

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE  
REMOCIÓN TERCIARIA PARA AGUAS RESIDUALES  
INDUSTRIALES VERTIDAS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS INDUSTRIALES DE LA CERVECERÍA DE  
BUCARAMANGA**

**PEDRO FERNANDO GARCÍA JEREZ  
QUÍMICO UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIA  
ESCUELA DE QUÍMICA**

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE  
REMOCIÓN TERCIARIA PARA AGUAS RESIDUALES  
INDUSTRIALES VERTIDAS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS INDUSTRIALES DE LA CERVECERÍA DE  
BUCARAMANGA**

**MONOGRAFÍA PRESENTADA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE ESPECIALISTA EN QUÍMICA AMBIENTAL**

**DIRECTOR DE LA MONOGRAFÍA**

**Dr. JAIRO CLARET PUENTE BRUGES. Docente UIS. Director  
Especialización en Química Ambiental**

**CODIRECTOR**

**Ing. JUAN CARLOS HOYOS .**

**Coordinador ambiental de la Dirección de Operaciones Bavaria  
S.A**

<b>Tabla de contenidos</b>	<b>No. página</b>
<b>RESUMEN EN ESPAÑOL</b>	8
<b>RESUMEN EN INGLÉS</b>	9
<b>INTRODUCCIÓN</b>	10
<b>1 MARCO TEÓRICO</b>	12
1.1 Procesos Anaeróbios	12
1.2. Procesos Aeróbicos	13
1.3 Tratamiento avanzado de las aguas efluentes	16
1.4 Aspectos legales.	17
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES CERVECERÍA DE BUCARAMANGA</b>	19
2.1 Características técnicas	20
2.2 Unidades de tratamiento primario	21
2.3 Unidades de tratamiento secundario	21
2.4 Descripción general de la operación	22
2.4.1 Línea de lodos	24
2.4.2 Línea de biogás	25
<b>3. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES</b>	27
<b>4. OPCIONES DE TRATAMIENTO TERCIARIO</b>	29
<b>5. PLANTEAMIENTO DE PROPUESTAS</b>	33
5.1 Áreas para reutilización del agua	33
5.1.1 Agua de reposición en torres de enfriamiento	33
5.1.2 Condensadores – Evaporativos	34
5.1.3 Enfriamiento de máquinas	34
<b>6 PROPUESTAS</b>	35
6.1 Propuesta 1	35
6.1.1 Oxidación	35
6.1.2 Coagulación – Floculación	36
6.1.2.1 Coagulantes	36
6.1.2.2. Polielectrolítos	36
6.1.2.3 Coagulantes metálicos	37
6.1.2.4 Sulfato de aluminio	37
6.1.3 Filtración	37
6.1.3.1 Sistemas de filtración	38

6.1.3.2 Tipo de funcionamiento	38
6.1.3.3 Fuerza impulsora	38
6.1.3.4 Tasa de filtración	39
6.1.3.4 Adsorción	39
6.1.3.5 Carbón activado	40
6.1.3.5.1 Carbón activado granular	41
6.1.3.5.2 Filtros de carbón activado	41
6.1.4. Desinfección	42
6.1.4.1 Métodos y medios	42
6.1.4.2 Mecanismos de acción de los desinfectantes	43
6.1.4.3 Cloración	43
6.2 Propuesta 2	44
6.2.1 Tratamientos naturales	45
6.2.2 Tratamiento con plantas acuáticas	45
6.2.2 Lenteja de agua	47
<b>7. EVALUACIÓN ECONÓMICA.</b>	49
7.1 Estimación de la inversión	49
7.1.1 Inversiones directas	49
7.1.2 Inversiones indirectas	49
7.2 Análisis económico propuesta 1	49
7.2.1 Costos directos	50
7.2.2 Costos Indirectos	52
7.3 Análisis económico propuesta 2	53
7.3.1 Costos directos	53
7.3.2 Costos indirectos	56
<b>8. ELECCIÓN DE LA MEJOR PROPUESTA</b>	58
<b>9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	59
<b>10 BIBLIOGRAFÍA</b>	60

## RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1 Etapas del tratamiento de las aguas residuales	18
Figura 2. Imagen de la planta de tratamiento Cervecería de Bucaramanga	19
Figura 3. Unidad de tratamiento Primario	21
Figura 4. Esquema del tiramiento secundario	21
Figura 5 Esquema de un tanque gasómetro	26
Figura 5 Grafico de caudal tratado y caudal vertido en el año 2005 y 2006	28
Figura 6. Esquema de la propuesta 1	35
Figura 7. Curva de demanda de cloro	44
Figura 8. Esquema propuesta 2	45

## **Relación de tablas**

Tabla1 Parámetros Exigidos en el Decreto 1584/84	18
Tabla 2 Características del vertimiento de la planta	20
Tabla 3 Características de diseño de la planta	20
Tabla 4. Caracterización Aguas de la PTAR	27
Tabla 5 Tipos de Tratamiento terciario	30
Tabla 6. Parámetros de calidad del agua para aguas de enfriamiento	31
Tabla 7 Tipos de reutilización de agua residual y su aplicación	32
Tabla 8. Posición sistemática de la lemna	47
Tabla 9 Costos de equipos propuesta 1	50
Tabla 10 Inversión en construcción propuesta 1	52
Tabla 11. Inversión construcción de propuesta 1	53
Tabla 12. Costos de equipos propuesta 2	54
Tabla 13. Costos de tubería y accesorios propuesta 2	55
Tabla 14. Adecuación de instalaciones propuesta 2	56
Tabla 15. Inversión en construcción propuesta 2	57
Tabla 16 Tabla comparativa de las propuesta	58

TITULO \* ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE UN SISTEMA DE REMOCIÓN TERCIARIA PARA AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES VERTIDAS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES DE LA CERVECERÍA DE BUCARAMANGA

AUTOR ES: GARCÍA JEREZ, PEDRO FERNANDO \*\*

PALABRAS CLAVES:

Remoción Terciaria, Reutilización De Agua, Procesos Anaerobios, Procesos Aerobios.

Contenido:

El tratamiento terciario de aguas residuales contribuyen a mejorar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua que se vierte a las diferentes fuentes acuíferas, ya que estas sean de origen industrial o domesticas. En el campo industrial pueden ser reutilizadas en sistemas de enfriamiento y sistemas de aseo. En la agroindustrial puede reutilizarse en sistemas de riego y bebederos de animales. Pero un mejor uso del agua radicar en volverla a potabilizar con gran facilidad. La finalidad de este trabajo es realizar el estudio de prefactibilidad para la aplicación de sistemas terciarios en la cervecería de Bucaramanga.

En este documento se presentan dos propuestas de remoción terciaria, el primero consisten en un sistema de tratamiento fisicoquímico el cual cuenta con la etapas de oxidación, coagulación – floculación, sedimentación, filtración, adsorción y desinfección. La segunda propuestas consiste en un sistema de tratamiento natural el cual tiene cuatro etapas: tratamiento acuático; filtración, adsorción y desinfección.

De las dos propuestas se escogió como la más factible, la propuesta 1 ya que por presentar menos costos de implementación y requerir de menor área para el desarrollo del proyecto de tratamiento terciario. Los costos del montaje de sistemas de tratamientos de aguas residuales utilizando sistemas de tratamiento natural como el planteado en la propuesta 2 son altos y requieren de áreas extensas con el fin de construir los sistemas de oxidación 1

---

\* Trabajo de monografía

\*\* Facultad de ciencias; Escuela de Química; Especialización en Química Ambienta; Especialización en Química Ambiental; Director JAIRO CLARET PUENTE BRUGES

TITLE \* PRE-FACTIBILITY STUDY OF A TERTIARY REMOVAL SYSTEM FOR RESIDUAL WATERS SPILT BY THE PLANT OF TREATMENT OF INDUSTRIAL WATERS OF BUCARAMANGA BREWERY

AUTHOR: GARCÍA JEREZ, PEDRO FERNANDO\*\*

KEY WORDS:

Tertiary removal, Reutilization of Water, Anaerobic Processes, Aerobic Processes.

Content:

The tertiary treatment of residual waters help to improve the physicochemical and microbiological properties of the water that is spilt to the different water sources, no matter if these are of industrial or domestic origin. In the industrial field they can be re-used in systems of cooling and systems of bathroom.

In the agro-industrial these water can be re-used in systems of irrigation and drinking-troughs for animals. But a better use of the water is to send it to purify turning it into potable water again with great facility. The purpose of this work is to realize the study of pre-factibility for the application of tertiary systems in Bucaramanga's brewery.

In this document I present two offers of tertiary removal, the first one consists of a physico-chemical system of treatment which needs six steps: oxidation, coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, adsorption and disinfection. The second one proposed consists of a natural treatment system which has four stages: aquatic treatment; filtration, adsorption and disinfection.

Between both offers the most feasible is the first one because it presents lower costs of implementation and needs a small area for the development of the project of tertiary treatment. The costs of assembly a natural treatment system for residual waters (the second one) is high and needs extensive areas in order to construct the oxidation systems.

---

\* Monograph work

\*\* Science Faculty; School of Chemistry; Specialization of Environmental Chemistry; Director: JAIRO CLARET PUENTE BRUGES

## **INTRODUCCIÓN**

Las aguas residuales son materiales derivados de Actividades domésticas, agrícolas o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones de recreación, económicas y estéticas, no pueden desecharse vertiéndolas sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales. Los materiales inorgánicos como la arcilla, sedimentos y otros residuos se pueden eliminar por métodos mecánicos y químicos; sin embargo, si el material que debe ser eliminado es de naturaleza orgánica, el tratamiento implica usualmente actividades de microorganismos que la utilizan y convierten la materia orgánica en CO<sub>2</sub> y otros compuestos.

Es por esto que los tratamientos de las aguas de desecho son procesos en los cuales los microorganismos juegan papeles cruciales. El tratamiento de las aguas residuales da como resultado la eliminación de microorganismos patógenos, evitando así que estos microorganismos lleguen a ríos o a otras fuentes de abastecimiento. Específicamente el tratamiento biológico de las aguas residuales es considerado un tratamiento secundario ya que esta ligado íntimamente a procesos microbiológicos, los cuales pueden ser aerobios, anaerobios y facultativos.

El tratamiento de las aguas residuales comprende una serie de reacciones complejas de digestión y fermentación efectuadas por un huésped de diferentes especies bacterianas, el resultado neto es la conversión de materiales orgánicos en CO<sub>2</sub> y gas metano, este último se puede separar y quemar como una fuente de energía. Debido a que ambos productos finales son volátiles, el efluente líquido ha disminuido notablemente su contenido en sustancias orgánicas.

Las industrias de bebidas generan vertimientos caracterizados por tener gran cantidad de materia orgánica. El tratamiento terciario busca mejorar la calidad de estas aguas industriales con el propósito de mejorar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas con el fin de poder reutilizarlos en otro proceso o darle otros usos.

El presente trabajo tiene como propósito desarrollar el estudio de prefactibilidad para implementar un sistema de remoción terciaria para la planta de tratamiento de aguas residuales de la cervecería de Bucaramanga. Esto con el propósito de mejorar la calidad del efluente final y darle cumplimiento a la ley 373 del 97 donde establece programas quinquenales de ahorro y uso eficiente del agua.

## 1. MARCO TEÓRICO

El tratamiento biológico de las aguas residuales se utiliza en las instalaciones de tratamiento de las aguas generadas por la industria. A continuación se describen sus Características

### 1.1 Procesos Anaeróbios

El proceso anaeróbico depende de reacciones de transferencia de  $H_2$  Inter-especies como:

- Digestión inicial de las sustancias macromoleculares por Proteasas, polisacaridasas y lipasas extracelulares hasta sustancias solubles.
- Fermentación de los materiales solubles a ácidos grasos.
- Fermentación de los ácidos grasos a acetato,  $CO_2$  e  $H_2$ .
- Conversión de  $H_2$  mas  $CO_2$  y acetato en  $CH_4$  (metano) por las bacterias metanogénicas.

Las bacterias celulolíticas rompen las células en celulosa, celobiosa y glucosa libre; la glucosa es fermentada por anaerobios en varios productos de fermentación: acetato, propionato, butirato,  $H_2$  y  $CO_2$ . Las bacterias metanogénicas, homoacetogénicas o reductoras de sulfatos, consumen inmediatamente cualquier  $H_2$  producido en procesos fermentativos primarios. Los organismos claves en la conversión de sustancias orgánicas complejas en metano, son bacterias productoras de  $H_2$  y oxidantes de ácidos grasos, por ejemplo Syntrophomonas y Syntrophobacter, las primeras oxidan los ácidos grasos produciendo acetato y  $CO_2$  y las ultimas se especializan en la oxidación de propionato y genera  $CO_2$  y  $H_2$ . En muchos ambientes anaeróbicos los precursores inmediatos del metano son el  $H_2$  y  $CO_2$  por parte de las bacterias metanogénicas: Metanosphaera, Stadtmanae, Metanopinillum, Metanogenium, Metanosarcina, Metanosaeta y Metanococcus. [1] [2]

Polimeros Complejos

Celulosa,

Otros polisacáridos,

Proteínas

Bacterias celulolíticas HIDRÓLISIS

Y otras hidrolíticas

MONOMEROS

Azucares,

Aminoácidos

Bacterias de FERMENTACIÓN

Fermentación

H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> ACETATO PROPIONATO

BUTIRATO

Bacterias productoras

Acetogenos Acetogenesis de H<sub>2</sub> oxidantes de  
ácidos grasos FERMENTACION

ACETATO H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> ACETATO

Metanogenos Metanogenos

METANOGENESIS

CH<sub>4</sub>

## 1.2 Procesos Aeróbicos

En el tratamiento aeróbico de las aguas residuales se incrementa fuertemente el aporte de oxígeno por riego de superficies sólidas, por agitación o agitación y aireación sumergida simultáneas. El crecimiento de los microorganismos y su actividad degradativa crecen proporcionalmente a la tasa de aireación. Las sustancias orgánicas e inorgánicas acompañantes productoras de enturbiamiento son el punto de partida para el desarrollo de colonias mixtas de bacterias y hongos de las aguas residuales, los floculos

que, con una intensidad de agitación decreciente, pueden alcanzar un diámetro de unos mm dividiéndose o hundiéndose después. [3]

La formación de floculos se ve posibilitada por sustancias mucilaginosas extracelulares y también por las micro fibrillas de la pared bacteriana que unen las bacterias unas con otras. El 40 – 50% de las sustancias orgánicas disueltas se incorporan a la biomasa bacteriana y el 50 – 60% de las mismas se degrada.

La acción degradativa o depuradora de los microorganismos en un proceso se mide por el porcentaje de disminución de la DBO en las aguas residuales tratadas. Dicha disminución depende de la capacidad de aireación del proceso, del tipo de residuos y de la carga de contaminantes de las aguas residuales y se expresa así mismo en unidades de DBO.[1]

El numero de bacterias de los fangos activados asciende a muchos miles de millones por ml, entre ellas aparece regularmente la bacteria mucilaginosa Zooglea ramigera, que forma grandes colonias con numerosas células encerradas en una gruesa cubierta mucilaginosa común, las células individuales libres se mueven con ayuda de flagelos polares. Entre las bacterias de los floculos predominan las representantes de géneros con metabolismo aerobio-oxidativo como Zooglea, Pseudomonas, Alcaligenes, Arthrobacter, Corynebacterium, Acinetobacter, Micrococcus y Flavobacterium.[1] [6]

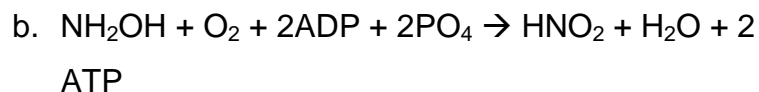
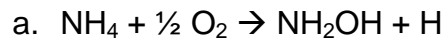
Pero también se presentan bacterias anaerobias facultativas, que son fermentativas en ausencia de sustratos oxigenados, de los generos Aeromonas, Enterobacter, Escherichia, Streptococcus y distintas especies de Bacillus. Todas las bacterias contribuyen con

las cápsulas de mucílago y con las microfibrillas al crecimiento colonial y a la formación de los floculos. En las aguas residuales con una composición heterogénea, la microflora se reparte equitativamente entre muchos grupos bacterianos. En la selección de bacterias y en la circulación y formación de floculos juegan un importante papel los numerosos protozoos existentes, la mayoría de ellos ciliados coloniales y pedunculados de los géneros Vorticela, Epystilis y Carchesium, aunque también puedan nadar libremente como los Colpidium que aparecen a la par de ellos, alimentándose de las bacterias de vida libre que se encuentran tanto sobre la superficie como fuera de las colonias. Su función es esencial en la consecución de unas aguas claras y bien depuradas. [1] [8]

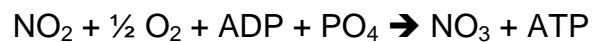
La salida de los fangos activados sintéticos libres de ciliados se ve contaminada y enturbiada por la presencia de bacterias aisladas. Se realiza una inoculación de ciliados que crecen rápidamente, favoreciendo con su actividad depredadora el crecimiento y la circulación de las bacterias de los fangos, con lo que posibilitan un efluente mas limpio. Además en los fangos activados aparecen regularmente hongos edáficos y levaduras, siendo las mas frecuentes las especies de Geotrichum, Trichosporum, Penicillium, Cladosporium, Alternaria, Candida y Cephalosporium. Tras la depuración biológica, las aguas residuales contienen compuestos orgánicos, fosfatos y nitratos disueltos que solo se degradaran ya lentamente. Los nitratos se forman por oxidación del amonio desprendido en la degradación de compuestos orgánicos nitrogenados. Esta es una tarea de las bacterias Nitrificantes, uno de cuyos grupos esta representado en las aguas residuales principalmente por Nitrosomonas y Nitrospira, que únicamente llevan a cabo la reacción de oxidación del amonio a nitrito para obtener energía metabólica, mientras que un segundo grupo de

bacterias, que aparece siempre junto al ya citado y que esta representado por Nitrobacter, oxida el nitrito a nitrato y obtiene energía gracias exclusivamente a este proceso:

Oxidación del amonio:



Oxidación del nitrito:



Otros microorganismos que también intervienen en el tratamiento aerobio de aguas residuales son: Citrobacter, Serratia, mohos y levaduras que actúan más de componentes acompañantes que de degradantes y algunas algas como Anabaena que convierte los poliuretanos en H<sub>2</sub>; Chrorella los alginatos los convierte en glicolato; Dulaniella los alginatos en glicerol; Nostoc el agar el H<sub>2</sub>; Algas como el Volvox, Tabellaria, Anacistis y Anabaena; las algas que obstruyen los filtros son Anacistis, Chrorella, Anabaena y Tabellaria. [8] [9]

### 1.3 Tratamiento avanzado de las aguas efluentes

Si el agua que ha de recibir el vertido requiere un grado de tratamiento mayor que el que puede aportar el proceso secundario, o si el efluente va a reutilizarse, es necesario un tratamiento avanzado de las aguas efluentes. A menudo se usa el término tratamiento terciario como sinónimo de tratamiento avanzado, pero no son exactamente lo mismo. El tratamiento terciario suele emplearse para eliminar el fósforo, mientras que el tratamiento avanzado podría

incluir pasos adicionales para mejorar la calidad del efluente eliminando los contaminantes recalcitrantes. Hay procesos que permiten eliminar más de un 99% de los sólidos en suspensión y reducir la DBO en similar medida. Los sólidos disueltos se reducen por medio de procesos como la ósmosis inversa y la electro diálisis. La eliminación del amoníaco, la desnitrificación y la precipitación de los fosfatos pueden reducir el contenido en nutrientes. Si se pretende la reutilización del agua residual, la desinfección por tratamiento con ozono es considerada el método más fiable, excepción hecha de la cloración extrema. [6] [15]

En la figura 1 se presenta el resumen de los diferentes tratamientos que actualmente se utilizan para mejorar las condiciones microbiológicas de aguas residuales de origen industrial y domestico. [6]

#### 1.4 Aspectos legales.

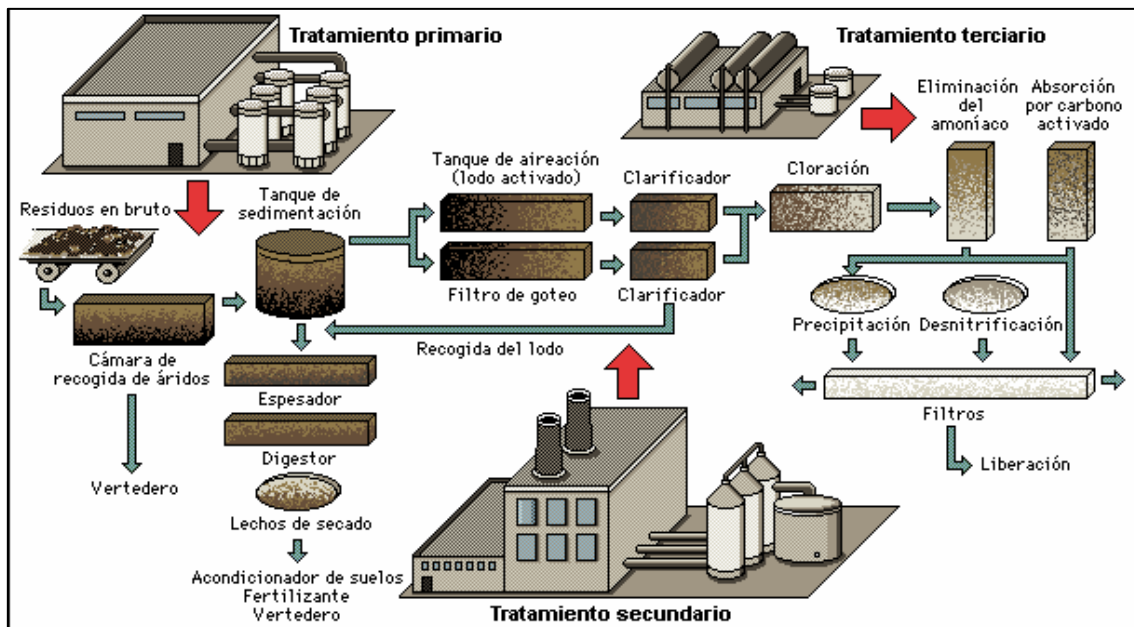
La planta de tratamiento de agua residual basa sus parámetros de medición en el decreto 1594 de 1984, en el cual se establecen los límites permisibles de vertimientos, los parámetros más importantes se reportan en la tabla 1. La cervecería cuenta con un sistema de alcantarillado separado entre aguas residuales industriales/domésticas y las aguas lluvias.

A la PTAR llegan la totalidad de las aguas industriales y domésticas generadas en la cervecería; las aguas lluvias son conducidas directamente al río Surata, pues no requieren de ningún tipo de tratamiento.

Tabla1 Parámetros exigidos en el Decreto 1584/84

PARÁMETRO	NORMA (Dcto 1594/84)
pH	5-9
TEMPERATURA(°C)	Menor de 40
SS ml/l*h)	Max. 10
MATERIAL FLOTANTE	Ausente
ACEITES Y GRASA (mg/l)	Menor de 50
SST (mg/l)	Mayor 50%
DBO5 (Eficiencia de remoción)	Mayor de 50%

Figura 1 Etapas del tratamiento de las aguas residuales



## **2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES CERVECERÍA DE BUCARAMANGA**

La planta de tratamiento de aguas residuales de la cervecería de Bucaramanga se encuentra ubicada en la zona sur oriental de la cervecería, es del tipo Anaeróbico de Flujo Ascendente y manto de lodos con recirculación interna (IC – UASP por su sigla en inglés) con tecnología Paques de desarrollo Holandés.

Figura 2. Imagen de la planta de tratamiento Cervecería de Bucaramanga



La planta consta de un sistema de tratamiento primario cuya finalidad es retirar la mayor parte de los sólidos suspendidos contenidos en el agua residual, y el sistema de tratamiento secundario que permite remover la materia orgánica soluble con una eficiencia superior al 80 %

## 2.1 Características técnicas

Las características del vertimiento de la planta y las características de diseño de la planta se resumen en las tablas 2 y 3 respectivamente

Tabla 2 Características del vertimiento de la planta

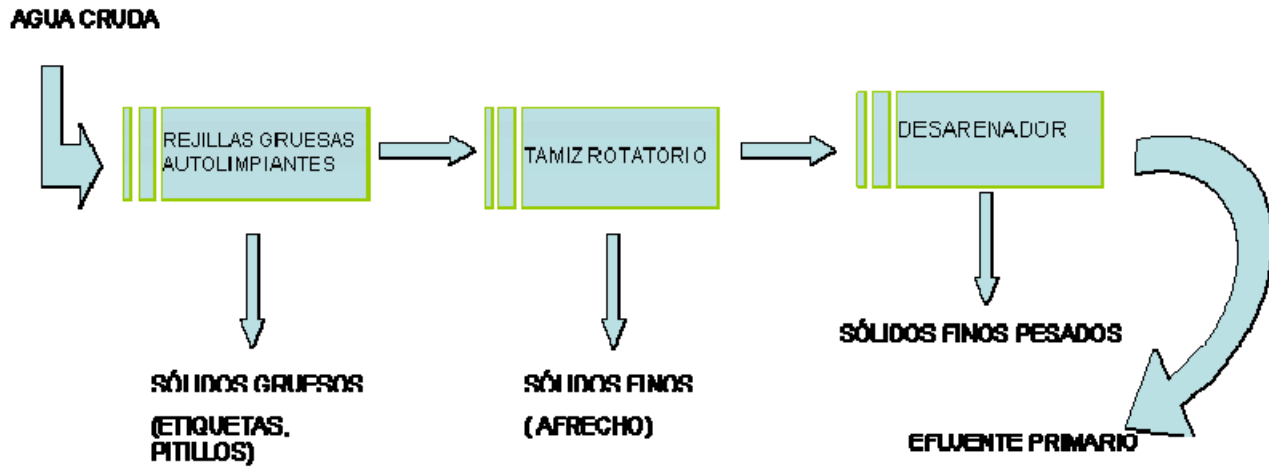
CAUDAL PROMEDIO ( M <sup>3</sup> /H)	110
Tiempo máxima descarga (min.)	15
DQO (mg/l)	800 – 2100
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	650 – 1700
Carga diaria de DBO <sub>5</sub> (Kg/d)	1400 – 3700
Carga diaria de DQO ( Kg/d)	1700 -4550
Temperatura promedio en °C	27
Sólidos suspendidos totales	500 max
Aceites y grasas ( mg/l)	50 max

Tabla 3 Características de diseño de la planta

CAUDAL PROMEDIO (M <sup>3</sup> /H)	90
Caudal máximo (m <sup>3</sup> /h)	180
Tiempo máximo de descarga (min.)	15
DQO máximo (mg/l)	2300
Carga diaria en DQO (Kg/d)	4968
Tasa de aplicación máxima ( Kg DQO/m <sup>3</sup> -d)	22
Temperatura máxima °C	39
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	800 máximo
Aceites y Grasas (mg/l)	50 máximo

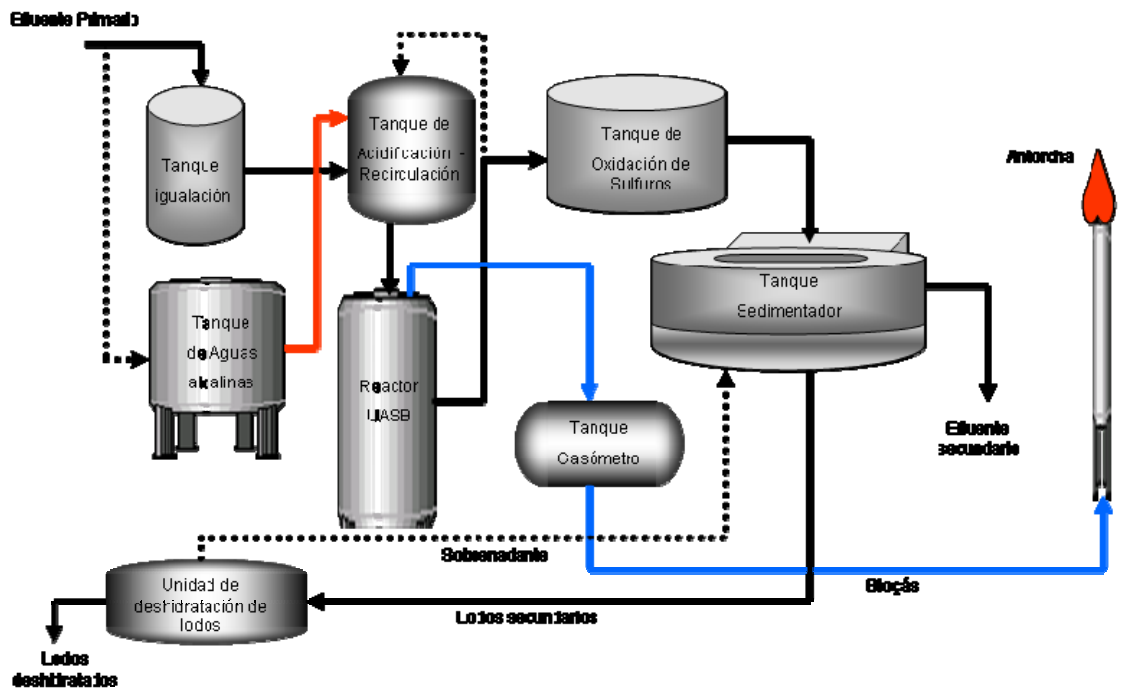
## 2.2 Unidades de tratamiento primario

Figura 3. Unidad de tratamiento Primario



## 2.3 Unidades de tratamiento secundario

Figura 4. Esquema del tratamiento secundario



## 2.4 Descripción general de la operación

El vertimiento proveniente de la cervecería de Bucaramanga se compone de los residuos líquidos generados en las áreas de cocinas, uniproceso, filtración, envase, agua Brisa, depósito mantenimiento y áreas administrativas (aguas residuales domésticas). [5]

Una vez el agua pasa por el sistema de tratamiento primario el caudal de agua residual ingresa al tanque de igualación para su homogenización. Si se presentan condiciones externas de pH o temperatura por lo general descarga de soda, el agua entra al tanque de aguas Alcalinas para luego ser dosificadas al tanque de acidificación – recirculación con el fin de ayudar a ajustar el pH y reducir el consumo de neutralizantes. El agua una vez homogenizada en carga orgánica y pH es alimentada al tanque de acidificación – recirculación donde el agua es adecuada al pH requerido (6.5 y 7.5). En esta unidad el agua se le proporciona un tiempo de retención para que ocurra la formación de ácido acético y los otros ácidos volátiles que contribuyen a la forma asimilable de la carga orgánica para las bacterias metanogénicas. [5]

De esta manera el agua alcanza las condiciones adecuadas para ser enviada al reactor IC y ser sometida al tratamiento secundario propiamente dicho. El reactor consiste en un tanque alto y delgado que contiene lodo granular, responsable de la degradación anaeróbica de la materia orgánica. El agua es alimentada por la base del reactor y entra inmediatamente en contacto con el lodo y después de un tiempo de contacto o retención hidráulico de aproximadamente la materia orgánica se degrada por efecto de las bacterias metanogénicas generándose el biogás

correspondiente. El Flujo ascendente de agua y el biogás formado expanden el lecho de lodo, es decir, lo elevan a todo lo alto de la torre optimizando el contacto de éste con el agua residual. El grado de expansión depende de la carga hidráulica alimentada al reactor y el volumen de biogás generado. [5]

El reactor contiene dos compartimientos con separadores gas – líquido. En el primero de ellos se genera la mayor cantidad de gas el cual permite la expansión del lodo y el ascenso de los fluidos a la parte superior de la torre a través de las tuberías de elevación (riser) hasta el tanque desgasificador donde ocurre la separación de gas de la mezcla lodo – agua. El gas separado sale del reactor almacenándolo en el tanque gasómetro y es quemado en la antorcha, mientras que una mezcla lodo – agua retorna por una tubería central (downer) hasta el fondo del reactor IC, proceso conocido como recirculación interna. El segundo compartimiento opera como una unidad de acabado o pulimento, en la cual, parte de la materia orgánica que no alcanzó a ser transformada en biogás en la primera parte, lo realice en este compartimiento. De la misma forma que en la primera unidad, los fluidos ascienden por tuberías de elevación y se separan en el tanque desgasificador. [5]

Finalmente, el efluente tratado es evacuado por la porción superior del reactor y llevado al tanque de oxidación de sulfuros para la remoción del sulfuro de hidrógeno formado en las reacciones metanogénicas. Este tanque posee difusores localizados en su base que suministran el aire necesario para la oxidación, ya su vez trabaja como una unidad adicional de tratamiento aerobio. El agua abandona el tanque de oxidación por rebose y se dirige finalmente al tanque de sedimentación secundaria donde se tiene la mayor parte de los sólidos arrastrados por el agua en su paso por el reactor y el

tanque de oxidación antes de su salida de la planta, el cual es aforado en la canaleta Parshall de salida [5]

#### 2.4.1 Línea de lodos

Los residuos generados por la operación de la planta de tratamiento son los lodos. En general, los lodos son materiales pastosos formados por la suspensión de un alto contenido de sólidos en un medio líquido que generalmente es agua. Durante la operación normal de la planta se generan tres tipos de lodos:

Lodos primarios

Lodos secundarios

Lodos anaerobios

Los lodos primarios surgen de la separación de sólidos suspendidos de las unidades de tratamiento primario: rejilla gruesa, tamiz rotatorio y desarenadores. La naturaleza de estos lodos depende de cada unidad en particular. Así los lodos de la rejilla gruesa están constituidos prácticamente por residuos gruesos como etiquetas y pitillos plásticos. Los lodos del tamiz están formados por residuos donde predominan el afrecho y fragmentos de etiqueta principalmente, y tienen un mayor contenido agua. Los residuos sólidos de los desarenadores tienen mayor contenido de agua. [5]

Los lodos secundarios son separados por el tanque sedimentador circular y que provienen del reactor IC y del tanque de oxidación de sulfuros (unidad de tratamiento secundario). Están constituidos en su mayor parte por sólidos finos que se generan por la actividad biológica en el tanque de oxidación. Estos sólidos se asientan en el sedimentador y son acumulados en la tolva del fondo con ayuda de un barredor mecánico que los arrastra y conduce hasta esta unidad.

Son lodos de naturaleza orgánica con un contenido de 1 a 5% de sólidos secos (10.000 – 50.000 mg/l de sólidos totales). Estos lodos necesitan ser desaguados y estabilizados antes de su disposición final sobre suelo o relleno sanitario. La planta cuenta con una unidad para el espesado y desaguado de lodos. [5]

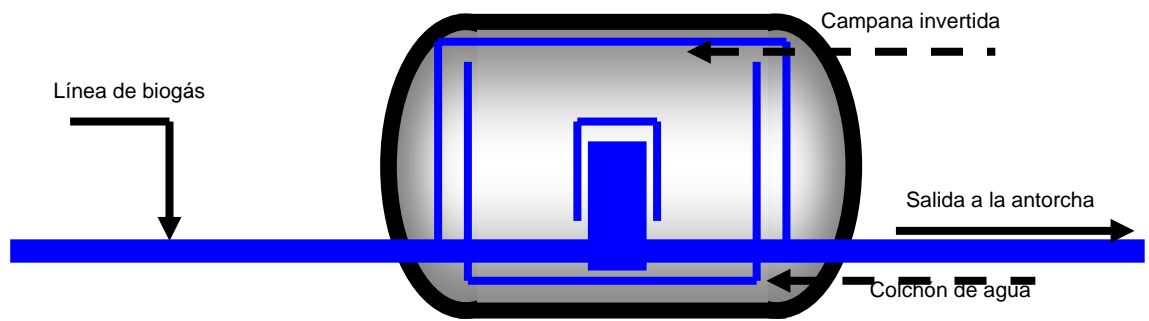
#### 2.4.2 Línea de biogás

El biogás generado como producto de la degradación anaeróbica de la materia orgánica y que se forma en el interior del reactor asciende hasta la parte superior de éste hasta el tanque degasificador, unidad que tiene como función separar la fase gaseosa de la mezcla lodo – agua.

El biogás separado sale del reactor y es llevado por tubería metálica hacia la unidad de quemado. Previamente a la combustión del gas metano, cantidad de biogás que pasa en cada instante por la línea es medida por un medidor de flujo. La lectura de caudal instantáneo se muestra localmente en el medidor y también está disponible en la pantalla de l sistema automático de supervisión. [5]

Cuenta con una unidad adicional localizada entre el medidor de flujo y la antorcha de quemado, cuya función es mantener la presión en la línea para permitir el paso regulado del gas en la antorcha. Dicha unidad se conoce como tanque gasómetro. Consiste básicamente en una campana sobre un cilindro hueco. A medida que el gas ingresa al gasómetro, la campana se levanta en proporción al caudal que ingresa en ese instante. Una ranura cuya área varía dependiendo del grado de levantamiento de la campana permite la salida del biogás. [5]

Figura 5 Esquema de un tanque gasómetro



### 3. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

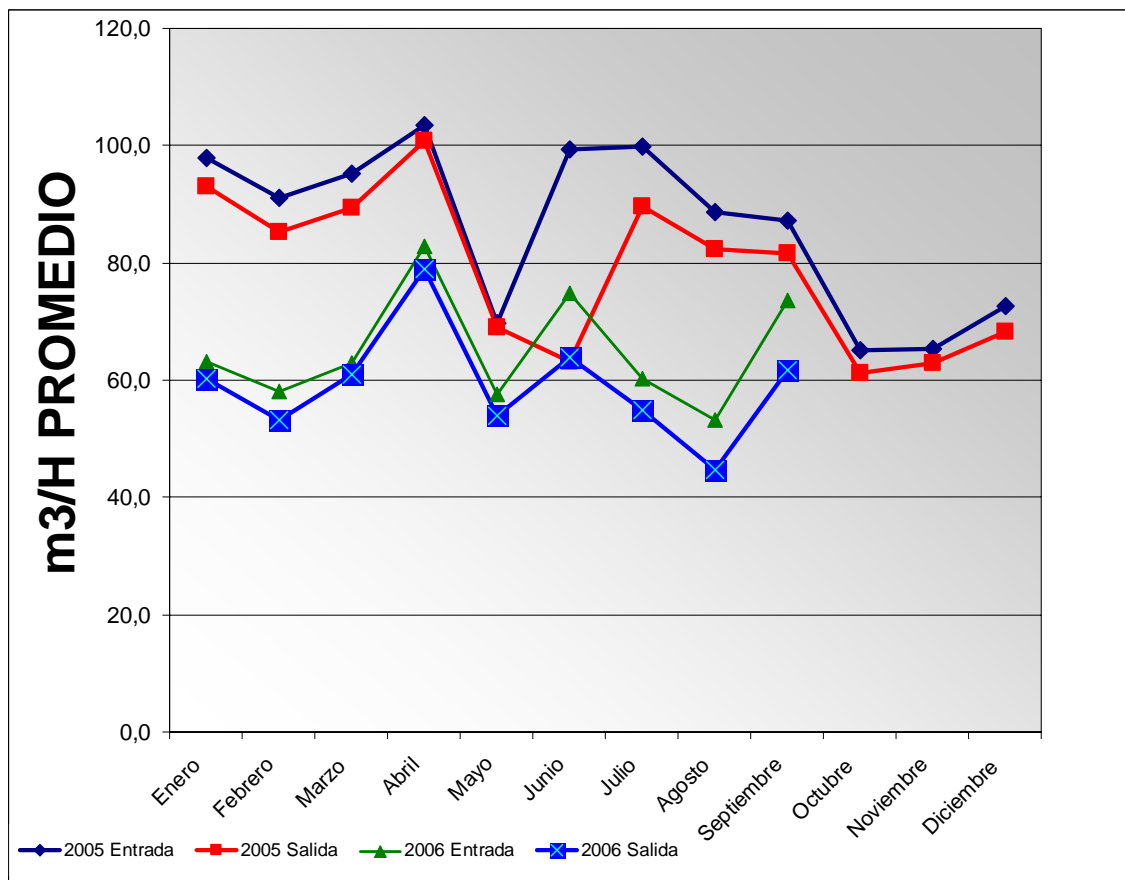
En la tabla 4 se presenta los resultados de análisis realizados en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas residuales de la cervecería y el laboratorio de consultas industriales de la UIS (grasas y aceites, Nitrógeno total y Fósforo total) para la primera semana del mes de septiembre. Estas determinaciones se realizan aplicando las técnicas analíticas descritas en el Standard Method.

Tabla 4. Caracterización Aguas de la PTAR

PARÁMETRO	Punto de muestreo	Resultado
Caudal (m3/ día)	Entrada Planta	7283
	Salida Planta	6941
DQO (mg/l)	T. Igualación	4940
	T. Acidificación # 1	2235
	T. Acidificación # 2	2172
	Efluente Reactor # 1	839
	Efluente Reactor # 2	835
	Salida Planta	642
	% Remoción Reactor # 1	62,46
	% Remoción Reactor # 2	61,56
	% Remoción Planta	87,00
DBO5 (mg/l)	Entrada Planta	3900
	Salida Planta	480
	Eficiencia - Remoción (>50%)	87,69
SST (mg/l)	Efluente sin ningún tratamiento	57495
	Entrada Planta	398
	Salida Planta	121
	Eficiencia - Remoción (>50%)	99,79
Grasas y Aceites (mg/l)	Entrada Planta (< 50 mg/l)	33,89
	Salida Planta (< 50 mg/l)	9,05
Nitrógeno Total (mg/l)	Entrada Planta	48,98
	Salida Planta	28,47
Fósforo Total (mg/l)	Entrada Planta	27,0
	Salida Planta	45,0
pH	Salida Planta (5 - 9)	7,38
Temperatura	Salida Planta (<40°C)	32,0

Caudal vertido en el año 2005 se vertió un caudal de 80 m<sup>3</sup> y en lo que va corrido del año 2006 60 m<sup>3</sup>. Se observa una disminución del promedio de caudal vertido al río surata Gracias al ahorro y reutilización del agua.

Figura 5 Grafico de caudal tratado y caudal vertido en el año 2005 y 2006



#### **4. OPCIONES DE TRATAMIENTO TERCIARIO**

El tratamiento terciario de aguas residuales es el proceso en el cual se mejora la calidad y depuración del agua, con algún fin específico, ya sea para cumplir con la legislación o para lograr su reutilización.

Entre las operaciones que se utilizan en el tratamiento terciario de aguas contaminadas están: filtración, coagulación y precipitación, adsorción por carbón activado, intercambio iónico, lagunas, ósmosis inversa y desinfección. En el tratamiento terciario se busca eliminar los contaminantes orgánicos, los nutrientes, como los iones fosfato y nitrato o cualquier exceso de sales minerales; reducir los sólidos en suspensión, disminuir la demanda bioquímica de oxígeno, DBO, la demanda química de oxígeno, DQO, y eliminar microorganismos patógenos. Los tipos de tratamiento terciario de las aguas residuales se pueden clasificar, según el objetivo de la eliminación que se requiere.

En la Tabla 5 se muestran clasificados, por la función de eliminación y el proceso u operación que se utiliza. La selección de una operación o proceso está determinada por factores como el uso potencial del efluente por tratar, las características del agua residual, la afinidad de las operaciones y procesos, los medios que se dispongan para el vertido de las cargas contaminantes y la factibilidad económica, ambiental y social de los diferentes tratamientos. [9] [18]

Tabla 5 Tipos de Tratamiento terciario [1]

<b>Función de eliminación</b>	<b>Proceso u operación</b>
Eliminación de sólidos suspendidos	Filtración
	Micro tamices
Eliminación de nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación biológica
Eliminación de nitratos	Desnitrificación biológica en etapas separadas
Eliminación biológica conjunta de nitrógeno y fósforo	Nitrificación/desnitrificación biológica y eliminación de fósforo
Eliminación física o química de nitrógeno y fósforo	Arrastre por aire
	Cloración al punto de quiebre
	Intercambio Iónico
Eliminación de fósforo por adición de reactivos químicos	Precipitación química con sales metálicas
	Precipitación química con cal
Eliminación de compuestos tóxicos y materia orgánica	Adsorción sobre carbón
	Lodos activados - Carvón activado en polvo
	Oxidación química
Eliminación de sólidos disueltos	Intercambio iónico
	Precipitación química
	Ultra filtración
	Osmosis Inversa
	Electrodialisis
Compuestos orgánicos volátiles	Volatilización y arrastre con gas

Uno de los aspectos más importantes para economizar agua y dinero es aplicar métodos de reutilización del agua residual para un uso beneficioso. La planificación para la concepción e implementación de sistemas de recuperación y reutilización de aguas residuales debe disponer de las etapas y procesos que se

relacionan, tanto con el abastecimiento de agua como para el saneamiento.

El factor que generalmente determina el nivel de tratamiento necesario es el uso al cual se destina el agua. Las principales aplicaciones de la reutilización son riego agrícola y espacios verdes, aplicaciones industriales, recarga de acuíferos y abastecimiento de agua. En la tabla 7 se contemplan los tipos de reutilización y sus aplicaciones. [9] [18]

La importancia del tratamiento terciario radica en la reutilización del agua para otros procesos e incluso para volver a potabilizar y en la calidad de aguas vertidas a los ríos las cuales contribuyen a mantener las fuentes acuíferas, para este fin se propone dos propuestas de tratamiento en la cual el tratamiento terciario tendría como finalidad reutilizar el agua en procesos de servicios generales (enfriamiento de equipos) los cuales requieren una calidad de agua que se resumen en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de calidad del agua para aguas de enfriamiento. [7]

<b>Parámetro</b>	<b>intervalo</b>	<b>unidades</b>
pH	7 a -8	unidades
Dureza total	650	mg/l
Dureza cálcica	80 -180	mg/l
Relación de dureza	2,0 -5,0	unidades
Alcalinidad total	40 - 120	mg/l
Índice de Ryznar	6,0 - 7,0,	unidades
DBO	<25	mg/l
DQO	<75	mg/l
Turbiedad	<50	UNT
Sólidos suspendidos Totales (SST)	<100	mg/l

Tabla 7 Tipos de reutilización de agua residual y su aplicación [1]

Tipo de reutilización		Aplicación
Para uso urbano	Riego de Zonas Verdes	Parques
		Aire acondicionado
		Fuentes Ornamentales
		Agua para incendios
		Riego de campos deportivos
	Zonas especiales	Cementerios
		Cinturones Verdes
		Áreas residenciales
Riegos Agrícolas	Consumo humano	Cultivos para consumo humano no procesados
	No se consumen o se consumen después del procesarlos	Forraje, pastos
		Fibras
		Viveros, Semillas
		Acuicultura
		Selvicultura
Usos Lúdicos	Contacto agua/usuario	fabricación de nieve
	Actividades Sin contacto	Campos de Golf
		Pesca
		Remo/ navegación
Ganadería	Calidad potable	Agua de bebida
	Calidad no potable	Limpiezas
		Arrastre de residuos
Reutilizaciones Industriales	Agua de procesos agua para limpieza /lavado Enfriamientos Obras públicas	Calderas
		Agua para refrigeración
		Agua Para Enfriamiento
		Control de polvo
		Compactación de suelos
Reutilización potable	Agua de abastecimiento	Suministro total
		Mezcla con otras fuentes

## **5. PLANTEAMIENTO DE PROPUESTAS USO DE AGUA**

Teniendo en cuenta la calidad y posible uso del agua para reutilizar, las áreas donde se podría emplear el agua del tratamiento terciario, sin que sea afectada la calidad del producto o del proceso cervecero, son:

- Agua de reposición en torres de enfriamiento.
  
- Condensadores – Evaporativos.
  
- Enfriamiento de máquinas.

### 5.1 Áreas para reutilización del agua

#### 5.1.1 Agua de reposición en torres de enfriamiento

La planta cuenta con un sistema de agua de enfriamiento con recirculación, en el cual se toma agua del estanque de la torre de enfriamiento, pasa a través de los equipos que requieren enfriamiento, y luego regresa a través de una unidad de evaporación. El sistema repite este proceso de recirculación, tomando suficiente agua fresca para reposición, -“make up” para compensar el agua evaporada, así como la purga del sistema.

Existen cinco torres de enfriamiento de tiro inducido a contraflujo las cuales están compuestas por ventiladores ubicados en la parte superior que impulsan hacia arriba el aire de enfriamiento a través del agua que cae. Las persianas de acceso de aire se localizan en la parte inferior, de tal manera que el aire circula a baja velocidad por la sección empacada y es descargado por la chimenea a alta velocidad. Además de las pérdidas de agua debidas a la evaporación, la alta velocidad de descarga causa pérdidas por gotas

que son arrastradas por la corriente de aire. El consumo de agua en torres de enfriamiento es de aproximadamente 450 m<sup>3</sup>/mes.

#### 5.1.2 Condensadores - Evaporativos

La planta cuenta con cuatro condensadores evaporativos, los cuales están formados por un serpentín por el cual circula el refrigerante (amoniac); este serpentín es enfriado por un sistema de aspersión de agua y un ventilador ubicado en la parte posterior de cada uno de los condensadores, de manera que al hacer circular una corriente de aire, el agua que cae sobre la superficie de los tubos se evapora, extrayendo calor. El consumo de agua de los condensadores - evaporativos es de 1000 m<sup>3</sup>/mes. [3] [13]

#### 5.1.3 Enfriamiento de máquinas

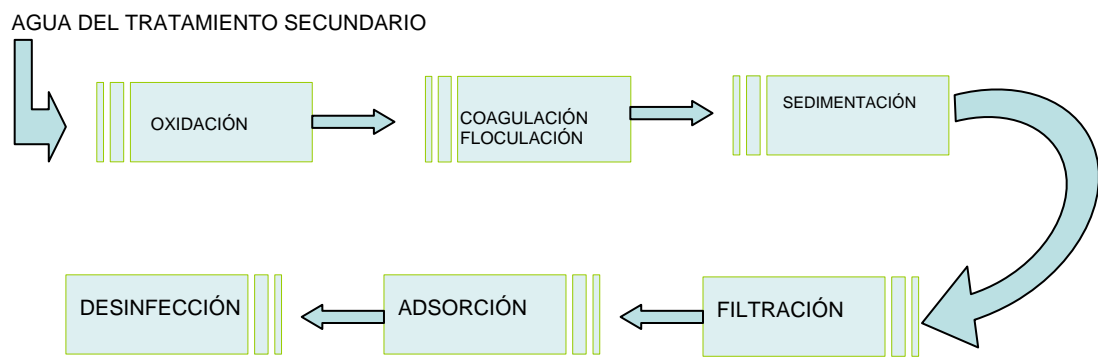
En la planta, se utilizan como fluidos de enfriamiento agua y amoniaco, siendo este último el más utilizado. El enfriamiento con agua se aplica a bombas, motores y otros equipos que requieren continuo mantenimiento y que hacen parte del área de servicios Industriales. El consumo para este fin es de 600.

## 6 PROPUESTAS

### 6.1 Propuesta 1

La primera propuesta planteada consiste de un tratamiento físico-químico. Las etapas se ilustran en la figura 5.

Figura 6. Esquema de la propuesta 1



#### 6.1.1 Oxidación

Los procesos de oxidación química se usan para reducir los niveles de DQO/DBO y para eliminar compuestos inorgánicos y orgánicos oxidables. Los procesos de oxidación más comunes son: [1] [13]

- Oxidación con peróxido de hidrógeno, ozono, permanganato de potasio, hipoclorito de sodio y de calcio, el reactivo de Fenton, entre otros.
- Oxidación ultravioleta (Uy), combinada con otros agentes oxidantes.

Debido a la alta carga orgánica del agua residual, la oxidación permite disminuir la cantidad de sólidos y la demanda de oxígeno en el efluente.

## 6.1.2 Coagulación – Floculación

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, llamadas “floc”. Tiene como funciones principal desestabilizar, agregar y unir sustancias coloidales presentes en el agua, mediante la adición de sustancias químicas denominadas coagulantes, que se distribuyen uniformemente sobre ella y forman un floc fácilmente sedimentable. El proceso remueve turbiedad, color, bacterias, algas y otros organismos planctónicos, fosfatos y sustancias productoras de olores y sabores.

Aunque es común referirse a coagulación como el proceso de adición de coagulante, mezcla rápida, floculación y sedimentación; se debe tener en cuenta que la coagulación es el proceso químico por el cual se añade un coagulante al agua, con el objeto de destruir la estabilidad de los coloides y promover su agregación, mientras la floculación es el proceso físico de mezcla lenta, por medio del cual se incrementa la posibilidad de choque entre partículas y, por consiguiente, la formación del floc. [6] [11]

### 6.1.2.1 Coagulantes

Coagulantes son aquellos compuestos capaces de formar un floc y que pueden efectuar coagulación al ser adicionados al agua, desestabilizando las sustancias coloidales. Se pueden clasificar en poli electrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos.

### 6.1.2.2. Polielectrolítos

En los polielectrolítos, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se agregan al agua. Se clasifican como catiónicos, aniónicos

y no iónicos. Los catiónicos son polímeros que al disolverse producen iones de carga positiva, los aniónicos producen iones de carga negativa y los no iónicos producen iones tanto positivos como negativos. [6] [11]

#### 6.1.2.3 Coagulantes metálicos

En los coagulantes metálicos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa. Existe una variedad de coagulantes metálicos que se pueden clasificar en tres tipos: sales de aluminio, sales de hierro y compuestos varios. [9] [18]

#### 6.1.2.4 Sulfato de aluminio

El producto comercial tiene usualmente la fórmula  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 12H_2O$  con masa molecular de 600. Cuando se añaden soluciones de sulfato de aluminio al agua, las moléculas se disocian en  $Al^{3+}$  y  $SO_4^{2-}$ . El  $Al^{3+}$  puede combinarse con coloides cargados negativamente para neutralizar parte de la carga de la partícula coloidal, el fenómeno predominante en este tipo de soluciones que promueven la coagulación es el de adsorción y neutralización de la carga. Comúnmente el pH efectivo para coagulación con alumbre es de 5,5 a 8,0.

#### 6.1.3 Filtración

El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos que no han sido removidos en las etapas de coagulación y sedimentación. El proceso de filtración remueve el material suspendido, medido como turbiedad, compuesto de floc, suelo, metales oxidados que puedan interferir con la desinfección, al proveer protección a los microorganismos de la acción del

desinfectante.

La filtración depende de una combinación compleja de mecanismos físicos. Entre estos mecanismos se encuentran: el cribado, la sedimentación, el impacto inercial, la intercepción, la adhesión, la adsorción física, la floculación y el crecimiento biológico. [4] [13]

#### 6.1.3.1 Sistemas de filtración

Los filtros se clasifican de acuerdo con el tipo de funcionamiento, dirección del flujo, tipo y configuración de los lechos filtrantes, la fuerza impulsora, tasa de filtración y el método de control de la tasa de filtración.

#### 6.1.3.2 Tipo de funcionamiento

Los filtros se pueden clasificar en continuos o semicontínuos. Los filtros semicontínuos se mantienen operando hasta que se empieza a deteriorar la calidad del efluente o hasta que se produzca una pérdida de carga excesiva en el filtro. En los filtros continuos, la etapa de filtración y lavado se realiza de manera simultánea. Los filtros se pueden clasificar en filtros de flujo ascendente o descendente. También se puede clasificar de acuerdo con el número de capas del material filtrante. Se utilizan generalmente un solo medio, como arena o antracita, medio dual con arena y antracita o multimedio con arena, grava, antracita, granate o ilmenita.

#### 6.1.3.3 Fuerza impulsora

Según la fuerza impulsora utilizada, los filtros se pueden clasificar como filtros de gravedad o de presión. En los filtros a presión la operación de filtrado se lleva a cabo en un depósito cerrado, bajo condiciones de presión conseguidas mediante bombeo; suelen

funcionar con mayores pérdidas de carga máximas admisibles, lo cual conduce a ciclos de filtración más largos y a menores necesidades de lavado. [13]

#### 6.1.3.4 Tasa de filtración

La filtración puede realizarse con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos).

Método de control de la tasa de filtración la tasa de filtración de un filtro puede expresarse con la siguiente ecuación:

Velocidad de flujo = Fuerza Impulsora / Resistencia del filtro.

En esta ecuación, la fuerza impulsora representa la pérdida de presión a través del filtro. Los principales métodos usados para controlar la tasa de filtración son: filtración a caudal constante, donde se controla el caudal de entrada para asegurar que el caudal que circula por el filtro es constante, mediante vertederos o bombeo; y filtración a caudal variable decreciente, donde el caudal que pasa a través del filtro va disminuyendo conforme aumenta la pérdida de carga. [6]

#### 6.1.3.4 Adsorción

La adsorción es un fenómeno que ocurre cuando moléculas en solución golpean la superficie de un sólido adsorbente y son adheridas a su superficie. El material concentrado constituye el adsorbato y el material que adsorbe es el adsorbente. La adsorción supone la acumulación del adsorbato sobre una superficie o interfaz. La adsorción de contaminantes sobre carbón activado es muy usada

en el tratamiento de aguas y en la purificación del aire. Existen tres tipos de adsorción: física, química y de intercambio.

La adsorción física no es específica y se debe a la acción de fuerzas débiles de atracción entre moléculas, como las fuerzas de Van der Waals; en tal caso, la molécula adsorbida tiene movimiento libre sobre la superficie del sólido adsorbente y no está unida a un sitio específico; puede condensarse y formar varias capas superpuestas sobre la superficie del adsorbente, y por lo general es reversible. [1]

La adsorción química se debe a fuerzas mucho más potentes, como las que conducen a la formación de compuestos químicos; el compuesto adsorbido forma una capa monomolecular sobre la superficie del adsorbente y las moléculas no son libres de moverse de un sitio a otro; cuando la superficie está cubierta por el material adsorbido, la capacidad del adsorbente está prácticamente agotada.

La adsorción química no es, generalmente, reversible y para remover el material adsorbido se debe calentar el adsorbente.

La adsorción de intercambio se usa para describir la adsorción debida a la atracción eléctrica entre el adsorbato y la superficie del adsorbente, como ocurre en el intercambio iónico. Los iones de un contaminante se concentran sobre sitios de carga eléctrica opuesta sobre la superficie del adsorbente. A mayor carga eléctrica del ión, mayor atracción; así mismo, a menor tamaño del ion, mayor atracción.

#### 6.1.3.5 Carbón activado

Es un material fabricado a partir de compuestos de carbono, con propiedades de adsorción. El carbón activado remueve contaminantes orgánicos del agua por el proceso de adsorción, atrayendo y acumulando el adsorbato sobre su superficie; adicionalmente, es un material carbonáceo sujeto a oxidación

selectiva para producir una estructura altamente porosa y para proveer una inmensa área superficial.

La gran área superficial del carbón activado por unidad de masa, lo hace uno de los adsorbentes más usados en tratamiento de aguas. El carbón activado granular posee áreas superficiales de 500 a 1400 m<sup>2</sup> por gramo de carbón, con diámetro de poros entre 10<sup>-7</sup> y 10<sup>-5</sup> cm . Las aplicaciones más usadas del carbón activado para tratamiento de aguas son:

- Remoción de sustancias orgánicas que producen olores y sabores.
- Remoción de trihalometanos, pesticidas y compuestos orgánicos de cloro.
- Remoción de residuos orgánicos tóxicos o peligrosos.
- Remoción de metales pesados. [6] [15]

#### 6.1.3.5.1 Carbón activado granular

El carbón activado granular (CAG) tiene densidad aparente de 0,4 a 0,5 g/cm<sup>3</sup>, diámetro promedio de partículas de 1,2 a 1,6 mm, densidad de partículas de 1,4 g/cm<sup>3</sup>. Se usa tanto en purificación de aguas como en tratamiento de aguas residuales, con el fin de explotar su gran capacidad adsorptiva para remover sustancias orgánicas disueltas y su capacidad de filtración para remover sustancias suspendidas. El CAG es un poco más costoso que el carbón en polvo, pero es más fácil de manejar, más sencilla su regeneración y es el carbón usado en procesos de flujo continuo. [6] [15]

#### 6.1.3.5.2 Filtros de carbón activado

Los filtros de carbón activado granular (CAG) se operan generalmente con flujo ascendente o descendente y deben lavarse

con agua de óptima calidad. La regeneración del carbón puede efectuarse mediante lavado con solventes orgánicos, ácido mineral, sustancias cáusticas, vapor o calor seco. Un método de regeneración térmica consiste en un secado a 100°C, pirólisis de los adsorbentes a menos de 800 °C y oxidación a temperaturas mayores de 800°C; las pérdidas de carbón, por ignición y otras causas, pueden ser del 10% en cada regeneración. [11] [18]

#### 6.1.4. Desinfección

Desinfección es el término aplicado a aquellos procesos en los cuales microorganismos patógenos son destruidos, pero no sus esporas. En el campo del tratamiento de las aguas residuales, la desinfección suele realizarse mediante: agentes físicos, químicos y radiación. [12] [15]

##### 6.1.4.1 Métodos y medios

Los agentes químicos utilizados son: cloro y sus compuestos, bromo, yodo, ozono, alcoholes, jabones, agua oxigenada y algunas bases y ácidos. Las condiciones que debe tener un desinfectante para poder ser usado deben ser: capacidad de destruir los organismos patógenos a una temperatura y tiempo adecuados, fácil disponibilidad, sencillo manejo y bajo costo, debe utilizarse en una concentración adecuada, de tal manera que deje un efecto residual, de tal manera que proteja el agua contra posteriores contaminaciones. Los agentes físicos más utilizados son la luz y el calor. Las bacterias pueden eliminarse por medios mecánicos, como tamices, desarenadores o filtros percoladores. Los principales tipos de radiación utilizados son la electromagnética, acústica y de partículas. Su poder de esterilización se utiliza en agua potable y residual. [23]

#### 6.1.4.2 Mecanismos de acción de los desinfectantes

Los mecanismos que explican la acción de los desinfectantes son: daño a la pared celular, lo cual da lugar al rompimiento celular; alteración de la permeabilidad de la célula; alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma y la inhibición de la actividad enzimática.

#### 6.1.4.3 Cloración

El cloro se usa como gas almacenado bajo presión en cilindros, o como líquido en soluciones de hipoclorito de sodio e hipoclorito de calcio. Tanto el cloro elemental gaseoso como el líquido, reaccionan con el agua de la siguiente forma: [2] [22]



El ácido hipocloroso, HOCl, se ioniza para formar el ión hipoclorito:

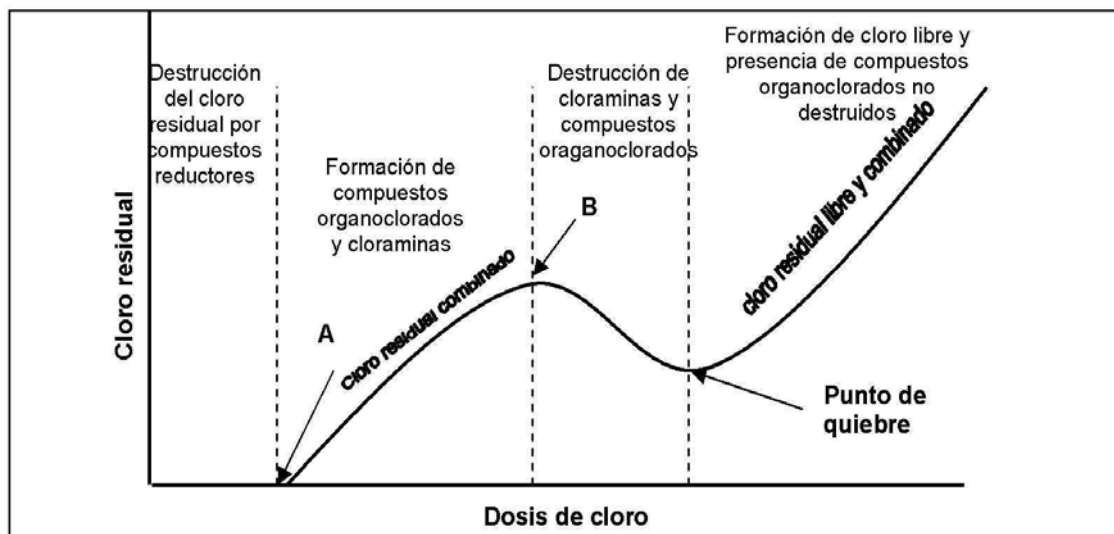


Las especies HOCl y OCl<sup>-</sup> en el agua constituyen lo que se denomina cloro libre disponible o residual de cloro libre. Si existe amoníaco en el agua, el ácido hipocloroso reaccionará con él para producir cloraminas, todo el cloro presente en forma de cloraminas es lo que se conoce como cloro combinado disponible o residual de cloro combinado. Al aplicar cloro al agua y construir una gráfica de la dosis aplicada contra los residuales obtenidos, resulta una curva conocida como curva de demanda de cloro.

En la Figura 7 se representa la curva de demanda de cloro. Cuando se añade el cloro, las sustancias fácilmente oxidables, tales como la materia orgánica, hierro y manganeso, reaccionan con el cloro

reduciendo la mayor parte de él a ión cloruro (punto A). Tras satisfacer esta demanda inmediata, el cloro seguirá reaccionando con el amoniaco para formar cloraminas y organoclorados entre los puntos A y B. Entre el punto B y el punto de quiebre algunas de las cloraminas se convierten en tricloruro de nitrógeno, mientras que las restantes se oxidarán a óxido nítrico y nitrógeno, reduciéndose el cloro a ión cloruro. En el punto de quiebre todas las cloraminas se oxidan. La adición de cloro más allá de este punto dará como resultado un aumento del cloro residual libre. La razón principal para añadir cloro suficiente hasta obtener cloro residual libre es lograr una desinfección adecuada [1] [4]

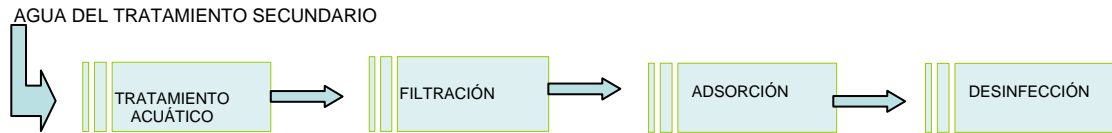
Figura 7. Curva de demanda de cloro. [10]



## 6.2 Propuesta 2

La segunda propuesta consiste de un tratamiento natural, complementado con un tratamiento físico y químico, el cual consta de las siguientes etapas y se muestran en la figura 8. [7] [18]

Figura 8. Esquema propuesta 2



### 6.2.1 Tratamientos naturales

Los sistemas de tratamiento natural se diseñan para aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en la naturaleza, con el fin de proporcionar tratamiento al agua residual. Los procesos que intervienen en los sistemas de tratamiento natural incluyen muchos de los utilizados en las plantas de tratamiento, como la sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, intercambio iónico, precipitación química, oxidación y reducción química, conversión y descomposición biológicas, junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento naturales, como la fotosíntesis, la fotooxidación y la asimilación por parte de las plantas. Los principales sistemas de tratamiento natural incluyen: los sistemas de aplicación al terreno, como los sistemas de baja carga, de infiltración rápida y de riego superficial; y los sistemas acuáticos donde se incluyen los terrenos pantanosos naturales y artificiales, y sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas. [6] [7]

### 6.2.2 Tratamiento con plantas acuáticas

Conceptualmente, un sistema de tratamiento con plantas acuáticas se puede visualizar como un filtro percolador de tasa baja de flujo horizontal con sedimentación propia. A diferencia de las lagunas de estabilización convencionales, donde el tratamiento depende de la población de algas, en los sistemas de tratamiento con las plantas acuáticas, las plantas tolerantes con el agua como la espadaña, la enea, los juncos, el jacinto de agua y las lentejas de agua,

reemplazan las algas y permiten hacer la remoción de los contaminantes del agua residual.

Una de las aplicaciones más importantes de los sistemas con plantas acuáticas es, entonces, la purificación de los efluentes del tratamiento secundario convencional, para remover trazas de metales, nutrientes, materiales orgánicos y otros contaminantes, capacidad que se ha comprobado tienen algunas plantas acuáticas. [9] [15]

El mecanismo de remoción de estos sistemas está relacionado con el metabolismo bacterial; es decir, que la remoción de sólidos coloidales y material orgánico soluble se lleva a cabo principalmente por bacterias suspendidas o soportadas en la planta. Coexisten varios fenómenos físicos y químicos en los mecanismos de remoción que interfieren, así: absorción física y química sobre el sustrato o la superficie de la planta, la descomposición o alteración de los compuestos menos estables, a través de los fenómenos de oxidación, reducción y por radiación ultravioleta.

Existen tres categorías generales de plantas potencialmente útiles en procesos de purificación: flotantes, emergentes y sumergidas. Las plantas flotantes tienen su actividad justo sobre la superficie del agua con sus raíces extendidas bajo ella. [9] [18]

Las plantas emergentes están enraizadas en el sustrato y tienen su parte fotosintética sobre la superficie de agua. Estas plantas también reducen la penetración de la luz y la transferencia de aire en menor grado que las flotantes. Finalmente, las plantas sumergidas, incluyendo algas, pueden ser suspendidas en el agua o enraizadas en el sustrato. Durante las horas de luz solar, esta categoría de plantas oxigena el agua. La selección de una especie vegetal para

uso en una unidad de tratamiento debe tomar en cuenta no sólo los efectos de dichas especie sobre el agua para tratar, sino la compatibilidad con el clima y el ambiente del lugar de operación.

Unas de las plantas más utilizadas en estos procesos de tratamiento de aguas residuales son las Lemnaceas; su potencial radica en la capacidad de remoción de contaminantes por la formación de una cobertura que retarda el crecimiento de las algas al reducir la penetración de la luz, contribuyendo al reaprovechamiento de la biomasa algal y estabilizando el pH, además facilita la remoción de DQO/DBO, metales y nutrientes, en la nitrificación y denitrificación. Esta planta es de fácil obtención y manipulación y su amplia distribución geográfica es una ventaja. [1] [18]

### 6.2.3 Lenteja de agua (Lemna sp.)

La Lenteja de agua Lemna sp es una planta acuática flotante o antífica que posee rosetas de hojas aéreas y flotantes en la superficie, un tallo muy condensado en donde se aprecia la ausencia de separación entre tallos, hojas y raíces. La posición sistemática se encuentra en la Tabla 8 [10] [18].

Tabla 8. Posición sistemática de la lemna

REINO	VEGETAL
SUBDIVISIÓN	FANEROGAMAS
CLASE	ANGIOESPERMA
ORDEN	MONOCOTILEDONEAS
FAMILIA	ESPATILORAS
GENERO	LEMNACEAE
ESPECIE	LEMNA SP
NOMBRE COMÚN	LENTEJA DE AGUA

Presenta dos tipos de propagación: Por reproducción sexual, con producción de semillas como resultado de la unión de gametos masculino y femenino, la cual ocurre en un período estacional. Por reproducción vegetativa o asexual, es decir, que una parte de la planta da lugar a una nueva planta, cuyo proceso se da en períodos cortos (8 días) y sujeto a las condiciones ambientales del lugar. La mayoría de estas macrofitas se encuentra en aguas ricas en sales disueltas, aguas servidas, con alto contenido de nutrientes. [6] [12]

Las Lemnaceae han mostrado un alto potencial como plantas acuáticas para el tratamiento de una variedad de aguas residuales generadas por plantas industriales y de procesamiento de animales, a causa de su rápida tasa de crecimiento, facilidad de cosecha, alto valor nutritivo y alto contenido inorgánico. El cultivo de Lemnaceae es esencial por su utilización como “filtro biológico. Muestran utilidad en la remoción de ciertos metales, tales como zinc, manganeso y hierro y productos sintéticos combinados, tales como insecticidas. Se requiere mantener condiciones favorables para el crecimiento, mantenimiento y remoción de nutrientes. [2] [6]

## **7. EVALUACIÓN ECONÓMICA.**

### 7.1 Estimación de la inversión

Para la valoración de la inversión, se requiere hacer un estimativo de la inversión fija, o capital fijo, y de capital de trabajo necesario para la instalación y montaje de cada una de las propuestas. La inversión fija representa el capital necesario para la compra y la instalación de todo el equipo de proceso, tuberías, accesorios, equipos de control, instalaciones eléctricas, servicios, compra y adecuación de terreno, costos de las construcciones, ingeniería, honorarios de contratistas y puesta en marcha. La inversión fija se divide en inversiones directas e indirectas. [6] [12]

#### 7.1.1 Inversiones directas

Los componentes de la inversión fija directa son de naturaleza duradera, son tangibles, se utilizan a lo largo de la vida útil del proyecto. Los elementos de esta inversión son: costo de equipos, instrumentación y control, tuberías, instalaciones eléctricas, edificios e instalaciones y terrenos.

Costo de equipos: Esta constituido por los equipos que intervienen en el tratamiento. Se consideran las bombas, dosificadores, material de los lechos de los filtros. Se realizaron cotizaciones de los equipos y materiales. [6] [12]

#### 7.1.2 Inversiones indirectas

Las inversiones indirectas constituyen los gastos de ingeniería, supervisión y obras civiles que se requieren para construir la planta.

### 7.2 Análisis económico propuesta 1

### 7.2.1 Costos directos

Los costos directos de esta propuesta se resumen en la tabla 9. [6]

Tabla 9 Costos de equipos propuesta 1

PROCESO	ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Oxidación	Bomba de entrada (0.6HP)	1	1'300.000	1'300.000
	Dosificador de permanganato	1	1'000.000	1'000.000
	Bomba de salida (5 HP)	1	3'300.000	3'300.000
Coagulación floculación	Dosificador polímero 1.5 l/h	1	700.000	700.000
	Dosificador alumbre 121 l/h	1	1'000.000	1'000.000
Desinfección por cloración	Dosificador hipoclorito de sodio 4 l/h	1	700.000	700.000
Tanques de almacenamiento	Bomba de entrada (2 HP)	1	1'800.000	1'800.000
<b>Total</b>				9'800.000

El costo total de equipos de la propuesta 1 es de 9'800.000 pesos, el costo de instalación fluctúa entre 25% a 50% del costo total de los equipos, es decir que si consideramos el 25%, el costo de montaje de equipos ascendería a dos millones cuatrocientos cincuenta mil pesos (2'450.000).

En cuanto a los sistemas de control de estos equipos pueden llegar a ser el 15% del costo total de los equipos e igualmente las instalaciones eléctricas pueden llegar a alcanzar el 10%. En total estos dos rubros sumarían otros dos millones cuatrocientos cincuenta mil pesos (2'450.000).

En cuanto a los costos de tubería, accesorios como codos y válvulas estos pueden alcanzar el 100 % de los costos de los equipos es decir nueve millones ochocientos mil pesos (9'800.000 \$)

Adecuación de instalaciones: Se incluyen en este valor, alumbrado, cercas, etc. Además se toma en cuenta el costo de los lechos filtrantes. Se estima este costo en el intervalo entre 10% y 20% del costo total de los equipos, Se tomará el costo de los lechos más el 15% del costo total de equipos. En la Tabla 10 se muestra este rubro. La cantidad es tomada aproximadamente.

Tabla 10 Inversión en construcción propuesta 1

ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Arena	8	Ton	300.000	2'400.000
Antracita	16	Ton	600.000	9'628.290
Grava	28	Ton	300.000	8'400.000
Carbón activado granular	3.5	Ton	4'000.000	14'000.000
15% del Costo equipo				1'470.000
<b>Total</b>				<b>35'898.290</b>

Las inversiones directas para el desarrollo de este proyecto ascienden a **sesenta millones trescientos noventa y ocho mil doscientos noventa pesos (\$ 60'398.290)**.

#### 7.2.2 Costos Indirectos

Comprende los gastos de ingeniería, supervisión y construcción de la planta.

- Ingeniería y supervisión: Se asume como el 25% del costo de los equipos lo que equivale a \$ 2'450.000. [9]

- Inversión en construcción: Se consideran aquí las construcciones necesarias

para el tratamiento, es decir la construcción del tanque de oxidación, de almacenamiento y las piscinas de desecación de lodos, estos costos pueden llegar a veinte millones de pesos (\$20'000.000), estos costos se indican en la tabla 11 los cuales presentan datos Aproximados. [1]

Tabla 11. Inversión construcción de propuesta 1

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Construcción tanque de oxidación	1	6'000.000	6'000.000
Construcción piscina de desecación	2	2'000.000	4'000.000
Construcción tanque de almacenamiento	1	10'000.000	10'000.000
<b>Total</b>			20'000.000

- Honorarios de contratistas: Equivale al 2% de los costos directos. En este caso son \$ 1.207.786.

La suma de la inversión indirecta alcanzaría los:

**Veintitrés millones seiscientos cincuenta y siete mil setecientos ochenta y seis pesos: (\$ 23.657.786).**

En total la inversión de la construcción de la propuesta 1 alcanza los: **Ochenta y cuatro millones cuarenta y siete mil setenta y seis peso (\$84'047.076)**

### 7.3 Análisis económico propuesta 2

De igual forma se realiza el análisis de estimación de construcción de la propuesta 2

#### 7.3.1 Costos directos

En la tabla 12 se presenta los costos estimados de los equipos requerido para realizar una posible construcción de la propuesta 2

Tabla 12. Costos de equipos propuesta 2

PROCESO	ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Tratamiento natural	Bomba de salida (1 HP)	1	1'800.000	1'800.000
	Bomba de salida (5 HP)	1	3'300.000	3'300.000
Desinfección por coloración	Dosificador hipoclorito de sodio 4 l/h	1	700.000	700.000
Tanque auxiliar	Bomba de entrada 3HP	1	2'300.000	2'300.000
<b>Total</b>				<b>8'100.000</b>

-Instalación de equipos: Considerando el 25% del costo de los equipos, será de \$ 2.025.000

-Instrumentación y control: Se considera como el 15% del costo total de los equipos, para la propuesta 2 será de \$ 1.215.000.

- Tuberías y válvulas: En la Tabla 13 se muestran la descripción de estos elementos y su costo empleado un sistema Degremon.

- Instalaciones eléctricas: Corresponde al 10% del costo de los equipos. El valor es de \$ 810.000

- Adecuación de instalaciones: Tomando el 15% del costo de los equipos más el costo de los lechos filtrantes,

- Instalaciones eléctricas: Corresponde al 10% del costo de los equipos. El valor es de \$ 810.000.

- Adecuación de instalaciones: Tomando el 15% del costo de los equipos más el costo de los lechos filtrantes, se muestra en la Tabla 14. [1]

Tabla 13. Costos de tubería y accesorios propuesta 2

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
<b>Tratamiento Natural</b>				
Tubería PVC 4"	150	m	\$ 18.000	\$ 2.700.000
Válvula de compuerta 4"	9	unid	\$ 450.000	\$ 4.050.000
Tubería de PVC 2 1/2" drenaje lodos	100	m	\$ 7.000	\$ 700.000
Válvula de compuerta 2 1/2" lodos	3	unid	\$ 200.000	\$ 600.000
<b>DEGREMONT</b>				
Tubería entrada PVC 4"	300	m	\$ 18.000	\$ 5.400.000
Válvula globo entrada filtros 4"	2	unid	\$ 320.000	\$ 640.000
Válvula compuerta filtro de carbón activado 4"	1	unid	\$ 450.000	\$ 450.000
Tubería tanque auxiliar PVC 4"	20	m	\$ 18.000	\$ 360.000
Válvula de compuerta tanques 4"	4	unid	\$ 450.000	\$ 1.800.000
Válvulas de compuerta salida de filtros 4"	3	unid	\$ 450.000	\$ 1.350.000
Válvula cheque salida filtros 4"	2	unid	\$ 18.000	\$ 36.000
Codos 90° 4"	20	unid	\$ 60.000	\$ 1.200.000
Codos 90° 2 1/2"	5	unid	\$ 30.000	\$ 150.000
Tes 4"	10	unid	\$ 12.000	\$ 120.000
Tes 2 1/2"	7	unid	\$ 5.000	\$ 35.000
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 19.591.000</b>

Tabla 14. Adecuación de instalaciones propuesta 2

ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Arena	8	Ton	300.000	2'400.000
Antracita	16	Ton	600.000	9'628.290
Grava	28	Ton	300.000	8'400.000
Carbón activado granular	3.5	Ton	4'000.000	14'000.000
15% del Costo equipo				1'470.000
<b>Total</b>				<b>35'643.290</b>

- Instalación de servicios: Para la propuesta 2 será de \$810.000, considerando el 10% del costo de los equipos.

-Costo de adecuación del terreno: El valor del terreno será el correspondiente a las lagunas. Para el área requerida se tiene un valor de \$ 30.000.000.

**Las inversiones fijas directas para la propuesta 2 ascienden a la suma de noventa y nueve millones cuatro mil doscientos noventa pesos (\$99'004.290).**

### 7.3.2 Costos indirectos

- Ingeniería y supervisión: Se asume como el 25% del costo de los equipos, lo que equivale a \$ 2.025.000.

- Inversión en construcción: Se consideran aquí las construcciones necesarias para el tratamiento, es decir las lagunas, el tanque de almacenamiento y las piscinas de desecación de lodos, esta propuesta requiere áreas grandes para la construcción de sistemas de oxidación (mínimo 6 unidades) lo cual incrementa los cotaos. En la siguiente, Tabla 15, se aprecia estos rubros para un caudal promedio de 80 m<sup>3</sup>/H

Tabla 15. Inversión en construcción propuesta 2

ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Construcción laguna de oxidación (485 m <sup>3</sup> )	6	Unid	9'000.0000	54'000.000
Construcción piscina de desecación (14 m <sup>3</sup> )	2	Unid	2'000.000	4'000.000
Construcción tanque de almacenamiento (104 m <sup>3</sup> )	1	Unid	10'000.000	10'000.000
<b>Total</b>				<b>68'000.000</b>

- Honorarios de contratistas: Equivale al 5% de los costos directos, en este caso son \$ 4.950.215.

**Los costos de la inversión indirecta alcanzan los setenta y cuatro millones novecientos setenta y cinco mil doscientos quince pesos (\$ 74.975.215).**

En total la inversión para llevar acabo la construcción de la propuesta 2 alcanza la suma de **ciento setenta y tres millones novecientos setenta y nueve mil quinientos cinco pesos (\$173'979. 505)**

## 8. ELECCIÓN DE LA MEJOR PROPUESTA

En la tabla 16 se presenta comparación de costos de construcción las diferentes propuestas.

Tabla 16 Tabla comparativa de las propuesta

<b>COMPARACIÓN PROPUESTAS</b>	<b>PROPUESTA 1</b>	<b>PROPUESTA 2</b>
Inversión Directa	<b>\$ 60'398.290</b>	<b>\$ 99'004.290</b>
Inversión Indirecta	<b>\$ 23.657.786</b>	<b>\$ 74.975.215</b>
<b>Total</b>	<b>\$ 84'047.076</b>	<b>\$ 173'979. 505</b>

En la tabla 16 se observa que el costo de implementar la propuesta 1 es más económico lo cual representa el 50% del costo de implementar la propuesta 2.

La propuesta 2 aunque es costoso su montaje los costos operativos son más bajos ya que solo requiere hipoclorito de sodio como desinfectante en comparación con los costos de operación de la propuesta 1 ya que esta emplea sulfato de aluminio en cantidades considerables y así como también de permanganato de potasio. Apresar de lo anterior considero que la propuesta1 es la más recomendada por el área disponible para el desarrollo de cada propuesta.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El sistema de tratamiento de aguas residuales con que cuenta la cervecería de Bucaramanga permite el cumplimiento de las normas establecidas en la legislación Nacional. Sin embargo en el propósito de mejorar la calidad del vertimiento final y del aprovechamiento del agua tratada se sugiere la aplicación de un sistema de tratamiento terciario.
- Se plantearon dos propuestas, para un tratamiento terciario del efluente de la Cervecería de Bucaramanga. La propuesta 1 consiste de un tratamiento físico-químico convencional, que consta de las etapas de oxidación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración, adsorción y desinfección. La segunda propuesta plantea un tratamiento natural utilizando plantas acuáticas (Iemna), complementado con etapas de filtración, adsorción y desinfección.
- Para la realización de este trabajo se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de los diferentes métodos de tratamiento terciarios de agua residuales y sus posibles usos.
- Se propuso dos propuestas de tratamiento terciario las cuales podrían ser implementadas en otras plantas de tratamiento de aguas residuales.
- De las dos propuestas se escogió como la más factible, la propuesta 1 ya que por presentar menos costos de implementación y requerir de menor área para el desarrollo del proyecto de tratamiento terciario.
- Se realiza una descripción del proceso de tratamiento primario y secundario que actualmente se realiza en la planta de aguas residuales de la cervecería de Bucaramanga.
- Los costos del montaje de sistemas de tratamientos de aguas residuales utilizando sistemas de tratamiento natural como el planteado en la propuesta 2 son altos y requieren de áreas extensas con el fin de construir los sistemas de oxidación.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

1. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA. Evaluación técnico – económica de tratamiento terciario para la planta de tratamiento de agua residuales cervecería de Boyacá, Contreras Jiménez Jhonny Andrés y Pubiano Barrera Ángela María.
2. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera edición. Bogotá: Mc Graw Hill, 2000.
3. BACA URBINA, Gabriel. Evaluación de proyectos. Cuarta edición. México: Mc Graw Hill, 2001.
4. CASAS REYES, José Vicente. Coagulación floculación. Santa fe de Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1992.
5. MANUAL DE OPERACIONES, planta de tratamiento aguas residuales, Cervecería de Bucaramanga, 2004
6. GUZMÁN CASTRO, Fernando. El estudio económico-financiero y la evaluación en proyectos de la industria química. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2001.
7. MANUALES DE OPERACIÓN SALAS DE MAQUINAS. Bavaria S.A. Cervecería de Bucaramanga
8. MC CABE, Warren, SMITH Julián, HARRIOT, Meter. Operaciones unitarias en ingeniería química. Cuarta edición. España: McGraw Hill, 1991.
9. METCALF, Leonard, EDDY Harrison. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización de aguas residuales. Volumen 1 y II. McGraw Hill, 1985.
10. MORALES, Esperanza. Potencial de plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales. Ciencia y Tecnología. Bogotá. Vol. 4 (Febrero — Abril 1986); p. 26-28. Colciencias, Bogotá.
11. LÓPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. Elementos de diseño para acueductos y alcantarillado. Santafé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.
12. PETERS, Max, TIMMERHAUS, Klaus. Plant design and economics for chemical engineers. Singapore: Mc Graw Hill,

1981.

13. ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acuíquímica. Santa fe de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996.
14. \_\_\_\_\_ Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.
15. Purificación del agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.
16. Duckweed-based wastewater treatment [en línea]. [Citado en 13 de marzo de 2004]. Disponible en Internet: <<http://www.technopreneurnettimeis/technology/StechJuneJulyO2IWastewater.html>>.
17. Fábrica de cerveza en línea]. [Citado en 5 de agosto de 2004]. Disponible en Internet: <<http://www.tecnologiaslimpias.org.co>>.
18. Reutilización de agua residual regenerada [en línea]. [Citado en 17 de junio de 2004]. Disponible en Internet: <<http://mie.esab.upc.es/arrITI E.htm>>.
19. UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA, FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES. Investigación y monitoreo de los ríos Carabaya-Ramis y Cabanillas y del lago Titicaca, Ministerio de Energía y Minas, 1999. [en línea]. [Citado en 13 de marzo de 2004]. Disponible en Internet: <<http://www.minem.gob.pe/ambientales/publicaciones/lagotiticaca.pdf>>
20. CLESCERI, LENORE S., GREENBERG, ARNOLD E., EATO, ANDREW B., Estándar Métodos para la examinación de Aguas y Aguas de desecho. Edición No. 2. Editorial American Public Health Associationing. Estados Unidos de América, Washington D.C. 1998.
21. Claudia Patricia Quevedo, Jaime Diaz, Carlos Lara Estudio de propuestas de manejo, tratabilidad y disposición de las aguas

servidas municipales, 2000. Monografía Uní Boyacá

22. AIDIS. Forjando el ambiente que compartimos

San Juan; AIDIS; Ago. 2004. s.p p. Ilus..

23. LÓPEZ RUIZ, Rafael. Aguas residuales municipales y biosólidos.

Elementos básicos, caracterización, tratamiento, reusos. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2003, s/p., tiraje

---