

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



DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS
INDUSTRIALES PROVENIENTES DE LA FABRICACIÓN DE TUBOS SIN COSTURA

Realizado por:

FRANCISCO YURUANÍ PÉREZ RAMÍREZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, julio de 2011

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



DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS
INDUSTRIALES PROVENIENTES DE LA FABRICACIÓN DE TUBOS SIN COSTURA

ASESORES

Ing. Químico Milena Amundaraín, M Sc.

Asesora académica

Ing. Químico Luis Cumana

Asesor industrial

Puerto La Cruz, julio de 2011

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



DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS
INDUSTRIALES PROVENIENTES DE LA FABRICACIÓN DE TUBOS SIN COSTURA

JURADO CALIFICADOR

Ing. Químico Milena Amundaraín, M Sc.

Asesor académico

Ing. Químico Hernán Raven, M. Sc

Jurado principal

Ing. Químico Alexis Cova, M. Sc.

Jurado principal

Puerto La Cruz, julio de 2011

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado:

“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE 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 por ayudarme a superar todas las adversidades y ser mi guía espiritual.
- A mi madre Liliam Victoria por su apoyo incondicional, protegerme con su inmenso amor y ser pilar fundamental en mi formación personal.
- A la memoria de mi padre José Ramón que me enseñó los valores que me hicieron y aún me hacen crecer personalmente como son la honestidad, el trabajo y la humildad; aconsejándome siempre para tomar la mejor decisión. Estuvo en todo momento cuando más lo necesité, fue muy severo y estricto durante toda su vida pero sé que su intención era darme una enseñanza que permitiera mantener a la familia unida con los valores que él y mi madre me habían inculcado. Sé que donde quiera que esté me ayudó a cumplir la meta de obtener el título de Ingeniero Químico tal como se lo prometí.
- A mis hermanas Georgina Victoria y Jo-ann Mercedes que en todo momento me han apoyado y han estado allí en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad de Oriente por darme la oportunidad de alcanzar la meta de optar el título de Ingeniero Químico.
- A la empresa de Producción Social Tubos sin Costura, C.A; por facilitarme todas las herramientas necesarias para la realización de este proyecto.
- A la profesora Ingeniero Químico, M Sc. Milena Amundaraín por su invaluable colaboración en el desarrollo de este trabajo de grado.
- Al Sr. Osman Colina por su gran aporte de conocimientos durante la realización de mis pasantías.
- A mis amigos Jesús Eduardo, Amín Anís, Emil Marín y muy especialmente a mi primo Tomás Román por disfrutar y compartir junto con ellos muchas alegrías y tristezas.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de grado fue el diseño de varias alternativas que permitirán realizar un tratamiento eficaz al agua que se empleará en la fabricación de tubos sin costura para la empresa de producción social Tubos Sin Costura, C.A; ubicada en Ciudad Guayana-estado Bolívar; dichas alternativas deben cumplir con todos los requerimientos de la empresa, es decir, una planta eficiente, con mínimos problemas de operación y cuya construcción sea económicamente factible generando así óptimos resultados en el tratamiento del agua. Para el diseño de las opciones se realizó el cálculo del caudal a tratar para alcanzar la máxima producción de la fábrica, el cual fue estimado en 2.106,0 m³/h. Se identificaron las cascarillas de acero, aceites y/o grasas, polvos y/o arenas como contaminantes que se generarán durante la producción, ésto con la finalidad de establecer que operaciones y procesos unitarios serán los más idóneos para el tratamiento del agua. De igual manera se establecieron sales de hierro, sulfato de aluminio, hidróxido de sodio, dióxido de cloro y etanolaminas como posibles sustancias químicas a emplear para la optimización del proceso de tratamiento y recuperación de la calidad inicial del agua. Los residuos sólidos retirados serán utilizados en construcciones civiles y procesos petroquímicos; los contaminantes líquidos podrán ser empleados como combustibles en hornos de producción de cal, ésto permitirá una disposición adecuada de los desechos cumpliendo con las normas ambientales establecidas preservando así los recursos naturales. Por último se realizó un estudio que comprende las implicaciones económicas para la construcción de cada una de las alternativas propuestas incluyendo obras civiles, equipos y/o sistemas y sustancias químicas.

TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN.....	vii
TABLA DE CONTENIDO.....	viii
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción general de la empresa.....	1
1.1.1 Reseña histórica de la empresa.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Antecedentes.....	4
2.2 Descripción del proceso de producción de la planta de laminación	5
2.2.1 Función del agua como medio de enfriamiento en la planta.....	6
2.2.2 Características del agua para el proceso.....	6
2.2.3 Características del agua residual	7
2.3 Calidad del agua.....	7
2.3.1 Sólidos y residuos presentes en el agua.....	7
2.4 Recuperación y reutilización de aguas residuales	8
2.5 Tecnologías de recuperación de aguas residuales.....	8
2.6 Fiabilidad de los procesos de tratamiento.....	9
2.7 Eliminación de sólidos suspendidos.....	9
2.8 Nivel de recuperación avanzado (combinación de procesos).....	10
2.9 Tipos de tratamientos posibles.....	11
2.9.1 Desbaste	11
2.9.2 Clarificación	12
2.9.2.1 Sólidos sedimentables.....	12
2.9.2.2 Sólidos coloidales.....	13
2.9.2.3 Estabilidad de los coloides, según la teoría química	13
2.9.2.4 Estabilidad de los coloides, según la teoría de la doble capa.....	14
2.9.2.5 Sedimentación del agua floculada	14
2.9.2.6 Determinación de la velocidad de sedimentación y diseño de sedimentadores..	15
2.9.2.7 Equipos empleados en la sedimentación.....	15
2.9.2.8 Clarificación en línea	16
2.9.2.9 Pruebas de jarras	16
2.9.3 Coagulación-floculación	19

2.9.3.1 Teoría de la coagulación	19
2.9.3.2 Factores que afectan la coagulación.....	20
2.9.3.3 Teoría de Schulze-Hardy.	20
2.9.3.4 Practica de la coagulación	21
2.9.3.5 Teoría de la floculación	22
2.9.3.6 Mecanismos de la floculación	22
2.9.3.7 Tasa de floculación.....	22
2.9.3.8 Practica de la floculación.....	23
2.9.4 Filtración	24
2.9.4.1 Filtración por gravedad.....	24
2.9.4.2 Filtración por presión	24
2.9.5 Flotación	25
2.9.5.1 Flotación por aire disuelto (DAF).....	25
2.9.5.2 Flotación por aire inducido	25
2.10 Torres de enfriamiento	26
2.10.1 Mecanismo de la evaporación.....	26
2.10.2 Variables que influyen en la evaporación.....	27
2.10.3 Tipos de torres de enfriamiento.....	27
2.10.3.1 Torres de circulación natural	27
2.10.3.2 Torres de tiro mecánico.....	27
2.10.3.3 Torres de flujo cruzado.....	28
2.10.4 Componentes de las torres de enfriamiento	28
2.10.5 Sistema de distribución de agua	29
2.10.6 Sistema de distribución de aire	29
2.11 Diseño conceptual de trabajos de grado.....	29
2.12 Recuperación de los sólidos y la importancia de su reutilización	29
2.13 Análisis de Costos	30
CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL PROYECTO.....	31
3.1 Definición del caudal estimado de agua a tratar para la máxima producción de la planta.....	31
3.1.1 Sistema indirecto	31
3.1.2 Sistema directo.....	33
3.2 Identificación de los contaminantes generados durante el proceso de fabricación de tubos sin costura	35
3.3 Establecimiento de las operaciones y procesos unitarios en función del tratamiento del agua.....	37
3.3.1 Procesos u operaciones unitarias	37
3.3.1.1 Alternativa (a)	38
3.3.1.2 Alternativa (b)	39
3.3.1.3 Alternativa (c)	41

3.4 Posibles sustancias que permitirán la separación de los contaminantes en el agua, así como la recuperación de su calidad inicial	42
3.5 Utilidad de los residuos generados durante el tratamiento	44
3.5.1 Cascarillas de acero	44
3.5.2 Aceites y/u otros contaminantes líquidos	45
3.6 Costos de adquisición e instalación de equipos.....	45
3.6.1 Costos totales para la construcción de la planta tratamiento propuesta en la alternativa (a).....	47
3.6.2 Costos totales para la construcción de la planta tratamiento propuesta en la alternativa (b).....	47
3.6.3 Costos totales para la construcción de la planta tratamiento propuesta en la alternativa (c).....	48
CAPITULO IV. DISCUSION DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
4.1 Discusión de resultados	49
4.1.1 Definición del caudal estimado de agua a tratar para la máxima producción de la planta.....	49
4.1.2 Contaminantes generados durante el proceso de producción.....	50
4.1.2.1 Cascarillas de acero.....	50
4.1.2.2 Contaminantes sólidos (polvos y arenillas)	51
4.1.2.3 Contaminantes líquidos (grasas y aceites)	51
4.1.3 Procesos y operaciones unitarias en función del tratamiento del agua	51
4.1.3.1 Fosa de escamas	51
4.1.3.2 Pozo caliente	52
4.1.3.3 Alternativas de diseño para la planta de tratamiento de agua.....	52
4.1.4 Sustancias químicas a emplear en la planta de tratamiento.....	53
4.1.5 Utilidad de los residuos generados	54
4.1.5.1 Cascarillas de acero.....	54
4.1.5.2 Contaminantes líquidos (aceites y grasas)	54
4.1.6 Costos de adquisición e instalación de equipos.....	55
4.2 Conclusiones	56
4.3 Recomendaciones.....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXOS.....	59
ANEXO A.....	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Procesos y operaciones unitarias empleados en la recuperación de agua residual	8
Tabla 2.2 Tiempo de sedimentación de las partículas en función del diámetro	13
Tabla 3.1 Caudal estimado en el enfriamiento indirecto para el sistema de lubricación, empleado en la fabricación de tubos sin costura	31
Tabla 3.2 Caudal estimado en el enfriamiento indirecto para el sistema hidráulico, empleado en la fabricación de tubos sin costura	32
Tabla 3.3 Caudal estimado en el enfriamiento indirecto de rodillos y estación hidráulica para el HSG y el HRT	32
Tabla 3.4 Caudal estimado para los equipos en la línea de alimentación con presión de 200,0 bar.....	33
Tabla 3.5 Caudal estimado para equipos en la línea de alimentación con presión de 12,0 bar.....	33
Tabla 3.6 Caudal estimado para equipos en la línea de alimentación con presión de 4,0 bar.....	34
Tabla 3.7 Estimado de agua del sistema de enfriamiento de la planta de tubos sin costura y caudal de agua a tratar, para la máxima producción.....	34
Tabla 3.8 Posibles contaminantes que se encontrarán en las barras cilíndricas antes de iniciar el proceso de producción.	37
Tabla 3.9 Especificaciones a controlar para mantener la calidad del agua a emplear en el proceso industrial.....	42
Tabla 3.10 Posibles sustancias, para recuperar la calidad física del agua a emplear en el proceso industrial.....	43
Tabla 3.11 Posibles sustancias a emplear, para recuperar la calidad química del agua .	43
Tabla 3.12 Costo de equipos e instalación, a emplear en la planta de tratamiento.	45
Tabla 3.13 Costo de obras civiles para la construcción de la planta de tratamiento	46
Tabla 3.14 Costos anuales de sustancias y/o agentes químicos a emplear en la planta de tratamiento.....	47
Tabla 4.1 Sustancias químicas empleadas en la empresa siderúrgica Orinoco Iron para recuperar la calidad inicial del agua.	53
Tabla 4.2 Resultados de inversión, de acuerdo a las alternativas de diseño presentadas para la planta de tratamiento de agua.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Edificio de operaciones, parcialmente construido en el año 1989.....	1
Figura 2.1. Comparación entre sistemas de tratamiento terciario empleados para la recuperación de aguas residuales.....	10
Figura 2.2. Diagrama de flujo conceptual de un sistema de tratamiento avanzado capaz de producir agua potable.....	11
Figura 2.3. Sistema de operación de una torre de enfriamiento de tiro mecánico inducido a contracorriente.....	28
Figura 3.1. Proceso de fabricación de tubos sin costura en la planta laminadora.....	35
Figura 3.2. Generación de las cascarillas de acero y eliminación de residuos sólidos y líquidos empleando inyección de aire y agua a alta presión	36
Figura 3.3. Diagrama de flujo de la alternativa (a) para la planta de tratamiento de agua empleada en la fabricación de tubos sin costura.	39
Figura 3.4. Diagrama de flujo alternativa (b) para la planta de tratamiento de agua en la fabricación de tubos sin costura.	40
Figura 3.5. Diagrama de flujo alternativa (c) para la planta de tratamiento de agua en la fabricación de tubos sin costura.	41

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción general de la empresa

La planta de tubos sin costura de la Siderúrgica del Orinoco, fue diseñada para producir una diversidad de productos tubulares aplicada para la industria petrolera, la cual ha estado evolucionando en calidades y grados de acero, por lo que se hizo necesario diseñar la misma, de tal manera que permitiera abastecer la demanda del sector petrolero; la planta está ubicada dentro de la Siderúrgica del Orinoco en Ciudad Guayana-estado Bolívar.

1.1.1 Reseña histórica de la empresa

Debido a la falta de producción de tubos sin costura, la industria petrolera ha importado al menos 1.200.000 toneladas métricas en los últimos cuatro años, para garantizar la continuidad de sus operaciones. La empresa de producción social de tubos sin costura se encuentra dentro de SIDOR, en el área conocida como lote 5. Este proyecto estuvo en ejecución a finales de la década de los 80, por parte de la entonces empresa estatal CVG SIDOR, paralizando su ejecución en el año 1992, lapso en el cual, el proyecto fue ejecutado parcialmente, en ese entonces se adquirieron la mayoría de los equipos de la planta laminadora y se iniciaron las obras civiles que luego fueron paralizadas por deficiencia presupuestaria (figura 1.1). Se hicieron varios intentos de asociación con empresas extranjeras para continuar el proyecto, pero no hubo logros importantes.

En el año 2006, se aprobó la ejecución del proyecto por parte del ejecutivo nacional; la empresa de producción social de tubos sin costura decide abrir un proceso de licitación para el suministro de equipos y partes faltantes, así como la adecuación tecnológica de la planta laminadora del proyecto, cuya ingeniería, equipos, máquinas y sistemas, habían sido suministradas por la empresa italiana ITALIMPIANTI; actualmente la fábrica continúa con la construcción de obras civiles y la empresa italiana DANIELLI fue la seleccionada para suministrar los equipos faltantes en la planta laminadora (Cañizales, 2006).



Figura 1.1. Edificio de operaciones, parcialmente construido en el año 1989.

1.2 Planteamiento del problema

El desarrollo productivo y el aparato económico del país tienen su fuente matriz en el mercadeo de los hidrocarburos que se encuentran en el territorio nacional. Una de las industrias de mayor envergadura a nivel mundial es PDVSA, por la importancia que esta tiene en cuanto al avance tecnológico-económico tanto de la nación como de otros estados en lo que a materia de energía se refiere. La empresa se basa en todo lo relacionado al tratamiento de dichos hidrocarburos, pero para poder realizar los procesos relacionados con la transformación de la materia prima es necesario el uso de ciertos equipos y materiales, los cuales no son producidos en el país.

Uno de esos materiales que son altamente demandado en la industria, son los tubos sin costura, los cuales permiten la optimización de la perforación y extracción de un yacimiento, así como el transporte de los fluidos que se encuentran en él (petróleo, gas, etc.). Esta tubería es muy necesaria, ya que su fabricación sin costura (sin soldadura) soporta la aplicación de presiones elevadas sin que esta se deforme o sufra fisuras.

Los tubos sin costura en Venezuela siempre han sido importados desde diferentes productores a nivel mundial, México es el principal proveedor de este material. Cada año que pasa, la industria petrolera demanda más tubería sin costura. Es por ello que hubo la necesidad de realizar un proyecto de inversión de capital nacional que permitiera la construcción de una planta capaz de fabricar la cantidad de tubos sin costura necesarios para abastecer el mercado nacional tanto para la industria petrolera como otras fabricas que demanden este producto.

El proceso de producción de tubos de acero sin costura, requiere de tres operaciones fundamentales que se realizan en caliente: perforación y alargamiento del material semi-elaborado de partida (barras redondas), laminación del material perforado y alargado y calibración del material laminado. Durante este proceso el tubo genera una serie de residuos tanto en la parte interna como externa, es por eso que dentro del proceso de fabricación se incluyó una operación denominada “descamado” o “descascarillado”, la cual consiste en aplicarle primeramente una corriente de nitrógeno y luego una de agua a alta presión para remover dichos residuos.

Sin embargo, como todo proceso de manufacturación incluye dentro de la planificación y desarrollo del proyecto un sistema que se encargue de mantener dentro de los límites previamente establecidos los valores de las condiciones que son de vital importancia, para mantener en óptimo estado la operación de la planta. Específicamente, este sistema comprende la circulación de un fluido que permita mantener y controlar las variables físico-químicas que presenta el proceso de producción.

La mayoría de las industrias, utilizan el agua para realizar esta tarea, por su gran capacidad calorífica, su disponibilidad y bajo costo; esto hace que las industrias consideren el empleo del agua como medio de transferencia de calor para sus operaciones de producción y servicios. El agua que se emplean en el proceso, será para enfriar los equipos de manera directa e indirecta y remover los residuos que se generen durante el proceso de producción. En el caso de ésta fábrica se hace necesario el uso del agua en el sistema de enfriamiento y el descamador, estas aguas requieren de

tratamientos fisicoquímicos para su reúso como parte de la política de la empresa para disminuir los posibles impactos ambientales que puedan ocasionar.

Es por esto que se necesita diseñar una planta de tratamiento que permita separar y recuperar residuos sólidos y obtener la calidad del agua necesaria a utilizar en el enfriamiento de los equipos. El diseño incluye determinar los equipos adecuados que optimicen el tratamiento, así como los agentes y/o sustancias necesarias para eliminar los sólidos suspendidos y recuperar las propiedades fisicoquímicas iniciales del agua.

La fábrica de tubos sin costura al igual que todas las empresas que componen el sector siderúrgico tienen su principio en el uso de acero tanto para la producción de productos semi-elaborados, así como el acabado de los mismos según el objetivo de cada empresa, por lo que el tratamiento que le dan al agua en esencia es el mismo, las diferencias las marcan las condiciones de temperatura que caracteriza cada proceso, el volumen de residuos sólidos generados y la calidad de agua que demanda cada sistema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar de manera conceptual el sistema de tratamiento de las aguas industriales provenientes del proceso de fabricación de tubos sin costura.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Definir el caudal estimado de agua a tratar para la máxima capacidad de producción de la planta.
2. Identificar los contaminantes que se generan durante el proceso de fabricación de tubos sin costura.
3. Establecer las operaciones y procesos unitarios en función del tratamiento que se le aplicará al agua.
4. Indicar las posibles sustancias químicas que permitan la separación de los contaminantes presentes en el agua, así como la recuperación de su calidad inicial.
5. Evaluar posible utilidad de los residuos generados durante el tratamiento del agua.
6. Estimar los costos de adquisición e instalación de los equipos empleados en la planta de tratamiento.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Ortiz (2005), desarrolló un diseño de un sistema de tratamiento de efluentes para la planta potabilizadora José Antonio Anzoátegui, éste se basaba generalmente en la conceptualización, es decir, en el desarrollo de la ingeniería, determinar los equipos a emplear y la preparación física donde se establecieron las instalaciones. Estableció que los contaminantes de mayor presencia fueron el hierro y el manganeso, por lo que hubo que realizar un proyecto que clarificara el agua para así cumplir con lo establecido en la ley y no afectar negativamente las condiciones ecológicas del río Neverí. Realizó pruebas de jarras para determinar si era viable recircular el sobrenadante al inicio del proceso de potabilización sin el uso de un coagulante adicional; esto con la finalidad del optimizar el proceso y minimizar los costos.

Canache (2004) realizó la evaluación de los efluentes líquidos de la planta potabilizadora José Antonio Anzoátegui, con la finalidad de determinar si los mismos cumplían con la normativa que regula el vertido a los cuerpos de agua, para ello determinó todos los parámetros fisicoquímicos no solo de los efluentes líquidos, sino también de los sobrenadantes de los efluentes del lavado de filtros y sedimentadores, así como también mezclas al 50% volumen/volumen de agua cruda-sobrenadantes y pudo demostrar que la descarga de los efluentes del lavado de sedimentadores de la planta potabilizadora, principalmente, es la responsable de afectar las propiedades fisicoquímicas del río Neverí. Igualmente demostró que los líquidos sobrenadantes del efluente del lavado de filtros pueden ser reciclados al inicio del proceso de potabilización.

Pino (2003) evaluó la influencia de la aplicación de coagulantes primarios en las operaciones unitarias de las plantas de potabilización El Rincón y José Antonio Anzoátegui, realizó un estudio de la calidad fisicoquímica de los coagulantes, del agua tratada con estas sustancias químicas desde 1996 al 2001, de la eficiencia de las unidades del proceso, costo y consumo de los coagulantes, y como parte complementaria estudió la acción bacteriológica de estos químicos en la calidad del agua tratada, encontrando que la calidad fisicoquímica de los coagulantes es apropiada según las normas COVENIN, hizo necesario realizar unos manuales para evaluar la calidad de los coagulantes en las plantas potabilizadoras y la calidad del agua cruda la encontró dentro los parámetros de calidad según la ley.

Olivares (1999) presentó el trabajo de grado donde se evaluó el tratamiento químico del agua cruda (con el coagulante sulfato de aluminio y gas cloro como desinfectante) y las operaciones de cada equipo y se comparó con las condiciones de diseño. Para esto se realizó un muestreo para determinar la calidad del líquido que entra y sale de cada una de las unidades de la planta, y verificar la eficiencia del tratamiento aplicado. Concluyó que la eficiencia del sistema de filtración disminuye sustancialmente en época de lluvia, además, que se ha hecho en esta planta mayor énfasis al mantenimiento correctivo que al preventivo.

En este proyecto se realiza el diseño preliminar de un sistema de tratamiento de las aguas industriales provenientes de la fabricación de tubos sin costura, por lo que para ello se determina teóricamente el caudal de agua a tratar, las operaciones y procesos

unitarios a realizar, las sustancias químicas a emplear y los agentes contaminantes generados durante el proceso.

De acuerdo a los trabajos previos citados, algunas de las semejanzas que se pueden establecer en cuanto a este proyecto es que necesariamente el agua debe ser tratada para eliminar todos los contaminantes tanto sólidos como líquidos que se encuentran en ella, de acuerdo a la naturaleza del proceso que cumplen y las características del lugar de donde provienen.

Sin embargo, el diseño en este proyecto difiere con los mencionados trabajos anteriores, ya que el tratamiento que se establecerá es distinto, debido a que el agua proviene y cumple una función diferente y lo que se busca es reponer las condiciones fisicoquímicas iniciales para continuar con la producción en la planta y recuperar el material sólido separado así como de los contaminantes líquidos retirados del agua por el valor comercial que éstos representan y que serán utilizados en diferentes procesos industriales; a diferencia de los antecedentes, cuya finalidad era potabilizar aguas para el consumo humano.

2.2 Descripción del proceso de producción de la planta de laminación

Al patio de materias primas, llegan las barras redondas de acero con dimensiones aproximadas de 12 metros, mediante grúas son colocadas en la vía de rodillos a través de los cuales se trasladan hasta las sierras para el corte a las longitudes programadas, luego son medidas y pesadas, para finalmente ser cargadas al HSG (Horno de Solera Giratorio), el cual cuenta con una capacidad de carga de 120 ton/h donde es accionado por un sistema hidráulico y enfriado por agua. Las barras por medio de pinzas son introducidas al horno, donde son calentadas a 1280 °C; luego son descargadas y colocadas por una pinza en un canal con una vía de rodillos accionados mecánicamente lo que permite trasladarlas hasta el perforador-alargador, el cual se encarga de la perforación de la barra y la formación del forado (barra convertida en tubo).

Luego se realiza el proceso de acabado del forado y formación del tubo bruto (esbozado), mediante el uso de un laminador FQM (Fine Quality Mill, "Laminador Fino de Calidad"), donde el forado es laminado por medio del uso de rodillos dispuesto en un canal en diferentes posiciones; seguidamente el tubo obtenido es soplado por medio de una corriente de nitrógeno y una de agua a alta presión con la finalidad de eliminar las escamas que se generan durante el proceso de producción, y por último se le aplica bórax en forma de espray para evitar oxidación y lubricar antes de que sea insertado el mandril.

Una vez obtenido el esbozado proveniente del FQM es insertado el mandril, el cual se encarga de laminar los tubos hasta alcanzar un diámetro interior previamente establecido, luego el mandril es extraído y devuelto para realizar el ciclo nuevamente. Una vez liberado el mandril el tubo es cortado en ambos extremos e introducido en el horno de recalentamiento, seguidamente prosigue al LRE (Laminador-Reductor-Estirador), que durante su trayectoria es sometido nuevamente a una corriente de agua a alta presión, en el LRE el diámetro exterior del tubo laminado es reducido, lo que permite alcanzar una longitud mayor sin que se vea afectado el diámetro interior obtenido a través del mandril.

Posteriormente el tubo se enviará a la mesa de enfriamiento donde luego será llevado a las sierras de corte de paquetes de tubos, en la cual el mismo es cortado pudiendo obtenerse de 2 a 6 tubos de 14 metros de longitud. Los tubos ya cortados son trasladados al sistema de pesado y marcado, para proseguir al sistema de CND (Control No Destructivo), seguidamente y por medio de pinzas los tubos son llevados al equipo de RTA (Recalcado y Tratamiento Térmico), en el cual se le aplican ciertos procesos físicos para mejorar y alcanzar los estándares de calidad establecidos; terminado este proceso los tubos son depositados en cestas y almacenado en los racks (bastidor destinado para el alojamiento de las cestas) y que finalmente son entregados de acuerdo a la demanda y destino de los clientes, ya sea por vía terrestre o marítima (Cañizales, 2006).

2.2.1 Función del agua como medio de enfriamiento en la planta

Las máquinas que conforman las líneas de producción de esta planta de tubos sin costura, requieren de enfriamiento para mantener una operación segura y confiable tanto para las personas que las operan como para las propias instalaciones. El enfriamiento de estas máquinas se hace a través de agua, la cual, debido a los altos volúmenes requeridos y en aras de preservar el medio ambiente, debe ser reutilizada.

El agua de enfriamiento para poder ser recirculada, debe pasar por un proceso de tratamiento una vez que ha recorrido por los sistemas de refrigeración de las líneas de producción, y luego se le deben reponer sus propiedades físico-químicas para garantizar una mayor vida útil tanto de la red de distribución como de los equipos que la utilizan. Dadas estas premisas, se requiere construir e instalar una planta de tratamiento de agua en la Planta de Tubos sin Costura. La planta de tratamiento de agua a construir, suplirá los requerimientos de agua de enfriamiento de los siguientes equipos: Laminador-reductor-estirador (LRE), laminador FQM, horno de solera giratorio (HSG), perforador-alargador, mandril, extractor de mandril, horno de recalentamiento de tubos tanto directo como indirecto.

2.2.2 Características del agua para el proceso

El agua que inicialmente utilizará la planta cuando esta inicie sus operaciones, será suministrada por SIDOR, donde las condiciones que se requieren para mantener el proceso en óptimas condiciones será de acuerdo a la demanda que los equipos tienen en cuanto a las propiedades físico-químicas del agua, para que así no sufran daños ni las maquinas ni la red de distribución. De acuerdo, al análisis físico-químico que SIDOR realizó y entregó a la gerencia del proyecto son las siguientes:

- Sólidos suspendidos totales (SST) 10-30 ppm
- Sólidos disueltos totales (SDT) 30-60 ppm
- Alcalinidad total 30-60 ppm
- Dureza total 30-60 ppm
- Dióxido de silicio 5-15 ppm
- pH 8-10
- Cloro 0.75-0.90 ppm
- Hierro 0.90-1.05 mg/L

En el diseño de la planta de tratamiento para la fábrica de tubos sin costura, uno de los objetivos primordiales del proyecto es establecer las posibles sustancias químicas necesarias que permitirán recuperar la calidad del agua dentro del rango de valores para cada una de estas especificaciones, siendo las más importantes los SST, SDT y el pH.

2.2.3 Características del agua residual

Cuando el agua proveniente de los tanques de almacenamiento es repartida a través de la red de distribución, ésta tiene dos funciones o recorridos: El primero consiste en enfriar los equipos de manera indirecta por medio de serpentines o tuberías internas, es decir, no hay contacto entre ellos por lo que el agua sólo se ve afectada por el incremento de la temperatura que ocurre durante el proceso de transferencia de calor y en consecuencia sólo necesita ser enfriada para volver a ser recirculada y realizar el ciclo nuevamente.

El segundo consiste en realizar el proceso de descamado de los tubos así como disminuir la temperatura de los equipos a través de un contacto directo, lo que ocasiona alteración tanto física por el aumento de la temperatura como química por los residuos que se depositan en el agua modificando así sus condiciones iniciales en lo que a la calidad de la misma se refiere, siendo las más afectadas el pH, los sólidos suspendidos y sólidos disueltos, por lo que para poder ser recirculada deben retomar sus valores iniciales, ésto con la finalidad de mantener y alargar la vida útil de los equipos, así como también deberá ser enfriada para que pueda mantener su temperatura dentro del rango previamente establecido en la ingeniería de diseño.

2.3 Calidad del agua

El término *calidad del agua* es relativo y sólo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso. Ésto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para el consumo humano puede resultar inadecuada para la industria. Dada la necesidad de cuantificar éste término, se expresa para cada uso, en función de sus características físicas, químicas y biológicas (Barrenechea, Vargas y Maldonado, 2003).

En la práctica, la remoción de la turbidez no es un proceso difícil de llevar a cabo en una planta de clarificación de agua; sin embargo es uno de los que más influye en los costos de producción, porque, por lo general, requiere usar coagulantes, ayudantes de coagulación, polímeros floculantes, entre otros químicos. Aunque no se conocen los efectos de la turbidez sobre la salud, ésta afecta la calidad estética del agua, lo que muchas veces, ocasiona el rechazo por parte de los consumidores.

2.3.1 Sólidos y residuos presentes en el agua

Se denomina así a los residuos que se obtienen como materia remanente luego de evaporar y secar una muestra de agua a una temperatura dada. Según el tipo de asociación con el agua, los sólidos pueden encontrarse suspendidos o disueltos, sin embargo, la suma de ambos, da como resultado los *sólidos totales*.

2.4 Recuperación y reutilización de aguas residuales

Las industrias para llevar a cabo y mantener en óptimo estado el proceso de producción, requieren del uso de agua como medio de enfriamiento. En los últimos años los organismos encargados de preservar el medio ambiente han obligado a estas empresas a reutilizar el agua para disminuir el impacto ambiental que podrían ocasionar si son vertidas directamente al ecosistema, con el objetivo de resguardar los embalses que almacenan el recurso hídrico, se establecieron cambios en las tecnologías, procesos químicos y operaciones físicas para aumentar el reciclaje del agua y así cumplir con las normas establecidas.

2.5 Tecnologías de recuperación de aguas residuales

Los criterios de calidad de agua aplicables a las aguas residuales recuperadas varían en función de cada caso de reutilización. La mayoría de las tecnologías de recuperación de aguas residuales existentes en la actualidad son, esencialmente, las mismas que las empleadas para el tratamiento del agua de abastecimiento y consumo. Sin embargo, en algunos casos, la eliminación de determinados contaminantes físicos y químicos, y la inactivación y eliminación de microbios pueden obligar a emplear procesos de tratamiento adicionales.

En la evaluación de las tecnologías de recuperación de aguas residuales, los aspectos fundamentales son la fiabilidad operativa de cada proceso unitario y el rendimiento global del sistema completo a la hora de producir un agua recuperada que satisfaga los criterios de calidad establecido para cada proceso industrial determinado (tabla 2.1).

Tabla 2.1 Procesos y operaciones unitarias empleados en la recuperación de agua residual (Metcalf & Eddy, 1996).

Constituyente	Tratamiento primario	Coagulación-floculación	Filtración	Cloración
Sólidos suspendidos totales	+	+	+	
Grasas y aceites	+	o		
Bioactividad		+		+
Hierro	o	+	+	

*Adaptado de la bibliografía

Nota: o: Eliminación 25 – 50 por 100 de la concentración de efluente.

+: Eliminación 50 por 100 de la concentración de efluente.

En la tabla 2.1 se nombran los procesos y operaciones unitarias más comúnmente empleados en la recuperación de aguas industriales, así como los principales

contaminantes eliminados. Para lograr un efectivo y eficaz tratamiento de las aguas residuales es necesario estudiar una serie de conceptos y tecnologías que son de vital importancia en la reutilización de las aguas provenientes de procesos industriales (Metcalf & Eddy, 1996).

2.6 Fiabilidad de los procesos de tratamiento

La fiabilidad de una planta de recuperación de aguas residuales se puede determinar en función de su capacidad de producir, de forma consistente, un agua de calidad aceptable para mantener dentro de lo establecido el proceso industrial. Los problemas que pueden afectar el rendimiento y fiabilidad de una planta de recuperación de aguas residuales se pueden dividir en dos categorías: (1) problemas provocados por fallas mecánicas, errores de diseños, fallas operativas, y (2) problemas provocados por cambios persistentes en las características del agua residual que se producen, a pesar de que el diseño, explotación y mantenimiento de la planta de recuperación sean correctos.

En relación con la primera categoría de problemas, las principales causas de bajos rendimientos de las instalaciones son las fallas relacionadas con la explotación y mantenimiento de la planta. En cuanto a la segunda categoría de problemas, en el diseño de sistemas de recuperación y reutilización de aguas industriales es de especial importancia evaluar la variabilidad de las características del agua residual y la correspondiente fiabilidad operativa. Las variaciones en la calidad del agua recuperada se pueden tomar como un indicador de la existencia de problemas inherentes a la planta, o como un problema provocado por las variaciones diarias o estacionales del caudal de agua residual y de sus características, así como por los sistemas de control de los procesos.

En los casos en los que se observa escasa fiabilidad en la eliminación de un determinado constituyente que resulta crítico para una determinada aplicación de reutilización del agua residual, se pueden incorporar una serie de cambios al diseño del sistema de recuperación de aguas industriales con el fin de optimizar el proceso. Los cambios pueden abarcar las operaciones físicas, procesos químicos, tanques de almacenamiento e incluso a las instalaciones de la planta de tratamiento (Metcalf & Eddy, 1996).

2.7 Eliminación de sólidos suspendidos

La reciente tendencia a re-utilizar las aguas empleadas en los procesos industriales con la finalidad de cumplir con las normas establecidas para así disminuir el impacto ambiental que esto produciría si fuesen vertidas al ecosistema, ha permitido que día a día se originen nuevos procesos y/o operaciones que permitan optimizar el proceso de tratamiento y recuperación de efluentes (figura 2.1). La combinación de operaciones físicas y procesos químicos han alcanzado niveles altos de eficiencia en cuanto al tratamiento del agua se refiere, manteniendo los niveles de producción dentro del proceso industrial en los rangos establecidos.

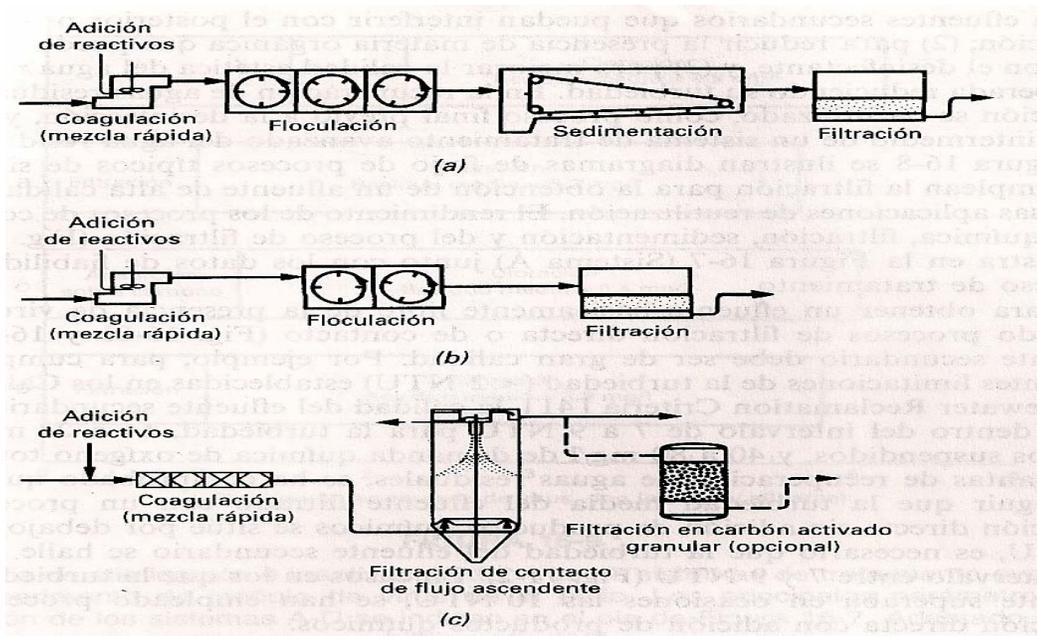


Figura 2.1. Comparación entre sistemas de tratamiento terciario empleados para la recuperación de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1996).

El tratamiento completo para alcanzar niveles óptimos en la recuperación de las aguas, suele consistir en coagulación química, floculación, sedimentación y filtración, seguidos de desinfección con cloro. Cuando es necesario instalar el tratamiento completo a continuación del tratamiento convencional del agua residual para su reutilización, ésta se debe desestimar por razones de costos, es decir, tomando en cuenta el nivel de suciedad o contaminación del agua residual y los parámetros de recuperación del efluente que se deben alcanzar para su recirculación (Metcalf & Eddy, 1996).

En el caso de la planta de tubos sin costura, el sistema de tratamiento que se debe instalar es el tratamiento completo, esto de acuerdo al tipo de contaminantes que se generaran y los niveles de calidad de agua que se deben lograr para mantener el proceso de producción y vida útil de los equipos en óptimas condiciones

2.8 Nivel de recuperación avanzado (combinación de procesos)

A fin de conseguir el elevado nivel de tratamiento y de fiabilidad necesario para la reutilización para usos potables y/o industriales, las unidades y procesos de recuperación avanzada suelen incluir procesos de sedimentación, eliminación de nutrientes, filtración, adsorción sobre carbón activado y desinfección por cloro. Sin embargo, este tipo de combinación de tratamiento se emplea en la recuperación de aguas residuales con usos potables (figura 2.2), lo que requiere un extenso e intenso tratamiento sobre todo en lo que a bioactividad se refiere, ya que puede afectar nocivamente la salud de la población.

En el caso de los procesos industriales los parámetros físico-químicos son los que más requieren atención, pues los equipos empleados en las industrias pueden verse

paralelamente y espaciadas entre 1 y 5 mm. Se limpian con rastrillos que se accionan normalmente de forma mecánica. En otros casos, si el tipo de sólidos lo permite, se utilizan trituradoras, reduciendo el tamaño de sólidos y separándose posteriormente por sedimentación u otras operaciones (MADRIDMASD, 2005).

2.9.2 Clarificación

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación. Realmente, este tipo de partículas (grandes y densas, como las arenas) se tienen en pocas ocasiones en aguas industriales.

La clarificación de un agua de desechos o residual es un proceso de separación sólido-líquido que emplea la sedimentación, la cual es la separación de sólidos suspendidos del agua por gravedad, o la filtración, que es el paso de un fluido a través de un medio poroso. El uso de una o ambas técnicas va a depender de la calidad requerida del agua o de las propiedades de los sólidos suspendidos. La eficiencia de ambos procesos puede incrementarse por la aplicación de productos químicos apropiados al proceso. En la fase líquida del agua pueden encontrarse dos grupos de sólidos: los sedimentables y los coloidales (LIPESA, 1989).

2.9.2.1 Sólidos sedimentables

Son aquellos sólidos que se encuentran suspendidos en el agua y que de acuerdo a su peso tienden a sedimentar en el fondo como resultado de la fuerza de gravedad en el proceso de sedimentación. Por el contrario las partículas más ligeras que el agua tienden a flotar por un proceso llamado flotación. La remoción por sedimentación, del material suspendido en el agua, a bajo costo y a bajo consumo de energía es conceptualmente simple, pero envuelve serias complicaciones a la hora de diseñar piscinas o tanques de sedimentación.

La velocidad de sedimentación de las partículas suspendidas en el agua puede reducirse al punto donde los sólidos sedimentarán por gravedad. La tasa de sedimentación de las partículas es afectada por su forma y tamaño, gravedad específica, así como por la viscosidad y gravedad específica del líquido donde se encuentran y de las corrientes dentro del recipiente. Manteniendo los demás factores iguales, se obtendrá una remoción máxima de los sólidos suspendidos más gruesos en un tiempo dado cuando el agua permanezca en reposo.

Según las leyes de Stokes, la velocidad de sedimentación está en función de las características físicas de las partículas y del medio en el cual se está sedimentando tal como se muestra en la tabla 2.2; los contaminantes en el agua natural y aguas residuales varían enormemente en su tamaño, y de acuerdo a las leyes de Stokes, es el

tamaño de las partículas (radio) el que tiene mayor influencia en la velocidad de sedimentación (LIPESA, 1989).

Tabla 2.2 Tiempo de sedimentación de las partículas en función del diámetro (LIPESA, 1989).

Diámetro (mm)	Orden de tamaños	Recorrido de 1 metro
10	Grava	1 segundo
1	Arena gruesa	10 segundo
0,1	Arena fina	2 minutos
10^{-2}	Arcilla, limo	2 horas
10^{-3}	Bacterias	8 días
10^{-4}	Partícula coloidal	2 años

La sedimentación de sólidos del agua, en reposo o en estanques de largos tiempos de residencia (4-24) horas, logran remover entre un 30-80% del material, no siendo prácticos para plantas de gran producción con requerimientos continuos de agua, tal es el caso de la planta de tubos sin costura. En la mayoría de los casos, las exigencias de calidad del agua final obligan otras técnicas y procesos que involucran algunos productos químicos.

2.9.2.2 Sólidos coloidales

El agua contiene otras partículas finas, llamadas coloides, las cuales constituyen una parte importante de la contaminación, y producen principalmente turbidez y color en el agua. Los coloides son partículas normalmente menores a un micrón (0,001 mm), que se mantienen en suspensión aún en condiciones de reposo por un tiempo determinado. Una característica distintiva entre las partículas de dimensiones coloidales y sedimentables, es la relación del área superficial y la masa.

Para los materiales coloidales esta relación es muy alta (gran área de superficie, baja masa), si se suma a esto las propiedades asociadas con la superficie de la partícula, sus cargas eléctricas y los grupos funcionales ionizables adquieren entonces mayor importancia. En el agua cruda las partículas coloidales son tanto inorgánicas (arena, arcillas, etc.), como orgánicas (color predeterminante). El color es difícil remover debido a que puede ser soluble o extremadamente pequeño (LIPESA, 1989).

2.9.2.3 Estabilidad de los coloides, según la teoría química

Las partículas coloidales poseen fuerzas que las mantienen en estado disperso a lo largo del tiempo, con una notable estabilidad en la forma natural que no permite que se

aglomeren o formen corpúsculos de mayor tamaño. Su estabilidad es el resultado de una solvatación o de una acción protectora debido a ciertos cuerpos absorbidos, así como la acción preponderante de fuerzas electrostáticas de repulsión entre las partículas. Los coloides se encuentran siempre cargados negativamente, y como consecuencia de su solvatación, debe considerarse la partícula ionizada parcialmente en su superficie, lo cual se observa al desplazarse ésta bajo la acción de un campo eléctrico (LIPESA, 1989).

2.9.2.4 Estabilidad de los coloides, según la teoría de la doble capa

La estabilidad coloidal depende de las cargas eléctricas que se desarrollan en la interfase partícula-agua. El origen de estas cargas puede deberse a la absorción de iones hidroxilos del agua sobre la superficie de la partícula, creándose un coloide cargado negativamente. Como un resultado del desarrollo de esta carga, se establece un balance en la vecindad del coloide hasta llenar los requerimientos de electroneutralidad. Se desarrollan dos tipos de capas iónicas: la capa fija y la capa difusa. La primera es una capa compacta y fija sobre la superficie coloidal cargada. La capa difusa se extiende por toda la solución. Si por alguna fuerza externa la partícula se mueve, se establecerá un plano en el cual, solo parte de la capa difusa se mueve con el coloide.

El potencial electrocinético o "Zeta" es definido como el potencial de ese plano; en efecto, si se aplica un campo eléctrico externo, el coloide se moverá hacia el electrodo con la carga opuesta. La velocidad con la cual se mueve el coloide puede correlacionarse con el potencial Zeta (es decir, a mayor carga más pesadamente se moverá el coloide). En el medidor Zeta (Zetámetro), un potencial es aplicado en ambos extremos de un tubo capilar, las partículas son observadas a través del microscopio y su velocidad es determinada por el tiempo de su movimiento sobre una cierta distancia.

La dirección en la cual ellas se mueven indica la carga de su superficie y la velocidad a la cual viajan indica la fuerza de su carga. Por lo tanto, cuando una partícula se encuentra en un campo eléctrico, alcanza, casi instantáneamente, una velocidad tal que se establece un equilibrio entre la fuerza eléctrica de atracción y la fuerza de rozamiento debida a la viscosidad del medio (LIPESA, 1989).

2.9.2.5 Sedimentación del agua floculada

Luego de la dosificación del coagulante-floculante, el agua pasa entonces a la fase de sedimentación, etapa final del proceso de clarificación. Aún cuando los conceptos teóricos, que intervienen en la remoción de sólidos suspendidos en el agua por sedimentación simple, son hasta ciertos grados diferentes de los relacionados con la remoción de partículas coaguladas, pueden aplicarse los mismos principios fundamentales de las leyes de sedimentación (Stokes) mencionadas anteriormente.

Después de la floculación, a medida que los flóculos aglomerados son decantados, el agua clarificada eleva su poder para separar el sedimento. El proceso no es 100% eficiente, el agua clarificada contendrá algo de materia en suspensión, como forma de flóculos de arrastre, los cuales pueden removerse en otra forma de separación física: la

filtración. Los flóculos decantados son removidos como lodos y, en ciertos casos, parte de ellos (5-10%) son recirculados hacia el sedimentador (LIPESA, 1989).

2.9.2.6 Determinación de la velocidad de sedimentación y diseño de sedimentadores

Algunos aspectos deben tomarse en cuenta para determinar la velocidad de decantación de las partículas y considerarse a la hora de diseñar sedimentadores:

- Los cuerpos esféricos se sedimentan con mayor velocidad que lo de cualquier otra forma de igual gravedad específica.
- Los sólidos suspendidos divididos por la turbidez dan una razón llamada coeficiente de finura, que dice que un cierto peso de sólidos muy finamente divididos, tiene una turbidez o poder absorbente de luz mucho mayor que el mismo peso de sólidos más gruesos.
- La velocidad de sedimentación disminuye simultáneamente al reducirse la temperatura del agua, debido a que la viscosidad de ésta aumenta al bajar la temperatura. Por ejemplo, una disminución en la temperatura de 4,4 °C (de 21,1 a 16,7 °C) da por resultado una reducción del 45% en la eficiencia de la sedimentación.
- La velocidad horizontal del agua que fluye arrastra las partículas, influyendo sobre la tendencia de estas a sedimentarse, por lo tanto no es posible obtener el % de remoción de sólidos suspendidos que puede lograrse manteniendo el agua en reposo, aun cuando se mantengan los mismo tiempos de sedimentación en los estanques.
- La capacidad de transporte del agua, con relación a las partículas suspendidas, varía conforme a la sexta potencia de su velocidad.
- No existe una fórmula matemática ideal que permita el cálculo de la velocidad de sedimentación.
- El proceso de clarificación admite equipos de muchos tipos; por lo tanto, el modelo usado debe proporcionar el ambiente adecuado a cada etapa: coagulación, floculación, sedimentación (LIPESA, 1989).

2.9.2.7 Equipos empleados en la sedimentación

Hoy en día existen en el mercado una extensa diversidad de equipos o modelos de clarificadores, que combinan las tres etapas en una sola unidad, estrechamente ligadas según los diferentes fabricantes; pero todos deben proporcionar eficiencia en las tres etapas dependiendo básicamente de la utilización de productos químicos adecuados, dosis recomendada, punto de dosificación correcto, calidad del efluente tratado y capacidad de espacio disponible en la instalación.

El proceso de coagulación-sedimentación requiere tres procesos en unidades distintas: (1) mezcla rápida para la coagulación, (2) mezcla moderada-lenta para la floculación y (3) separación del floculo y el agua. Originalmente, las unidades convencionales de clarificación consistían en largas piscinas rectangulares de concreto, divididas en dos o tres secciones, donde ocurría cada etapa del proceso. El flujo de agua era horizontal a través de dichos sistemas. Estas unidades son usadas en plantas

industriales muy grandes y para clarificación de aguas municipales. El tiempo de retención es normalmente largo (de 4 a 6 horas) y principalmente para la sedimentación.

La mezcla rápida típicamente es diseñada para 3 a 5 minutos y la mezcla lenta para 15 a 30 minutos. Este diseño ofrece gran flexibilidad en el establecimiento de los puntos idóneos de adición de productos químicos. Del mismo modo dichas unidades son relativamente insensibles a cambios en el agua cruda. Los largos tiempos de retención permiten un tiempo suficiente de reacción para realizar los ajustes necesarios en alimentación de polímeros y de químicos, si las condiciones de agua cruda cambian bruscamente. Sin embargo, para demanda de aguas tratadas muy grandes, las unidades horizontales requieren altos costos de construcción y más espacio por unidad de capacidad de carga (LIPESA, 1989).

2.9.2.8 Clarificación en línea

La clarificación en línea es el proceso de remoción de turbidez del agua cruda por adición de coagulantes justo antes de la filtración. El diseño del equipo puede ser ascendente o descendente y depende de la turbidez del agua cruda y del tamaño de la partícula. La unidad de flujo descendente generalmente consiste en capas de varios grados de antracita y arena, soportadas sobre un lecho de grava. Después del retrolavado, las partículas de antracita más grande se separan del tope del lecho, mientras las más densas, partículas más pequeñas van al fondo. El propósito es permitir la penetración del lecho por el floculo, el cual reduce el potencial por excesiva presión; así tasas de filtración más altas son realizadas, sin pérdida significativa en la calidad del efluente, debido al hecho de tener un lecho incrementado. Las tasas normales de filtración son de 5 a 6 gpm por pie².

La clase y tasa de alimentación del polímero coagulante dependen del diseño del equipo. El coagulante es aplicado solo para proveer suficiente neutralización y permitir la atracción y absorción de partículas a través del lecho. Normalmente se requiere un corto periodo de tiempo para alcanzar el grado de reacción óptimo por unidad de operación. Debido a la naturaleza de la operación, un cambio en la tasa de alimentación del polímero mostrara un cambio en la turbidez del efluente en un periodo de tiempo relativamente corto (LIPESA, 1989).

2.9.2.9 Pruebas de jarras

Es la prueba de jarras, la técnica más extensamente usada para determinar la dosis de químicos y otros parámetros del proceso de sedimentación-clarificación. En ella se trata de simular los procesos de coagulación, floculación y sedimentación a nivel de laboratorio. Por supuesto, el intentar simular las condiciones de operación de cada planta en particular no ha permitido la estandarización de la prueba de jarras.

Antes de llevar a cabo un ensayo de jarras, es necesario hacer una encuesta en la planta que se quiere simular con los siguientes puntos:

- Principios de operación del equipo de clarificación (marca, modelo, etc.)
- Condiciones de mezcla de la planta, distintas etapas del proceso, etc., para determinar y simular las condiciones de mezcla de la prueba de jarras.

- Productos químicos utilizados y posibles cambios a ensayar.
- Parámetros de calidad del agua a tratar: turbidez, TSS, pH, alcalinidad, color, dureza.
- Parámetros de calidad deseados para el agua efluente, teniendo en cuenta la capacidad de diseño de la instalación. Casi siempre son los mismos que los tomados para el agua cruda, más algunos adicionales, consecuencia del tratamiento y que requieran ser ajustados.
- Posibles puntos de inyección u orden de adición, de los productos químicos a evaluar.

A. Condiciones de la prueba de jarras

Debido a que la prueba de jarras es solo una simulación de lo que está sucediendo en planta, se debe determinar primero que clase de tiempos de mezcla tiene la planta y la duración de los mismos.

- Mezcla rápida

El objetivo de la mezcla rápida es crear turbulencia y movimiento necesario para poner en contacto los reactivos químicos con las partículas coloidales del agua, de modo de neutralizar sus cargas, desestabilizarlas y hacer que se aglomeren en un corto periodo de tiempo. Para aguas con bajo contenido de sólidos (turbidez coloidal), mientras más largas e intensa sea la mezcla rápida mejor será la clarificación. Para aguas con altos contenidos de sólidos (aguas residuales, > 0,5%) una mezcla rápida prolongada (alta energía) puede ser dañina, ya que rompería los flóculos frágiles previamente formados.

Si la planta posee una reacción rápida, el ciclo de mezcla típico del equipo de jarras sería de 80-100 rpm por 1 a 3 minutos, pero si ésta no posee mezcla rápida definida, siempre se requerirá la dispersión de los químicos en la prueba de jarras y debe adoptarse entre 40-60 rpm por 15-60 segundos.

- Mezcla lenta

En la práctica usual el tiempo de mezcla lenta no excede de 15 minutos, aún con los tiempos reales en la planta, mayores a éste. Un tiempo excesivo puede crear calentamiento de la muestra originando una floculación más eficiente.; pero a su vez una pobre sedimentación, ya que ocurre la liberación de los gases disueltos en el agua, formando burbujas que se adhieren a los flóculos y los hace flotar. Es práctico un tiempo de mezcla lenta de 20 a 40 rpm durante 3 a 15 minutos. El tiempo de duración y velocidades más bajas (rpm), son más indicados para clarificadores de aguas residuales con alto contenido de sólidos suspendidos. Mayores tiempos de agitación y velocidades de agitación más altas (rpm), son indicativos de plantas de clarificación de agua cruda bien diseñadas.

- Sedimentación (reposo)

El tiempo de sedimentación no es crítico, debido a que el tamaño del floculo no puede medirse y la tendencia de la muestra a calentarse causa corrientes térmicas. Lógicamente, se debe conseguir un tiempo mínimo donde un incremento en el tiempo de reposo, no aumente la remoción de turbidez. Se puede permitir entre 5-10 minutos sin agitación.

B. Procedimiento para realizar una prueba de jarras

Existen en el mercado una variedad de equipos para pruebas de jarras, pero en todos, su versatilidad debe radicar en mezclar una serie de jarras al mismo tiempo y la posibilidad de variación de la velocidad de agitación (RPM). Otros equipos para preparar las soluciones y sus aplicaciones incluyen: pipetas graduadas de 1 ó 2 ml (o jeringas), botellas de dilución para las soluciones de trabajo, jarras de 1000 ml (beaker), reloj, etc. Las soluciones químicas deben ser preparadas al momento. Mientras algunas soluciones químicas se benefician con el tiempo, aunque la mayoría se deterioran. Los resultados obtenidos con muestras añejas no son representativos.

Una ecuación práctica indica como determinar el volumen de químico a añadir en la jarra, para obtener la dosis deseada (ppm), $V_x = D \cdot V / C \cdot 10^4$, donde:

V_x : ml de químico requerido en la jarra

D: dosis de químico deseada

V: volumen de muestra en la jarra

C: concentración de químico en la solución madre, %

Factor 10^4 ppm/%

Las muestras para las pruebas deben ser lo más representativas del sistema y en cantidad suficiente para una serie de pruebas completas. Se deben tomar todas las precauciones para una captación de muestra, de acuerdo al lugar de distribución en el sistema. En las muestras viejas la turbidez del agua usualmente coagula más fácilmente que en muestras frescas, debido a la inestabilidad de la suspensión coloidal; por lo tanto no se recomienda correr pruebas de jarras con más de dos horas de captadas.

La adición de químicos debe realizarse en el mismo orden en que son añadidos en planta. A las jarras se añaden normalmente los coagulantes, coagulantes y/o ajustadores de pH. Algunas plantas usan cloro para oxidar la materia orgánica y eliminar el color; pero debido a lo difícil que sería añadir cloro gas en la prueba se suele usar sales de cloro (hipocloritos). Estas son altamente alcalinas e incrementan el pH en la jarra, lo que no ocurre en planta al usar cloración (gas) donde más bien se reduce el pH. Esto puede corregirse tomando muestras ya cloradas (precloración) y luego proceder con la adición de los otros químicos.

Se debe tener cuidado de no demorar la adición de los químicos si se necesita una adición simultánea de los mismos, ya que se estarían alterando las condiciones de la prueba. La temperatura a la cual se realizan las pruebas de jarras debe corresponderse con la del equipo o proceso de planta, ya que las velocidades de reacción dependen en gran grado de la temperatura del medio. Por tanto, se debe ajustar está en la prueba, ya sea con baño de hielo o con plato de calentamiento. La simulación de la recirculación y contacto de lodos no es práctico en una prueba de jarras, debido al tiempo extra requerido y a la incómoda técnica a emplear. Por otro lado la evidencia no es concluyente y no se justifica su uso (LIPESA, 1989).

C. Criterios de evaluación en una prueba de jarras

Para evaluar los resultados de una prueba de jarras no se siguen criterios convencionales o patrones universales y casi se trata de un criterio particular del analista, fabricante del equipo, operador de la planta de acuerdo a su experiencia, etc.; pero bajo la convicción que le da la certeza de trabajar en las mismas condiciones experimentales y bajo los mismos criterios analíticos. No obstante se observan ciertos lineamientos a seguir para evaluar una prueba de jarras.

- Características de los flóculos

El tamaño y la uniformidad de los flóculos es un buen criterio de evaluación. Una jarra con flóculos grandes y uniformes debe evaluarse como mejor sobre una con diferentes tamaños de flóculos. También el tiempo de aparición o formación inicial de flóculos es muy importante, especialmente si se trata de simular plantas con aguas donde la formación de flóculos es lenta y donde el tiempo de mezcla es deficiente. Las observaciones deben caracterizar al floculo: si son voluminosos y de poco peso, si son densos y consistentes, livianos y difuso, apenas puntos o microflóculos, apenas perceptibles, etc.

- Calidad del sobrenadante

La claridad o transparencia es el criterio más importante en la evaluación de una prueba de jarras, ya que es lo que se persigue en la clarificación del agua. Para ello la mayoría de las plantas disponen de turbidímetros o cualquier otro instrumento para determinar, más precisamente que el ojo humano, la claridad del sobrenadante. Cuando el agua cruda es bastante coloreada, el color residual del sobrenadante debe tomarse en cuenta a la hora de evaluar la prueba de jarras. Las observaciones deben girar en torno a si el sobrenadante es totalmente transparente, semiturbio, turbio, coloreado, semicoloreado, con apreciable cantidad de material suspendido (TSS), decantado, semidecantado, etc.

- Sedimentación o velocidad de sedimentación de los flóculos

Se puede tomar el tiempo que toman los flóculos para sedimentar, una vez que se para la agitación en el equipo. No es necesario tener una sedimentación completa para tener una idea de cuales flóculos son más densos, pesados, mas sedimentables y que producto y dosis es la de mejores resultados. Se deben observar parámetros como: sedimentación violenta, rápida, pesada, lenta o casi nula, baja velocidad de sedimentación, etc. Teniendo en cuenta las observaciones en estos tres parámetros se obtiene la conclusión sobre la mejor jarra, mejor combinación de productos, dosis.

2.9.3 Coagulación-floculación

2.9.3.1 Teoría de la coagulación

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, en muchos casos parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño (10^{-6} – 10^{-9} m), lo que conforma una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las

partículas. Por tanto tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico.

Para separar las partículas coloidales suspendidas en el agua es necesario un cambio de estado que permita que se aglomeren y formen corpúsculos de mayor tamaño, decantándose por peso en condiciones de velocidad satisfactorias. Por lo tanto, la suspensión debe desestabilizarse por medio de dos acciones diferentes; una desestabilización efectuada por la adición de productos químicos que, por medio de mecanismos de agregación y de adsorción, anulan las fuerzas repulsivas o actúan sobre la hidrofilia de las partículas coloidales, llamada coagulación; y una aglomeración de los coloides "descargados", que resulta de diversas fuerzas de atracción entre partículas puestas en contacto, primero por movimiento browniano y después por agitación mecánica exterior, que origina partículas de suficiente tamaño (flóculos), llamada floculación.

La coagulación es, por definición, el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales que se consigue al neutralizar sus cargas eléctricas negativas, al punto donde sus cargas de superficie no son tan fuertes como para prevenir su colisión. Consiste en introducir en el agua un producto tal como iones de Al^{+3} , Fe^{+3} , o polímeros catiónicos, capaces de neutralizar las cargas electronegativas del coloide en el agua y formar un aglomerado fácil de sedimentar (CEPIS & LENNTECH, 2007).

2.9.3.2 Factores que afectan la coagulación

Existen tres factores que influyen sobre la intensidad de la mezcla y la duración del tiempo de aplicación del producto (el movimiento browniano es más dependiente del tiempo y la temperatura):

- Tasa de distribución de iones (adición de coagulantes).
- Tasa de adsorción (o incorporación del coagulante).
- Tasa de colisión de estas partículas de carga reducida para formar flóculos iniciadores de la coagulación.

Los gradientes de velocidad son usados normalmente como un diseño de medición de intensidad de la mezcla (a mayor gradiente, es más intensa la mezcla). El tiempo de aplicación de la mezcla rápida depende de la clase del coagulante. Por ejemplo, los polímeros se distribuyen más lentamente que los iones metálicos debido a su mayor molécula, por lo tanto requerirán mayor tiempo o mayor gradiente de velocidad que los coagulantes metálicos hidrolizantes. La tasa de colisión en un mezclador rápido o en una sección de mezcla lenta de un floculador, es una función del gradiente de la intensidad de mezcla. Es también, una función del número de partículas en el agua y del volumen de las partículas en suspensión (LIPESA, 1989).

2.9.3.3 Teoría de Schulze-Hardy.

En los últimos años del siglo XIX se establecieron las leyes de la coagulación, que muestran que la acción coagulante es función de la valencia del ion que posee una carga opuesta a la de las partículas. La coagulación se efectúa tanto mejor, cuanto mayor es

esta valencia. Esta teoría explica, es parte, porque las sales de hierro y aluminio trivalentes han sido y continúan siendo las más utilizadas. Sin embargo, estos coagulantes, debido a la hidrólisis que experimentan, modifican las características físico-químicas del agua (pH, conductividad), creando el inconveniente de tener que usar productos alcalinos para acondicionarla.

La acción coagulante de estas sales es el resultado de la hidrólisis que sigue a su disolución, sin llevar inmediatamente a la formación del hidróxido $\text{Al}(\text{OH})_3$. Los compuestos intermedios del aluminio, complejos hidróxidos-aluminosos, no solo neutralizan a los coloides, sino que pueden polimerizarse creando puentes entre los coloides, cebando el proceso de floculación.

El pH desempeña un papel muy importante en el estudio de los fenómenos de coagulación-floculación, es así como una parte de la carga de las partículas coloidales que han adsorbido iones OH^- , queda destruida por un aumento de la concentración de iones H^+ , lo que ocasiona una disminución de la estabilidad de la suspensión coloidal. Preferiblemente, el pH debe quedar dentro de la zona correspondiente al mínimo de la solubilidad de los iones metálicos del coagulante usado. Para las sales de aluminio, el mínimo de iones Al^{3+} permanece en solución a un pH entre 6-7,4; fuera de este rango, y según la mineralización del agua, existe el riesgo de volver a encontrar en solución una proporción más o menos fuerte de aluminio. Para las sales de hierro la zona de pH es mucho más amplia, alcanzándose el mínimo de solubilidad $\text{pH} > 5$.

La temperatura del agua también influye enormemente en la efectividad de la coagulación y la velocidad de formación del floculo. Conforme disminuye la temperatura el agua debe aumentarse la dosis de productos químicos usados para coagular, a objeto de lograr o asegurar la formación de flóculos adecuados. El efecto desfavorable de la baja de temperatura, sobre la formación del floculo, puede disminuirse mediante un diseño adecuado del equipo con respecto a un mezclado eficiente previo a una floculación apropiada (LIPESA, 1989).

2.9.3.4 Practica de la coagulación

Como el principal objetivo de la coagulación es la neutralización de los coloides, es conveniente que el producto utilizado se difunda con la mayor rapidez posible. En efecto, el tiempo de coagulación es extraordinariamente breve (menos de un segundo) y la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar (por ejemplo como $\text{Al}(\text{OH})_3$).

Para la mezcla de los productos se utiliza a veces únicamente la turbulencia creada por un vertedero, o la línea de agua de entrada, pero conviene disponer de un mezclador rápido o coagulador que sea capaz de crear un gradiente de velocidad entre 100 y 1000 revoluciones por segundo. A continuación se mencionan los coagulantes más usados y sus reacciones más importantes.

- Sales de aluminio

Sulfato de aluminio comercial

Sulfato de aluminio + cal

Sulfato de aluminio + carbonato de sodio (soda ash)

- Sales de hierro

Sulfato férrico comercial

Sulfato férrico + cal

También existen otros coagulantes menos usados como: cloruro de aluminio (AlCl_3), sulfato de aluminio + soda caustica (NaOH), polímero del aluminio, cloruro férrico (FeCl_3), cloruro férrico + cal, sulfato ferroso (FeSO_4), sulfato ferroso + cal, sulfato ferroso + cloro, cloruro férrico + aluminato de sodio, sulfato cúprico (CuSO_4), sulfato cúprico + cal, ozono (LIPESA, 1989).

2.9.3.5 Teoría de la floculación

En la coagulación, dosis fuertes de coagulantes producen un exceso de fangos que generalmente crean problemas. Por otro lado, no se consigue siempre un precipitado que posea las características deseadas para una buena separación. Por estas razones se ha recomendado el uso de floculantes (ayudantes de la floculación). Al comienzo se utilizaron productos naturales minerales (sílice activada), luego orgánicos (almidones, alginatos, etc.), y más tarde productos sintéticos denominados polielectrolitos (mayor masa molecular). La floculación es, por definición, la aglomeración de varios flóculos, mediante agitación suave, para formar partículas de mayor tamaño (aglomerados) con mayores velocidades de decantación. La agitación debe ser cuidadosamente controlada para impedir la desintegración de los flóculos frágiles ya formados (LIPESA, 1989).

2.9.3.6 Mecanismos de la floculación

La floculación ocurre por tres procesos físico-químicos básicos, cuando es añadido un floculante: fuerzas de Van der Waals, que es la atracción gravitacional entre la masa de una partícula y la masa de otra, causando su unión cuando ellas se acercan; el atrapamiento de las partículas en un floculo naciente y la adsorción química, que es la formación de puentes químicos entre las moléculas.

2.9.3.7 Tasa de floculación

La velocidad de floculación es dependiente de la frecuencia de colisión (número de contactos por unidad de volumen por segundo) y de la eficiencia de la colisión (número de colisiones que resultan en la formación de un flóculo). El coagulante aplicado da lugar a la formación del aglomerado, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y especialmente su cohesión. Así se favorecerá el engrosamiento del flóculo por medio de: una coagulación previa (pre-coagulación), tan perfecta como sea posible, aumento de la cantidad del flóculo en el agua; conviene poner el agua en contacto con los precipitados ya formados por el tratamiento anterior (recirculación de lodos) tratando de conseguir la mayor concentración posible, una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula-floculo y el empleo de un floculante adecuado.

2.9.3.8 Practica de la floculación

La floculación debe realizarse con agitación lenta durante 5 minutos o más en tratamiento de aguas residuales. Esta agitación lenta tiene lugar en un floculador separado, o en interior del decantador (sedimentador) propiamente dicho. La elección del tipo de mezclador y floculador está en estrecha relación con la elección del procedimiento de separación utilizado. La floculación se efectúa en depósitos provistos de sistemas de agitación que giran con relativa lentitud para no romper los flóculos ya formados, pero con una velocidad suficiente para lograr el engrosamiento progresivo del floculo e impedir que sedimenten en el fondo del depósito.

El volumen de la cuba de floculación debe ser el necesario para conseguir el tiempo de floculación determinado en los ensayos previos ("jar test"). El sistema de agitación puede consistir de hélices o palas fijas sobre un eje rotatorio, vertical u horizontal, donde es conveniente obtener un gradiente de velocidad entre 20-50 revoluciones por segundo. Es de suma importancia que no se rompa el floculo al pasar del floculador a la zona de sedimentación, por lo tanto las velocidades de paso del floculo deben limitarse y controlarse, según la calidad del agua tratada, a los valores siguientes:

- Flóculo de hidróxido metálico frágil, $v=0,20$ m/s
- Flóculo de hidróxido metálico resistente, $v=0,50$ m/s
- Flóculo de aguas residuales, $v=1$ m/s

La temperatura, usualmente incontrolada, afecta la eficiencia de la floculación. El agua a más baja temperatura tiene una menor energía cinética y una mayor viscosidad. Una mayor viscosidad del agua también afectará la velocidad de sedimentación de acuerdo a las leyes de Stokes. Por estas razones, las temperaturas del agua fría pueden causar un incremento en la demanda química, que es la cantidad requerida de químicos para producir una calidad de agua deseada. A continuación se presentan los floculantes más usados en el proceso de aglomeración.

- Sílice activada
- Arcillas
- Polímeros orgánicos

Los polímeros orgánicos se dividen en dos grupos: naturales, que lo conforman principalmente almidones (polisacáridos) extraídos de granos vegetales, que no tienen un peso molecular tan alto, otros floculantes naturales son los alginatos, extraídos de algas y usados junto con las sales férricas, derivados de la celulosa; y los polímeros orgánicos sintéticos que se caracterizan por su alto peso molecular, favoreciendo así la aglomeración de los flóculos a través de puentes, pueden ser iónicos (catiónicos y aniónicos) y no-iónicos. Un polímero es simplemente una macromolécula larga que tiene una unidad simple repetida (monómero), algunas de las cuales poseen cargas eléctricas o grupos ionizables. Según el carácter iónico de su grupo activo, los polímeros sintéticos llamados polielectrolitos comprenden polímeros no iónicos, polímeros aniónicos y polímeros catiónicos:

El mayor beneficio obtenido con los floculantes poliméricos es un mayor incremento en el tamaño del floculo, resultando en una más rápida sedimentación. Estos productos

funcionan primariamente como floculantes de alto peso molecular, originando más eficientes y efectivos mecanismo de puentes. Esto contrasta con los polielectrolitos catiónicos de menor peso molecular, los cuales funcionan como coagulantes primarios (neutralización). Los floculantes no funcionan positivamente como coagulantes primarios excepto donde su carga es de menor orden.

La dosis de polímeros floculantes para clarificación de aguas es normalmente muy bajo, en el rango de 0,05-2,0 ppm; para control de la contaminación 1-10 ppm. Con el desarrollo de macromoléculas relativamente ligeras y muy cargadas, el campo de uso de los polielectrolitos se ha extendido a la coagulación, en ciertos casos favorables. No hay una regla que permita deducir de antemano cual de los floculantes y en que dosis dará mejores resultados, por lo que siempre es recomendable efectuar ensayos de laboratorio ("jar test"). Asimismo, es importante determinar el punto de aplicación, el orden y el tiempo que debe transcurrir entre la dosificación del coagulante y el floculante (LIPESA, 1989).

2.9.4 Filtración

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0,15 y 0,3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento para agua potable, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación).

En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de tierra de diatomeas. También es habitual, para mejorar la eficacia, realizar una coagulación-floculación previa. Hay muchas maneras de clasificar los sistemas de filtración: Por gravedad o a presión, lenta o rápida, de torta o en profundidad (MADRIDMASD, 2005).

2.9.4.1 Filtración por gravedad

El agua circula verticalmente y en descenso a través del filtro por simple gravedad. Dentro de este tipo, podemos hablar de dos formas de operar, que lleva a tener una filtración lenta, apenas utilizados actualmente, o una filtración rápida. El mecanismo de la separación de sólidos es una combinación de asentamiento, retención, adhesión y atracción, por lo que se eliminan partículas mucho menores que el espacio intersticial. Es un sistema muy utilizado en tratamiento para aguas potables.

2.9.4.2 Filtración por presión

Normalmente están contenidos en recipientes y el agua se ve forzada a atravesar el medio filtrante sometida a presión. También en este caso puede haber filtración lenta, en la que en la superficie del filtro se desarrolla una torta filtrante donde la filtración, a través de esa superficie, es por mecanismos físicos y biológicos. Por otro lado, en la filtración

rápida se habla de filtración en profundidad, es decir, cuando la mayor parte de espesor de medio filtrante está activo para el proceso de filtración y la calidad del filtrado mejora con la profundidad. Esta filtración a presión se suele utilizar más en aguas industriales. En la actualidad y en algunas de sus aplicaciones, estos métodos están siendo desplazados por operaciones con membranas, especialmente por microfiltración.

2.9.5 Flotación

Operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmiscible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a “flotar” más rápidamente estas gotas, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua (MADRIDMASD, 2005).

En esta operación hay un parámetro importante a la hora del diseño: La relación aire/sólidos, ml/l de aire liberados en el sistema por cada mg/l de concentración de sólidos en suspensión contenidos en el agua a tratar. Es un dato a determinar experimentalmente y suele tener un valor óptimo comprendido entre 0,005 y 0,06.

En el tratamiento de aguas se utiliza aire como agente de flotación, y en función de cómo se introduzca en el líquido, se tienen dos sistemas de flotación:

2.9.5.1 Flotación por aire disuelto (DAF)

En este sistema el aire se introduce en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas. Los elementos principales de estos equipos son la bomba de presurización, el equipo de inyección de aire, el tanque de retención o saturador y la unidad de flotación propiamente dicha, donde tiene lugar la reducción brusca de la presión, por lo que el aire disuelto se libera, formando multitud de microburbujas de aire.

2.9.5.2 Flotación por aire inducido

La operación es similar al caso anterior, pero la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, normalmente situados en la parte inferior del equipo de flotación, o bien inducidas por rotores o agitadores. En este caso el tamaño de las burbujas inducidas es mayor que en el caso anterior.

Históricamente la flotación se ha utilizado para separar la materia sólida o líquida flotante, es decir, con una menor densidad que el agua. Sin embargo la mejora en la generación de burbujas adecuadas y la utilización de reactivos para favorecer la operación (por ejemplo sustancias que disminuyen la tensión superficial) ha hecho posible la utilización de esta operación para la eliminación de materia más densa que el agua.

Así se utiliza en el tratamiento de aguas procedentes de refinerías, industria de la alimentación, pinturas, etc. Una típica aplicación es también, aunque no sea

estrictamente tratamiento de aguas, el espesado de fangos. En esta operación se trata de “espesar” o concentrar los fangos obtenidos en operaciones como la sedimentación.

2.10 Torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento tienen como finalidad enfriar una corriente de agua por vaporización parcial de ésta con el consiguiente intercambio de calor sensible y latente de una corriente de aire seco y frío que circula por el mismo aparato. Las torres pueden ser de muchos tipos, sin embargo el enfoque se centra en un equipo de costo inicial bajo y de costo de operación también reducido. Con frecuencia la armazón y el empaque interno son de madera. Generalmente el entablado de los costados de la torre es de pino, poliéster reforzado con vidrio, o cemento de asbesto. Pueden empacarse con empaques plásticos. El empaque de plástico puede ser polipropileno, moldeado en forma de enrejado o alguna otra forma. El espacio vacío es muy grande, generalmente mayor del 90% con el fin de que la caída de presión del gas sea lo más baja posible.

Las torres de enfriamiento son equipos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes porque, son el medio más económico para hacerlo, si se compara con otros equipos de enfriamiento como los cambiadores de calor donde el enfriamiento ocurre a través de una pared. En el interior de las torres se monta un empaque con el propósito de aumentar la superficie de contacto entre el agua caliente y el aire que la enfría. En las torres se colocan deflectores o eliminadores de niebla que atrapan las gotas de agua que fluyen con la corriente de aire hacia la salida de la torre, con el objeto de disminuir la posible pérdida de agua.

El agua se introduce por el domo de la torre por medio de vertederos o por boquillas para distribuir el agua en la mayor superficie posible. El enfriamiento ocurre cuando el agua, al caer a través de la torre, se pone en contacto directo con una corriente de aire que fluye a contracorriente o a flujo cruzado, con una temperatura de bulbo húmedo inferior a la temperatura del agua caliente, en estas condiciones, el agua se enfría por transferencia de masa (evaporación) y por transferencia de calor sensible y latente del agua al aire, lo anterior origina que la temperatura del aire y su humedad aumenten y que la temperatura del agua descienda; la temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada de la torre (Lárez, 2010).

2.10.1 Mecanismo de la evaporación

En la superficie del agua que está en contacto con aire no saturado sucede lo siguiente:

- Inicialmente el agua toma calor de sí misma para evaporarse y así se crea un gradiente de temperatura entre el seno del agua y la superficie de contacto.
- El aire recibe humedad (vapor) y por lo tanto energía en forma de calor latente de vaporización
- Después el aire le proporciona energía al agua, la que se evapora cada vez más a expensas de la energía del aire que de sí misma

2.10.2 Variables que influyen en la evaporación

En la superficie de contacto agua - aire el calor total que gana el aire (Q) está dado por la relación: $Q = A h \Delta T$. Con la que se deduce que la evaporación depende de las propiedades del sistema.

Presión total, La evaporación es más rápida a bajas presiones ó en el vacío y más lenta a presiones altas. Área de contacto (A), La masa de agua evaporada es proporcional a la superficie en la cual se efectúa la evaporación. Coeficiente de transferencia de calor (h), el cual depende entre otras variables, de la velocidad del aire. La evaporación se acelera a mayor velocidad de las corrientes de aire, el viento desplaza las capas de aire sobre la superficie de evaporación y arrastra consigo la humedad. Diferencia de temperatura (ΔT) entre el agua y el aire.

2.10.3 Tipos de torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento se clasifican según la forma de suministro de aire en:

Torres de circulación natural

- Atmosféricas
- Tiro natural

Torres de tiro mecánico

- Tiro inducido
- Tiro forzado

Otros tipos: Torres de flujo cruzado

2.10.3.1 Torres de circulación natural

Las torres de circulación natural atmosféricas el movimiento del aire depende del viento y del efecto aspirante de las boquillas aspersoras, se usan en pequeñas instalaciones y depende de los vientos predominantes para el movimiento del aire. Las torres de tiro natural, el flujo de aire necesario se obtiene como resultado de la diferencia de densidades, entre el aire más frío del exterior y húmedo del interior de la torre. Utilizan chimeneas de gran altura para lograr el tiro deseado, debido al inmenso tamaño de estas torres (500 pie alto y 400 pie de diámetro), se utilizan por lo general para flujos de agua por encima de 200.000 gpm y son ampliamente utilizadas en las centrales térmicas.

2.10.3.2 Torres de tiro mecánico

El agua caliente que llega a la torre puede distribuirse por boquillas aspersoras o compartimientos que dejan pasar hacia abajo el flujo de agua a través de unos orificios. El aire usado para enfriar el agua caliente es extraído de la torre, en cualquiera de las dos formas siguientes: las de tiro inducido el aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre y son las más utilizadas. Las de tiro forzado, el aire se fuerza por un ventilador situado en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior.

Estas torres están sujetas particularmente a la recirculación del aire caliente y húmedo que es descargado, dentro de la toma del ventilador, debido a la baja velocidad de descarga y que materialmente reduce la efectividad de la torre. El tiro inducido con el

ventilador en la parte superior de la torre evita esto y además permite una distribución interna más uniforme del aire (figura 2.3).

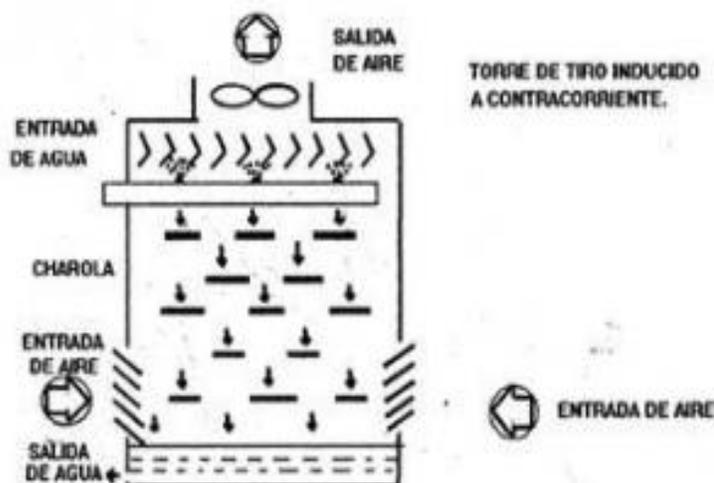


Figura 2.3. Sistema de operación de una torre de enfriamiento de tiro mecánico inducido a contracorriente (Lárez, 2010).

2.10.3.3 Torres de flujo cruzado

El aire entra a los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Las corrientes de aire laterales se unen en un pasaje interno y dejan la torre por el tope. Las torres de flujo cruzado requieren más aire y tienen un costo de operación más bajo que las torres a contracorriente.

2.10.4 Componentes de las torres de enfriamiento

- ❖ Equipo mecánico
 - Ventiladores
 - Motores
- ❖ Relleno: distribuido dentro de la torre suministra el área superficial para la transferencia de masa y calor.
- ❖ Eliminadores de desviación
- ❖ Base recolectora del agua fría. El agua fría es recogida por la base del fondo
- ❖ Desviadores del flujo de aire
- ❖ Cubierta de redistribución

La eficiencia global de una torre de enfriamiento esta directamente relacionada con el diseño del sistema de distribución de agua caliente. La consideración principal en la selección del tipo de sistema de distribución de agua para una aplicación específica es la cabeza a vencer por la bomba. La cabeza de la bomba impuesta por una torre de enfriamiento consiste de la altura estática (relativa a la altura desde la entrada, más la presión necesaria para mover el agua a través del sistema de distribución y sobre el relleno (Lárez, 2010).

2.10.5 Sistema de distribución de agua

Torres contracorriente: utilizan un sistema de distribución de spray a alta presión para lograr cubrir todo el relleno de la torre. El patrón de spray de las boquillas es sensible a los cambios en el flujo de agua, y a los cambios en la presión de las boquillas. Las torres a contracorriente tienen un área de presión menor que las de flujo cruzado pero requieren altura adicional, altura estática y cabeza dinámica para alcanzar el mismo efecto de enfriamiento.

Las torres a flujo cruzado utilizan un sistema de distribución diferente. El agua caliente es distribuida a través de los empaques por gravedad a través de unos pequeños orificios ubicados en el piso de la base de entrada. Tal sistema no es un sistema de distribución en spray. El aire se mueve horizontalmente a través del empaque y se cruza con el agua que cae. En las torres de flujo cruzado el componente de presión interna de la cabeza de bombeo es insignificante debido a que el flujo es principalmente por gravedad. Comparadas a las torres de flujo cruzado las contracorriente pueden requerir de 5 a 6 psig adicionales de cabeza para alcanzar una distribución adecuada del spray. Esta elevada cabeza de bombeo conduce a mayores costos iniciales y anuales por consumo de energía de las bombas.

2.10.6 Sistema de distribución de aire

En las torres contracorriente la resistencia al flujo ascendente del aire por parte de las gotas que caen resulta en una elevada pérdida de presión estática y una mayor potencia del ventilador que en flujo cruzado. Las torres a flujo cruzado contienen una configuración del relleno a través de la cual el aire se mueve horizontalmente a través del agua que cae. Las torres de flujo cruzado utilizan esencialmente toda la altura de la torre para las rejillas de ventilación, reduciendo la velocidad de entrada del air, y minimizando la recirculación y pérdida de tiro (Lárez, 2010).

2.11 Diseño conceptual de trabajos de grado

El diseño conceptual trata de capitalizar los recursos disponibles para desarrollar una idea, la cual llevada a cabo servirá para satisfacer una necesidad. Las ideas surgen de acuerdo a la escasez de un bien o producto en específico, sin tomar en consideración su tamaño o dimensiones. Lo que caracteriza este diseño, es la ventaja que tiene de presentar un abanico de opciones en cuanto a las diferentes maneras que podrá ejecutar dichas ideas, ajustándose claro está a las herramientas y recursos disponibles para desarrollar las mismas. Luego de ser ejecutada físicamente la idea general se podrán hacer modificaciones leves o moderadas, pero manteniendo siempre la idea inicial.

2.12 Recuperación de los sólidos y la importancia de su reutilización

Durante el proceso de producción de las industrias se generan una serie de residuos y/o contaminantes que son arrastrados por el agua cuando esta cumple su función dentro del proceso de fabricación, por lo que es necesario aplicar un tratamiento para retirar dichos sólidos y recuperar las condiciones fisicoquímicas del agua. El tratamiento dentro de la planta es continuo, por lo que se debe disponer de un sistema recolector de

residuos dentro de las diferentes unidades donde ocurre el proceso de separación de las partículas sólidas.

Luego de retirado los residuos estos deben ser dispuestos de forma adecuada para cumplir con las normas establecidas y minimizar el impacto ambiental que podrían ocasionar. El reúso de los sólidos varía de acuerdo a la naturaleza del proceso que se lleva a cabo en las distintas industrias y de acuerdo a las características que estos presentan. La reutilización de los sólidos recuperados durante el tratamiento del agua produce un aumento en los ingresos de la fábrica generadora de dichos residuos así como permite cumplir con las leyes ambientales.

2.13 Análisis de Costos

En el diseño conceptual se deben contemplar varias opciones para comparar y establecer cual cumple en mayor proporción con los requerimientos de la empresa. En el caso de este proyecto las alternativas propuestas son para la planta de tratamiento de agua proveniente de la fabricación de tubos sin costura. Sin embargo, estas opciones deben considerar las implicaciones económicas que tendrían que realizarse para ser ejecutadas.

Este análisis debe incluir costos de adquisición e instalación de cada uno de los equipos implicados dentro de cada alternativa, inversión de obras civiles que incluyen ubicación de los equipos y estructuras físicas y el costo de las sustancias químicas a emplear para acelerar y optimizar el proceso de tratamiento que incluirá separación de los residuos sólidos y recuperación de la calidad inicial del agua.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Definición del caudal estimado de agua a tratar para la máxima producción de la planta

La planta de tubos sin costura demandará un considerado volumen de agua, puesto que la misma se empleará para realizar el proceso de “descamado” y enfriamiento de los equipos, y que por medio del canal de drenaje llegará a la planta de tratamiento donde se realizarán las operaciones fisicoquímicas correspondientes para la recuperación de sus valores iniciales. De manera general el consumo de agua de la planta para la producción de tubos sin costura se divide en dos sistemas.

3.1.1 Sistema indirecto

En el sistema de enfriamiento indirecto, como su nombre lo indica, el agua no tendrá contacto ni con el producto ni con las piezas físicas de los equipos, manteniéndose dentro de tuberías y serpentines intercambiadores de calor; por lo que solamente se incrementará la temperatura, siendo necesario enfriarla para que pueda cumplir su función nuevamente. En este sistema las condiciones de temperatura de entrada, temperatura de salida y presión, se mantienen constantes, cuyos valores son 35,0°C, 40,0°C y 4,0 bar respectivamente, variando el caudal.

Para el estimado del caudal de las de enfriamiento indirecto encontramos el sistema de lubricación (tabla 3.1), cuya función es disminuir la fricción entre las piezas que conforman cada equipo generándose así un incremento en la temperatura de los mismos, para mantener un rango de temperatura seguro tanto para los equipos como los operadores de la planta se necesita la transferencia de calor indirecta por medio de agua empleando tuberías internas dentro de los equipos; en este sistema se encuentran cinco (5) estaciones representadas por la letra “L” seguidas del número que indica el punto de lubricación específico definido por el caudal de agua que consume.

Tabla 3.1 Caudal estimado en el enfriamiento indirecto para el sistema de lubricación, empleado en la fabricación de tubos sin costura

Sistema de lubricación	Estación	Caudal (m ³ /h)
	L1	25,0
	L2	20,0
	L3	20,0
	L4	15,0
	L5	20,0

Para iniciar el proceso de laminación de tubos, los equipos deben accionarse mediante un sistema hidráulico, este sistema emplea un líquido incompresible lo cual permite que los equipos entren en funcionamiento; durante su accionar las partes hidráulicas de los equipos experimentarán un incremento de temperatura así como ocurrirá en el sistema de lubricación, por ello la necesidad de enfriar dichas partes con agua de manera indirecta, los puntos de enfriamiento en el sistema hidráulicos están representados por la letra "H" seguida del número que indica la estación correspondiente definido por su caudal de consumo (tabla 3.2).

Tabla 3.2 Caudal estimado en el enfriamiento indirecto para el sistema hidráulico, empleado en la fabricación de tubos sin costura

	Estación	Caudal (m ³ /h)
Sistema hidráulico	H1	25,0
	H2	50,0
	H3	25,0

Por último, dentro del sistema de enfriamiento indirecto encontramos los rodillos del horno de solera giratorio (HSG), que son las guías donde van dispuestas las barras cilíndricas calentadas y son los encargados de llevar las mismas al laminador-perforador-alargador, así como de los rodillos del horno de recalentamiento de tubos (HRT), los cuales trasladan al tubo hasta el laminador-reductor-estirador luego de su salida del horno, estos rodillos cuentan con serpentines internos donde el agua podrá realizar la transferencia de calor y así mantener la temperatura alrededor de los 35°C (tabla 3.3).

Tabla 3.3 Caudal estimado en el enfriamiento indirecto de rodillos y estación hidráulica para el HSG y el HRT

Equipo	Caudal (m ³ /h)
Rodillos horno de solera giratorio	120,0
Rodillos horno recalentamiento de tubos	15,0
Estación hidráulica para HSG y HRT	15,0

El consumo de agua de cada sistema varía de acuerdo a los requerimientos de los equipos y a las especificaciones del fabricante, y las que se muestran en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 son las necesarias para la máxima producción dentro de la planta. El agua empleada en el sistema indirecto se mantiene dentro de tuberías y serpentines y luego de realizado el proceso de transferencia de calor es bombeada hasta los equipos (torres

de enfriamiento) donde será enfriada y posteriormente almacenada en tanques de agua fría; seguidamente a través de bombas será nuevamente transferida a los equipos que conforman el sistema indirecto.

3.1.2 Sistema directo

El sistema de enfriamiento directo, comprende el contacto entre el agua y los equipos, aquí se alteran las propiedades del agua debido a los contaminantes y/o residuos que se generan por la fricción de los componentes internos de los mismos y a los que se encuentran en la superficie de los tubos y que serán arrastrados por el agua cuando realice el proceso de descamado. La temperatura de entrada y la de salida de los equipos se mantienen constantes siendo sus valores 35,0°C y 45,0°C, respectivamente; según las especificaciones del fabricante (Danielli, C.A).

El agua que se encuentra en los tanques de almacenamiento (tanques de agua fría) es bombeada hasta la tubería de distribución, la cual se divide en tres líneas, cada línea mantiene una presión distinta; siendo sus valores 200,0 bar, 4,0 bar y 12,0 bar respectivamente, ésto debido a que los equipos varían en cuanto a la presión de alimentación que cada uno requiere, como es el caso del descamador, el cual es un proceso de inyección de agua a alta presión (tabla 3.4), para eliminar todas las partículas solidas que se originan durante la fabricación del tubo.

Tabla 3.4 Caudal estimado para los equipos en la línea de alimentación con presión de 200,0 bar.

Equipo	Caudal (m ³ /h)
Descamador	100,0

En este sistema de enfriamiento directo se presenta la situación de que algunos equipos demandan alimentación de dos (2) líneas diferentes, esto debido a que requieren un enfriamiento previo a una determinada presión antes de ser accionados, así como de un enfriamiento posterior a una presión distinta por las elevadas temperaturas que alcanzarán luego de terminado su funcionamiento (tabla 3.5 y 3.6)

Tabla 3.5 Caudal estimado para equipos en la línea de alimentación con presión de 12,0 bar.

Equipo	Caudal (m ³ /h)
Perforador	84,0
Laminador continuo	72,0
Mandril	324,0

Tabla 3.6 Caudal estimado para equipos en la línea de alimentación con presión de 4,0 bar.

Equipo	Caudal (m ³ /h)
Cajas de sellado HSG	80,0
Perforador	180,0
Laminador	150,0
Extractor	15,0
Laminador-Reductor-Estirador	110,0
Enfriamiento mandril	984,0
Lavado y Lubricación	7,0
Flushing	400,0

En este sistema ocurren pérdidas por evaporación, ya que el recorrido del agua por la planta de tratamiento será a cielo abierto, por lo que hay que considerar un sistema de agua de reintegro que se encargará de reponer el agua necesaria para mantener el nivel mínimo establecido dentro de los tanques de almacenamiento (tanques de agua fría). Toda el agua empleada en el proceso de enfriamiento directo cae en un canal de drenaje, y por gravedad es conducida hasta la fosa de escamas, lugar donde comenzará el proceso de pre-tratamiento.

En la tabla 3.7 se muestran los caudales totales de cada sistema de enfriamiento así como el caudal de agua a tratar, el mismo está definido por el agua que se empleará en el sistema de enfriamiento directo, excluyendo el caudal de consumo del flushing (400 m³/h), el cual es un caudal de recirculación constante entre el canal de drenaje, la fosa de escamas y el pozo caliente, esto con la finalidad de mantener lubricado dicho canal para evitar incrustaciones de los contaminantes sólidos.

Tabla 3.7 Estimado de agua del sistema de enfriamiento de la planta de tubos sin costura y caudal de agua a tratar, para la máxima producción.

Sistema de Enfriamiento	Caudal (m ³ /h)
Indirecto	350,0
Directo	2.506,0
Agua a Tratar	2.106,0

El caudal de agua a tratar para alcanzar la máxima producción de la planta lo determinará el total de consumo que realizarán los equipos empleados en el sistema de enfriamiento directo incluyendo el descamador; por lo que las instalaciones que formaran parte de la planta de tratamiento de agua, deberán ser construidas de acuerdo a las condiciones de caudal máximo establecido.

3.2 Identificación de los contaminantes generados durante el proceso de fabricación de tubos sin costura

Cuando las barras cilíndricas son calentadas por medio del Horno de Solera Giratorio (HSG), se extraen por medio de pinzas y son colocadas en la vía de rodillos para su laminación (figura 3.1), el perforador-alargador al momento de realizar su función, convertir la barra en tubo (forado) se generarán una cantidad de virutas y/o cascarillas de acero en la parte interna del tubo, luego el mismo es llevado hasta el laminador continuo donde se generarán cascarillas en la parte externa.

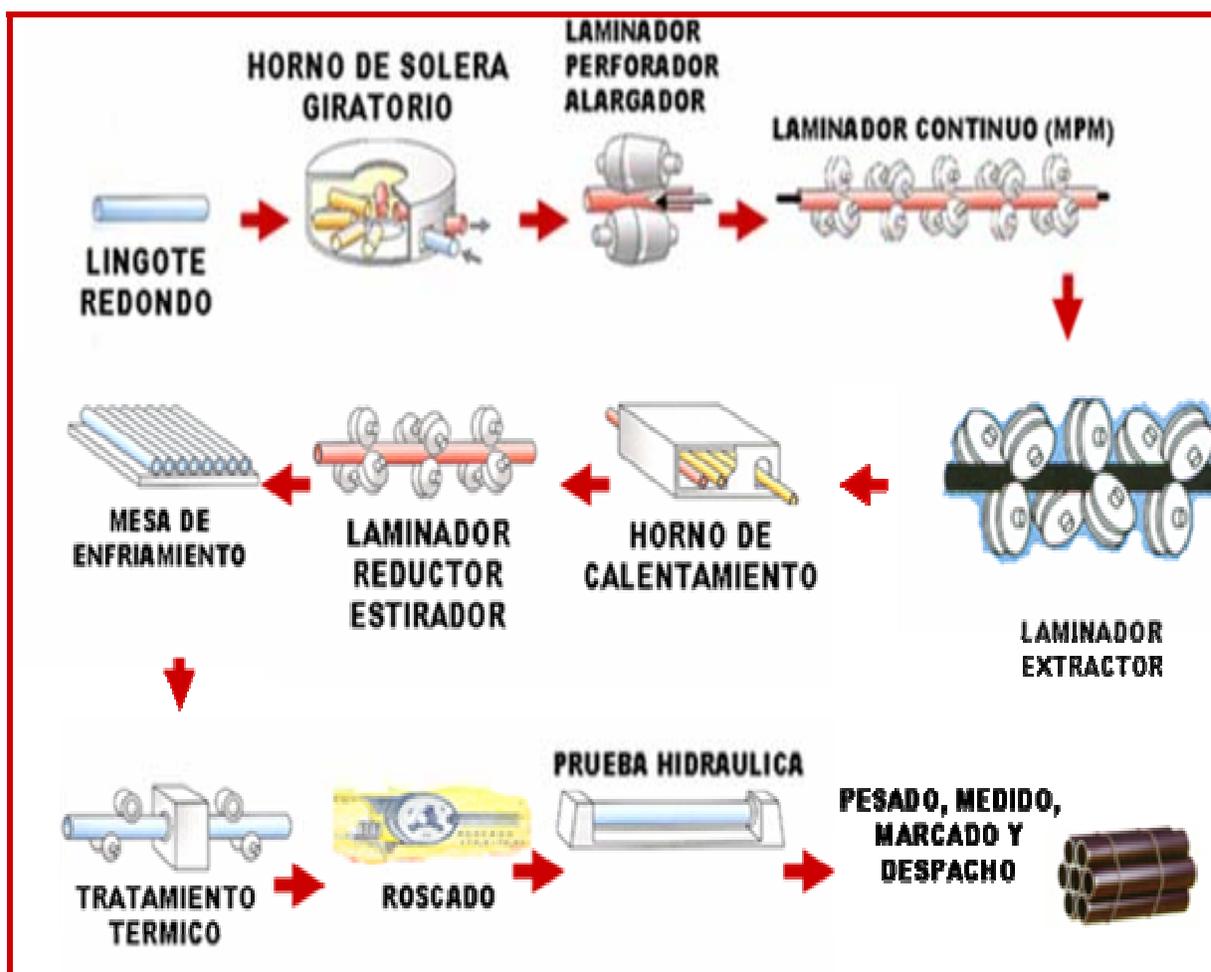


Figura 3.1. Proceso de fabricación de tubos sin costura en la planta laminadora (Cañizales, 2006).

Las virutas o cascarillas generadas deben ser removidas por medio de una corriente de nitrógeno y una corriente de agua (descamado) a determinadas presiones (figura 3.2), con el fin de alcanzar uniformidad en las paredes del tubo, estas cascarillas son arrastradas desde el canal de drenaje hasta la fosa de escamas (Primera unidad de la planta de tratamiento de agua).

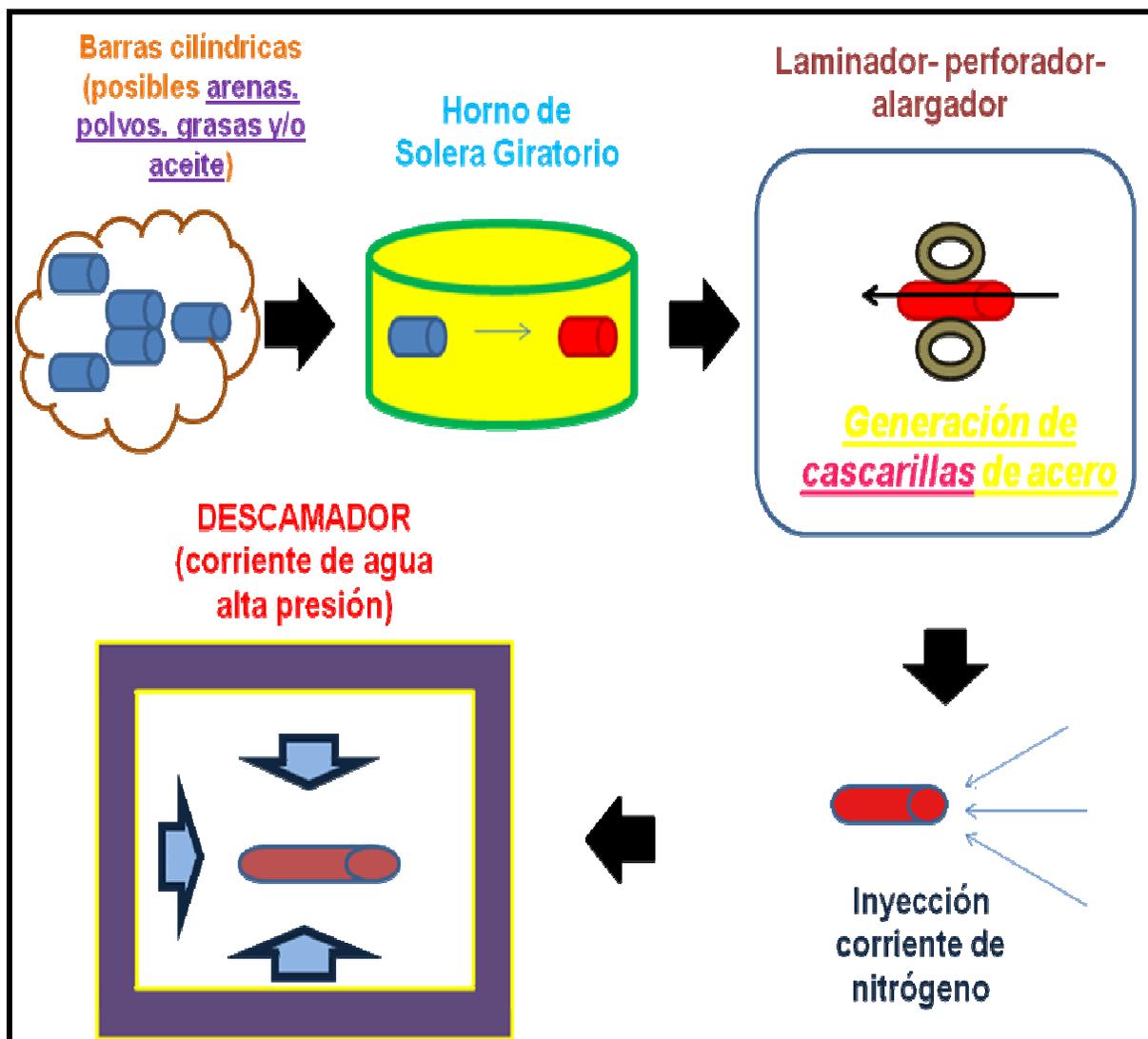


Figura 3.2. Generación de las cascarillas de acero y eliminación de residuos sólidos y líquidos empleando inyección de aire y agua a alta presión (Cañizales, 2006).

Sin embargo, se tomó en consideración que las barras no se encontrarán totalmente limpias antes iniciar el proceso de producción, posiblemente se encuentren en su exterior algunos elementos que podrán convertirse en contaminantes (tabla 3.8), durante la fabricación de los tubos, esto debido a que las barras se encuentran en espacios abiertos y a la intemperie, la acción del viento podrá arrastrar consigo elementos sólidos

que se encuentren cerca, alojándolos en la superficie de las barras así como de posibles sustancias que se emplearán en la planta y puedan por accidente derramarse y contaminar de igual manera el área física de las mismas (véase figura 3.1). Dichos elementos se establecieron de manera teórica por parte de la gerencia del proyecto de tubos.

Tabla 3.8 Posibles contaminantes que se encontrarán en las barras cilíndricas antes de iniciar el proceso de producción.

Fase	Contaminante
Sólidos	Polvos
	Arenillas
Líquidos	Grasas
	Aceites

Tomando en cuenta que los equipos empleados en la fabricación de los tubos, tienen sistemas de lubricación por aceite, existe la factibilidad de contaminar el agua de enfriamiento, en caso de que ocurra un derrame del mismo por parte de algún equipo o sistema. Indicar los contaminantes reales y los posibles agentes que puedan alterar de igual forma las propiedades físico-químicas del agua, se hace con la finalidad de abarcar todas las posibilidades o focos de contaminación que puedan generarse, para poder así establecer que operaciones y procesos son los más idóneos y que permitirán optimizar el tratamiento del agua que se llevará a cabo en la planta para tal fin.

3.3 Establecimiento de las operaciones y procesos unitarios en función del tratamiento del agua

Una vez realizada la descamación y el enfriamiento directo, el agua, cae en un canal y por gravedad se conducirá hasta la fosa de escamas, donde comenzará el proceso de pre-tratamiento; pues es aquí donde el agua se encuentra con mayor grado de contaminación, por lo que se recomendaron en tres (3) alternativas las siguientes operaciones y/o procesos para lograr la mayor eficiencia en el tratamiento de la misma y poder así reutilizarla.

3.3.1 Procesos u operaciones unitarias

El agua del enfriamiento directo y del descamador cae en el canal de drenaje y llega hasta la fosa de escamas, esta fosa comprende la 1era unidad de la planta de tratamiento y aquí se retirarán los sólidos más densos y los líquidos no miscibles presentes en la superficie del agua, la adición de un pre-coagulante será de gran ayuda para acelerar la decantación de las partículas y agilizar la separación de los coloides cuando sean agregadas las otras sustancias químicas (coagulante y floculante).

En esta primera unidad de tratamiento se debe instalar un equipo recolector de líquidos inmiscibles en el agua (aceite y/o grasas) denominado desnatador, así como la construcción de una trampa de aceite entre la fosa de escamas y la segunda unidad de tratamiento, esto con la finalidad de retener todo el contaminante líquido alojado en la superficie del agua.

El agua proveniente del canal de drenaje y que llega a la fosa de escamas traerá consigo una gran turbulencia debido al volumen de agua y a la longitud del canal que se conduce por gravedad, es por ello que se contempló una segunda estación denominada “pozo caliente”, este pozo tiene como función disminuir la turbulencia del caudal de agua, almacenar y distribuir el agua proveniente de la fosa de escamas tanto para el flushing como para las siguientes estaciones. Deberá instalarse un desbaste entre la fosa de escamas y el pozo caliente para retener la mayor cantidad de partículas sólidas. Las alternativas de diseño para la planta de tratamiento que a continuación se presentan deberán incluir estas dos (2) unidades dentro de la opción elegida, sin importar las operaciones y procesos que incluyan dicha alternativa.

3.3.1.1 Alternativa (a)

Por medio de bombas el agua se conducirá desde el pozo caliente hasta la tercera unidad de tratamiento (sedimentador) donde se realizará el proceso de separación de sólidos mediante la coagulación-floculación, y que de acuerdo al volumen de agua a tratar se deben disponer de 2 sedimentadores, lo cual permitiría acelerar el proceso de separación de las partículas sólidas.

Dichos sedimentadores serán piscinas rectangulares de concreto donde se añadirán el coagulante que desestabilizará las partículas y un floculante que permitirá la aglomeración de las mismas, para luego por medio de la gravedad lograr su decantación. Dentro de los sedimentadores se incluye un equipo denominado raspador el cual se encargará de apilar los flóculos que se acumulen en el fondo de los mismos para luego por medio de grúas sean extraídos y almacenados en depósitos (figura 3.1).

El tiempo de decantación estará determinado por la eficacia del coagulante en cuanto a la velocidad y el tiempo que necesite para neutralizar las cargas eléctricas de las partículas así como del floculante que permita aglomerarlas “rápidamente”. Sin embargo, aún no es posible determinar con certeza las sustancias a emplear, en vista de que la planta se encuentra en construcción e imposibilita la realización de pruebas de jarras. Solo se pueden recomendar algunas sustancias que son empleadas en otras industrias con procesos siderúrgicos.

Luego de realizado el proceso de coagulación-floculación, el agua por medio de bombas será enviada a los filtros, que por condiciones y características que presentará el agua, estos deberán ser filtros de presión con antracita y arena como medio filtrante, en esta operación son retenidos los sólidos disueltos; el agua empleada para el retrolavado de los filtros caerá en un canal y por gravedad llegará al sedimentador.

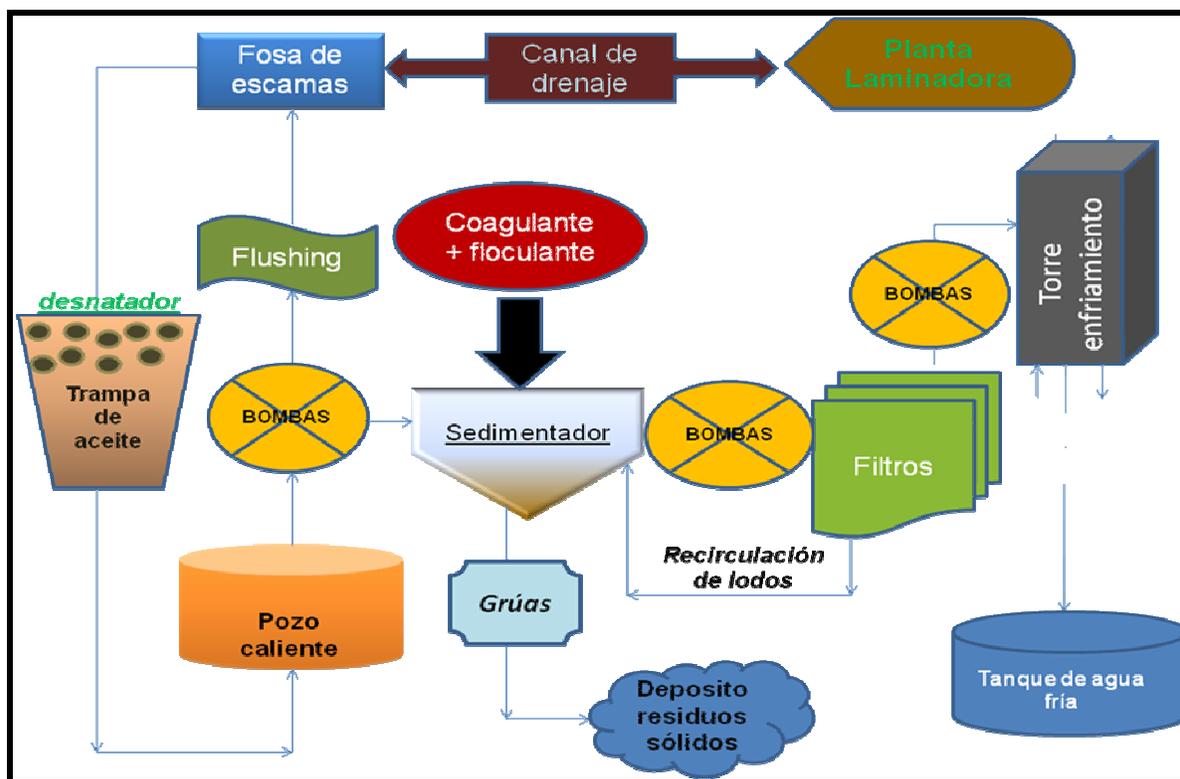


Figura 3.3. Diagrama de flujo de la alternativa (a) para la planta de tratamiento de agua empleada en la fabricación de tubos sin costura.

Seguidamente del proceso de filtración el agua por requerimientos físicos debe ser enfriada para poder ser recirculada dentro de los equipos empleados en la planta de laminación de los tubos, es por ello que se deben utilizar torres de enfriamiento de tiro mecánico inducido, por el gran volumen de agua a enfriar y por el ahorro de energía que caracteriza estas torres, el enfriamiento del agua debe dividirse en al menos 3 torres para agilizar el proceso y evitar que se pueda ver afectada la producción en el caso de presentar falla por parte de alguna de las torres.

Finalmente el agua cae por gravedad en los tanques de almacenamiento que deberán estar ubicado debajo de cada torre, en estos tanques de “agua fría” serán añadidos los agentes químicos correspondientes para recuperar la calidad inicial del agua (pH, bioactividad, inhibidor de corrosión, etc.)

3.3.1.2 Alternativa (b)

Esta propuesta contempla la instalación de un sistema de flotación ya sea por aire inducido (DAF) o aire disuelto en el pozo caliente, el aire a altas presiones que se introduciría en el agua incrementaría la velocidad de las partículas solidas suspendidas y disueltas así como la formación de microburbujas y burbujas las cuales permitirán arrastrar dichos sólidos y hacer “flotar” las emulsiones presentes en el líquido. En esta alternativa, la instalación del desnatador y el sistema de flotación deberán estar ubicados

en la misma unidad, esto con la finalidad de retirar todo el contaminante líquido que flotará por medio de las burbujas formadas (figura 3.2).

Para acelerar el proceso de separación de partículas sólidas presentes en el agua, se deberá añadir un coagulante que permitirá la desestabilización eléctrica de las partículas, aprovechando la presión del aire para incrementar la velocidad de la mezcla. Sin embargo en esta estación no se deberá añadir un floculante puesto que el agua se encuentra permanentemente inyectado por aire a alta presión lo que ocasionaría la ruptura de los microfloculos evitando así la formación de floculos.

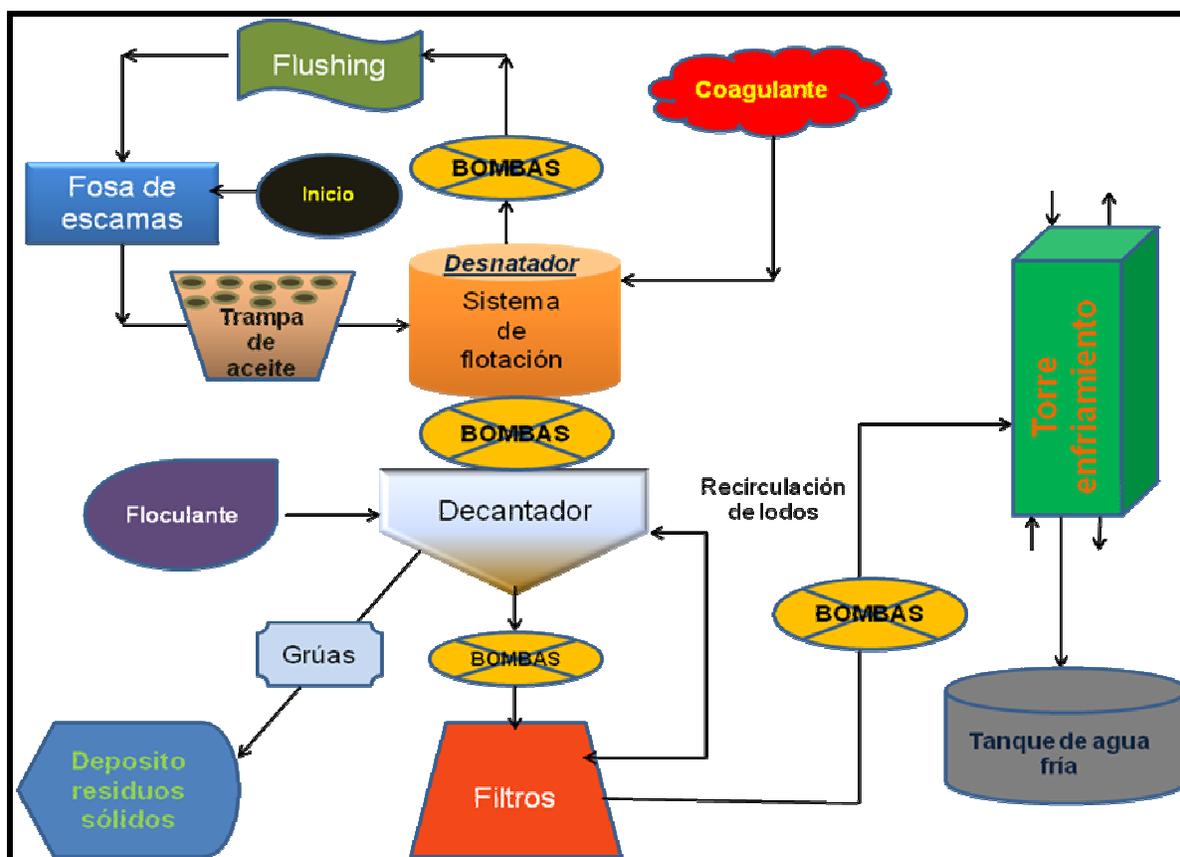


Figura 3.4. Diagrama de flujo alternativa (b) para la planta de tratamiento de agua en la fabricación de tubos sin costura.

Tomando en cuenta esta consideración se hace necesario la construcción de una tercera unidad denominada decantador, que por medio de bombas se llevará el agua desde el pozo caliente hasta el decantador, en esta unidad se añadirá el polielectrolito (floculante) que producirá la aglomeración de los sólidos desestabilizados para posteriormente su decantación.

El retiro de los sólidos presentes en el fondo del decantador se realizará por medio de un equipo denominado “raspador”, el cual mantiene un barrido discontinuo en el fondo de la estructura y permitirá acumular hacia una de las paredes los sólidos que ahí se

depositen y que luego por medio de grúas serán extraídos y llevados al depósito dispuesto para su almacenamiento. Luego de realizado este proceso el agua recibirá el mismo tratamiento posterior que se propuso en la alternativa (a): filtración, enfriamiento por torres y adición de los agentes químicos en los tanques de agua fría.

3.3.1.3 Alternativa (c)

Contempla la instalación de un sistema de desbaste entre del pozo caliente y un decantador, lo cual permitirá retener las partículas suspendidas del agua, este sistema contará con una reja construida con barras metálicas de 6mm o más dispuestas paralelamente y espaciadas entre 1 y 5mm; los sólidos retenidos en la reja serán retirados por medio de rastrillos que se accionan automáticamente de forma mecánica, este sistema permitirá retener las partículas solidas de mayor dimensión provenientes de la fosa de escamas, que luego por medio de grúas los residuos serán retirados de los rastrillos para ser almacenados en un depósito (figura 3.3).

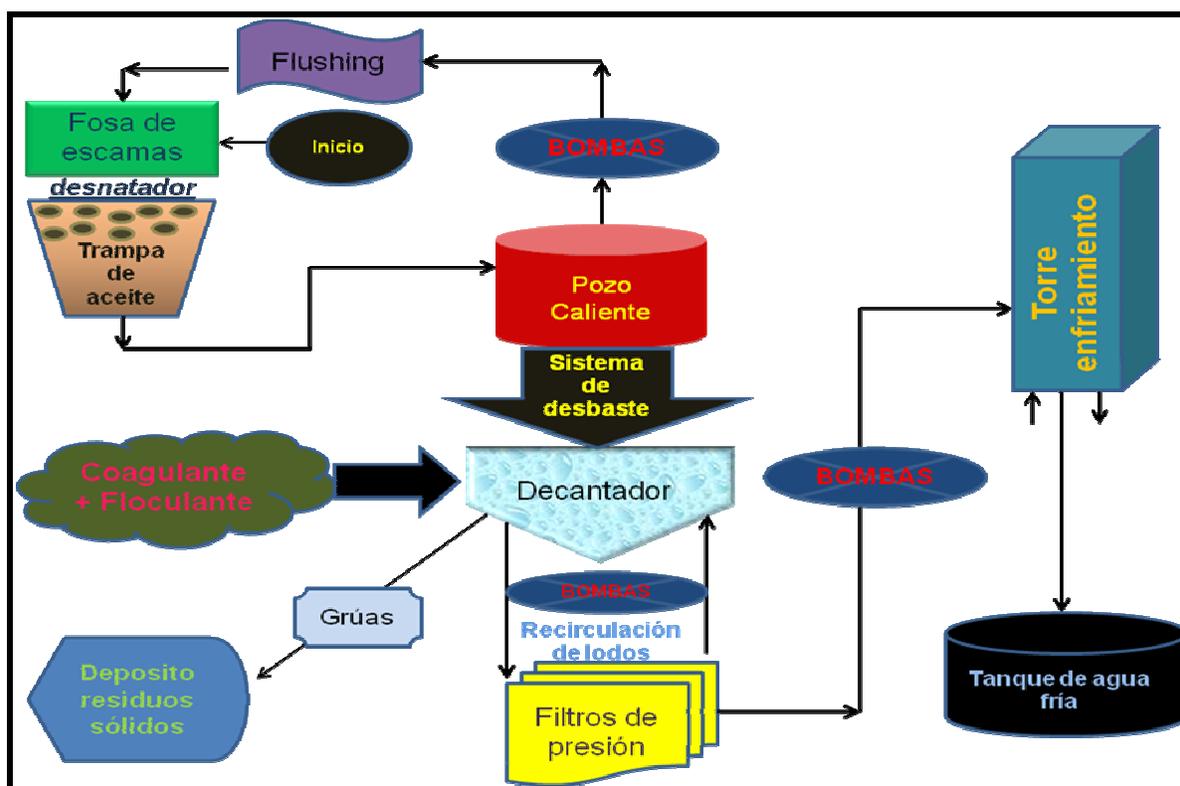


Figura 3.5. Diagrama de flujo alternativa (c) para la planta de tratamiento de agua en la fabricación de tubos sin costura.

Seguidamente el agua que pasa del pozo caliente al decantador se encuentra con una velocidad de caudal relativamente baja lo que permitirá añadir el coagulante y el floculante y obtener así eficiencia en la operación de sedimentación, así mismo se deberá contar con un raspador para remover y luego por medio de grúas retirar y

depositar los sólidos que se encontrarán en el fondo del decantador. Luego de realizado este proceso el agua por medio de bombas será llevada hasta los filtros donde se retirarán los sólidos disueltos, posteriormente será enfriada en las torres de enfriamiento para finalmente ser almacenada en los tanques de agua fría donde se agregarán las sustancias químicas para recuperar las propiedades iniciales.

3.4 Posibles sustancias que permitirán la separación de los contaminantes en el agua, así como la recuperación de su calidad inicial

Para que los equipos empleados en el proceso de producción operen de manera efectiva y eficaz es necesario controlar y mantener ciertos parámetros y propiedades del agua (tabla 3.9) dentro de un rango de valores determinado, ya que la alteración en algunas de estas condiciones afectaría el buen funcionamiento de los mismos perjudicando de manera directa la producción en la planta. Asimismo se deben emplear algunos agentes químicos que permitan el control y mantenimiento de los parámetros requeridos en el agua para que el proceso de producción se mantenga óptimo, pues son las propiedades del agua las que determinarán el buen funcionamiento de los equipos.

Tabla 3.9 Especificaciones a controlar para mantener la calidad del agua a emplear en el proceso industrial (SIDOR, 2010).

Parámetro	Rango de valores	Unidad
Sólidos suspendidos	10 – 30	ppm
Sólidos disueltos	30 – 60	ppm
pH	8 – 10	[H+]
Bioactividad	<10.000	N° de bacterias

Las sustancias químicas a emplear para lograr la separación de los sólidos suspendidos y sólidos disueltos son los utilizados durante el proceso de pre-coagulación (fosa de escamas) y coagulación-floculación (sedimentador o decantador), donde estos agentes por medio de reacciones electroquímicas logran la unión de las partículas que se encuentran en el agua y posteriormente su decantación.

El coagulante que se utilizará en la planta de tratamiento aún no está establecido puesto que la fábrica se encuentra en construcción por lo que se imposibilita realizar pruebas de jarra que permitan seleccionar el coagulante más óptimo para el proceso de separación. Sin embargo, de manera teórica se puede explicar que los contaminantes sólidos presentes en el agua son inorgánicos y están cargados positivamente, ya que las partículas coloidales son de acero (formados aproximadamente por 70% de hierro), por lo que se necesita utilizar un coagulante (véase tabla 3.10) que aporte carga negativa (aniones) para neutralizarlas y lograr la unión entre ellas.

De la misma manera que el proceso de coagulación no se puede determinar cuál será el floculante a emplear, pero de acuerdo a la naturaleza del proceso y tomando en cuenta los datos teóricos establecidos en el proyecto inicial se pueden hacer consideraciones para realizar la mejor elección. Los polielectrolitos negativos de alto peso molecular son los más indicados para la floculación (véase tabla 3.10), puesto que las partículas suspendidas en el agua están cargadas positivamente, los sulfatos (aluminio o amonio) serian los más indicados para realizar esta operación.

Tabla 3.10 Posibles sustancias, para recuperar la calidad física del agua a emplear en el proceso industrial (Orinoco Iron, 2010).

Parámetro	Proceso	Función	Sustancias
Sólidos suspendidos totales (SST)	Coagulación	Desestabilizar cargas eléctricas de coloides.	Sales de hierro o de aluminio (coagulante).
	Floculación	Aglomerar las partículas desestabilizadas	Sulfato de amonio o de aluminio

Luego de finalizado el proceso de separación de los contaminantes y enfriamiento del agua, los parámetros físicos como los sólidos suspendidos y sólidos disueltos han sido recuperados, pero las propiedades químicas-biológicas aun se encuentran alteradas por lo que es necesario recuperar los valores iniciales por medio de diferentes agentes químicos (véase tabla 3.11).

Tabla 3.11 Posibles sustancias a emplear, para recuperar la calidad química del agua (Orinoco Iron, 2010).

Parámetro	Función	Sustancias
pH	Aumentar pH por medio de una base	Hidróxido de sodio (NaOH) ó hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
Bioactividad	Reducir hábitat de microorganismos en estructuras y equipos	Dióxido de cloro (ClO_2), hipoclorito de sodio (NaClO).
Inhibidor de corrosión	Mantener propiedades físicas de la red de tubería	Etanolaminas, molibdatos ó fosfatos

Tomando en consideración que la fosa de escamas, el pozo caliente y el sedimentador se encontraran a cielo abierto, esto facilita que agentes biológicos se alojen en la superficie y paredes de estas estructuras, lo que ocasionaría la formación de algas y bacterias, y que serán arrastrados por el caudal de agua aumentando considerablemente

el riesgo de daños a los equipos. Por lo que es necesario el uso de un biocida (tabla 3.11). Los biocidas son sustancias químicas sintéticas, naturales o de origen biológico o físico y están destinados a destruir, neutralizar, impedir la acción o ejercer un control de otro tipo sobre cualquier microorganismo considerado nocivo para el proceso industrial que se llevará a cabo en la fábrica de tubos sin costura.

Así mismo se debe utilizar un inhibidor de corrosión (tabla 3.11), a fin de evitar depósitos y formación de lodos (incrustaciones) a lo largo de de la red de distribución, que obstaculicen el proceso de transferencia de calor y flujo de agua. El acero como es el principal contaminante, el inhibidor de corrosión a seleccionar debe estar dirigido especialmente en el control y neutralización de este compuesto.

3.5 Utilidad de los residuos generados durante el tratamiento

Durante el proceso de tratamiento del agua, se obtienen una cantidad de residuos que por razones ecológicas deben ser dispuestos para disminuir el impacto ambiental que estos pueden producir. En la planta de tubos sin costuras, el contaminante que se generará en mayor proporción serán las virutas o cascarillas de acero, y posiblemente algún contaminante líquido (aceites). La utilidad que se le pueden dar a dichos contaminantes produciría beneficios económicos por la venta de los mismos, así como ambientales ya que la empresa estaría cumpliendo con las normas establecidas por las instituciones encargadas de velar la correcta disposición de los efluentes.

3.5.1 Cascarillas de acero

Las cascarillas de acero o escamas, obtenidas durante el proceso de sedimentación y filtración, son utilizadas en la industria de la construcción. El concreto (cemento, piedra y agua) es muy utilizado hoy día en la edificación de caminos, puentes, obras industriales, etc. Sin embargo este concreto tiene limitaciones de trabajo cuando recibe esfuerzos de presión, tracción y flexión; es por ello la necesidad de producir un concreto con mayor resistencia ante este tipo de operaciones, cuando se añaden fibras de acero al concreto, este nuevo producto se conoce como concreto u hormigón armado, aumentando considerablemente la fortaleza y durabilidad de las estructuras y obras civiles.

Los principales beneficios medioambientales conseguidos con el reciclado de la cascarilla son la reducción de residuos y el aprovechamiento de su contenido de hierro como materia prima. El 90% del acero retirado luego de realizado el tratamiento del agua puede emplearse como materia prima en otros procesos siderúrgicos tales como en la producción de briquetas, laminas, etc. En pequeñas cantidades se utilizan para ferroaleaciones, en plantas cementeras y en la industria petroquímica. El acero separado del agua en sus diferentes tamaños puede ser 100% reutilizable de acuerdo a los requerimientos que las diferentes industrias demandan en su proceso, esto permitirá reducir al mínimo el impacto ambiental que podría ocasionar si estos residuos son vertidos directamente al ecosistema.

3.5.2 Aceites y/u otros contaminantes líquidos

Los residuos líquidos extraídos del agua, se reutilizarán como combustible para hornos de producción de cal o se utilizan como lubricantes en procesos sencillos o de menos exigencia, puesto que los mismos no pueden ser empleados en ningún proceso dentro de la producción de tubos sin costura ni en los equipos.

El objetivo de darle utilidad a los residuos y contaminantes que se generarán en la producción y que serán retirados durante el tratamiento, es reducir al mínimo el impacto ambiental que estos podrían ocasionar, cumpliendo así con las normas establecidas por los organismos encargados de vigilar, controlar y mantener el ecosistema. Otra de las ventajas, es el ingreso económico que se logra por la venta de los mismos, permitiendo así aumentar los márgenes de ganancia de la empresa.

3.6 Costos de adquisición e instalación de equipos

La estimación de los costos de adquisición de los equipos para la planta de tratamiento, se hizo de acuerdo a los procesos y operaciones recomendadas en este proyecto que incluyen equipos, sustancias y obras civiles. Sin embargo, el costo de inversión que se presentará es actual, y la fábrica de tubos sin costura tiene pautado construir la planta de tratamiento para el año 2013. La inversión económica se presentará de acuerdo a las alternativas recomendadas y la empresa determinará cuál de estas será la seleccionada.

Tabla 3.12 Costo de equipos e instalación, a emplear en la planta de tratamiento.

Requerimiento	Costo (MBs.F)	Instalación (MBs.F)	Años de Vida	Cantidad requerida por alternativa		
				(a)	(b)	(c)
Torre de enfriamiento	1.290	64,5	20	3	3	3
Filtro de presión	215	10,75	12	6	6	6
Sistema de flotación	2450	122,50	10	-	1	-
Sistema de desbaste	645	32,25	7	-	-	1
Bomba	86	4,30	10	10	8	6
Desnatador	25	1,29	15	1	1	1
Raspador	150	7,53	12	2	1	1
Instrumentación y control de campo	430	21,50	8	1	1	1

La fábrica de tubos sin costura no cuenta con un presupuesto para construir una planta de tratamiento que requiera una elevada inversión por lo que uno de los objetivos de este diseño es evaluar que alternativa se presenta con un costo moderado pero que permitirá alcanzar un óptimo tratamiento del agua y poder así mantener el proceso de producción en los estándares establecidos.

Los precios de equipos incluidos en las alternativas de diseño para la planta de tratamiento (tabla 3.12) fueron suministrados por la empresa italiana Danielli, C.A; la cual es la encargada de proveer a la fabrica los equipos y piezas faltantes de la planta de laminación de tubos así como posiblemente la de los equipos empleados en la planta de tratamiento.

Los costos de obras civiles (tabla 3.13) fueron facilitados por la empresa constructora Saqui, C.A, ubicada en Ciudad Guayana-estado Bolívar, la cual está encargada actualmente de llevar a cabo la construcción de las obras civiles pertenecientes a la planta de laminación de tubos. Estos costos fueron suministrados por un representante de la gerencia de proyectos de la empresa, pero sin documentos físicos que los respaldaran, esto según políticas internas de la constructora la cual establece en no entregar información por escrito de costos de obras sin que estas vayan a ejecutarse realmente.

Tabla 3.13 Costo de obras civiles para la construcción de la planta de tratamiento

Requerimiento	Costo (MBs.F)
Canal de drenaje	120
Fosa de escamas	800
Pozo caliente	650
Sedimentador	630
Decantador	430
Fundación para filtro	55
Fundación para torre de enfriamiento	70
Tanque de agua fría	190
Instalación red de tubería (1400m)	350

Fuente: Gerencia de proyectos Constructora Saqui, C.A

Los costos de sustancias y/o agentes químicos (tabla 3.14) a emplear en el tratamiento del agua, para separar los contaminantes y recuperar su calidad inicial fueron obtenidos

por la empresa estatal Orinoco Iron ubicada en Ciudad Guayana-Estado Bolívar. Sin embargo, hubo varias limitantes en esta información la cual fue principalmente la negación de proveer el nombre específico de cada sustancia así como de entregar por escrito la información suministrada. El argumento que presentó el departamento de mantenimiento fue que no están autorizados por parte de la empresa proveedora de las sustancias químicas en dar información completa de los productos que ellos fabrican.

Tabla 3.14 Costos anuales de sustancias y/o agentes químicos a emplear en la planta de tratamiento

Sustancia	Costo (MBs.F)
Coagulante	64,5
Floculante	77
Recuperador de pH	40
Biocida	54,8
Inhibidor de corrosión	96,6

Fuente: Departamento de mantenimiento de la empresa Orinoco Iron

3.6.1 Costos totales para la construcción de la planta tratamiento propuesta en la alternativa (a)

$$\text{Inversión} = \text{COC} + \text{CES} + \text{CSQ} \text{ (Ec. 3.1)}$$

Donde:

COC: Costo de obras civiles

CES: Costo de equipos y sistemas

CSQ: Costo sustancias químicas

Sustituyendo valores en Ec. 3.1

$$\text{Inversión alternativa (a)} = [4290,00 + 7113,84 + 332,90] \text{ MBs.F}$$

$$\text{Inversión alternativa (a)} = 11.736,74 \text{ MBs.F}$$

3.6.2 Costos totales para la construcción de la planta tratamiento propuesta en la alternativa (b)

$$\text{Inversión} = \text{COC} + \text{CES} + \text{CSQ} \text{ (Ec. 3.1)}$$

Donde:

COC: Costo de obras civiles

CES: Costo de equipos y sistemas

CSQ: Costo sustancias químicas

Sustituyendo valores en Ec. 3.1

$$\text{Inversión alternativa (b)} = [3460,00 + 9.348,22 + 332,90] \text{ MBs.F}$$

$$\text{Inversión alternativa (b)} = 13.141,12 \text{ MBs.F}$$

3.6.3 Costos totales para la construcción de la planta tratamiento propuesta en la alternativa (c)

$$\text{Inversión} = \text{COC} + \text{CES} + \text{CSQ} \text{ (Ec. 3.1)}$$

Donde:

COC: Costo de obras civiles

CES: Costo de equipos y sistemas

CSQ: Costo sustancias químicas

Sustituyendo valores en Ec. 3.1

$$\text{Inversión alternativa (c)} = [3460,00 + 7272,37 + 332,90] \text{ MBs.F}$$

$$\text{Inversión alternativa (c)} = 11.065,27 \text{ MBs.F}$$

CAPITULO IV. DISCUSION DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Discusión de resultados

4.1.1 Definición del caudal estimado de agua a tratar para la máxima producción de la planta

Para alcanzar la máxima producción de la planta la cual está estipulada en 350.000 toneladas métricas/año (950 toneladas métricas/día), el consumo de agua se divide en dos sistemas de enfriamiento: indirecto y directo. El primero consta del enfriamiento de estaciones hidráulicas y de lubricación de equipos laminadores y los rodillos tanto del horno de solera giratorio como el horno de recalentamiento de tubos por medio de serpentines y tuberías internas; el segundo realizará enfriamiento por contacto directo del agua con los equipos empleados en la planta de laminación.

El consumo de agua en las estaciones varía de acuerdo a los requerimientos de enfriamiento que cada equipo posee. Por ejemplo, en el caso del sistema de lubricación, la estación L1 será la que tendrá mayor consumo de agua ($25,0 \text{ m}^3/\text{h}$) pues es en ésta donde ocurre mayor incremento de temperatura y la estación L4 la de menor caudal requerido para su enfriamiento ($15,0 \text{ m}^3/\text{h}$). Estas variaciones de caudal dentro del sistema de lubricación se deben a que los equipos difieren en el aumento de su temperatura mientras se encuentran en funcionamiento.

Así mismo, ocurre con el sistema hidráulico donde la estación H2 requerirá un consumo de agua de $50,0 \text{ m}^3/\text{h}$ y las estaciones H1 y H3 un consumo de $25 \text{ m}^3/\text{h}$ c/u, esto debido a que en el punto de enfriamiento H2 el incremento de la temperatura es mucho mayor a las otras dos estaciones, por lo que se necesita una transferencia de calor elevada. En el caso de los rodillos, para el horno de solera giratorio se estima que la temperatura de los mismos alcance unos 1200°C por lo que requieren un caudal de $120 \text{ m}^3/\text{h}$ para disminuir y mantener una temperatura segura para el buen funcionamiento de los hornos, siendo dentro del sistema indirecto el punto con el mayor caudal para su enfriamiento.

Para el caso del sistema directo, los equipos que comprenden el perforador-alargador, el laminador continuo y el mandril, requerirán de un pre-enfriamiento con un caudal de consumo de $84,0$; $72,0$ y $324,0 \text{ m}^3/\text{h}$ respectivamente, a una presión de $12,0$ bar y un enfriamiento posterior con un caudal requerido de $180,0$; $150,0$ y $984,0 \text{ m}^3/\text{h}$ respectivamente, a una presión de $4,0$ bar; esto debido a que las temperaturas que alcanzarán durante la fabricación de los tubos será muy elevada por lo que deberá disminuirse su temperatura al mínimo para que puedan seguir operando de manera eficiente.

Los otros equipos que componen la planta de laminación tales como el descamador, el extractor de mandril, el laminador-reductor-estirador, requerirán de un consumo de agua luego de su función dentro de la laminación de los tubos, siendo estos caudales variados puesto que cada equipo aumenta su temperatura en niveles diferentes.

El caudal a tratar para la reutilización del agua empleada en el sistema de enfriamiento, estará determinada por el consumo de agua que requiere el sistema directo de enfriamiento, pues es en este sistema donde ocurre la alteración fisicoquímica del agua por el aumento de la temperatura y los contaminantes sólidos (acero) que se generarán así como de los posibles contaminantes líquidos que puedan originarse durante el proceso de producción y sean arrastrados por el agua, siendo este caudal a tratar para la máxima producción de la planta de 2106,0 m³/h.

4.1.2 Contaminantes generados durante el proceso de producción

Los residuos de acero generados durante el proceso de producción, el aumento de temperatura que el agua experimenta por el enfriamiento de los equipos y los posibles contaminantes que podrán encontrarse en la superficie de las barras cilíndricas son los que alteran las propiedades fisicoquímicas del agua. El consumo de agua en la planta es elevado y en aras de preservar el medio ambiente, es necesario realizar un tratamiento previo para poder reutilizarla.

4.1.2.1 Cascarillas de acero

Cuando se realiza el proceso de perforación, se logra formar el forado (barra convertida en tubo), durante el perforado se originan una serie de escamas en la superficie interior del tubo, por lo que se hace necesario llevar a cabo la descamación, que consiste en inyectarle al tubo un caudal de agua a alta presión (200,0 bar) para barrer todas las cascarillas presentes en el mismo.

Este subproducto siderúrgico procede del tren de laminación del proceso de laminación en caliente del tubo. La formación de la cascarilla depende de diversos factores como son: la atmósfera del horno empleado en el calentamiento de las barras, su temperatura y tiempo de laminación, el contenido en SO₂ en los gases del horno, las características físicas y composición del acero, etc.

En la cascarilla están presentes, además de hierro en forma elemental, tres tipos de óxidos de hierro: wustita (FeO), hematites (Fe₂O₃) y magnetita (Fe₃O₄). La composición química de la cascarilla varía en función del tipo de acero a producir y del proceso empleado. El contenido de hierro es normalmente de un 70,0 % y contiene trazas de metales no férreos y compuestos alcalinos. La cascarilla podrá estar contaminada con restos de lubricantes, otros aceites y grasas procedentes de derrames de los equipos asociados a las operaciones de laminación.

El contenido en aceites suele variar entre 0,1 y 2,0 %, pudiendo llegar hasta 10,0 %, en el caso de presentarse algún derrame por parte de los equipos de laminación. La cascarilla está formada por partículas de naturaleza escamosa, con un tamaño de partícula generalmente menor de 5,0 mm y algunas menores de 0,1 mm.

La cantidad de cascarilla generada por tonelada de acero depende del área superficial del producto. Para el caso de la fábrica de tubos sin costura se estima que la generación de cascarilla sea aproximadamente 5% de la producción diaria de la planta, es decir, la cantidad de cascarilla generada puede variar de 30 a 50 kg/día de producto laminado, considerando la máxima producción de la planta de tubos.

4.1.2.2 Contaminantes sólidos (polvos y arenillas)

Cuando se realice el proceso de descamación, es posible que el agua arrastre consigo estos agentes que podrán estar presente en el área física de la barra cilíndrica al momento de iniciar la producción, es por esto que se tomaron en consideración al momento de la elección de los tipos de procesos y operaciones que se llevarán a cabo en la planta de tratamiento. A pesar de que estos contaminantes sólidos no tienen algún reúso, es necesario su separación del agua pues podrían ocasionar incrustación y graves daños a la red de bombas así como a los equipos que requieren del contacto directo del agua para su enfriamiento

4.1.2.3 Contaminantes líquidos (grasas y aceites)

Luego de su producción las barras cilíndricas se le añaden algunas grasas y/o aceites, esto como parte de un proceso de lubricación con la finalidad de mantener sus propiedades físicas, hasta que sean enviadas a las diferentes industrias siderúrgicas. Cuando estas barras sean calentadas en el horno de solera giratorio, sean laminadas y se realice el proceso de descamación, el agua arrastrará consigo no sólo las cascarillas sino también las grasas y/o aceites que se encontraban inicialmente en las mismas, por lo que deberá retirarse dichos contaminantes líquidos durante el tratamiento que se le dará al agua

4.1.3 Procesos y operaciones unitarias en función del tratamiento del agua

4.1.3.1 Fosa de escamas

Una vez realizada la descamación y el enfriamiento directo, el agua, cae en un canal y por gravedad llegará a la fosa de escamas, donde comienza el proceso de pre-tratamiento; pues es aquí donde el agua se encuentra con mayor grado de contaminación, la función de la fosa es recibir toda el agua contaminada proveniente de la planta laminadora. Para optimizar los resultados en el tratamiento del agua y en el mantenimiento de los equipos se realizaron las siguientes consideraciones:

- Disponer de un tanque donde se almacene un pre-coagulante y que este sea vertido directamente en la corriente que viene del canal para acelerar la mezcla y ayudar en la desestabilización de las partículas de mayor dimensión, y que por su peso caerán al fondo de la fosa.
- Instalar un equipo recolector de escamas así como un depósito, para retirar y almacenar las partículas solidas que se encuentran en el fondo de la fosa.
- Tomando en cuenta el arrastre de los aceites y/o grasas presentes en las barras cilíndricas así como de un posible derrame de aceite por parte de algún equipo de la planta laminadora, es necesario la instalación de una trampa de aceite, un equipo recolector (desnatador) y un tanque para su depósito.

4.1.3.2 Pozo caliente

El pozo caliente se encontrará a continuación de la fosa de escamas y su función es almacenar el agua limpia de aceite y de las partículas sólidas de mayor dimensión así como disminuir la velocidad del agua, por lo que la alimentación que provee la fosa de escamas hacia el pozo caliente deberá encontrarse en el centro de las estructuras, esto con la finalidad de minimizar el paso de los residuos al pozo. El canal que conduce el agua desde la planta laminadora hasta la fosa de escamas debe mantener un flujo constante, por lo que se debe instalar un sistema de bombeo para transferir agua desde el pozo caliente hacia el canal, este proceso es denominado *flushing*.

4.1.3.3 Alternativas de diseño para la planta de tratamiento de agua

Las alternativas presentadas en el capítulo 3 para el diseño de la planta de tratamiento, basa sus diferencias en las operaciones empleadas para la separación de los sólidos suspendidos, puesto que la separación de los sólidos disueltos se realizará empleado los mismos filtros de presión así como el enfriamiento del agua utilizando torres de enfriamiento tipo tiro mecánico inducido.

La alternativa (a) establece la construcción de dos sedimentadores para realizar el proceso de coagulación-floculación, mediante la adición directa del coagulante y floculante simultáneamente, tomando en cuenta que la velocidad del agua será lo suficientemente baja para mantener una mezcla que permita la formación de los flóculos para su posterior sedimentación

La alternativa (b) propone la instalación de un sistema de aire disuelto, donde la inyección de aire a presión genera burbujas lo cual permite hacer flotar las emulsiones y los sólidos suspendidos de bajo peso. El proceso de coagulación y floculación se hará de manera separada, el primero se realizará en el pozo caliente añadiendo el coagulante y el segundo agregando el floculante en el decantador. Este sistema de aire inducido permitirá remover todos los líquidos inmiscibles presentes en el agua así como agilizar la desestabilización eléctrica de las partículas por medio de la alta velocidad que alcanzara el agua por la inyección del aire.

La alternativa (c) contempla la instalación de un sistema de desbaste en el pozo caliente lo que permitirá retener partículas suspendidas de tamaños variados, logrando así disminuir la cantidad de sólidos presentes en el agua; en el pozo caliente se iniciará el proceso de decantación con la adición del coagulante y terminará con la floculación en el decantador añadiendo el floculante, originando así la aglomeración de las partículas.

La mayor ventaja que presenta la alternativa (a) es que los sedimentadores no necesitan ningún sistema físico para su funcionamiento, además requieren solamente un mantenimiento preventivo cada cierto período de tiempo en las paredes internas puesto se producirán incrustaciones como consecuencia del proceso de sedimentación, a diferencia de las alternativas (b) y (c) donde incluyen sistemas accionados por piezas mecánicas lo que requieren de un mantenimiento frecuente; porque son los más propensos a presentar fallas debido a que son sistemas de funcionamiento eléctrico y mecánico, en el caso de generarse algún desperfecto ocasionaría una parada temporal de la planta de tratamiento de agua y por consecuencia habría que detener la producción dentro la planta laminadora.

El objetivo de las alternativas propuestas es permitir alcanzar un óptimo tratamiento del agua logrando recuperar los niveles de calidad de la misma, requeridos para el buen funcionamiento de los equipos empleados en la planta laminadora.

4.1.4 Sustancias químicas a emplear en la planta de tratamiento

Las sustancias químicas a utilizar deben estar orientadas para optimizar el proceso de tratamiento, que incluye la separación de los contaminantes sólidos así como la recuperación de la calidad química inicial del agua. Una de las principales ventajas que presenta este diseño conceptual son las opciones en cuanto a los posibles agentes químicos a emplear, los cuales fueron suministrados por la empresa siderúrgica Orinoco Iron, dichas sustancias fueron recomendadas por su bajo costo, fácil manejo y relativa baja toxicidad (tabla 4.1).

Tabla 4.1 Sustancias químicas empleadas en la empresa siderúrgica Orinoco Iron para recuperar la calidad inicial del agua.

Parámetro	Función	Sustancia
Coagulante	Desestabilizar coloides	Sales de hierro
Floculante	Aglomerar partículas	Sulfato de aluminio
pH	Aumentar iones OH ⁻	Hidróxido de sodio
Biocida	Disminuir colonia de bacterias y hongos	Dióxido de cloro
Inhibidor de corrosión	Evitar deterioro red de tuberías	Etanolaminas

Sin embargo para cuando inicie operaciones la planta de tratamiento, será necesaria la elaboración de pruebas de jarras para determinar con certeza las sustancias que generen mayor rendimiento y logren en menor tiempo alcanzar los niveles deseados en lo que a calidad de agua se refiere. En el caso de la separación de sólidos por medio del proceso de sedimentación se recomendaron como coagulantes sales de hierro o aluminio y como floculantes sulfato de amonio o de aluminio, los cuales son empleados en el tratamiento del agua que se realiza en la empresa Orinoco Iron (véase tabla 4.1).

Para la recuperación de la calidad química del agua se recomendó emplear hidróxido de sodio o hidróxido de calcio para aumentar el pH, puesto que las cascarillas de acero están cargadas positivamente (H⁺) lo que ocasiona una disminución del pH, por lo que debe llevarse al nivel requerido el cual está entre 8-10 (véase tabla 4.1)

Las estructuras que conforman la planta de tratamiento se encontrarán a cielo abierto lo que incrementa las posibilidades de formación de colonias de microorganismos en la superficie, paredes y fondo de las unidades de tratamiento, por lo que se hace

necesario añadir un biocida que mantenga reducido los niveles de vida de bacterias y hongos, los más utilizados son el dióxido de cloro y el hipoclorito de sodio; el empleado en la planta de tratamiento de Orinoco Iron es el dióxido de cloro por su bajo costo, fácil manejo y seguro almacenaje (tabla 4.1).

Tomando en cuenta que los sólidos presentes en el agua pueden ocasionar incrustaciones a lo largo de la red de tuberías, es imprescindible agregar un inhibidor de corrosión el cual evitara el deterioro de las paredes del tubo así como mantendrá las propiedades físicas de la tubería, algunos de los inhibidores recomendados son la Etanolaminas, molibdatos y fosfatos; Orinoco Iron utiliza etanolaminas como inhibidor de corrosión en su agua tratada (tabla 4.1).

4.1.5 Utilidad de los residuos generados

Luego de realizado el proceso de tratamiento, los residuos generados y que fueron separados constituyen en sí un foco de contaminación y un posible impacto al ambiente, pudiendo alterar el ecosistema si no se disponen de manera adecuada. Por lo que se estableció en este proyecto la utilidad que se le puede dar a los contaminantes y que se encuentran almacenados en tanques y/o depósitos, obteniéndose ganancias para la empresa y minimizando el nivel de contaminación que podría ocasionar la misma si los residuos fuesen vertidos directamente a ríos, lagos, etc.; cumpliendo con las normas establecidas por las instituciones encargadas de velar el equilibrio entre el sector industrial y el medio ambiente.

4.1.5.1 Cascarillas de acero

El reutilización que se le puede dar a la cascarilla según su tamaño puede ser variado incluyendo la producción de hormigón armado, aleaciones por medio del hierro contenido en el acero para la industria petroquímica y plantas cementeras. Según las exigencias del comprador estas virutas deberán ser clasificadas de acuerdo a su tamaño y peso, puesto que cada empresa requiere de cascarillas con características determinadas. La venta de estos residuos sólidos permitirá a la empresa aumentar sus ingresos y cumplir con las normas ambientales establecidas, pues se la estaría dando a los contaminantes una disposición correcta.

4.1.5.2 Contaminantes líquidos (aceites y grasas)

Los residuos líquidos retirados por el desnatador y almacenados en los depósitos, podrán ser empleados como combustible en hornos de producción de cal o como lubricantes en la producción de piezas de acero en otros procesos siderúrgicos. Dentro de la fábrica de tubos sin costura dichos líquidos no tienen ninguna utilidad pero deberán ser igualmente debidamente dispuestos para cumplir con las normas y ayudar a mantener el ecosistema, esto como parte de la política de la empresa en preservar nuestros recursos naturales.

4.1.6 Costos de adquisición e instalación de equipos

Para la construcción de la planta de tratamiento se presentaron los costos de obras civiles, equipos y/o sistemas y sustancias químicas, dicha información fueron suministradas por la empresa constructora Saqui, C.A; la empresa italiana de tecnología Danielli, C.A; y la empresa estatal siderúrgica Orinoco Iron, respectivamente. Sin embargo, ninguna de estas informaciones tienen respaldo físico en documentos o presupuestos, pues argumentaron que no pueden dar datos precisos sin que haya una propuesta final de construcción de la planta de tratamiento, por lo que los costos presentados no tienen alguna validez para el momento real de construcción de obras civiles y adquisición de equipos, sistemas y sustancias químicas por parte de la fábrica de tubos sin costura.

Se determinaron de acuerdo a los costos, la inversión que se deberá realizar para la construcción de la planta de tratamiento para cada una de las propuestas establecidas, de acuerdo a su diseño (véase tabla 4.2). A pesar de que la tercera opción fue la que presentó menor inversión no establece que sea la que generará mayor rendimiento económico para la fábrica, ni la alternativa (b) por su mayor costo permitirá alcanzar el nivel más óptimo en la planta de tratamiento.

Tabla 4.2 Resultados de inversión, de acuerdo a las alternativas de diseño presentadas para la planta de tratamiento de agua

Alternativa	Inversión (MBs.F)
(a)	11.736,74
(b)	13.141,11
(c)	11.065,27

Tomando en cuenta las ventajas y diferencias entre cada opción, la alternativa que generaría mayor beneficio económico para la fábrica de tubos sin costura y mejor rendimiento en el tratamiento del agua es la opción (a), a pesar que presenta un inversión mayor a la alternativa (c), pero tomando en cuenta la mínima probabilidad de presentar fallas durante el funcionamiento de las unidades de separación de sólidos (sedimentadores) permitirá lograr alcanzar la máxima producción anual de la fábrica, el cual es el objetivo primordial en este proyecto.

4.2 Conclusiones

1. El caudal de agua a tratar para la máxima producción en la fábrica de tubos sin costura es de 2.106,0 m³/h.
2. El contaminante principal que se generará durante la producción será el acero.
3. La alternativa A es la que presenta mayor ventaja para el funcionamiento de la planta de tratamiento
4. Los filtros más indicados para la fábrica de tubos sin costura son los de presión.
5. Se deberán realizar pruebas de jarras para determinar la eficiencia de las sustancias químicas propuestas.
6. La utilidad y disposición de los residuos generados, aumentará por la venta de los mismos los ingresos de la empresa y disminuirá el impacto ambiental.
7. La inversión para la construcción de la planta de tratamiento de la alternativa A es de Bs.F 11.736.740

4.3 Recomendaciones

1. Establecer un sistema de control que reporte alguna caída de presión en las líneas de distribución.
2. Disponer en la fosa de escamas de un equipo dosificador de pre-coagulante, así como en el sedimentador para agregar el coagulante y floculante en la cantidad necesaria de acuerdo a la concentración de sólidos en el agua.
3. El canal donde cae el agua de retrolavado de los filtros debe mantener un flujo constante para evitar incrustaciones por parte de las partículas solidas.
4. Contar con más de una torre de enfriamiento, para dividir el total del caudal de agua a enfriar así como con más de un tanque de almacenamiento de agua.

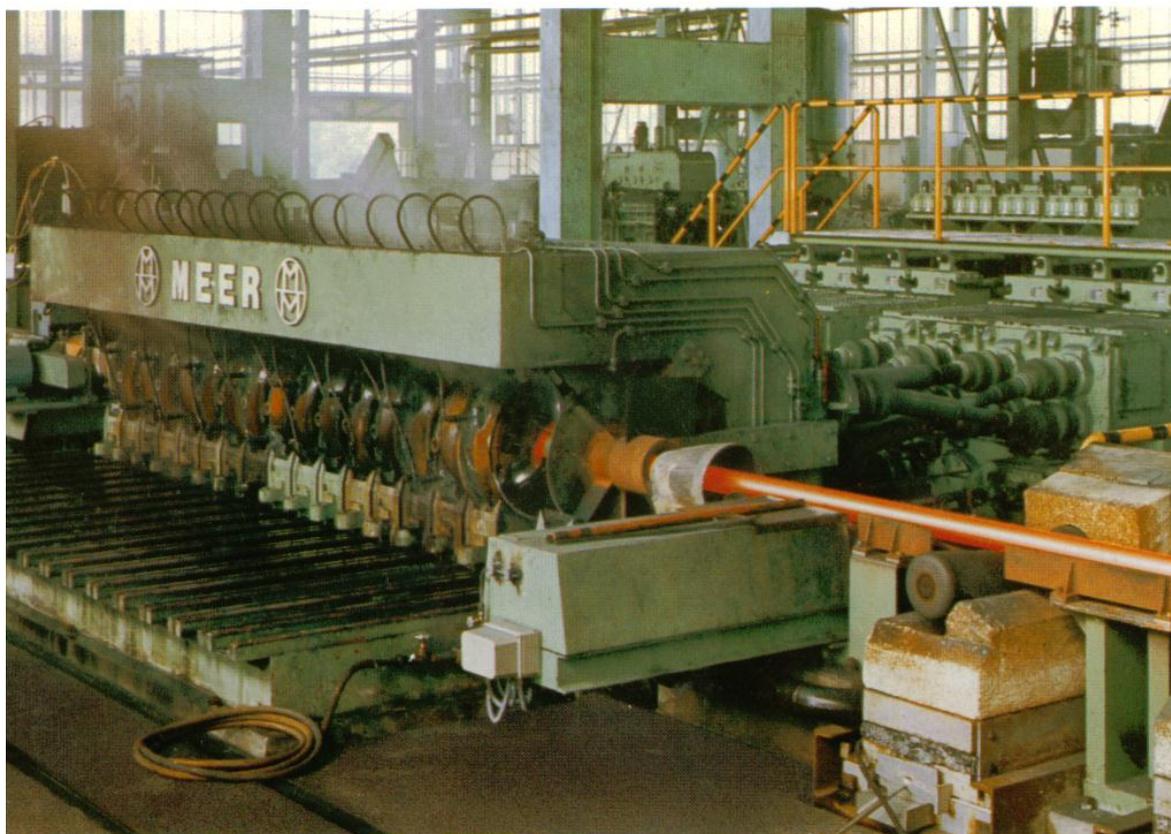
BIBLIOGRAFÍA

- Barrenechea, A.; De Vargas, L. y Maldonado, V. *Manual I: Teoría*. CEPIS (2003).
- Canache, P. “**Evaluación de los Efluentes Líquidos de la planta potabilizadora José Antonio Anzoátegui**”. Tesis de Grado de Ingeniería Química, UDO, Anzoátegui (2004)
- Cañizales, R. “**Reactivación proyecto tubos sin costura**”. Empresa de producción social tubos sin costura, C.A; Puerto Ordaz (2006)
- CEPIS. “**Coagulación - Floculación**” [en línea], disponible: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/scan2/mu%C3%B1oz2.pdf>
- Larez, G. “**Adecuación Tecnológica (estructural e hidráulica) de la torre de enfriamiento modular para proyecto planta de tratamiento de agua de la fábrica de tubos sin costura**”. Tesis de grado de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, UGMA, Ciudad Guayana (2010)
- LENNTECH. “**Floculación**” [en línea], disponible: <http://www.lenntech.es/floculacion.htm>
- LIPESA, “**Tratamiento del Agua**”. Caracas, Venezuela. Septiembre (1989)
- MADRIDMASD. “**Tratamiento de Aguas Residuales**”, disponible en línea: http://www.madridmasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf
- Marcano, J. “**Manual de Químicos utilizados en la Planta de Tratamiento de Agua de la Empresa Orinoco Iron**”. Orinoco Iron, Puerto Ordaz (2004)
- Mc Cabe, W., Smith, J y Harriot, P. “**Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**”, Cuarta Edición, Editorial McGraw-Hill, Madrid (1991)
- Olivares, X. “**Evaluación de los Procesos de tratamiento Químico en la Planta Potabilizadora de Agua José Antonio Anzoátegui, Barcelona Estado Anzoátegui**”. Tesis de Grado de Ingeniería Química, UDO, Anzoátegui (1999)
- Ortiz, R. “**Diseño de un Sistema de Tratamiento de los Efluentes Sólidos y Líquidos de la Planta Potabilizadora José Antonio Anzoátegui**”. Tesis de Grado de Ingeniería Química, UDO, Anzoátegui (2005)
- Pino, M. “**Evaluación de la Dosificación de Coagulantes y su Influencia en las Operaciones de Coagulación y Filtración en Plantas de Potabilización**”. Tesis de Grado de Ingeniería Química, UDO, Anzoátegui (2003)
- TEXTOS CIENTIFICOS. “**Efluentes**” [en línea], disponible: <http://www.textoscientificos.com/efluentes>

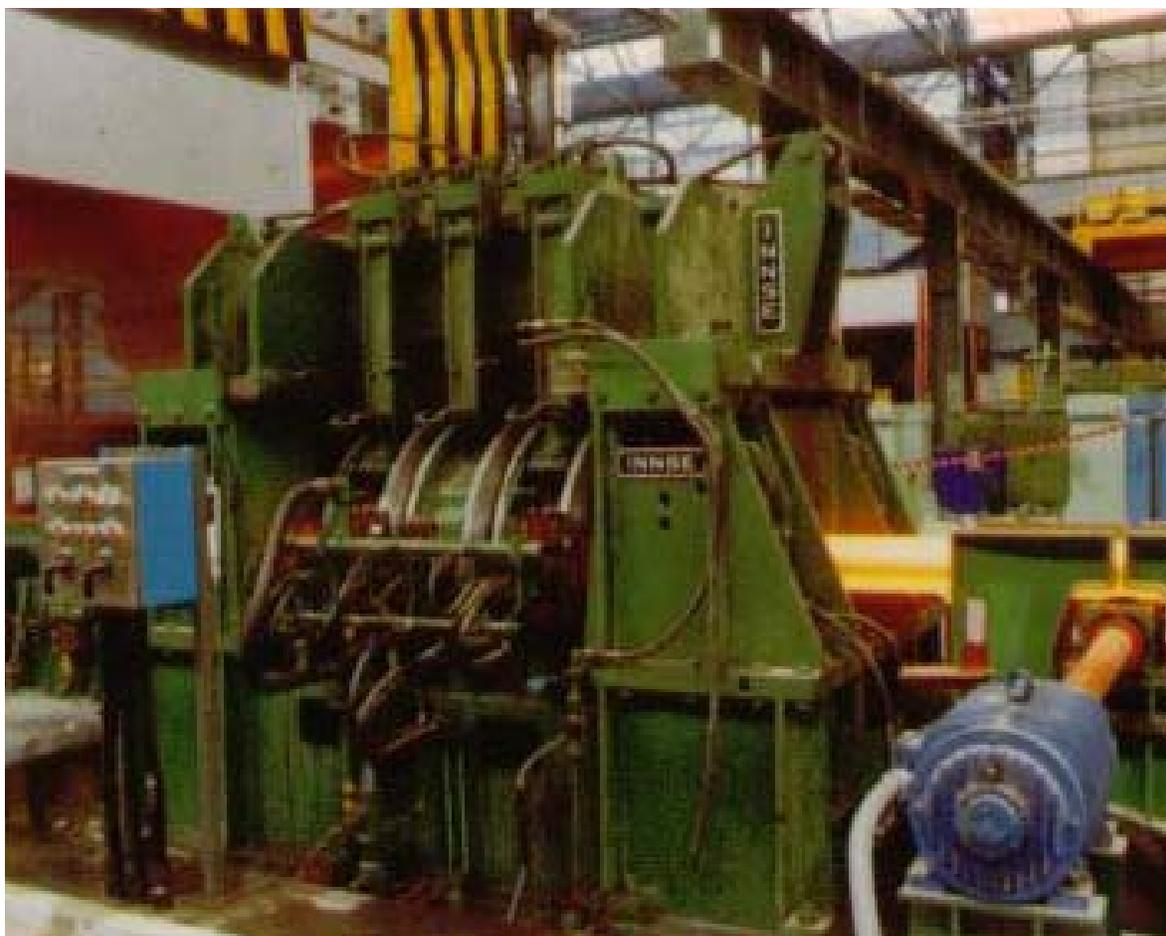
Metcalf & Eddy. **“Ingeniería de aguas residuales – Tratamiento, vertido y reutilización”**. Tomo II, Tercera Edición, Editorial Mc-Graw-Hill, Ciudad de México (1996)

**ANEXO A: EQUIPOS EMPLEADOS EN LA PLANTA DE LAMINACION DE TUBOS
SIN COSTURA**

A.1.- Laminador-reductor-estirador



A.2.- Extractor del mandril



A.3.- Cama de enfriamiento



A.4.- Laminador FQM



**ANEXO B: FUNDACIONES REALIZADAS EN 1989 PARA LOS EQUIPOS DE LA
PLANTA DE LAMINACIÓN**

B.1.- Descamador y vista parcial del laminador-reductor-estirador



B.2.- Horno de solera giratorio



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	“DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS INDUSTRIALES PROVENIENTES DE LA FABRICACIÓN DE TUBOS SIN COSTURA”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
FRANCISCO YURUANÍ PÉREZ RAMÍREZ	CVLAC: 19.095.848 E MAIL: yuruani_1987@hotmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Diseño conceptual

Aguas industriales

Tratamiento

Tuberías sin costuras

Efluentes

Calidad inicial

Estimado de costo

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	
	INGENIERÍA QUIMICA

RESUMEN (ABSTRACT):

El objetivo del presente trabajo de grado fue el diseño de varias alternativas que permitirán realizar un tratamiento eficaz al agua que se empleará en la fabricación de tubos sin costura para la empresa de producción social Tubos Sin Costura, C.A; ubicada en Ciudad Guayana-estado Bolívar; dichas alternativas deben cumplir con todos los requerimientos de la empresa, es decir, una planta eficiente, con mínimos problemas de operación y cuya construcción sea económicamente factible generando así óptimos resultados en el tratamiento del agua. Para el diseño de las opciones se realizó el cálculo del caudal a tratar para alcanzar la máxima producción de la fábrica, el cual fue estimado en 2.106,0 m³/h. Se identificaron las cascarillas de acero, aceites y/o grasas, polvos y/o arenas como contaminantes que se generarán durante la producción, ésto con la finalidad de establecer que operaciones y procesos unitarios serán los más idóneos para el tratamiento del agua. De igual manera se establecieron sales de hierro, sulfato de aluminio, hidróxido de sodio, dióxido de cloro y etanolaminas como posibles sustancias químicas a emplear para la optimización del proceso de tratamiento y recuperación de la calidad inicial del agua. Los residuos sólidos retirados serán utilizados en construcciones civiles y procesos petroquímicos; los contaminantes líquidos podrán ser empleados como combustibles en hornos de producción de cal, ésto permitirá una disposición adecuada de los desechos cumpliendo con las normas ambientales establecidas preservando así los recursos naturales. Por último se realizó un estudio que comprende las implicaciones económicas para la construcción de cada una de las alternativas propuestas incluyendo obras civiles, equipos y/o sistemas y sustancias químicas.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Hernán Raven	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	4.136.007			
	E_MAIL	hraven1@yahoo.com			
	E_MAIL				
Alexis Cova	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	11.905.328			
	E_MAIL	ajcova@udo.edu.ve			
	E_MAIL				
Milena Amundarain	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	5.194.070			
	E_MAIL	milena.amundarain@gmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	07	15
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Diseño conceptual del sistema de tratamiento de las aguas industriales.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 trabajos de grado:

“Los Trabajos de grado son propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”

Francisco Pérez

AUTOR

Milena Amundarain

TUTOR

Alexis Cova

JURADO

Hernan Raven

JURADO

Yraima Salas

POR LA SUBCOMISION DE TESIS