere de energía externa adicional, si no que la turbulencia necesaria se logra de manera natural con el flujo del líquido al ser guiada por las pantallas deflectoras.

3.2.3.4 Sedimentación

Para el proceso de sedimentación se seleccionó un sedimentador estático rectangular, por ser una de los que presenta mejores referencias de eficiencia [22], con bajo costo de instalación y facilidad de mantenimiento. Además no requiere de ningún tipo suministro de energía externa, empleando solo la fuerza de arrastre del agua que se desea clarificar.

3.2.3.5 Selección de la dosis óptima de coagulante

La dosificación adecuada del coagulante a emplear (sulfato de aluminio) se realizó empleando el método de prueba de jarra. La prueba consiste en tomar varias muestras de 1 litro del agua a tratar, adicionar cantidades distintas del aditivo químico a cada envase de muestra mientras es mezclado intensamente en un equipo agitador a una velocidad aproximada de 120 rpm por un periodo de 60 segundos

representando esto el proceso de mezcla rápida para la coagulación, luego se cambia la velocidad de agitación a 15 rpm por un periodo de 10 minutos para caracterizar el proceso de floculación, durante esta etapa se observa la calidad del flóculo así como el tiempo de formación del mismo. Finalmente se detiene la agitación y se deja sedimentar por un lapso de 30 minutos para luego sacar el sobrenadante clarificado para determinar la turbidez y pH. La dosis que reporte la menor turbidez residual, con el pH requerido, se considera la dosis óptima de coagulante a emplear, la cual para el caso de las aguas evaluadas la dosis de sulfato de aluminio que dio los mejores resultados fue de 60 mg/l.

Otros parámetros obtenidos de esta prueba son la velocidad de flujo durante la floculación y el tiempo de retención del proceso de floculación que será equivalente al tiempo de mezcla lenta empleado. La velocidad de flujo para floculación se obtiene a partir de la velocidad de agitación durante el mezclado lento por medio de la expresión matemática [22]:

$$V_{floc} = 2\pi \cdot \frac{r_j}{100} \cdot \frac{RPM}{60}$$

(Ec. 3.6)

donde:

V_{floc} : velocidad de flujo durante la floculación (m/s)

r_j : radio de la jarra empleada (cm)

RPM: velocidad de agitación empleada en la prueba (rpm)

Las jarras empleadas presentan un radio de 4,5 cm, y reemplazando en la ecuación 3.6 se tiene:

$$V_{floc} = 2\pi \cdot \frac{4,5cm}{100} \cdot \frac{15rpm}{60} = 0,0707 \text{ m/s}$$

Los datos obtenidos a partir de las pruebas de jarra se resumen en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Parámetros de diseño obtenidos a partir de pruebas de jarra.

Parámetro	Valor obtenido
Dosis óptima de coagulante (mg/l)	60
Tiempo de floculación (min)	10
Velocidad de floculación (m/s)	0,0707

3.2.4 Reducción de DBO y DQO

La DBO y la DQO son parámetros de calidad del agua que dependen directamente del origen de las aguas y de la composición de las mismas, es decir, dependen de otros parámetros como pueden ser los sólidos suspendidos y disueltos o los microorganismos patógenos, por lo que la reducción de los primeros depende de manera directa de la eliminación de los segundos [14,15].

Con los equipos ya seleccionados es posible eliminar la mayor parte de los sólidos y la turbidez presente en el agua, por lo que se puede estar seguro de que en igual medida se ha eliminado una cantidad considerable en las concentraciones reportadas de DBO y DQO, sin embargo para asegurar su eliminación en la mayor medida posible, se decidió la colocación de un filtro de arena vertical con flujo por gravedad, el cual permitirá disminuir aún más los sólidos suspendidos coloidales, flóculos remanentes del proceso de sedimentación, y microorganismos patógenos que hayan podido quedar en el líquido una vez realizado los procesos anteriores de la planta de tratamiento de aguas residuales.

3.2.5 Dimensionamiento de los equipos seleccionados

Para el dimensionamiento de los equipos de la planta de tratamiento de aguas residuales se debe primeramente establecer el caudal con el que trabajará dicha planta y a partir de allí definir el resto de los parámetros necesarios para el diseño de cada equipo.

3.2.5.1 Establecimiento del caudal de la planta

El caudal con que debe operar la planta depende directamente de los ciclos de trabajo de la planta principal de reciclaje, la cual según el diagrama de flujo de la figura 3.1 produce un flujo de efluentes líquidos de 320 m³/d, y para facilidad de cálculo en el dimensionamiento de los equipos se realiza su equivalencia a m³/h:

$$320 \frac{m^3}{d} \times \frac{1d}{24h} = 13,33 \frac{m^3}{h}$$

Siendo este el caudal del efluente que será tratado en la planta depuradora por cada hora.

3.2.5.2 Dimensionamiento del tanque de homogeneización

Para el dimensionamiento de este tanque el parámetro de donde se parte es el volumen que ha de almacenar para luego distribuirlo a la planta de tratamiento. En vista de que su función será acumular las descargas diarias intermitentes y distribuir las uniformemente durante 24 horas, el volumen del tanque se define igual a la producción diaria de efluentes en el proceso de reciclaje, es decir 320 m³/d.

Con este valor y considerando la forma circular del tanque seleccionado, se asume una altura de 6 metros (valor tomado de recomendaciones de expertos en el área, de la empresa Hidrocaribe para tanques de capacidades similares) que permita obtener el radio del tanque por medio de la expresión para el volumen de un cilindro:

$$V_{\text{tanque}} = \pi R_c^2 h_{\text{tanque}}$$

(Ec. 3.6)

donde:

 V_{tanque} : volumen del tanque (m^3). R_t : radio del tanque (m). h_{tanque} : altura del tanque (m).

Realizando el despeje del radio y reemplazando el volumen de diseño y la altura asumida, en la ecuación 3.6 resulta:

$$R_t = \sqrt{\frac{V_{\text{tanque}}}{\pi h_{\text{tanque}}}} = \sqrt{\frac{320m^3}{\pi (6m)}} = 4,12m$$

El diámetro es igual al doble del radio por tanto el diámetro del tanque resulta ser 8,24 m.

El fondo del tanque debe ser de forma cónica invertida de forma que se puedan extraer fácilmente los sólidos sedimentables que se acumulen dentro del mismo. Para ello se asume un inclinación de 30° desde la base del cilindro del tanque para determinar la profundidad máxima en el centro del tanque. Ésta inclinación es considerada de acuerdo a las recomendaciones de diseño de la empresa Hidrocaribe para facilitar el desplazamiento de los lodos. De acuerdo a la figura 3.9 se deduce que la altura en el centro (H_m) medida de forma descendente desde la base de la sección cilíndrica es:

$$H_m = R_t \cdot \tan 30^\circ = 4,12m \cdot \tan 30^\circ = 2,38m$$

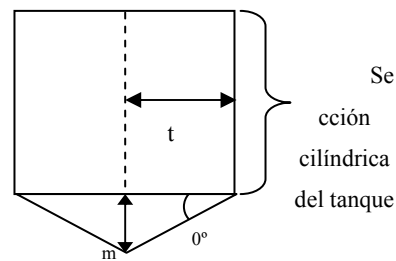


Figura 3.9 Inclinación del fondo del tanque de homogeneización.

3.2.5.3 Características del mezclador estático

El mezclador estático es un dispositivo patentado por un fabricante que mantiene sus consideraciones y esquemas de diseño bajo resguardo, por tanto se realizó una revisión de los distintos fabricantes, siendo seleccionada la empresa norteamericana Koflo Corporation, especialista en el ramo, por ofrecer el mayor nivel de información, acerca de sus productos además de ofrecer la mejor relación de eficiencia y economía. De acuerdo a la tabla mostrada en el anexo C, el modelo recomendado para el caudal de planta manejado es el 2-40C-4-6-2 de la serie 308.

El mezclador seleccionado tiene 2” de diámetro nominal y 19” (0,4826 m) de longitud y está fabricado en material de PVC transparente que permite la inspección continua del flujo que circula, incluye elementos internos de acero inoxidable que generan la turbulencia necesaria para el mezclado. Su instalación se realiza en el curso de la tubería de alimentación a la planta por medio de sus extremos de rosca para facilitar tanto montaje como el mantenimiento.

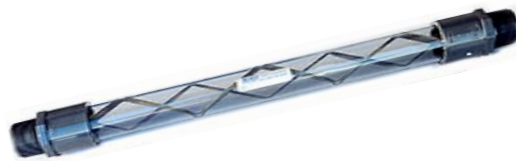


Figura 3.10 Mezclador estático modelo 2-40C-4-6-2 [38].

3.2.5.4 Dimensionamiento de la unidad de mezcla lenta (floculador)

Para el dimensionamiento de esta unidad se siguió el procedimiento recomendado por la literatura [39], basado en las variables obtenidas de las pruebas de jarra realizadas que se muestran en la tabla 3.7, teniéndose una velocidad de flujo de 0,0707 m/s y un tiempo de floculación o tiempo de retención de 10 minutos.

A partir de estos valores la longitud de canal necesaria se obtiene por la expresión [39]:

$$L = V_{floc} \cdot t \quad (\text{Ec. 3.7})$$

donde:

L : longitud del canal (m).

V_{floc} : velocidad de flujo para floculación (m/s).

t : tiempo de retención (min).

Sustituyendo valores se tiene:

$$L = 0,0707 \text{ m/s} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 42,42 \text{ m}$$

El área de sección del canal es:

$$A = \frac{Q}{V_{floc}} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

donde:

A: área de sección del canal (m²).

Q: caudal de diseño (m³/h).

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$A = \frac{13,33 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \left(\frac{1\text{h}}{3600\text{s}}\right)}{0,0707 \text{ m/s}} = 0,0524$$

Las pantallas deflectoras serán móviles, construidas en madera machihembrada recubierta con pintura impermeabilizante, para facilitar el mantenimiento de la unidad y el flujo del líquido, las medidas de las mismas se establecieron en 0,60 m de alto por 1,5 m de largo (por ser una medida comercialmente accesible según información consultada a empresas distribuidoras del ramo), y un espesor de 0,01 m. la profundidad del agua en el canal considerando el bajo caudal se fijó en 0,40 m según una recomendación dada en los manuales del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS), que implica dejar un espacio entre la superficie del líquido y el borde superior de la pantalla. La altura de la pared de la unidad se considerará la misma de las pantallas deflectoras.

El espaciamiento entre pantallas está dado por la relación del área de sección del canal entre la profundidad de agua en el canal [39]:

$$\alpha = \frac{A}{h} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

donde:

a : espaciamiento entre pantallas (m).

h_c : profundidad del agua en el canal (m).

El espaciamiento entre pantallas resulta:

$$\alpha = \frac{0,0524m^2}{0,40m} = 0,13m$$

El espaciamiento entre la punta de la pantalla y la pared será 1,5 veces el espaciamiento entre las pantallas [39]:

$$Y = 1,5 \cdot \alpha = 1,5 \cdot 0,13m = 0,19m \quad (\text{Ec. 3.10})$$

donde:

Y : espaciamiento entre la punta de la pantalla y la pared (m).

El ancho del tanque será el espaciamiento entre la punta de la pantalla deflectora y la pared más la longitud de la pantalla [39]:

$$I = X + Y$$

(Ec. 3.11)

donde:

I : ancho de la unidad del floculador (m).

X : Longitud de la pantalla deflectora (m).

$$I = 1,5m + 0,195m$$

El número de pantallas deflectoras necesarias se determina con la longitud del canal entre el ancho de la unidad [39]:

$$N = \frac{L}{I}$$

(Ec. 3.12)

donde:

N : número de pantallas deflectoras.

$$N = \frac{42,42m}{1,625m} = 26,10 \approx 26$$

Finalmente con el número de pantallas y el espaciamiento entre las ellas, y el espesor de las mismas, la longitud total del floculador resulta:

$$L_t = N(\alpha + E_p)$$

(Ec. 3.13)

donde:

L_t : largo total de la unidad de floculación (m).

E_p : espesor de las pantallas deflectoras (m).

Reemplazando:

$$L_t = 26(0,13m + 0,01m) = 3,64m$$

3.2.5.5 Dimensionamiento del sedimentador

Para el dimensionamiento del tanque de sedimentación se siguió la metodología recomendada por el CEPIS para el diseño de desarenadores y sedimentadores, basada en las siguientes recomendaciones [40]:

- La relación de las dimensiones largo y ancho debe estar entre 3 – 6.
- La relación de las dimensiones de largo y profundidad será entre 5 – 20.
- El fondo de la unidad debe tener un pendiente de 5 a 10% para facilitar el deslizamiento de sedimentos.
- La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/s para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.
- La ubicación de la pantalla difusora debe ser entre 0,7 a 1 m de distancia de la pared de entrada.
- Los orificios más altos de la pared difusora deben estar a $1/5$ o $1/6$ de la altura a partir de la superficie del agua y los más bajos entre $1/4$ ó $1/5$ de la altura (H) a partir de la superficie del fondo.

Experimentalmente fue determinado el tiempo de sedimentación por ensayos en columnas, cuyo valor fue de 32 min. Este procedimiento recomendado por técnicos de los laboratorios donde se realizó este proyecto, consiste en colocar la muestra de agua residual ya floculada en una columna cilíndrica de cristal, como puede ser una probeta común de capacidad de 1 litro, y medir la altura de la capa de sedimento que se va depositando en el fondo de la probeta a intervalos de tiempo definidos, hasta que la misma permanezca constante. El tiempo en que la altura del lodo depositado comienza a ser constante y el líquido sobrenadante se observa clarificado se considera el tiempo de sedimentación. Para efectos de diseño se asume un tiempo de residencia de 35 min, considerando las posibles interferencias que puedan afectar la sedimentación en la realidad.

El primer paso es determinar el volumen de líquido que debe permanecer en el tanque de la unidad por unidad de tiempo a través de la expresión:

$$V_{sed} = Q \cdot t_r \quad (\text{Ec. 3.14})$$

donde:

V_{sed} : volumen del sedimentador (m^3).

Q : caudal de diseño (m^3/h).

t_r : tiempo de residencia en el sedimentador (min).

Reemplazando los datos obtenidos experimentalmente se tiene:

$$V_{sed} = 13,33 \, m^3/h \cdot 35 \, min \cdot 1h/60 \, min = 7,78 \, m^3$$

Assumiendo la altura del tanque en 1,1 m por el caudal a manejar según las recomendaciones de los manuales del CEPIS, se obtiene el área superficial de la unidad de sedimentación [39]:

$$As = \frac{V_{sed}}{H_{sed}}$$

(Ec. 3.15)

donde:

As : área superficial del sedimentación (m^2).

H_{sed} : altura del sedimentador (m).

$$As = \frac{7,78 \, m^3}{1,1 \, m} = 7,07 \, m^2$$

Se asume ahora el ancho de la unidad en 1,5 m de acuerdo a las recomendaciones [39], para determinar la longitud de la sección de sedimentación [39]:

$$L_s = \frac{As}{B}$$

(Ec. 3.16)

donde:

L_s : longitud de la sección de sedimentación (m).

B : ancho del tanque (m).

$$L_s = \frac{7,07m^2}{1,5m} = 4,71m$$

Se asume la separación entre la entrada de la unidad y la pantalla difusora según las recomendaciones en un valor de 0,8 m, por lo que la longitud total del sedimentador será [39]:

$$T = L_s + 0,8 \quad \text{(Ec. 3.17)}$$

donde:

T : longitud total del sedimentador (m).

$$T = 4,71m + 0,8m = 5,51m$$

Con estos valores se comprueban las relaciones:

$$\text{Largo – ancho (T/B)} = (5,51m/1,1) = 3,67$$

$$\text{Largo – Profundidad (T/H)} = (5,51m/1,1m) = 5,01$$

Confirmando que estos valores están dentro de los rangos recomendados por el CEPIS.

- *Diseño de la pantalla difusora:*

La pantalla difusora es la encargada de que el líquido se mantenga en flujo laminar dentro de la sección de sedimentación, facilitando el descenso de los flóculos; consiste en una pantalla de concreto con orificios que permiten el flujo del líquido a través de ella, para distribuirlo de forma uniforme [40].

Asumiendo la velocidad de paso por los orificios según las recomendaciones en 0,07 m/s se obtiene el área total de los orificios [39]:

$$A_o = \frac{Q}{V_o \cdot 3600} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

donde:

A_o : área total de los orificios (m^2).

Q : caudal de diseño (m^3/h).

V_o : velocidad de paso en los orificios (m/s).

$$A_o = \frac{13,33 \text{ m}^3/h}{0,07 \text{ m/s} \cdot 3600} = 0,053 \text{ m}^2$$

En base a las recomendaciones se considera un diámetro de orificio $D = 0,05$ m (5 cm), área de cada orificio será:

$$a_o = \pi \frac{D^2}{4} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

donde:

a_o : área de cada orificio (m^2).

D : diámetro del orificio (m).

$$a_o = \pi \frac{(0,05)^2}{4} = 1,963 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

El número de orificios viene dado por [39]:

$$n = \frac{A_o}{a_o} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

donde:

n : número de orificios necesarios.

$$n = \frac{0,053 \text{ m}^2}{1,963 \times 10^{-3}} = 26,99 \approx 27$$

Se propone un arreglo de 3 filas y 9 columnas para ordenar todos los orificios. La altura de la sección que albergará los orificios estará dada de acuerdo a las recomendaciones [39]:

$$h = H_{sed} - \frac{2}{5} H_{sed} \quad (\text{Ec. 3.21})$$

donde:

h : altura de la pantalla difusora (m)

$$h = 1,1m - \frac{2}{5} (1,1m) = 0,66m$$

El espaciado entre filas será [39]:

$$a_1 = \frac{h}{n_f} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

donde:

a_1 : espaciado entre filas de orificios (m).

n_f : número de filas.

$$a_1 = \frac{0,66m}{3} = 0,22m$$

El espaciado entre columnas será [39]:

$$a_2 = \frac{B}{n_c + 2} \quad (\text{Ec. 3.23})$$

donde:

a_2 : espaciado entre columnas de orificios (m).

n_c : número de columnas..

$$a_2 = \frac{1,5m}{9 + 2} = 0,14m$$

3.2.5.6 Dimensionamiento del filtro de arena seleccionado

El filtro seleccionado es el filtro de arena vertical de gravedad, elaborado en acero al carbono con revestimiento interno en resinas epóxicas para evitar la corrosión del metal, presenta conexiones bridadas de 3 pulgadas y medio filtrante simple de arena sílice, con una capa de grava fina como soporte. La entrada del agua se da por la parte superior del filtro en tanto que el agua filtrada es recolectada en la parte inferior, a través de un fondo falso. En estos fondos falsos son montados una serie de distribuidores, los cuales retienen la carga del material filtrante, dejando pasar solamente el agua. El diseño se realizó siguiendo la metodología recomendada en la literatura [19].

Primero se elige el tipo de medio a utilizar según las recomendaciones, la cual se decidió fuera un filtro de lecho simple de arena. De la tabla 2.5 se tiene que la velocidad de filtración para éste tipo de medio es 10 m/h por lo que el área del filtro viene dada por [19]:

$$\text{Área del filtro} = \frac{Q}{\text{Velocidad de filtración}} = \frac{13,33\text{m}^3/\text{h}}{10\text{m}/\text{h}} = 1,333\text{m}^2$$

A partir de la expresión del área de una circunferencia se tiene el diámetro requerido por el filtro:

$$\text{Diámetro del filtro} = \frac{4 \cdot \text{Área del filtro}}{\pi} = \frac{4 \cdot 1,333\text{m}^2}{\pi} = 1,30\text{m}$$

Para determinar la altura del filtro toma la altura de lecho de arena recomendada en la tabla 2.5 la cual es de 0,70 m. De acuerdo a las recomendaciones se debe colocar una capa de grava de 0,15 m como soporte del medio filtrante, dejar un espacio de 0,50 m en el fondo para el agua filtrada, así como aproximadamente 0,80 m en el tope para la columna de agua cruda sobre el medio filtrante, además de

0,45 m para las bases o soportes del filtro, dando como la altura del filtro la sumatoria de altura de lecho + altura de grava + altura capa de agua en tope + altura de agua en fondo + base de soporte, teniéndose un total de 2,60 m de altura.

3.2.5.7 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de agua tratada

Este tanque tendrá la función de acumular el agua tratada para luego ser bombeada hasta su disposición, a la vez que permite emplear el agua acumulada en los procesos de retro lavado de los equipos que lo requieren. Se seleccionó un tanque circular con un volumen del 20 % del total tratado diariamente, lo que resulta equivalente a 64 m^3 , con este valor y considerando la forma circular del tanque seleccionado, se asume una altura de 3 metros (valor tomado de recomendaciones de expertos en el área, de la empresa Hidrocaribe para tanques de capacidades similares) que permita obtener el radio del tanque despejando de la ecuación 3.6 se tiene:

$$R_t = \sqrt{\frac{V_{\text{tanque}}}{\pi h_{\text{tanque}}}} = \sqrt{\frac{64 \text{ m}^3}{\pi(3\text{m})}} = 2,60 \text{ m}$$

El diámetro es igual al doble del radio por tanto el diámetro del tanque resulta ser 5,22 m.

3.2.6 Propuestas para la disposición de los efluentes tratados

De acuerdo a los equipos seleccionados para el tratamiento de los efluentes provenientes de la planta de reciclaje de papel se espera que el líquido que se obtenga de la planta de tratamiento presente condiciones óptimas para su reutilización en el proceso de reciclaje de papel. Siendo éste el destino ideal para elevar aún más el carácter ecológico de la planta de reciclaje de papel, con el ahorro y recuperación de dichas aguas.

Otra opción es la de emplearlos en el riego de las áreas verdes de las instalaciones de la empresa así como en la sección de plantación de las materias primas vegetales, o bien su disposición final en los cuerpos de agua cercanos a las instalaciones.

3.3 PRESENTACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO SELECCIONADO Y SU DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

Los equipos seleccionados tienen en común ser de funcionamiento hidráulico, es decir, no precisan de fuentes de energía alterna para su funcionamiento, lo que tiene beneficios desde los puntos de vista económico y ecológico, reduciendo el mantenimiento que requieren, y reduciendo al mínimo posible el consumo de energía eléctrica y generación de calor de las maquinarias, así como tienen un alto nivel de seguridad al no poseer partes móviles. En base a ello se realizan los diagramas de flujo de proceso y los diagramas de distribución en planta (layout).

3.3.1 Diagrama de flujo del proceso seleccionado

En general los contaminantes a enfocar en la planta de tratamiento de efluentes están asociados a la presencia de los distintos tipos de sólidos, por lo que el diagrama de flujo de proceso se realizó en función de una secuencia de equipos y procesos que permitieran la eliminación gradual de los distintos sólidos que se encontraron en la caracterización de las aguas, según su tamaño comenzando por los sólidos sedimentables hasta llegar a los sólidos coloidales. La figura 3.11 muestra la secuencia de procesos seleccionados para la elaboración del diagrama de flujo.

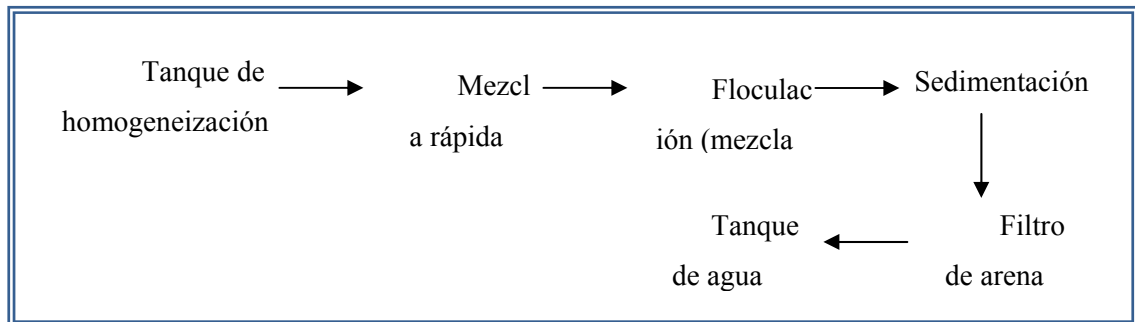


Figura 3.11 Secuencia de los procesos seleccionados para el tratamiento.

3.3.1.1 Descripción del diagrama de flujo de proceso

- **Tanque de Homogeneización:** consiste en un tanque cilíndrico de concreto armado impermeabilizado. Es en esta etapa que se reciben las descargas intermitentes de los efluentes de reciclaje de papel, y se acumulan los distintos volúmenes descargados para distribuirlos uniformemente a lo largo de todo el día hacia la planta de tratamiento que se encargará de tratarlos. En este mismo tanque por medio de su diseño de fondo cónico, se logran separar la carga de sólidos sedimentables que contienen las aguas entrantes, los cuales estar formados por fibras de papel que pueden ser recuperadas para llevarlas nuevamente al proceso, previo proceso de secado, o bien por bombeo directo.
- **Mezclador estático:** está representado por un mezclador estático en línea modelo 2-40C-4-6-2 del fabricante Koflo corporation. Estará instalado en la tubería que interconecta el tanque de homogeneización con el sistema de tratamiento aguas abajo del mismo. Es en este punto que se realiza la adición del sulfato de aluminio empleado como coagulante con una dosis de 60 mg/l. El efecto de mezclado se consigue por seis elementos internos colocados estratégicamente dentro del mezclador para generar la turbulencia necesaria para la dispersión total del aditivo químico y producir la coagulación de las partículas suspendidas.

- **Floculador:** luego de pasar por el mezclador las partículas sólidas y coloidales desestabilizadas deben pasar a un régimen de mezcla lenta para aglomerarse y producir flóculos de peso suficiente para sedimentar. Esta unidad consiste en un canal de mezclado con pantallas que guían al fluido y lo hacen realizar giros de 180° en su curso para generar una leve turbulencia que permita a las partículas chocar entre sí y se realice la floculación, pero sin llegar a ser demasiado fuerte como para romper los flóculos ya formados. Las pantallas están hechas de madera impermeabilizada para permitir su fácil remoción durante la limpieza y mantenimiento.
- **Sedimentador:** en el sedimentador se hace circular el fluido en un régimen laminar a baja velocidad de forma que los flóculos formados puedan descender con facilidad hasta el fondo de la unidad, de donde son arrastrados por gravedad a una fosa de lodos desde donde se extraen para ser llevados a tratamiento.
- **Filtro de arena:** es el paso final donde son removidos los sólidos coloidales que pueden haber pasado las etapas previas de tratamiento. En esta unidad se hace circular el fluido de manera descendente por gravedad a través de un lecho filtrante compuesto por una capa de arena y una de grava fina soportados sobre una malla de acero inoxidable.
- **Tanque de agua tratada:** en este tanque se almacena momentáneamente el agua tratada para llevarla nuevamente por bombeo hasta el proceso de reciclaje de papel. Desde este tanque se tiene una conexión de recirculación hasta el tanque de homogenización como medida de ahorro económico.

3.3.2 Simulación en laboratorio del proceso seleccionado

Para comprobar la eficiencia del proceso seleccionado se realizó una simulación a escala de laboratorio empleando métodos que representaran de la manera más exacta posible los equipos escogidos. Primeramente se escogieron la muestra 1 por ser la que tendrá mayor nivel de producción en la planta de reciclaje (papel bond

blanco), y la muestra 4 (bond – cartulina con colorante bija) por ser la mezcla con colorante que reportó el más alto valor de DQO (cabe destacar que las muestras 5 y 6 reportaron valores de DQO mayores, pero por presentar problemas en la coloración no fueron incluidas para la simulación).

Los equipos de laboratorio que se emplearon para reemplazar los industriales fueron: el tanque de homogeneización se reemplazó por los envases donde se recolectó las muestras, las mismas se dejaron en reposo por un lapso de 40 minutos para permitir la sedimentación, y se extrajo el sobrenadante el cual se llevó a envase de un litro. Los procesos de mezcla rápida, floculación y sedimentación tienen un sustituto por excelencia a escala de laboratorio como lo son las llamadas pruebas de jarra, método aplicado en este caso por medio de un agitador magnético con control de revoluciones, para finalmente pasar por un filtro de arena construido de forma artesanal con un recipiente plástico tipo botella invertida, con capas de grava y arena como se muestra en la figura 3.12.

Luego de realizar el proceso a ambas muestras, aplicando la dosificación de coagulante previamente determinada, se analizaron los parámetros problema (a excepción del DBO que no pudo ser realizado por dificultades de carácter logístico), además de determinarse los valores de alcalinidad y dureza los cuales teóricamente son afectados por el empleo del coagulante seleccionado.

Con los valores obtenidos se calculó el porcentaje de remoción de cada contaminante problema empleando la expresión:

$$\% \text{remoción} = \frac{\text{valor en agua cruda} - \text{valor en agua tratada}}{\text{valor en agua cruda}} \cdot 100$$

(Ec. 3.X)

Para la muestra 1 luego del tratamiento se obtuvo un valor de turbidez de 2,06, tomando el valor de la turbidez para la misma muestra cruda se tiene un porcentaje de remoción de:

$$\%remoción = \frac{445NTU - 2,06NTU}{445NTU} \cdot 100 = 99,54 \%$$

Del mismo modo se calculan los porcentajes de remoción para cada parámetro analizado en la simulación y los resultados se muestran en la tabla 4.5.



Figura 3.12 Filtro de arena empleado para la simulación en laboratorio: (a) materiales empleados como medios filtrantes, (b) disposición de las capas en el lecho, (c) detalle de los orificios de salida de agua filtrada, (d) detalle del difusor superior del lecho.

3.3.3 Distribución en planta de los equipos seleccionados

Para la distribución de los equipos en planta se investigó sobre las normativas de seguridad de los distintos equipos, así como de los requerimientos de mantenimiento que presenta cada uno. Igualmente se estudió las condiciones de flujo

que debe cumplir el agua residual durante las etapas de tratamiento para decidir la distancia entre equipos que permitieran su limpieza sin comprometer la eficiencia del proceso por excesos de distancia en las tuberías. Como punto principal también se estudió el área del terreno donde será instalada la planta a fin de conocer las posibilidades de espacio existentes.

La planta estará dividida en dos secciones análogas que operarán de forma alternada por razones de mantenimiento, con un caudal de 13,33 m³/h. Ambas compartirán el mismo tanque de homogeneización el cual requiere de poco mantenimiento, y se propone hacerlo los días de inactividad que presenta la planta de papel reciclado, o en paradas programadas de inspección general de todo el sistema.

3.4 REALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE COSTOS PARA LA INSTALACIÓN DE LA PLANTA SELECCIONADA

El estudio de costos de la planta de tratamiento de efluentes, estuvo basado principalmente en la estimación de los costos de construcción e instalación de los equipos principales, a partir de los cuales se estima el costo total de la inversión empleando el método de porcentaje de costo del equipo entregado. Los precios fueron obtenidos de las listas de precios referenciales para insumos y materiales de construcción en obras de ingeniería de APV obras [41], actualizada para el mes de marzo de 2010. Esta empresa realiza actualizaciones mensuales de la lista de insumos para la construcción de acuerdo a los índices de precios generados por el Banco Central de Venezuela. Otras referencias fueron tomadas de las empresas, Koflo Corporation y Tiendas Montana. A continuación se describe el proceso seguido para el estimado de costos para cada equipo.

3.4.1 Tanque de homogeneización

De acuerdo a los datos tomados de la tabla 3.7. El requerimiento de concreto para la construcción de los muros laterales se determina según la expresión [20]:

$$C_p = \pi \cdot (R^2 - r^2) h_{\text{tanque}} \quad (\text{Ec. 3.24})$$

donde:

C_p : volumen de concreto requerido para las paredes (m^3).

R : radio exterior de la pared del tanque (m).

r : radio interior de la pared del tanque (m).

h_{tanque} : altura del tanque (m).

Considerando un espesor de pared de 0,15 m, según las recomendaciones de resistencia asociadas al volumen del tanque [20]:

$$C_p = \pi \cdot [(4,12\text{m})^2 - (3,97\text{m})^2] 6\text{m} = 22,87\text{m}^3$$

El costo por m^3 de construcción de muros en concreto es 919,40 Bs [41], por lo que el costo por construcción de paredes es $22,87 \text{ m}^3 \cdot 919,40 \text{ Bs/m}^3 = 21.026,68$ Bs. La cantidad de concreto necesario para el fondo cónico (C_f) se determina por [20]:

$$C_f = \left(\frac{\pi}{3} R^2 H m \right) - \left(\frac{\pi}{3} r^2 H m \right) \quad (\text{Ec. 3.25})$$

Considerando un espesor de 0,15 m por recomendaciones de resistencia en éste tipo de tanque.

$$C_f = \left(\frac{\pi}{3} (4,12\text{m})^2 2,38\text{m} \right) - \left(\frac{\pi}{3} (3,97\text{m})^2 2,23\text{m} \right) = 5,50$$

El costo por m^3 de construcción de losas de fondo en concreto es 551,77 Bs [41], por lo que el costo de construcción de la losa cónica de fondo resulta 3.034,74 Bs. El techo del tanque se construirá en concreto de 0,1 m de espesor para un radio de 4,12m el volumen de la sección circular del techo resulta $5,33 \text{ m}^3$ a un costo de 640,25 Bs [41], se tiene un costo para la construcción del techo del tanque de 3412,53 Bs. Para dar el acabado final a todas las superficies del tanque estas deben ser

impermeabilizadas a base de mortero arena – cemento con aditivo impermeabilizante. El área de las paredes a impermeabilizar considerando el radio interno de las paredes de 3,97 m es $2\pi \cdot 3.97\text{m} \cdot 6\text{m} = 146,67\text{m}^2$. El costo por m^2 de impermeabilización de muros de concreto es 301,64 Bs [41], por lo que el costo por impermeabilización de las paredes laterales del tanque es 44.214,54 Bs. El área a impermeabilizar de la losa de fondo para un radio de 3,97 m en forma cónica de altura 2,23 m es $27,81\text{m}^2$, para un costo de impermeabilización de 221,68 Bs por m^2 [41], dando un costo de 6.164,92 Bs. El costo total de construcción del tanque se determina sumando los costos de construcción e impermeabilización de paredes y fondo, y el costo del techo, lo cual se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Costo de construcción del tanque de homogeneización.

Descripción	Costo (Bs)
Construcción de muros laterales	21.026,68
Impermeabilización de muros laterales	44.214,54
Construcción losa cónica de fondo	3.034,74
Impermeabilización losa cónica de fondo	6.164,92
Construcción del techo	3.412,53
Total:	77.852,41

3.4.2 Mezclador estático

El costo del mezclador estático en línea fue suministrado por el fabricante Koflo Corporation, ubicado en Cary, Illinois, Estados Unidos de America (EUA), el cual establece un costo para el equipo modelo 2-40C-4-6-2 de la serie 308 para el mes de febrero del año 2010 de 189 dólares de EUA. A una tasa de cambio oficial de 4,30 Bs por dólar el costo del equipo resulta 812,70 Bs. También debe considerarse los gastos por servicios de traslado del equipo, así como los costos de introducción al país. En entrevistas informales realizadas al personal del Servicio Nacional Integrado de Administración Aduanera y Tributaria (SENIAT) se conoció que los costos

asociados a la procura de equipos en el extranjero pueden calcularse como un porcentaje del costo del equipo según se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Costos asociados a la procura de equipos importados

Costos asociados a la procura de equipos en el extranjero	Porcentaje del precio del equipo (%)
Costo por empaque, transporte a puerto y gastos de aduana	3
Transporte marítimo o aéreo	5
Seguros	1
Arancel	15
Gastos de Puerto y agente aduanal	3
Transporte interno	3
Repuestos de arranque	3
Servicios del vendedor	2
Total	35

El costo total del mezclador estático estaría dado por el precio original más un adicional correspondiente al 35 % de ese mismo precio, es decir, $812,70 \text{ Bs} + 0,35 \cdot 812,70 = 1.097,15 \text{ Bs}$, como se realizarán dos líneas de tratamiento, el costo total sería $1.097,15 \text{ Bs} \cdot 2 = \mathbf{2.194,30 \text{ Bs}}$.

3.4.3 Unidad de floculación

El volumen de concreto para la construcción de las paredes de la unidad se obtiene considerando un espesor de 0,1 m (el cual es empleado en equipos de similar tamaño). Las paredes laterales tienen cada una las medidas de 3,64x0,60x0,1 m, lo que da un volumen de $0,22 \text{ m}^3$, por ser dos paredes laterales se tiene un volumen de $0,44 \text{ m}^3$. Las paredes anterior y posterior tienen cada una 1,695x0,60x0,10 m dando un volumen de $0,1 \text{ m}^3$, al ser dos paredes iguales el volumen será de $0,2 \text{ m}^3$, sumando los volúmenes de las paredes laterales, anterior y posterior de la unidad se tiene el volumen de concreto requerido para la construcción de muros del floculador resultando $0,64 \text{ m}^3$ al ser dos unidades idénticas $0,64 \text{ m}^3 \cdot 2 = 1,28 \text{ m}^3$, el costo por

m^3 de concreto para la construcción de muros es de 919,40 Bs [41], obteniéndose un costo para la construcción en concreto de muros de 1.176,83 Bs, el área a impermeabilizar de las paredes laterales es $(3,64 \cdot 0,60) m = 2,18 m^2 \cdot 2 = 4,36 m^2$, las paredes frontal y posterior tienen un área de $(1,695 \cdot 0,60) m = 1,02 m^2 \cdot 2 = 2,04 m^2$, el área total de las paredes es $4,36 + 2,04 = 6,4 m^2$, como serán dos unidades el área será $12,8 m^2$, si el costo por m^2 para impermeabilización de muros es 301,64 Bs [41], el costo de acabado de los muros es $12,8 m^2 \cdot 301,64 Bs/m^2 = 3.860,99 Bs$. El volumen de la losa de fondo para 0,1 m de espesor es $(3,64 \cdot 1,695 \cdot 0,1)m = 0,62 m^3$, son dos unidades $0,62m^3 \cdot 2 = 1,24 m^3$ a un costo de concreto para losa de fondo de 551,77 Bs/ m^3 el costo del concreto resulta 684,19 Bs, la impermeabilización para el área del piso de $(3,64 \cdot 1,695)m = 6,19 m^2 \cdot 2 unidades = 12,38 m^2$ por un costo de 221,68 Bs/ m^2 [41] resulta 2.744,40 Bs. Las pantallas deflectoras tienen una medida de $(1,5 \cdot 0,60)m = 0,9 m^2$, el área total de las pantallas es $0,9 m^2 \cdot 26 = 23,4 m^2 \cdot 2 unidades = 46,8 m^2$. La madera machihembrada tienen un costo de 200 Bs/ m^2 [41], por lo que el costo total de las pantallas sería de $46,8 m^2 \cdot 200Bs/m^2 = 9.360 Bs$, la impermeabilización de la madera se realiza con esmalte Impercoat PLUS (anexo D), aplicando cuatro capas sucesivas en direcciones opuestas. El rendimiento es de 75 $m^2/galón$. El área total a pintar será $46,8 m^2 \cdot 4 cuatro capas = 187,2 m^2$. Se necesitarán tres galones para el acabado final a un costo de 116 Bs [41] cada galón el costo por pintura será de 348 Bs. El costo total del floculador se determina sumando los costos de cada sección tal como se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Costo total de la unidad de floculación seleccionada.

Descripción	Costo (Bs)
Construcción de paredes de la unidad	1.176,83
Impermeabilización de paredes de la unidad	3.860,99
Construcción de la losa de fondo	684,19
Impermeabilización de la losa de fondo	2.744,40
Pantallas deflectoras	9.360,00
Impermeabilización de las pantallas	384,00

deflectoras	
Total:	18.210,41

3.4.4 Sedimentador

Las dimensiones de las paredes laterales del sedimentador considerando 0,1 m de espesor empleados en unidades de este tipo, son $(5,51 \times 1,1 \times 0,1) \text{ m} = 0,61 \text{ m}^3$, por ser dos paredes, $0,61 \text{ m}^3 \cdot 2 = 1,22 \text{ m}^3$. Las paredes frontal y posterior tienen dimensiones de $(1,1 \times 1,5 \times 0,1) \text{ m} = 0,17 \text{ m}^3$, como son dos paredes se tiene $0,34 \text{ m}^3$, y el volumen total de concreto requerido por las paredes será $(1,22 + 0,34) \text{ m}^3 = 1,56 \text{ m}^3$, se proyectan dos unidades por tanto $1,56 \text{ m}^3 \cdot 2 = 3,12 \text{ m}^3$ multiplicado por el costo del m^3 de concreto para la construcción de muros [41] se tiene $3,12 \text{ m}^3 \cdot 919,40 \text{ Bs/m}^3 = 2.868,53 \text{ Bs}$, el área de las paredes resulta ser la suma de las áreas de las paredes laterales y las frontal y posterior, resultando $[(5,51 \cdot 1,1) \text{ m} \cdot 2 + (1,1 \cdot 1,5) \text{ m} \cdot 2] = 15,42 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ unidades} = 30,84 \text{ m}^2$, el costo por m^2 para la impermeabilización de los muros es 301,64 Bs [41], resultando un costo por impermeabilización de 9.302,58 Bs. La losa de fondo requiere un volumen de concreto de $(5,51 \cdot 1,5 \cdot 0,1) \text{ m} = 0,83 \text{ m}^3 \cdot 2 \text{ unidades} = 1,66 \text{ m}^3$, a un costo de concreto de $551,77 \text{ Bs/m}^3$ [41], el costo por construcción del fondo es $1,66 \text{ m}^3 \cdot 551,77 \text{ Bs/m}^3 = 915,94 \text{ Bs}$. El área de la losa de fondo es $(5,51 \cdot 1,5) \text{ m} = 8,27 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ unidades} = 16,54 \text{ m}^2$. La impermeabilización de la losa de fondo se cotiza en 221,68 Bs/ m^2 [41] por lo que el costo será 3.666,58 Bs. La pantalla difusora se realizará en concreto con un espesor de 0,1 m por lo que su volumen será $(1,5 \times 1,1 \times 0,1) \text{ m} = 0,17 \text{ m}^3$, como serán dos unidades se tiene $0,34 \text{ m}^3$ y el costo de construcción en concreto [41] resulta $0,34 \cdot 919,40 \text{ Bs/m}^3 = 312,60 \text{ Bs}$. La impermeabilización se realizará por ambas caras obteniéndose un área de $(1,5 \cdot 1,1) \text{ m} \cdot 2 = 3,3 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ unidades} = 6,6 \text{ m}^2$, por tanto el costo de impermeabilización de las pantallas difusoras será $6,6 \text{ m}^2 \cdot 301,64 \text{ Bs/m}^2 = 1.990,82 \text{ Bs}$. El costo total del equipo se resume en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Costo total del sedimentador seleccionado.

Descripción	Costo (Bs)
Construcción paredes del sedimentador	2.868,53
Impermeabilización paredes del sedimentador	9.302,58
Construcción losa de fondo	915,94
Impermeabilización losa de fondo	3.666,58
Construcción pantalla difusora	312,60
Impermeabilización pantalla difusora	1.990,82
Total:	19.057,05

3.4.5 Filtro de arena

El costo de los equipos de filtración en arena depende de múltiples factores y requiere de un alto nivel de detalles para estimarlos con exactitud, por lo que se consideró para este estudio un precio promedio determinado a partir de la información obtenida de entrevistas informales a distintos fabricantes en cuanto a filtros de características similares a las requeridas por el proceso. Dicho costo resultó 10.400 Bs por cada unidad de filtración incluyendo el medio filtrante. Se proyectaron dos unidades de filtración por cada línea de tratamiento, como se tienen dos líneas, se requieren cuatro unidades el costo total por equipos de filtración es $10.400 \text{ Bs} \cdot 4 \text{ unidades} = \mathbf{41.600 \text{ Bs}}$.

3.4.6 Tanque de almacenamiento de agua tratada

La estimación de costos para este tanque se realiza del mismo modo descrito en la sección 3.4.1 para la sección cilíndrica del tanque de homogeneización. Resultando un costo para este tanque de 25.113,13 Bs, como se contemplan dos secciones análogas el costo total de este equipo es de **50.226,26 Bs**.

3.4.7 Costo del equipo entregado

El costo del equipo entregado es la sumatoria de los costos de cada una de los equipos considerados en el proceso que se llevará a cabo en la planta de tratamiento de efluentes, esto se muestra en la tabla 3.16.

Tabla 3.11 Costo total del equipo entregado

Equipo	Costo (Bs)
Tanque de homogeneización	77.852,41
Mezclador estático en línea	2.194,30
Unidad de floculación	18.210,41
Sedimentador	19.057,05
Filtro de arena	41.600,00
Tanque de almacenamiento de agua tratada	50.226,26
Total:	209.140,43

3.4.8 Estimación del costo total para la instalación de la planta

Considerando que este proyecto abarca un diseño preliminar, la estimación del costo total para la instalación de la planta se realiza por el método de porcentaje de costo de equipo entregado, en el cual se estiman los gastos asociados a la instalación de los equipos principales, como un porcentaje del costo total de los mismos. Para este método no se consideran las instalaciones eléctricas ya que la mayoría de los equipos son de tipo hidráulico y no requieren de energía externa alguna para su funcionamiento o control. La aplicación del método para este proyecto se realiza en base a la tabla 2.7 para plantas que procesan fluidos y sólidos modificando algunos porcentajes en función de las condiciones específicas de este proyecto, dichas modificaciones se presentan en la tabla 3.12 [28].

Tabla 3.12 Costo total de inversión para la instalación de la planta de tratamiento propuesta.

Rubros	% Costo del equipo entregado
Costos directos	
Equipo adquirido y entregado	100
Instalación del equipo adquirido	39
Instrumentación y controles	13
Cañerías y tuberías	31
Obras civiles*	18
Mejoras del terreno	10
<i>Total de costos directos</i>	<i>211</i>
Costos indirectos	
Ingeniería y supervisión*	20
Gastos de construcción*	25
<i>Total de costos indirectos</i>	<i>66</i>
<i>Total de costos directos e indirectos</i>	<i>277</i>
Honorarios del contratista*	15
Eventuales	36
<i>Inversiones de capital fijo</i>	<i>331</i>
<i>Inversiones total de capital</i>	<i>331</i>

* Porcentajes modificados para el proyecto en curso.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se discute en forma detallada los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, explicando las consideraciones tomadas para cada propuesta, así como los beneficios que reporta cada una para el óptimo funcionamiento de la planta de tratamiento de efluentes seleccionada.

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES LÍQUIDOS DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE PAPEL

Para la caracterización de los efluentes líquidos de la planta ecológica de reciclaje de papel se realizaron dos etapas diferenciadas, la primera fue la simulación en laboratorio del proceso de elaboración de papel con material reciclado para obtener los efluentes, esto debido a que el proyecto en general se encuentra en fase de diseño y no se cuenta con instalaciones físicas que generen los líquidos residuales. Y el segundo paso fue la caracterización fisicoquímica de las muestras de efluentes recolectadas. En este mismo orden serán analizados los resultados obtenidos.

4.1.1 Proceso de obtención de las muestras de los efluentes líquidos del reciclaje de papel

En esta etapa se realizaron pruebas preliminares de reciclaje para verificar la calidad del producto que se obtiene de cada una de las materias primas que se tenían propuestas para su empleo, dichas materias primas se muestran en la figura 3.2: papel bond, periódico, cartulina y cartón. De estas pruebas preliminares se obtuvo que la producción de papel a partir de periódico, cartón, y cartulina de tonalidades oscuras no es viable aplicando el proceso de reciclaje descrito por Martínez y Mijares [7], ya

que se obtiene un papel reciclado de una tonalidad oscura o de contextura gruesa, que no es apto para la escritura o impresión en aplicaciones de oficina o domésticas; destino que se espera tenga el producto final. Estos materiales podrían ser empleados adicionando agentes químicos blanqueadores y/o agentes que ablanden las fibras, pero esto eliminaría el enfoque ecológico que caracteriza este proyecto.

La tonalidad oscura procede principalmente de las tintas empleadas en los periódicos y los colorantes que contienen algunas cartulinas, en el caso del cartón proviene del proceso de producción original a partir de la madera virgen, donde no se aplica blanqueo o refinación rigurosa considerando que las aplicaciones para las que fueron creados en general no lo requieren. La contextura gruesa se debe a las fibras que componen la materia prima, el cartón y la cartulina están elaborados con fibras de papel más gruesas que el papel bond tradicional, y al reciclarlo por el método descrito no es posible cambiar esa característica de las fibras.

Una prueba adicional dio como resultado que la cartulina de colores claros ofrece un resultado aceptable cuando es reciclado junto con papel bond en una relación papel – cartulina de 70:30, esto producto que las fibras predominantes en el producto final son las correspondientes al papel bond.

En base lo anterior esto se determinó que las materias primas definitivas a emplear en la planta de reciclaje de papel será el papel bond y la cartulina blanca o de colores claros en combinación con el primero. Definiéndose las pruebas de elaboración de papel con material reciclado para obtener las muestras de efluentes tal como se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Combinación de materias primas realizadas para obtener la muestra de los efluentes del proceso de reciclaje.

Muestra	Tipo de papel a reciclar
1	Papel bond blanco usado
2	Papel bond – cartulina en relación 70:30
3	Papel bond blanco con colorante bija
4	Papel bond – cartulina en relación 70:30 con colorante bija
5	Papel bond blanco con colorante de índigo
6	Papel bond – cartulina en relación 70:30 con colorante de índigo

4.1.2 Caracterización de los efluentes líquidos de la planta de reciclaje de papel

Los análisis fisicoquímicos a realizarse se determinaron en función de los contaminantes principales que esperaban encontrarse en este tipo de agua según el proceso de reciclaje empleado, y de los parámetros básicos de control de efluentes, como lo son los metales pesados. Los resultados de los análisis realizados a las distintas muestras de efluentes obtenidas se muestran en la tabla 4.2. A partir de esta tabla se determinan cuales valores representan un problema de carga contaminante dentro del fluido en estudio al ser comparados con los límites establecidos en el decreto 883 [34], de la normativa ambiental vigente en Venezuela.

Para la reducción de los distintos contaminantes hasta los valores exigidos se debe estudiar el origen de los mismos. La turbidez está relacionada directamente con las altas concentraciones de sólidos suspendidos que presentan las aguas. El incremento de la DQO tiene distintos orígenes como pueden ser las tintas que se emplean para la impresión y escritura, el grafito de los lápices, partículas de distintos tipos que se encuentran atrapadas entre las fibras del papel empleado como materia prima, y también de otras materias empleadas como el almidón, el yagrumo y los colorantes (en los casos que los presentan), que al ser todos de origen orgánico incrementan la carga oxidante del agua residual. Los sólidos suspendidos provienen de la suciedad del papel producto de su uso común, además de los acumulados en los sitios donde se almacena antes de su reciclaje.

Tabla 4.2 Caracterización fisicoquímica realizada a las diferentes muestras de efluentes obtenidas en laboratorio.

ENSAYO	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5	MUESTRA 6	Decreto 883*
Temperatura (°C)	24,6	24,6	23,7	23,4	25,6	26,2	--
pH	7,59	7,43	7,15	7,11	7,33	7,27	6-9
Conductividad (mS/cm)	476	478	457	408	595	608	--
Turbidez (NTU)	445	290	390	430	190,2	130,5	< 25
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	380,64	223,26	492,68	386,46	330,62	212,28	--
Dureza (mg CaCO ₃ /l)	362	266	248	212	316	372	500
Cloruros (mg/l)	50,34	60,27	60,27	50,34	52,47	48,92	1.000
DQO (mg/l)	883,98	849,06	1.076,63	1.271,87	1.790,76	1.802,94	350
DBO (mg/l)	240	210	382,5	330	482,5	461,25	60
Nitrógeno total (mg/l)	4,15	5,46	4,09	3,42	4,95	2,73	40
Sól. totales (mg/l)	1.490	980	1.300	1.150	1.593,33	1.593,75	--
Sól. disueltos (mg/l)	540	150	150	430	353	370,42	--
Sól. suspendidos (mg/l)	950	830	1.150	720	1.240	1.223,33	80
Sól. sedimentables (ml/l)	19	24	16	17	21	19	1,0
Hierro (mg/l)	0,221	0,552	0,35	0,42	0,41	0,42	1,0
Sódio (mg/l)	36	37	34	34	39	36	200
Potasio (mg/l)	11	13	36	23	76	60	--
Plomo (mg/l)	0,03	0,018	< 0,01	<0,01	0,05	0,2	0,5
Zinc (mg/l)	0,002	0,014	0,21	0,19	0,24	0,22	5

* Límites máximos permitidos por la normativa ambiental vigente en Venezuela [33]

Las fibras de papel de diámetros muy pequeños también quedan suspendidas por largo tiempo antes de sedimentar. El origen de la DBO está relacionado igualmente con el uso común y disposición del papel antes del proceso de reciclado, donde tiene contacto con materiales de todo tipo y el mismo ser humano que adhieren al papel, partículas orgánicas susceptibles de degradación biológica. Finalmente los sólidos sedimentables provienen principalmente de fibras gruesas de papel que pasan

a través del proceso de filtrado y que pueden ser recuperadas para reciclarse nuevamente, también se incluyen otros sólidos de tamaño considerable que logran salir del proceso de tratamiento. Cabe destacar que a nivel industrial se espera que la cantidad de sólidos sedimentables presente sea mucho menor, gracias a técnicas de filtrado y prensado más eficientes que las que pueden ser logradas en un proceso manual.

Un detalle adicional que se encontró durante este proceso fue que la coloración que se logra empleando el índigo no es estable, perdiéndose la tonalidad en el proceso de secado. Motivo por el cual los resultados de las muestras 5 y 6 no se consideran representativas ya que se requiere de modificaciones para lograr la fijación del color.

Los análisis referentes a la calidad biológica del efluente no fueron realizados motivado a que los microorganismos que pudiesen presentarse en los efluentes industriales de la planta de elaboración de papel reciclado dependerán directamente del origen de las materias primas y no del proceso en sí, por lo que los resultados que se obtendrían en las muestras extraídas en la simulación de laboratorio no resultarían representativas para un proceso de diseño.

4.2 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS NECESARIOS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS EFLUENTES DE LA PLANTA DE RECICLAJE DE PAPEL

La selección de los equipos para el tratamiento de los efluentes estuvo basada en las recomendaciones de la literatura sobre los procesos más eficientes para la remoción de cada uno de los componentes problema que fueron identificados en la fase de caracterización. Se tomó en consideración, las facilidades de instalación y mantenimiento, la energía requerida para su funcionamiento y el tiempo de vida útil, así como la disponibilidad en el mercado, los costos y tamaños de cada uno. En la

tabla 4.3 se muestran los equipos seleccionados para la planta de tratamiento así como la aplicación de cada uno en la reducción de la carga contaminante.

Una característica común en todos los equipos seleccionados es su carácter hidráulico de funcionamiento, para disminuir los requerimientos de energía de la planta de tratamiento y ayudando a cumplir con los planes de ahorro energético propuestos por el gobierno nacional en la actualidad, además de reducir los costos operativos y de mantenimiento.

4.2.1 Selección de los aditivos químicos para la coagulación

La visión principal del proyecto fue el diseño de un proceso totalmente ecológico donde la presencia de químicos sintéticos sea inexistente o se reduzca al mínimo. Por lo que se consideró el uso de las semillas de moringa, un coagulante de origen natural conocido por su alta eficiencia en el proceso de clarificación de aguas para consumo.

El componente activo que tiene efecto coagulante son las proteínas contenidas en las semillas del fruto de esta planta, las cuales se extraen por diversos medios, tales como solventes orgánicos como el éter de petróleo, etanol, propanona y tolueno, o por extracción con agua. Los primeros aíslan las grasas y las proteínas ofreciendo un producto estable que tiene grandes cualidades en los procesos de depuración de agua, pero a costa de generar desechos altamente contaminantes en los residuos de solventes, además de elevar el costo por el proceso necesario para su extracción.

Tabla 4.3 Equipos seleccionados para el tratamiento de los efluentes de la planta de reciclaje

Equipo seleccionado	Descripción y función en planta
Tanque homogeneizador	Es un tanque circular cuya función principal es la regulación de los caudales intermitentes provenientes de la planta de reciclaje de papel, acumulándolos para luego ser bombeados a caudal constante hasta los equipos donde se dará el tratamiento a los líquidos residuales. A través de una adaptación del fondo para darle forma cónica, se da a la unidad la capacidad de eliminar los sólidos sedimentables que constituyen uno de los problemas de estas aguas residuales.
Mezclador estático	Es un dispositivo instalado en la tubería que conecta el tanque de homogeneización con la planta de tratamiento, y logra la dispersión de los aditivos coagulantes con la generación de una alta turbulencia empleando la fuerza de bombeo dentro de la tubería dispersándola por medio de elementos colocados en el interior del equipo.
Floculador de flujo horizontal	Provee al fluido la intensidad de mezcla suficiente para la formación de flóculos de tamaño y peso suficiente para ser fácilmente separados, consisten en un canal con pantallas deflectoras que imparten al fluido giros de 180° para lograr la agitación necesaria.
Sedimentador rectangular	Es la unidad encargada de la separación de los flóculos formados por efecto de la gravedad. Consiste en un tanque donde el fluido circula con flujo laminar a baja velocidad permitiendo que las partículas descendan con facilidad.
Filtro vertical de arena	Tiene la función de dar el afinado final a las aguas en tratamiento eliminando flóculos que hayan

	pasado el proceso de sedimentación, así como partículas coloidales o microorganismos patógenos.
Tanque de almacenamiento	Es un tanque circular que tiene como función recibir y acumular las aguas tratadas para su posterior bombeo hasta la disposición final. Igualmente el agua acumulada será empleada para los procesos de limpieza de los equipos de tratamiento por retro lavado.

La segunda opción resulta menos contaminante, pero requiere de aproximadamente 20 horas de contacto de la semilla pulverizada con el agua para liberar el contenido de proteínas, y un proceso de intercambio iónico para activar el efecto coagulante en la suspensión, otra desventaja de este proceso es que el extracto no es estable a temperatura ambiente, descomponiéndose en aproximadamente 48 horas, siendo solo estable bajo refrigeración a 4 °C.

La planificación de este proyecto está orientada al autoabastecimiento de los productos de origen natural por medio de la siembra de los árboles necesarios [7], lo cual obligaría a emplear algunos de estos dos métodos de extracción dentro de las instalaciones de la planta de reciclaje, restando carácter ecológico al proceso en el caso del método de solventes orgánicos, y requiriendo de instalaciones adicionales en el caso de la extracción con agua. Otra limitante es el bajo peso de las semillas, por lo que se requieren grandes cantidades de la misma para extraer una masa de coagulante suficiente para aplicaciones industriales, además de necesitar amplias áreas para la siembra de moringa. Bajo estas consideraciones se descarta el uso de este aditivo coagulante.

Finalmente se optó por el empleo de coagulantes químicos, específicamente el sulfato de aluminio, por ofrecer las características de pH óptimo de acción, facilidad de adquisición en el mercado y bajo costo en las instalaciones necesarias para su

aplicación, convirtiéndolo en la opción adecuada para el proceso. Su desventaja radica en las concentraciones de aluminio remanente en los lodos de desechos que se generan, pero se tiene amplia experiencia en su tratamiento que reduce el impacto del mismo en el ambiente donde se dispone.

4.2.2 Dimensionamiento de los equipos seleccionados

Para el dimensionamiento de los equipos de la planta se definió el caudal a manejar en $13,33 \text{ m}^3/\text{h}$, valor que será el parámetro de partida para la determinación de las características de cada equipo, considerando los tiempos de residencia requeridos para el óptimo tratamiento de los efluentes. Las dimensiones obtenidas se reportan en la tabla 4.4. Donde se observan medidas relativamente pequeñas en comparación a los equipos de este tipo encontrados en otras plantas, sin embargo están acorde a los bajos niveles de caudal que se manejan y a los tiempos de residencia que se requieren para los procesos.

La sumatoria de todas las áreas de los equipos seleccionados es un aproximado de $131,82 \text{ m}^2$, lo que se adapta perfectamente al área disponible para la construcción asignado en planta de $291,79 \text{ m}^2$ [7], dejando la libertad de modificaciones o expansiones futuras.

A continuación se presentan los diagramas de las dimensiones obtenidas para cada equipo según los procedimientos descritos en la sección 3.2.5.

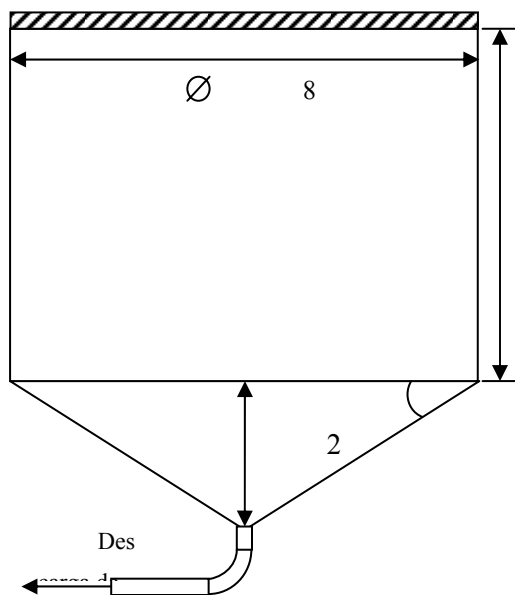


Figura 4.1 Dimensiones del tanque de homogeneización seleccionado.

Tabla 4.4 Dimensiones de los equipos seleccionados.

Equipo	Dimensiones
Tanque de homogeneización	Volumen = 320 m ³ Altura = 6 m Diámetro = 8,24 m Inclinación del fondo = 30° Profundidad desde la base de la sección cilíndrica al fondo del cono = 2,38 m
Mezclador estático en línea	Longitud = 19 pulgadas Diámetro nominal = 2 pulgadas Número de elementos internos = 6
Floculador de pantallas	Ancho = 1,6958 m Largo = 3,64 m Profundidad = 0,60 m Número de pantallas = 26 Altura de pantallas = 0,60 m Longitud de pantallas = 1,5 m
Sedimentador	Longitud = 5,51 m Ancho = 1,5 m Altura = 1,1 m Espaciado entrada – pantalla difusora = 0,80 m Pantalla difusora: Altura = 0,60 m Ancho = 1,5 m

	Número de orificios = 27 Diámetro de orificios = 0,05 m
Filtro de Arena	Diámetro = 1,30 m Altura total = 2,60 m Altura de lecho = 0,70 m
Tanque de almacenamiento de agua tratada	Volumen = 64 m ³ Diámetro = 5,4 m Altura = 3 m

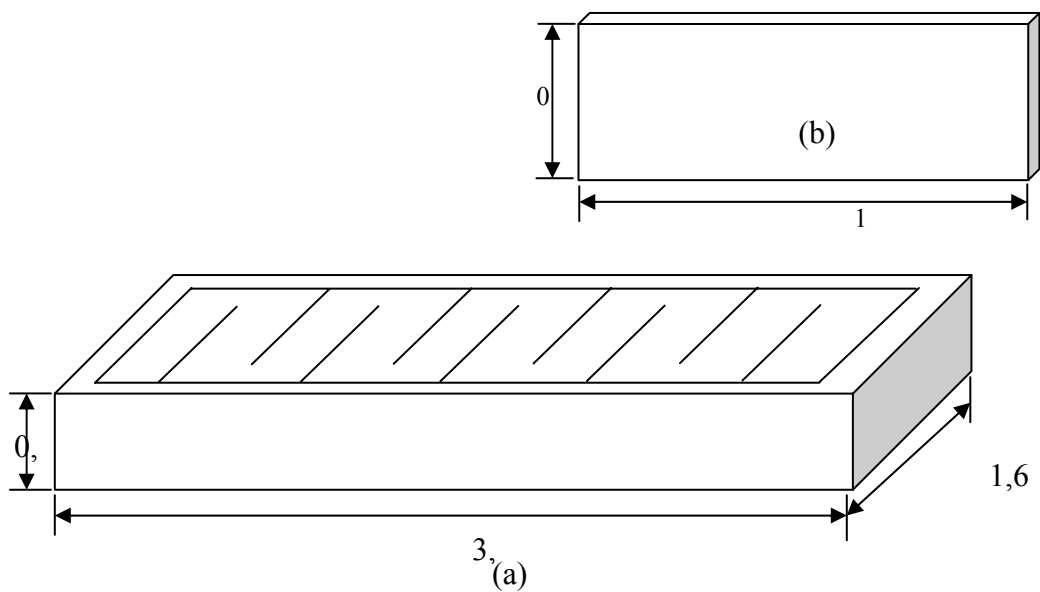


Figura 4.2 (a) dimensiones de la unidad de floculación, (b) dimensiones de las pantallas deflectoras.

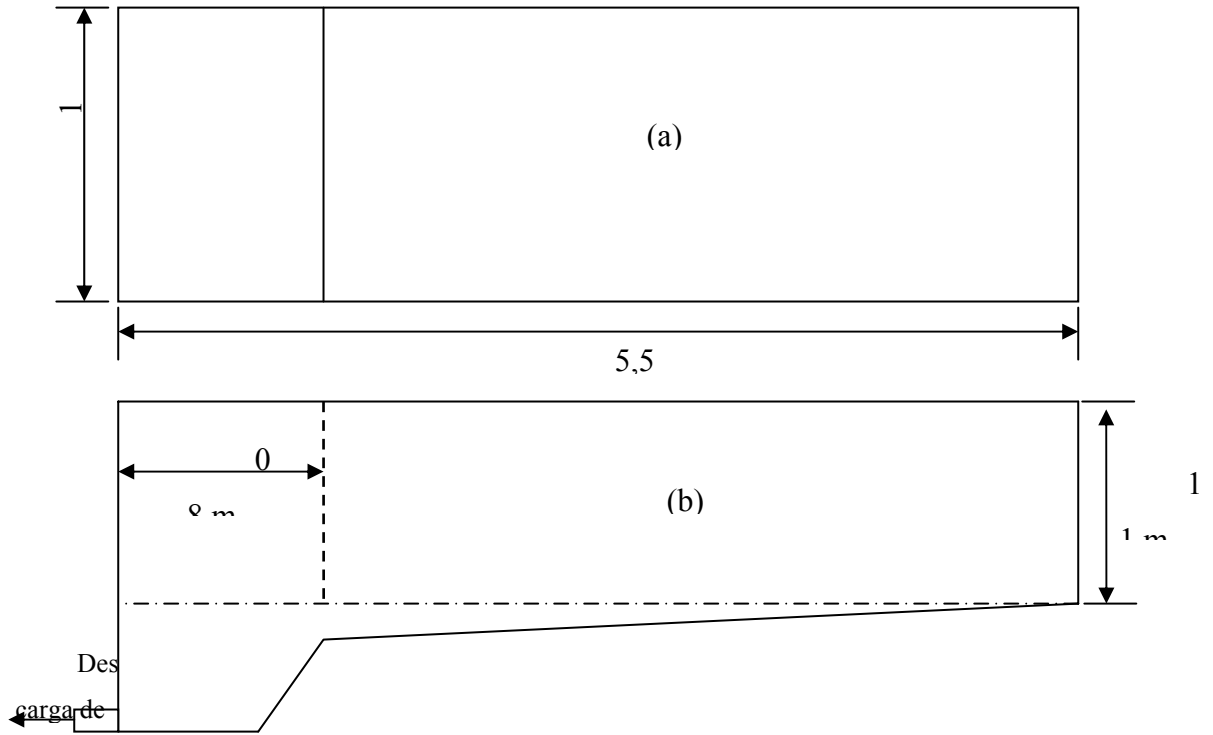


Figura 4.3 Dimensiones del sedimentador seleccionado: (a) vista de planta, (b) corte lateral.

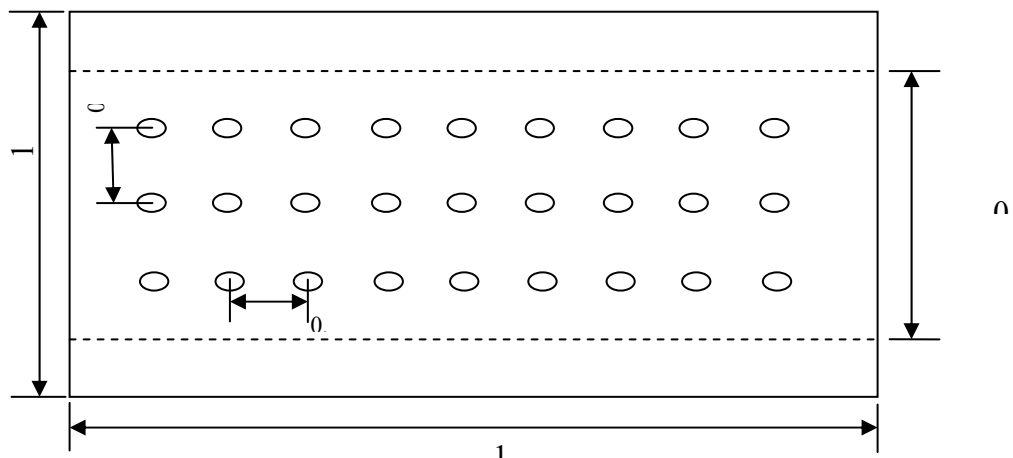


Figura 4.4 Dimensiones de la pantalla difusora del sedimentador con diámetro de orificio de $D = 0,05$ m.

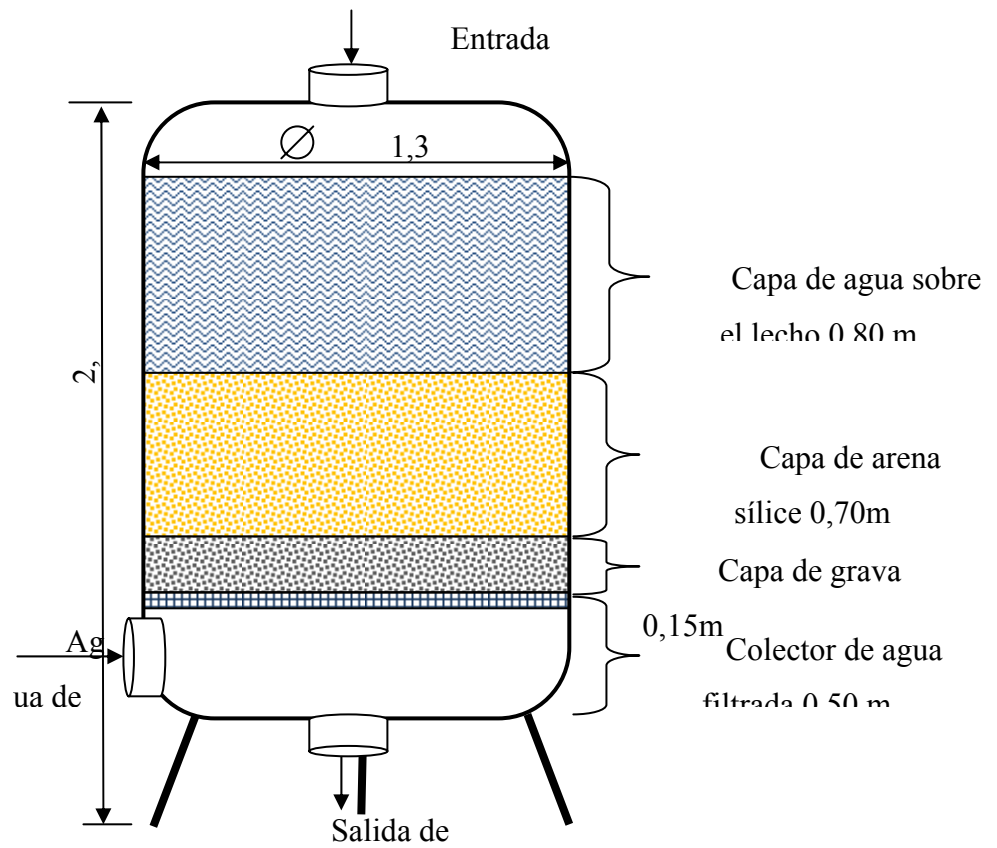


Figura 4.5 Dimensiones del filtro de gravedad seleccionado.

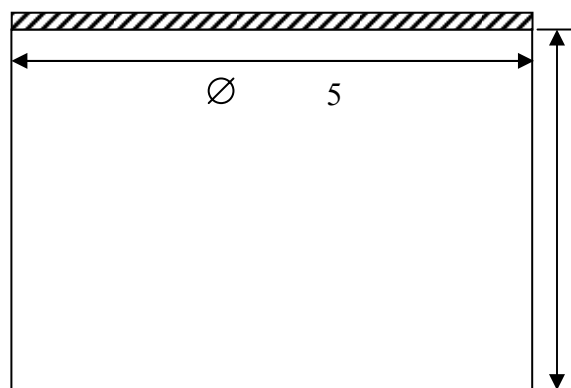


Figura 4.6 Dimensiones del tanque de almacenamiento de agua tratada.

4.2.3 Propuestas para la disposición de los efluentes tratados

Para la disposición final de los efluentes tratados se realizaron tres propuestas principales:

- Reutilización de las aguas en el proceso de reciclaje de papel de la planta principal.
- Reutilización de las aguas en otras áreas de la planta (riego de áreas verdes, mantenimiento)
- Vertido a los cuerpos de agua cercanos a la planta de tratamiento.

De estas propuestas la que tiene la mayor aceptación es la reutilización en proceso, debido a las grandes cantidades de agua diaria que requiere ($320 \text{ m}^3/\text{d}$) a pesar de ser una planta con poca producción, lo cual asegura el carácter ecológico que se desea en este proyecto, reduciendo el requerimiento de agua de las redes de distribución.

4.3 PRESENTACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO SELECCIONADO Y SU DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

Para la elaboración del diagrama de flujo se tomó en consideración la reducción de los costos operativos de la planta, el aumento del carácter ecológico, así como la secuencia necesaria de equipos para remover los contaminantes con la mayor eficiencia posible. El proceso propuesto se muestra en la figura 4.7.

4.3.1 Descripción del diagrama de flujo del proceso seleccionado

El proceso mostrado en la figura 4.7 comienza con la corriente de efluentes que proviene de la planta de reciclaje de papel, la cual no presenta un caudal constante y por tanto debe ser regulado por medio de un *tanque de homogeneización*, construido en concreto armado e impermeabilizado. En esta etapa se acumulan los distintos volúmenes descargados del proceso de reciclaje en cada carga para

distribuirlos uniformemente a lo largo de todo el día hacia la planta de tratamiento que se encuentra aguas abajo.

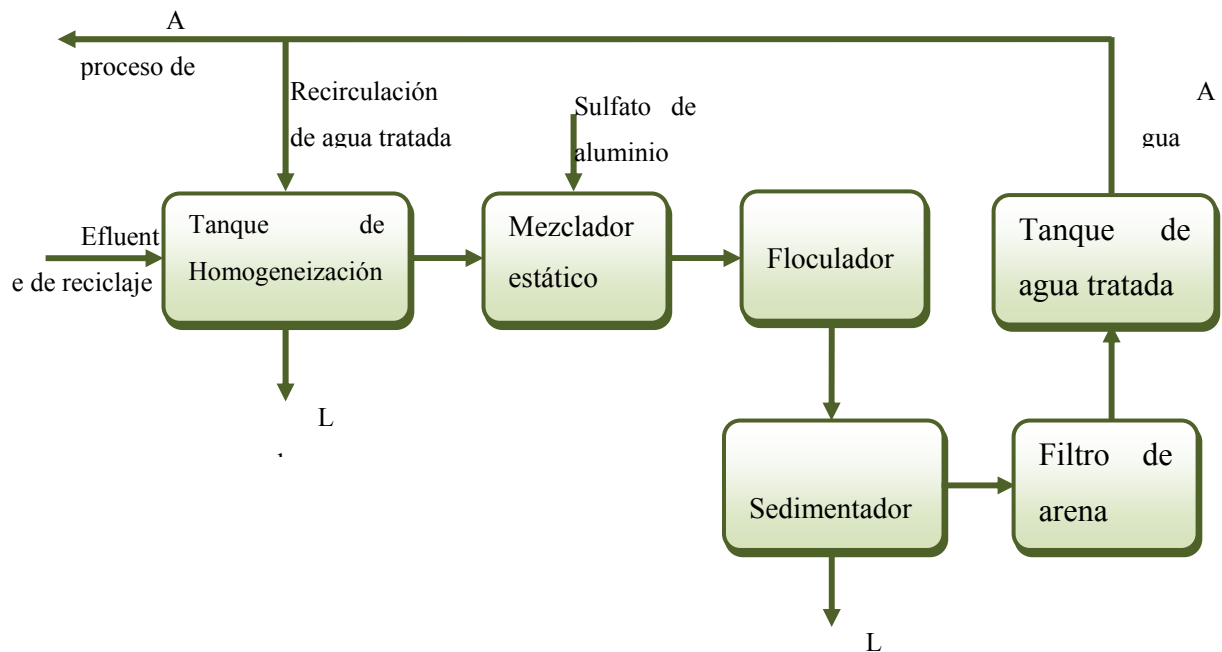


Figura 4.7 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento seleccionado.

En este mismo tanque por medio de su diseño de fondo cónico, se logran separar la carga de sólidos sedimentables que contienen las aguas entrantes, los cuales están formados por fibras de papel que pueden ser recuperadas para llevarlas nuevamente al proceso, previo proceso de secado, o bien por bombeo directo. De este tanque el líquido es extraído por bombeo a caudal constante y pasa por un *mezclador estático* en la tubería que interconecta el tanque de homogeneización con el resto del sistema de tratamiento. Es en este punto que se realiza la adición del sulfato de aluminio empleado como coagulante con una dosis de 60 mg/l. El efecto de mezclado se consigue por seis elementos internos colocados estratégicamente dentro del mezclador para generar la turbulencia necesaria para la dispersión total del aditivo químico y producir la coagulación de las partículas suspendidas. Inmediatamente se pasa al *floculador de flujo horizontal* donde sólidas y coloidales desestabilizadas

deben pasar a un régimen de mezcla lenta para aglomerarse y producir flóculos de peso y tamaño suficiente para sedimentar. Esta unidad consiste en un canal de mezclado con pantallas que guían al fluido a través de giros de 180° en su curso para generar una leve turbulencia que permita a las partículas chocar entre sí y producirse la floculación. Al salir de esta etapa, el fluido se distribuye en el *sedimentador* donde se hace circular en régimen laminar a baja velocidad de forma que los floculos formados puedan descender con facilidad hasta el fondo, de donde son arrastrados por gravedad a una fosa de lodos para ser extraídos y llevados a tratamiento. Las aguas ya clarificadas del sedimentador son recogidas por un canal que los guía hasta el *filtro de arena* donde son removidos los sólidos coloidales que pueden haber pasado las etapas previas de tratamiento. En esta unidad se hace circular el fluido de manera descendente por gravedad a través de un lecho filtrante compuesto por una capa de arena y una de grava fina soportados sobre una malla de acero inoxidable. Finalmente el líquido ya depurado llega a un *tanque de almacenamiento* donde se acumula momentáneamente el agua tratada para llevarla nuevamente por bombeo hasta el proceso de reciclaje de papel. Desde este tanque se tiene una conexión de recirculación hasta el tanque de homogenización como medida de ahorro económico. El tanque de homogenización está diseñado para almacenar el volumen de agua residual correspondiente a un día de producción, si se considera que la planta ecológica de reciclaje de papel operará en jornadas semanales de cinco días, los dos días restantes no habría alimentación hacia la planta de tratamiento de aguas ni recirculación desde esta última hacia el proceso, motivo por el cual la recirculación se daría hacia el tanque de homogeneización, manteniéndose éste en el nivel requerido y la planta de tratamiento podría seguir funcionando los dos días de inactividad en la producción de papel. Otro beneficio que se genera es que cuando la recirculación se dé hacia el tanque ecualizador el agua permanecerá libre de contaminantes, por lo que no será necesaria la dosificación del coagulante correspondiéndose en un ahorro por concepto del mismo.

4.3.2 Simulación del proceso en laboratorio

En esta etapa se buscó comprobar la eficiencia del proceso propuesto realizando una simulación en laboratorio siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.3.2. Los resultados obtenidos en los análisis del agua tratada, así como los porcentajes de remoción alcanzados se encuentran en la tabla 4.5. Estos resultados demuestran que el proceso es altamente eficiente, logrando reducir los parámetros muy por debajo de los límites permitidos por la legislación ambiental vigente (decreto 883) [34], para el vertido de efluentes líquidos a cuerpos de agua, y es completamente apta para su reutilización en el proceso de reciclaje de papel, siendo aceptada por tanto la propuesta principal para la disposición final del efluente tratado. Los análisis de DBO no fueron realizados para el agua tratada por motivos de disponibilidad técnica, sin embargo los niveles de disminución del resto de la carga contaminante permiten tener en cuenta una disminución de la DBO en términos parecidos, sobre todo si se considera que el origen de la misma está en la materia orgánica presente en el líquido residual, comúnmente en forma de sólidos, y éstos han presentado altas tasas de remoción.

Tabla 4.5 Resultados de los análisis del agua tratada en el proceso simulado en laboratorio.

Análisis	Muestra 1			Muestra 4			Decreto 883
	Agua cruda	Agua tratada	% de remoción	Agua cruda	Agua tratada	% de remoción	
Temperatura (°C)	24,6	28,5	--	23,7	27,9	--	--
pH	7,59	7,59	--	7,11	7,83	--	6 – 9
Turbidez (NTU)	445	2,06	99,54	430	2,01	99,48	<25
Sólidos sedimentables (ml/l)	19	<1	≈100	17	<1	≈100	<1
Sólidos suspendidos (mg/l)	950	50	94,74	720	45	93,75	80
DQO (mg/l)	883,98	194,15	78,04	1.271,87	210,66	83,44	350
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /l)	380,64	126,12	66,87	386,46	115,9	70,01	--
Dureza (mgCaCO ₃ /l)	362	148	59,12	212	178	28,23	500

4.3.3 Distribución en planta de los equipos seleccionados (layout)

La distribución de los equipos en planta se presenta en la figura 4.8, donde se especifica (sin escala aproximada) la ubicación relativa que deben mantenerse entre unidades para efectos de mantenimiento. Así mismo se muestra el recorrido de las tuberías principales que guiarán el líquido durante el tratamiento. La planta estará dividida en dos secciones análogas que operarán de forma alternada por razones de mantenimiento, con un caudal de $13,33 \text{ m}^3/\text{h}$, es decir, mientras una se encuentra en operación la otra estará en periodo de mantenimiento, asegurando con ello un proceso continuo y una calidad de agua tratada constante. Ambas secciones compartirán el mismo tanque de homogeneización el cual requiere de poco mantenimiento, y se propone hacerlo los días de inactividad que presenta la planta de reciclaje o en paradas programadas de inspección general de todo el sistema. Ésta decisión se hizo tomando en cuenta que este tipo de tanque son los equipos que tienen el mayor costo dentro de una planta de tratamiento.

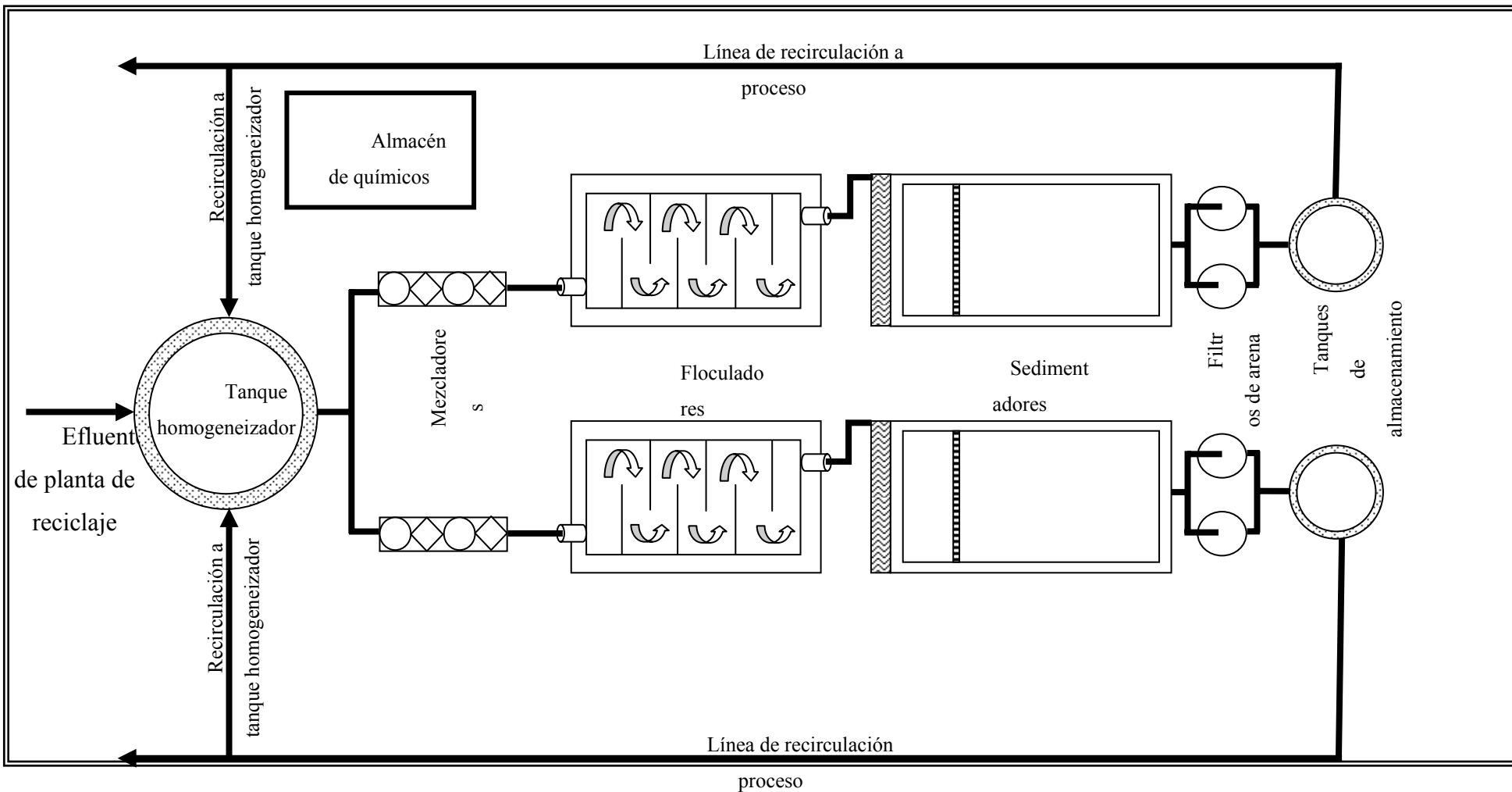
Esta planta será una sección anexa a la planta ecológica de reciclaje de papel, por lo que esta distribución no contempla las áreas administrativas o sistemas de laboratorio y control de calidad, sino que estas oficinas estarán ubicadas dentro del área administrativa general de la planta de reciclaje. Se tendrá un almacén de químicos donde serán almacenados los sacos de coagulante cerca del punto de dosificación, pero a la distancia suficiente para evitar que la humedad de la planta no genere problemas por hidrólisis del sulfato de aluminio.

El área requerida para la construcción de los equipos seleccionados es de $131,82 \text{ m}^2$, y el área dispuesta en la planta para el reciclaje de papel para el sistema de tratamiento de efluentes es de $291,79 \text{ m}^2$, lo cual ofrece un espacio considerable para la distribución en forma óptima de los sistemas de tuberías y dispositivos de control y seguridad.

4.4 ESTUDIO DE COSTOS PARA LA INSTALACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

El estudio de costos fue realizado de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.4, obteniéndose como resultado los valores que se muestran en la tabla 4.6, para los equipos principales seleccionados para el diseño de la planta de tratamiento de efluentes en sus dos líneas de tratamiento. Estos precios incluyen la mano de obra y materiales necesarios para la construcción en concreto, sin incluir el transporte de los materiales hasta el punto de instalación de la planta.

La inversión total para la instalación de la planta se realizó empleando el método del equipo entregado, el cual resultó **642.061,12** Bs. Costo que se considera aceptable considerando el tamaño de las instalaciones y que se trata de una planta de tratamiento anexa a una planta principal. El procedimiento para la estimación de la inversión se detalla en la tabla 4.7.



Área de construcción requerida = 131,82 m²

Área disponible en la parcela para esta sección = 291,79

Figura 4.8 Distribución en planta de los equipos seleccionados para el tratamiento de efluentes.

Tabla 4.6 Costo total del equipo entregado

Equipo	Costo (Bs)
Tanque de homogeneización	77.852,41
Mezclador estático en línea	2.194,30
Unidad de floculación	18.210,41
Sedimentador	19.057,05
Filtro de arena	41.600,00
Tanque de almacenamiento de agua tratada	50.226,26
Total:	209.140,43

Tabla 4.7 Costo total de inversión para la instalación de la planta de tratamiento propuesta.

Rubros	% Costo del equipo entregado	Costos (Bs)
Costos directos		
Equipo adquirido y entregado	100	209.140,43
Instalación del equipo adquirido	39	81.564,77
Instrumentación y controles	13	27.188,26
Cañerías y tuberías	31	64.833,53
Obras civiles	18	37.645,28
Mejoras del terreno	10	20914,04
<i>Total de costos directos</i>	<i>211</i>	441.286,31
Costos indirectos		
Ingeniería y supervisión	20	41.828,09
Gastos de construcción	25	52.285,11
<i>Total de costos indirectos</i>	<i>66</i>	94.113,20
<i>Total de costos directos e indirectos</i>	<i>277</i>	535.399,51
Honorarios del contratista	15	31.371,06
Eventuales	36	75.290,55

<i>Inversiones de capital fijo</i>	331	106.661,61
<i>Inversiones total de capital</i>	331	642.061,12

El financiamiento del proyecto no se presenta en este caso por ser esta una planta anexa a una planta principal y en periodo de diseño, por lo que dicho financiamiento se debe estudiar como un conjunto global de los costos integrales de todo el complejo.

4.5 CONCLUSIONES

1. Los contaminantes del agua residual que exceden los límites permitidos por el decreto 883 son la turbidez, los sólidos suspendidos y sedimentables, la DBO y la DQO.
2. El caudal a manejar por la planta de tratamiento de efluentes se definió en 13,33 m³/h.
3. Los equipos seleccionados para el tratamiento de los efluentes son: tanque de homogeneización, mezclador estático, floculador de flujo horizontal, sedimentador rectangular y filtro de arena.
4. El área de construcción de la planta de tratamiento de efluentes es aproximadamente 131,82 m², dividida en dos secciones análogas.
5. La inversión total para la instalación de la planta de tratamiento seleccionada se estimó en 642.061,12 Bs.

4.6 RECOMENDACIONES

1. Estudiar la utilización del papel periódico, cartón y cartulina de colores como materia prima para el reciclaje de otros tipos de papel.

2. Reducir el uso de los colorantes naturales por medio de la clasificación de los papeles usados por colores, con lo que se logra un producto con tonalidades similares a la materia prima.
3. Realizar un estudio de las diferentes opciones para la extracción del coagulante de la semilla de moringa.
4. Realizar análisis periódicos del agua tratada para constatar la eficiencia del proceso aplicado.
5. Establecer planes de mantenimiento periódico de los equipos seleccionados en función de los resultados de los análisis del agua tratada.
6. Realizar el estudio de los lodos formados en las unidades de sedimentación, para establecer el tratamiento a que deben ser sometidos.
7. Estudiar la posibilidad de ubicar centros de acopio de papel usado en otros municipios cercanos.
8. Estudiar el comportamiento de la carga orgánica dentro del tanque de homogeneización.
9. Elaborar un plan de uso de las aguas tratadas a fin de optimizar los beneficios por tratamiento de estos efluentes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Maradei, C. **“Historia del estado Anzoáteui”**, Ediciones de la Presidencia de la República . Caracas (1981).
2. Anónimo, 2008, marzo. **“Mapas de los estados y municipios de Venezuela”**. [En línea]. Disponible: <http://www.avenezuela.com/mapas/map/html/estados/anzoategui.html>. [julio, 2009].
3. Instituto Nacional de Estadística. **“Demografía”**. En línea, disponible en: <http://www.ine.gov.ve> (2008).
4. Wikipedia la Enciclopedia Libre. **“Estado Anzoátegui”**, En línea, disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Anzo%C3%A1tegui>. (2010).
5. González, R. y Carrero, O. 2007 **“Tendencia del consumo aparente de pulpa y papel en los últimos cuarenta años en Venezuela”**. Revista Forestal Venezolana, Volumen 51 (2). Págs. 129 – 139.
6. Anónimo. 2004, noviembre. **“Medio ambiente”**. [En línea]. Disponible: http://www.manpa.com.ve/espanol/secciones/ecologia/eco_medio.html. [Febrero, 2009].
7. Martínez, A. y Mijares, A., **“Diseño conceptual de una planta ecológica procesadora de papel reciclado en la zona norte del estado Anzoátegui”**, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO – Anzoátegui, Puerto La Cruz (2008)
8. Reyes, A., **“Evaluación de diferentes sistemas de tratamiento para el acondicionamiento y reuso de los efluentes industriales generados en la refinería Puerto La Cruz, PDVSA”**, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO – Anzoátegui, Puerto La Cruz (2008)
9. Salazar, H., **“Diseño conceptual de una planta de tratamiento de efluentes para una planta procesadora de leche y productos pasteurizados”**, Tesis de

- grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO – Anzoátegui, Puerto La Cruz (2007).
10. Vallee, A., **“Diseño del prototipo de una planta modular para tratamiento de aguas residuales”**, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO – Anzoátegui, Puerto La Cruz (2007).
 11. Fernandez, P., **“Diseño preliminar de una planta de tratamiento de agua potable en el embalse de San Juan para los municipios Gómez y Marcano, estado Nueva Esparta”**, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, UDO – Anzoátegui, Puerto La Cruz (2007).
 12. Marsilli, A., 2005, diciembre. **“Tratamiento de aguas residuales”**. [En línea]. Disponible: <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm#trat>. [Febrero, 2009].
 13. Anónimo., 2009, enero. **“¿Qué son las aguas residuales?”**. [En línea]. Disponible: <http://www.cuidoelagua.org/empapate/aguaresiduales/aguasresiduales.html>. [Marzo, 2009].
 14. Metcalf & Eddy, **“Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización”**. Volúmenes 1 y 2. Tercera edición. Editorial McGraw – Hill, España (1995).
 15. Crites, R. y Tchobanoglous, G., **“Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones”**, Editorial McGraw – Hill Interamericana, Colombia (2000).
 16. Larousse, **“Diccionario enciclopédico”**, 3^{ra} edición, Editorial DECO, Colombia (1998).
 17. Mijares, G., **“Tratamiento de aguas residuales”**, Segunda edición, Ediciones Vega, Caracas (1978).
 18. COVENIN 2771 – 91, **“Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de dureza”**, Editorial Fondonorma, Caracas (1991).

19. Gerard, K., **“Ingeniería ambiental, fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión”**, Volumen 2. Primera edición, Editorial McGraw – Hill, España (1999).
20. Perry, R. **“Manual del ingeniero químico”**. Volumen IV. Séptima edición. Editorial McGraw – Hill. España, (2001).
21. Empresas Bupolsa, 2008. **“Arquetas de desbaste manuales”**. [En línea], Disponible: <http://www.bupolsa.com/depu/ar.html>. [febrero, 2010].
22. CEPIS, **“Tratamiento de aguas de consumo humano”**. Manual I, Tomo I. Lima (2004).
23. Cardenas, Y., **“Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico”**, SEDAPAL, Lima (2000).
24. Huisman, L., **“Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades: tecnología de pequeños sistemas de abastecimiento de agua en países en desarrollo”**. CEPIS, Lima (1988).
25. CEPIS, **“Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas”**, Lima (2004).
26. Blanco, H., **“Manual de tratamiento para potabilización de aguas”**, Primera edición, Gerencia técnica de Hidroven, Caracas (2005).
27. Anónimo. 2006, noviembre. **“Distribución en planta”**. [En línea]. Disponible: <http://www.grsconsultores.com/Distribucion%20Planta.html> [Julio, 2009].
28. Peters, M. y Timmerhaus, K., **“Diseño de plantas y economía para ingenieros químicos”**, Editorial McGraw – Hill. Cuarta edición. (1991).
29. Anónimo 2010, **“Indigofera tictoria”**. [En línea]. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Indigofera_tinctoria [Marzo, 2010].
30. Anonimo, 2006, **“La economía colonial del añil”**. [En línea]. Disponible: <http://www.gabrielbernat.es/colonia/anil/index.html>, [Febrero 2010].
31. Anonimo, 2007, **“Bixa orellana”**. [En línea]. Disponible: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/13-bixac1m.PDF, [Febreo 2010].

32. Anónimo, 2006, **“El mercado de almidón añade valor a la yuca”**, Revista Enfóques de la FAO. Italia (2006).
33. Anonimo, 2010, **“Cecropia peltata”**. [En línea]. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Cecropia_peltata, [Febreo 2010].
34. Gaceta Oficial República de Venezuela n° 5021 Extraordinario. **“Normas para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos”**. Caracas (1995).
35. Rodriguez, S., **“Empleo de un producto coagulante natural para clarificar agua”**, Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 36, Cuba (2005).
36. Mendoza, I., **“Uso de la *Moringa oleifera* como coagulante en la potabilización de las aguas”**, ICLAM, Maracaibo (2000).
37. Parrotta, J., **“Moringa oleífera”**, Departamento de Agricultura de EEUU, Los Angeles (1993).
38. Koflo Corporation, 2010, **“Clear PVC Statics mixers”**, [En línea]. Disponible: <http://www.koflo.com/static-mixers/pvc-static-mixers.html> [marzo, 2010].
39. Arboleda, J., **“Teoría y práctica de la purificación del agua”**, Tercera edición, editorial McGraw – Hill, España (2001).
40. CEPIS, **“Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores”**, Lima, (2005).
41. APV Obras, 2010, **“Listado de partidas”**, [En línea]. Disponible: <http://www.apvobras.com/costos.php>.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO**

TÍTULO	DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES PARA UNA PLANTA ECOLÓGICA PROCESADORA DE PAPEL RECICLADO EN LA ZONA NORTE DEL ESTADO ANZOÁTEGUI
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Macadan C, Freddy J	CVLAC: 17.732.916 E MAIL: fj.macamp@gmail.com

	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Tratamiento
 Aguas residuales
 Diseño
 Planta ecológica
 Efluentes Papel

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

La puesta en marcha de toda industria requiere de un plan de manejo de los desechos que generará dicha actividad. En este proyecto se describe el procedimiento seguido para el diseño preliminar de una planta de tratamiento para el manejo de los desechos líquidos de una planta ecológica para el reciclaje de papel en la zona norte del estado Anzoátegui. Para ello se comenzó por caracterizar las muestras de efluentes obtenidas en laboratorio, debido a que el proyecto global aún se encuentra en fase de diseño; a partir de ello se determinó que los sólidos suspendidos, la turbidez y las demandas química y bioquímica de oxígeno, eran los parámetros de calidad del agua que necesitaban especial atención por estar sobre los niveles permitidos en las legislaciones ambientales vigente, en base a esto se seleccionaron los siguientes equipos: tanque de homogeneización, mezclador estático en línea, floculador de pantallas, sedimentador y un filtro de arena, estableciéndose el diagrama de flujo de procesos así como la distribución en planta de los dichos equipos y su dimensionamiento. A través de una simulación de laboratorio se demostró la eficiencia del proceso seleccionado, obteniéndose tasas de remoción para la turbidez, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y demanda química de oxígeno en el orden de 99 %, 94 %, ≈ 100 % y 80 % respectivamente. Finalmente se realizó un estudio de costos para determinar la inversión total para la instalación de la planta siendo ésta de 642.061,12 Bs.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS(X)	TU	JU
Maritza Millán Silva	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Milena Amundaraín	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Hernán Raven	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:				
	E_MAIL				

	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	04	23
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Diseño.Tratamiento.papel.doc	Application/ msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u
v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de ingeniería química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

Macadan C, Freddy J

AUTOR

Maritza Millán Silva

TUTOR

Milena Amundaraín Hernán Raven

JURADO

JURADO

Yraima Salas

POR LA SUBCOMISION DE TESIS