

# UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química

Diseño de una planta de tratamiento de aguas  
residuales para una industria alimenticia de  
Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Gloria María  
Margarita Estrada Bercian para optar al grado académico  
de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala,  
2012



Diseño de una planta de tratamiento de aguas  
residuales para una industria alimenticia de  
Guatemala

# UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Química


Diseño de una planta de tratamiento de aguas  
residuales para una industria alimenticia de  
Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Gloria María  
Margarita Estrada Bercian para optar al grado académico  
de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala,  
2012

Vo.Bo:

(f)

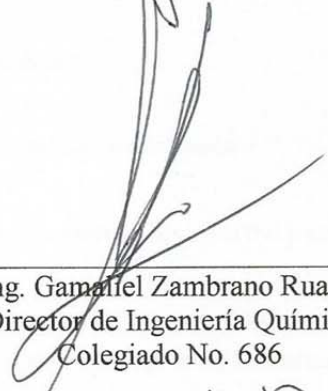


---

Ing. Jaime Horacio Rosales Solórzano  
Asesor  
Colegiado No. 320

Tribunal:

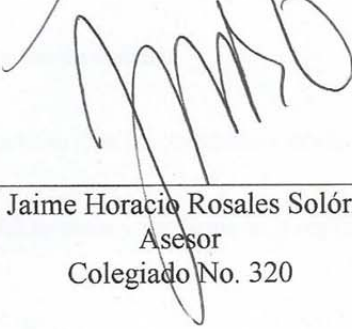
(f)



---

Ing. Gamaliel Zambrano Ruano  
Director de Ingeniería Química  
Colegiado No. 686

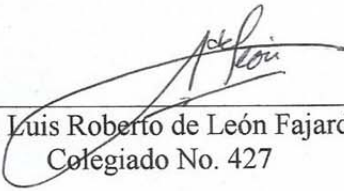
(f)



---

Ing. Jaime Horacio Rosales Solórzano  
Asesor  
Colegiado No. 320

(f)



---

Lic. Luis Roberto de León Fajardo  
Colegiado No. 427

Fecha de aprobación: 26/01/2012

## Agradezco a:

Dios: por darme la vida y ser mi guía

Mis padres: por ser mi ejemplo y fuente de admiración

Mis hermanos: por apoyarme y acompañarme en todos mis logros

José Rolando, mi novio y futuro esposo: por acompañarme desde el primero hasta el último día en el camino para llegar a esta meta, y vivir conmigo todas las tristezas y alegrías

Mis amigos: por compartir este triunfo conmigo

Ing. Jaime Rosales: por compartir su gran conocimiento y sabiduría en la realización de este proyecto

A la empresa: por brindarme los recursos y apoyarme en la realización de este proyecto

# ÍNDICE GENERAL

LISTA DE TABLAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. ANTECEDENTES .....	2
A. Definición de aguas residuales.....	2
B. Elección de proceso de tratamiento del agua residual.....	2
C. Tipos de tratamiento.....	5
D. Ecuación de flujo .....	16
E. Trampas de grasas .....	18
F. Coagulación y floculación .....	18
G. Sedimentación.....	21
H. Tratamiento biológico de lodos activados .....	22
III. JUSTIFICACIÓN.....	24
IV. OBJETIVOS .....	25
A. OBJETIVO GENERAL.....	25
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	26
VI. METODOLOGÍA .....	27
VII. RESULTADOS .....	29
VIII. DISCUSIÓN.....	52
IX. CONCLUSIONES .....	60
X. RECOMENDACIONES .....	61
XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62
XII. APÉNDICE.....	64
A. Matrices de selección de tratamientos .....	64
B. Datos originales .....	67
C. Cálculos realizados .....	72
D. Parámetros de diseño .....	121
E. Hojas técnicas de coagulante y floculante.....	124

## LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1: Tecnologías de tratamiento físico.....	10
Tabla No. 2: Tecnologías de tratamiento químico.....	12
Tabla No. 3: Tecnologías de tratamiento biológico.....	14
Tabla No. 4: Especificaciones para el tanque de equalización .....	29
Tabla No. 5: Especificaciones para el tanque de solución de ácido sulfúrico .....	29
Tabla No. 6: Flujo de diseño para la planta de tratamiento .....	29
Tabla No. 7: Especificaciones para las trampas de grasas.....	30
Tabla No. 8: Flujos volumétricos y másicos de las trampas de grasas .....	30
Tabla No. 9: Parámetros de calidad del influente y efluente de las trampas de grasas.....	30
Tabla No. 10: Especificaciones para los tanques de coagulación y floculación.....	30
Tabla No. 11: Flujos volumétricos y másicos de los tanques de coagulación y floculación .....	31
Tabla No. 12: Especificaciones para los tanques de solución de coagulante y floculante.....	31
Tabla No. 13: Especificaciones para impulsores.....	32
Tabla No. 14: Especificaciones para el sedimentador primario .....	32
Tabla No. 15: Especificaciones de pantalla difusora.....	33
Tabla No. 16: Flujos volumétricos y másicos del sedimentador primario.....	33
Tabla No. 17: Parámetros de calidad del influente y efluente del sedimentador primario .....	33
Tabla No. 18: Especificaciones para los aireadores del tratamiento biológico.....	33
Tabla No. 19: Flujos másicos y volumétricos del aireador del tratamiento biológico.....	34
Tabla No. 20: Especificaciones para el sedimentador del tratamiento biológico .....	34
Tabla No. 21: Flujos másicos y volumétricos de los sedimentadores del tratamiento biológico.....	34
Tabla No. 22: Parámetros de calidad del influente y efluente del tratamiento biológico .....	34
Tabla No. 23: Datos obtenidos en cálculo de bombas.....	34
Tabla No. 24: Flujo de caja del proyecto.....	35
Tabla No. 25: Equipo necesario para implementación de planta.....	36
Tabla No. 26: Matriz para la selección de tratamiento físico .....	65
Tabla No. 27: Matriz para la selección de tratamiento químico .....	65
Tabla No. 28: Matriz para la selección de tratamiento biológico .....	66
Tabla No. 29: Resultados de medición de caudal durante 24 horas .....	67
Tabla No. 30: Caracterización de muestra compuesta obtenida durante 24 horas.....	69
Tabla No. 31: Resultados obtenidos para prueba de jarras 1 de determinación de pH óptimo.....	70
Tabla No. 32: Resultados obtenidos para prueba de jarras 2 de determinación de dosis óptima de coagulante, Policloruro de aluminio .....	70
Tabla No. 33: Resultados obtenidos para prueba de jarras 3 de determinación de exceso de grasas y aceites para tratamiento químico .....	70
Tabla No. 34: Resultados obtenidos para prueba de jarras 4 de determinación de dosis óptima de floculante, Poliacrilamida aniónica .....	71
Tabla No. 35: Resultados obtenidos para prueba de jarras 5 de determinación de disminución de parámetros con dosificaciones óptimas de tratamiento determinadas anteriormente .....	71
Tabla No. 36: Límites máximos permisibles de aguas residuales a cuerpos receptores según el artículo 20 del “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”.....	71
Tabla No. 37: Datos de caudal obtenidos para el agua de influente o agua de proceso.....	72
Tabla No. 38: Caudal máximo para cada hora y datos para el cálculo de volumen de tanque de equalización .....	75
Tabla No. 39: Volumen de tanque de homogenización tomando un crecimiento de planta de 5% anual .....	77
Tabla No. 40: Especificaciones del proveedor del tanque de solución de ácido sulfúrico .....	80

Tabla No. 41: Flujo de diseño para crecimiento de planta de 5% anual .....	83
Tabla No. 42: Especificaciones del proveedor del tanque de solución de coagulante.....	90
Tabla No. 43: Especificaciones del proveedor del tanque de solución de floculante .....	94
Tabla No. 44: Porcentajes para determinación de inversión.....	116
Tabla No. 45: Inversión total en planta .....	116
Tabla No. 46: Depreciación anual de equipo.....	117
Tabla No. 47: Sueldo a pagar por empleado.....	117
Tabla No. 48: Descripción de horarios de operadores .....	118
Tabla No. 49: Costo total anual de salarios de operadores .....	118
Tabla No. 50: Porcentajes sobre salario base para determinación de prestaciones laborales .....	119
Tabla No. 51: Costo anual de químicos utilizados .....	119
Tabla No. 52: Costos de operación anual .....	120
Tabla No. 53: Parámetros de diseño para tanques agitados.....	122
Tabla No. 54: Parámetros de diseño para trampas de grasa .....	122
Tabla No. 55: Parámetros de diseño para tanques de coagulación y floculación .....	122
Tabla No. 56: Parámetros de diseño para tanques de sedimentación .....	123
Tabla No. 57: Parámetros de diseño para sistema biológico de lodos activados .....	123

## LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1: Diagrama esquemático para la determinación del volumen requerido de tanques de ecualización .....	17
Figura No. 2: Impulsores utilizados para mezcla .....	20
Figura No. 3: Turbina de paletas planas .....	20
Figura No. 4: Esquema general de un proceso de tratamiento biológico de lodos activados .....	23
Figura No. 5: Balance de masa del proceso.....	39
Figura No. 6: Diagrama de flujo.....	40
Figura No. 7: Distribución de la planta de tratamiento, vista de sección .....	41
Figura No. 8: Distribución de la planta de tratamiento, vista de planta.....	42
Figura No. 9: Detalle de tanque de ecualización de flujo y de tanque de ácido sulfúrico .....	43
Figura No. 10: Detalle de trampas de grasa.....	45
Figura No. 11: Detalle de sistema de coagulación.....	46
Figura No. 12: Detalle de sistema de floculación .....	47
Figura No. 13: Detalle de sedimentador primario .....	49
Figura No. 14: Detalle de tanques de aireación .....	50
Figura No. 15: Detalle de sedimentadores secundarios .....	51
Figura No. 16: Gráfica para la determinación del volumen de tanque de ecualización.....	76
Figura No. 17: Sistema de bombeo .....	112

## RESUMEN

Este trabajo de graduación consistió en realizar el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria alimenticia, las cuales consistían básicamente en agua de cocimiento de maíz y de limpieza de freidoras, para obtener un efluente que cumpla con los requerimientos del “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” acuerdo gubernativo número 232-2006, hasta el último período en que se encuentra definido, el cual es el año 2024. La planta se diseñó para un caudal de agua residual de 3.04 m<sup>3</sup>/h.

Se determinó que los procesos necesarios para la reducción requerida de los contaminantes del agua son dos trampas de grasas, seguido de tratamiento químico de coagulación y floculación, para luego dar lugar a la sedimentación, y finalmente implementar tratamiento biológico de lodos activados. Sin embargo, se consideró que era necesaria la equalización del flujo anteriormente a todos estos procesos para evitar flujos pico que pudieran afectar la correcta operación de cada una de las unidades.

En cada parte del proceso se determinó el equipo necesario, con lo cual se pudo saber que la inversión total para poner en operación la planta es de Q1,682,272.83. Dado que este tipo de proyectos no presenta ingresos por venta de productos, el análisis económico que se realizó consistió en determinar la cantidad monetaria en que la empresa debe aumentar sus ingresos anualmente durante diez años, para poder recuperar la inversión. Se determinó que este valor equivale a Q840,759.56.

Todos los resultados de diseño de la planta se muestran en tablas y en planos realizados con software de dibujo, los cuales fueron realizados con el mayor detalle posible para que la empresa pueda utilizarlos sin dar lugar a confusiones o ambigüedades en el momento en que decida construir la planta.

Al construir el sistema de tratamiento de aguas residuales y cumplir con los requerimientos de la legislación nacional para la descarga de aguas, la empresa se verá beneficiada en poder crear una imagen de marca amigable con el ambiente, poder abrir oportunidades de comercialización con clientes que exijan que sus proveedores contaminen al mínimo en sus proceso de producción, y evitar elevados gastos por multas o la clausura de la planta.

## ABSTRACT

The objective of this work is to develop the design of a wastewater treatment plant of a food industry, which basically consists of water of corn cooking and rinse of fryers, so that the effluent is free of pollutants and satisfy the demands of the Discharge and Reuse of Wastewater and Sludge Disposal Regulations of the Department of Environment, until the last period in which is defined, that is in the year of 2024. The plant was designed to an influent wastewater flow of 3.04 m<sup>3</sup>/h.

It was determined that the necessary processes for the required reduction of pollutants in wastewater were two grease traps, followed by chemical treatment of coagulation and flocculation, and after that passing through a sedimentation process, to finally get in a biological treatment of activated sludge. However, it was considered the need of flow equalization before all these treatments, to prevent peak flows that would affect the correct operation of the process units.

In each part of the process was determined the necessary equipment to develop the plant, so that, it was determined that the total investment to put the plant in operation was Q1,682,272.83. In the case of this kind of projects, in which there are not incomes for the commercialization of products, the economic analysis consisted in determining the quantity of money in which the incomes should be increased annually during 10 years, to recover the investment. This value is Q840,759.56.

The results of the designed plant are shown in tables and layouts made on drawing software, which were made as detailed as possible so that the company can use them without confusions or ambiguities when they take the decision of constructing the plant.

When constructing the wastewater treatment system and satisfy the demands of national legislation, the industry will be benefited in creating a brand image friendly with the environment, in opening to opportunities of commercialization with costumers that demand low contamination in production processes, and in avoiding high expenditures because of penalties or closing the production plant.

# I. INTRODUCCIÓN

El trabajo de graduación realizado consistió en diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales para la obtención de un efluente con la menor cantidad de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos, que cumpla con las exigencias del “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” acuerdo gubernativo número 232-2006, y asegure tanto la salud humana como la conservación del medio ambiente.

Se analizó el contenido del agua residual para determinar las necesidades del proceso de tratamiento con el que se obtenía el efluente deseado. Se determinó que este proceso consistía en retirar grasas y aceites con trampas de grasa, seguido por tratamiento químico de coagulación y floculación, para después pasar a una fase de sedimentación de sólidos, y finalmente a un tratamiento biológico de lodos activados. Se diseñó de manera detallada cada parte del proceso, para mostrar los resultados en tablas y en planos realizados con software de dibujo.

Además, se determinó el equipo y otros servicios necesarios para la implementación de la planta, de manera que se pudo obtener el costo total de su construcción haciendo cotizaciones con diferentes proveedores para obtener datos lo más reales posibles, y poder obtener una idea bastante segura de la inversión necesaria a realizar. Se hizo el análisis financiero con base en la inversión calculada y los costos de operación, para determinar la cantidad anual en que deben aumentar los ingresos para tener un retorno de inversión en un horizonte de diez años.

Finalmente, se presentaron los resultados obtenidos a las autoridades de la empresa, y se entregó un informe del trabajo de graduación para que evalúen el proyecto y puedan construir la planta de tratamiento cuando así lo decidan. Es importante también destacar que se deben presentar las ventajas que se obtienen al implementar una planta que cubra completamente las necesidades para la obtención de un efluente con mínima cantidad de contaminantes. Entre éstas se encuentra la fijación de una marca amigable con el ambiente en la mente de los consumidores y tener la posibilidad de vender producto a clientes que exijan que todos sus proveedores contaminen lo menos posible durante su producción.

## II. ANTECEDENTES

### A. Definición de aguas residuales

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias.

Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que proviene de residencias, oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual.

Las aguas residuales industriales son líquidos generados en los procesos industriales que poseen características específicas dependiendo del tipo de industria.

Una comprensión de las características físicas, químicas y biológicas del agua residual es muy importante en el diseño y operación de la recolección, tratamiento y disposición de dichas aguas. La naturaleza del agua residual incluye características físicas, químicas y biológicas que dependen del uso que se le haya dado al agua.

### B. Elección de proceso de tratamiento del agua residual

El proceso para desarrollar una estrategia efectiva de tratamiento del agua residual envuelve primero la caracterización de los influentes y la evaluación de las necesidades de tratamiento para cada influente respecto a los estándares de regulación de descargas.

1. **Características del agua residual.** En general, el agua residual puede ser caracterizada basándose en los parámetros de carga orgánica, características físicas, y contaminantes específicos.

Los parámetros de calidad de la carga orgánica del agua residual miden la cantidad de materia orgánica en el influente. Parámetros típicos son el carbono orgánico total, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, y grasas y aceites. Estos parámetros no miden un compuesto específico, sino un grupo de constituyentes.

Las características físicas del agua residual incluyen los sólidos en suspensión totales, pH, temperatura, color, olor y algunas veces potenciales de oxidación/reducción. Algunas características físicas reflejan cualidades de estética del agua residual, como el olor y el color, mientras que otras, como el pH y la temperatura, pueden tener un impacto negativo en los cuerpos receptores.

Los parámetros de contaminantes específicos incluyen mediciones de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), nitrato ( $\text{NO}_3$ ), metales pesados, surfactantes, sulfuros, fenoles, orgánicos tóxicos y cianuros.

a. Parámetros físicos. Las características físicas más importantes de las aguas residuales son la temperatura y su concentración de sólidos.

La temperatura afecta las reacciones químicas y actividades biológicas. Los sólidos, como los sólidos en suspensión totales, sólidos suspendidos volátiles, y los sólidos sedimentables, afectan la operación y tamaño de las unidades de tratamiento.

1) Sólidos en el agua residual. Los sólidos comprenden la materia suspendida o disuelta en el agua residual. Los sólidos están divididos en diferentes fracciones y sus concentraciones dan información útil para la caracterización del agua residual y control de los procesos de tratamiento.

a) Sólidos totales. Es la suma de los sólidos suspendidos totales y los sólidos disueltos totales. Cada uno de estos grupos puede ser dividido a su vez en fracciones volátiles y fijas.

b) Sólidos en suspensión totales. Se refieren a los residuos no filtrables. Los sólidos suspendidos totales es un parámetro de calidad muy importante para el agua residual y es un estándar del efluente tratado de agua residual.

c) Sólidos disueltos totales. Los sólidos disueltos son también llamados residuos filtrables.

d) Sólidos fijos y volátiles. El residuo de los sólidos totales, los sólidos suspendidos totales o sólidos disueltos totales se calientan hasta peso constante a  $550^\circ\text{C}$ . El peso perdido en la ignición son los sólidos volátiles, mientras que los sólidos remanentes representan los sólidos fijos totales, sólidos fijos suspendidos, o sólidos fijos disueltos.

La determinación de la porción de sólidos volátiles es útil para el control de las operaciones de plantas de tratamiento de aguas residuales porque da una estimación de la cantidad de materia orgánica presente en la fracción sólida del agua residual, lodos activados, y en residuos industriales.

La determinación de los sólidos volátiles y fijos no distingue precisamente entre materia orgánica e inorgánica. Debido a que la pérdida de peso en la ignición no es confinada sólo a materia orgánica, esta incluye pérdidas debido a la descomposición o volatilización de algunas sales minerales. La determinación de la materia orgánica puede ser hecha por análisis para la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, y carbón orgánico total.

e) Sólidos sedimentables. Sólidos sedimentables es el término aplicado al material sedimentando fuera de suspensión dentro de un tiempo definido. Los sólidos sedimentables pueden ser expresados en una base volumétrica (mL/L) o base másica (mg/L).

Los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos en el agua residual contienen material orgánico e inorgánico. La materia orgánica puede incluir carbohidratos, grasas, aceites, surfactantes, proteínas, pesticidas y otros químicos de agricultura, compuestos orgánicos volátiles, y otros químicos tóxicos (domésticos e industriales). La materia inorgánica puede incluir metales pesados, nutrientes (nitrógeno y fósforo), cloruros, sulfuro y otros contaminantes inorgánicos. Tanto el nitrógeno como el fósforo en el agua residual sirven como elementos esenciales para el crecimiento biológico y la reproducción durante los procesos de tratamiento del agua residual.

2) Parámetros de carga orgánica. La fuerza o contenido orgánico del agua residual es usualmente medida como la demanda bioquímica de oxígeno en 5 días ( $DBO_5$ ), demanda química de oxígeno y carbono orgánico total. Estas mediciones indican la cantidad de materia orgánica de un influente que requiere estabilización u oxidación. La demanda bioquímica de oxígeno mide los componentes orgánicos que son sujetos a tratamiento biológico. El carbono orgánico total mide la cantidad de carbono orgánico, mientras que la demanda química de oxígeno mide la cantidad de carbono que puede teóricamente ser oxidado a dióxido de carbono más cualquier material inorgánico oxidable.

Los parámetros de grasas y aceites, e hidrocarburos de petróleo totales, indican la presencia de aceite o hidrocarburos de petróleo, los cuales pueden estar disueltos o en una fase.

3) Calidad de efluente. Adicionalmente a la determinación de las características específicas del agua residual, se deben comprender los requerimientos de tratamiento. Los parámetros que deben monitorearse y sus niveles de descarga permitidos están determinados por regulaciones de ley. Además, los requerimientos específicos de los efluentes dependen del punto de descarga.

## C. Tipos de tratamiento

Una vez se ha caracterizado el agua residual y se conocen los requerimientos de tratamiento para lograr el efluente deseado, el próximo paso es conciliar estos anteriores. Por lo tanto, se deben evaluar las alternativas que se pueden utilizar. Para esto se necesita comprensión de los diferentes tipos de procesos de tratamiento disponibles y lo que estos pueden hacer, para poder seleccionar que están de acuerdo a las facilidades con las que se cuentan.

El tratamiento del agua residual está generalmente clasificado en cuatro niveles: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado, los cuales se describirán posteriormente. Adicionalmente a estos cuatro niveles de tratamiento, hay tres clases de tecnologías de tratamiento: físico, químico, y biológico. Los procesos específicos seleccionados para remover contaminantes pueden ser usados de manera singular o juntos en varias combinaciones.

1. Niveles de tratamiento de aguas residuales. Los sistemas de tratamientos convencionales son combinaciones de procesos físicos y biológicos, algunas veces con químicos, para remover sus impurezas.

Los métodos alternativos para tratamiento de agua residual están simplemente clasificados en 3 categorías mayores: (1) tratamiento primario (proceso físico), (2) tratamiento secundario (proceso biológico), y (3) tratamiento terciario o avanzado (combinación de procesos físicos, químicos y biológicos). Cada categoría debería incluir dispositivos de tratamiento previo (preliminar), desinfección, y manejo de lodos (tratamiento y disposición).

a. Tratamiento preliminar. Los sistemas preliminares son designados para remover físicamente o retirar los materiales grandes suspendidos y flotantes, y remover los sólidos inorgánicos pesados y las cantidades excesivas de aceite y grasa.

El propósito del tratamiento preliminar es proteger el equipo de bombeo y las subsecuentes unidades de tratamiento.

Los sistemas preliminares consisten en dispositivos de medición de flujo y reguladores (tanques de equalización de flujo), pantallas de separación de sólidos, dispositivos de trituración (amoladoras, cortadoras y desfibradoras), cámaras desarenadoras, tanques de preaeración, y algunas veces clorinación.

La calidad del agua residual no es mejorada sustancialmente por el tratamiento preliminar.

b. Sistemas de tratamiento primario. El objetivo del tratamiento primario es reducir la velocidad de flujo del agua residual suficientemente para permitir que los sólidos suspendidos sedimenten, es decir, para remover los materiales sedimentables. Cuando se aplican químicos para promover la sedimentación se necesitan otras unidades auxiliares como alimentadores de químicos, dispositivos de mezclado, y dispositivos para manejo de lodos (biosólidos).

El proceso físico de sedimentación en tanques de sedimentación remueve aproximadamente de 50 a 70% de los sólidos suspendidos totales del agua residual, mientras que la eficiencia de remoción de  $\text{DBO}_5$  por sistemas primarios es de 25 a 35%. Cuando ciertos coagulantes son aplicados para la sedimentación, un total de 80% a 90% de los sólidos totales suspendidos, es removido. Además, aproximadamente 10% del fósforo correspondiente insoluble es normalmente removido por sedimentación primaria. Durante el proceso de tratamiento primario, la actividad biológica en el agua residual es despreciable.

La clarificación primaria es lograda comúnmente en cuencas grandes de sedimentación bajo condiciones relativamente inactivas. Los sólidos sedimentados pueden ser entonces recolectados por raspadores mecánicos entre una tolva y bombeados a la unidad de tratamiento de lodos. Las grasas, aceites y otra materia flotante pueden ser retiradas de la superficie. El efluente es descargado sobre vertederos a tuberías para más tratamiento o a un desagüe de descarga.

c. Sistemas de tratamiento secundario. Después del tratamiento primario el agua residual todavía contiene materia orgánica en estados de suspensión, coloidal y disuelta. Esta materia debe removerse antes de descargarse a cuerpos receptores.

El tratamiento secundario es usado para remover la materia orgánica soluble y coloidal que permanece después del tratamiento primario. Aunque la remoción de estos materiales puede ser efectuado por medios fisicoquímicos proveyendo mayor remoción de sólidos suspendidos, el tratamiento secundario es comúnmente referido como un proceso biológico.

El tratamiento biológico consiste de aplicación de un proceso natural controlado en el cual un gran número de microorganismos consumen materia orgánica soluble y coloidal del agua residual sobre un tiempo razonable.

Los dispositivos de tratamiento secundario pueden ser divididos en dos grupos: procesos de crecimiento adjuntos y procesos de crecimiento en suspensión. Los procesos de crecimiento adjunto (película) son filtros percoladores, contactores biológicos de rotación (RBC) y filtros de arena intermitentes. Los procesos de crecimiento en suspensión incluyen lodos activados y sus modificaciones, como tanques de estabilización (aireación), reactores batch en secuencia, digestores aeróbicos y anaeróbicos, filtros anaeróbicos, tanques de estabilización y lagunas aeróbicas.

Los procesos de tratamiento secundario pueden remover más del 85% del DBO<sub>5</sub> y los sólidos suspendidos totales. Sin embargo, no son efectivos para la remoción de nutrientes (N y P), metales pesados, materia orgánica no biodegradable, bacteria, virus, y otros microorganismos. Adicionalmente, un clarificador secundario se requiere para remover sólidos de los procesos secundarios. Los lodos generados de los clarificadores primarios y secundarios necesitan tratamiento y disposición apropiada.

d. Sistemas de tratamiento avanzado. El tratamiento avanzado se define como los métodos y procesos que remueven más contaminantes del agua residual que el tratamiento convencional. El término tratamiento avanzado puede ser aplicado a cualquier sistema que sigue al secundario, o modifica o reemplaza un paso en el proceso convencional.

El propósito del tratamiento avanzado es específicamente reducir sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, DBO, nitrógeno orgánico, nitrógeno total, o fósforo. Los procesos de remoción de nutrientes biológicos pueden eliminar nitrógeno o fósforo, y cualquier combinación. Los procesos avanzados utilizan algunos procesos para el tratamiento de agua para consumo. Estos incluyen filtros de tierras diatomeas y ultrafiltración y nanofiltración, que son utilizadas para remover sólidos suspendidos finos y sólidos coloidales.

Para el control de nitrógeno, se utilizan técnicas como asimilación biológica, nitrificación (conversión de amonio en nitrógeno y nitrato), y denitrificación e intercambio iónico.

El fósforo soluble puede removerse por precipitación química y consumo biológico (bacteria y alga) para el crecimiento celular normal en un sistema de control. Procesos físicos como ósmosis inversa y ultrafiltración también ayudan a lograr reducción de fósforo, pero éstas son primariamente para la reducción de sólidos inorgánicos disueltos. Están disponibles las zanjas de oxidación, proceso de oxidación anaeróbica y otros procesos patentados.

El uso de lagunas, lagunas de aereación, y humedales naturales y construidos es un método efectivo para la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Remoción de algunas especies de grupos de compuestos tóxicos y orgánicos refractarios puede ser lograda por adsorción de carbón activado, procesos de carbón activado, y oxidación química. Los procesos convencionales de coagulación-sedimentación-filtración y tratamiento biológico (filtro percolador, contactores biológicos de rotación, y lodos activados) también son usados para remover los contaminantes prioritarios y algunos compuestos orgánicos refractarios.

## 2. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales

a. Tratamiento físico. Los procesos de tratamiento físico crean un cambio físico en las propiedades de los contaminantes mientras que la naturaleza química de los compuestos permanece inafectada.

Los procesos de tratamiento físico típicamente empleados en tratamiento de aguas residuales industriales son: separación por gravedad, flotación con aire, coalescencia de aceites, evaporación, filtración, adsorción con carbón activado, extracción con aire.

b. Tratamiento químico. Los procesos de tratamiento químico manipulan las propiedades químicas de los contaminantes para facilitar la remoción de estos.

Los procesos de tratamiento químico más comúnmente empleados en tratamiento de aguas residuales industriales son: precipitación química y coagulación, recubrimiento electrolítico, intercambio iónico, ósmosis inversa, y oxidación y reducción química.

c. Tratamiento biológico. Los procesos de tratamiento biológico utilizan mecanismos biológicos y bioquímicos para causar un cambio químico en las propiedades de los contaminantes de interés. Las propiedades químicas son alteradas bajo la acción de una amplia variedad de microorganismos que causan la descomposición del compuesto en el influente.

La descomposición, o metabolismo, de los compuestos orgánicos produce más masa biológica así como energía necesitada por los microorganismos para sobrevivir. En otras palabras, los contaminantes sirven como alimento para los microorganismos.

El mayor objetivo del tratamiento biológico es estabilizar la materia orgánica en un influente residual de manera que la degradación biológica no ocurra en el sistema de distribución del agua residual o en el cuerpo receptor. Esto se realiza para proteger al agua receptora del agotamiento de oxígeno y otros nutrientes críticos, y para prevenir el crecimiento de productos residuales.

Los procesos de tratamiento biológico típicos para aguas residuales industriales incluyen: procesos de lodos activados, lagunas de aereación o lagunas de estabilización, filtros percoladores o reactores de película fija y procesos anaeróbicos.

Tabla No. 1: Tecnologías de tratamiento físico

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Separación por gravedad	Es el proceso utilizado para tratar influentes donde los contaminantes pueden ser separados como resultado de sus gravedades específicas siendo mayor o menor que la del agua, la cual es 1.0. Los sólidos con gravedades específicas menores a este valor son separados en una capa superior flotante, mientras que los que tiene una gravedad específica mayor sedimentan en una capa de lodos en el fondo.	-Aceite libre -Sólidos suspendidos	-Costo bajo -Mantenimiento bajo -No tiene elementos mecánicos -Relativamente seguro -Facilidad de operación -Costos de energía bajos	-Emisiones volátiles -No remueve constituyentes disueltos -Requiere de disposición de residuos de aceite y lodos
Flotación con aire	Este es un método utilizado para acelerar la separación por gravedad. Es útil para remover materiales con grasas y aceites que naturalmente flotarían en un tiempo prolongado pero presentan un problema para los separadores por gravedad convencionales (ejemplo: un aceite emulsificado por mezclado turbulento, presurización o por bomba centrífuga)	-Aceite emulsificado -Grasas -Sólidos suspendidos finos	-Rompe emulsiones mecánicas -Costo bajo -Relativamente seguro	-Emisiones volátiles -No remueve constituyentes disueltos -No rompe emulsiones químicas -Requiere aditivos químicos -Requiere disposición de espuma -Dificultad de mantenimiento -Costos de energía elevados
Coalescencia de aceites	Se utiliza para la remoción de emulsiones de aceite y agua que no pueden ser separados por gravedad. Este sistema consiste en un elemento filtrante fijo hecho de un material fibroso u otro material que atraiga al aceite. Las gotas pequeñas de aceite tienen gran afinidad por estas fibras, las cuales hacen que se adhieran y rompan las emulsiones. Cuando las emulsiones pasan por el elemento, las gotitas de aceite crecen y migran a través de él para subir a la superficie del agua. El aceite flotante es entonces removido de la superficie.	Aceite libre y emulsificado	-Mantenimiento bajo -No tiene elementos mecánicos -Rompe emulsiones mecánicas -Remoción de aceite mejorado -No requiere de aditivos químicos -Relativamente seguro -Facilidad de operación -Costos de energía bajos	-No remueve constituyentes disueltos -Requiere disposición de aceites -No rompe emulsiones químicas

Continuación Tabla No. 1: Tecnologías de tratamiento físico

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Evaporación	Este proceso envuelve la vaporización de un líquido en una solución o lodo. El objetivo es concentrar una solución compuesta de un solvente volátil y un soluto menos volátil.	-Compuestos orgánicos volátiles -Reducción de volumen de agua	-Reduce el volumen de residuos -Remueve contaminantes disueltos -Relativamente seguro -Facilidad de operación	-Emisiones volátiles -Costos de energía altos -Susceptible a ensuciamiento -Dificultad de mantenimiento
Filtración	El mecanismo de remoción es por filtración directa y coagulación inducida de los glóbulos de aceite en el medio filtrante. El proceso puede además romper emulsiones mecánicas. Los materiales usados en los medios filtrantes son: vidrio, cerámica porosa, metales, plástico, arena, antracita y grafito. Además, se puede utilizar para remover sólidos suspendidos. Los medios filtrantes más utilizados para esto son arena y otros sólidos inertes.	-Aceite libre y emulsificado -Sólidos suspendidos	-Remueve algunos contaminantes disueltos -Relativamente seguro -Facilidad de operación -Costos de energía bajos	-Susceptible a ensuciamiento -Requiere de retrolavado -Produce malos olores y crecimiento de bacterias -Mantenimiento alto
Adsorción	Este proceso envuelve el uso de carbón activado con área superficial grande para la adsorción de contaminantes orgánicos del agua residual.	-Compuestos orgánicos -Algunos compuestos inorgánicos	-Remueve contaminantes disueltos -Relativamente seguro -Facilidad de operación -Costos de capital bajos	-Susceptible a ensuciamiento -Produce malos olores y crecimiento de bacterias -Mantenimiento alto -Requiere regeneración o disposición
Extracción con aire	Es un proceso en el que los contaminantes disueltos son transferidos de la fase líquida a vapor. Para esto se introduce aire o vapor vivo en el agua residual.	-Compuestos orgánicos volátiles -Algunos compuestos orgánicos semivolátiles	-Remueve contaminantes disueltos -Un tanto seguro -Costos de capital bajos	-Costos de energía altos -Dificultad de mantenimiento -Susceptible a ensuciamiento -Emisiones volátiles -No remueve compuesto inorgánicos

(Belhateche: 32-51)

Tabla No. 2: Tecnologías de tratamiento químico

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Precipitación química	En este proceso los contaminantes solubles son convertidos en formas insolubles por reacciones químicas, o por cambios en la composición del solvente que disminuye la solubilidad de los contaminantes. Los sólidos precipitados pueden entonces ser removidos por coagulación, floculación y sedimentación, o filtración.	-Compuestos inorgánicos -Metales	-Remueve constituyentes disueltos -Mantenimiento bajo -Recubrimiento de metales -Un tanto seguro -Costos de energía bajos -Facilidad de operación	-Emisiones volátiles -Requiere manejo y almacenamiento apropiado de reactivos -Requiere disposición de lodos residuales -Remoción selectiva -Requiere aditivos químicos
Recubrimiento electrolítico	Este proceso envuelve reacciones de oxidación y reducción que tienen lugar en la superficie de electrodos conductivos (cátodo y ánodo). Los electrodos son sumergidos en un medio químico y se aplica un potencial eléctrico. El ión metálico es reducido a su forma elemental en el cátodo, mientras los productos gaseosos, como el oxígeno, hidrógeno, nitrógeno o cloro evolucionan en el ánodo.	-Compuestos orgánicos en altas concentraciones -Compuestos inorgánicos -Metales	-Remueve constituyentes disueltos -Recubrimiento de metales -Relativamente seguro -Facilidad de operación -No produce lodos residuales	-Costos de capital y costos de operación altos -Remoción selectiva -Dificultad de mantenimiento -Costos de energía elevados -Susceptible a ensuciamiento
Intercambio iónico	Este proceso envuelve el intercambio de un ión colocado en una superficie sólida por fuerzas electrostáticas con un ión de carga similar que está presente en el influente de agua residual. Usualmente se utilizan resinas sólidas sintéticas con grupos funcionales iónicos solubles.	-Compuestos orgánicos en bajas concentraciones -Compuestos inorgánicos -Metales	-Remueve constituyentes disueltos -Recubrimiento de metales -Relativamente seguro -Facilidad de operación -El agua puede ser reutilizada	-Costos de capital y costos de operación altos -Remoción selectiva -Dificultad de mantenimiento -Costos de energía elevados -Susceptible a "fouling"

Continuación Tabla No. 2: Tecnologías de tratamiento químico

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Ósmosis inversa	La ósmosis envuelve la migración del agua a través de una membrana semipermeable separando soluciones de diferentes concentraciones. La membrana es permeable al agua, pero retiene contaminantes disueltos como sales o compuestos de alto peso molecular. En ósmosis el agua normalmente migra a través de la membrana del lado diluido hacia el lado más concentrado hasta que ambos lados de la membrana tienen iguales concentraciones. En ósmosis inversa se aplica presión al lado más concentrado para dirigir el agua al lado menos concentrado.	-Compuestos orgánicos en bajas concentraciones -Compuestos inorgánicos -Metales	-Remueve constituyentes disueltos -Recubrimiento de metales -Relativamente seguro -Facilidad de operación -El agua puede ser reutilizada	-Costos de capital y costos de operación altos -Remoción selectiva -Dificultad de mantenimiento -Costos de energía elevados -Susceptible a "fouling"
Oxidación/Reducción Química	Este tratamiento consiste de un par de reacciones en las cuales las moléculas de un reactante pierden electrones (oxidación) mientras que las moléculas del otro reactante ganan electrones (reducción).	-Compuestos orgánicos en altas concentraciones -Algunos compuestos inorgánicos	-Remueve contaminantes disueltos -Es un alto grado de tratamiento -No produce residuos	-Costos de capital y costos de operación altos -Remoción selectiva -Dificultad de mantenimiento -Dificultad de operación -Costos de energía elevados

(Belhateche: 32-51)

Tabla No. 3: Tecnologías de tratamiento biológico

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Lodos activados	En este proceso un licor mezclado que consiste en microorganismos suspendidos, oxígeno disuelto, compuestos orgánicos y nutrientes es continuamente mezclado o aereado. La materia biológica suspendida entra en contacto con el oxígeno, nutrientes y la materia orgánica para degradar los compuestos orgánicos a dióxido de carbono y agua los cuales permanecen en el licor. El tanque de aereación donde ocurre la degradación está seguido por un clarificador o sedimentador donde se remueve la materia microbiana suspendida. Una porción de la biomasa sedimentada, o lodo, se recicla de regreso al tanque de aereación, mientras el resto se descarta.	-Compuestos orgánicos en bajas concentraciones -Algunos compuestos inorgánicos	-Remueve constituyentes disueltos -Mantenimiento bajo -Es un proceso de destrucción -Relativamente seguro -Costos de capital bajos -Relativamente fácil de operar	-Emisiones volátiles -Requiere disposición de lodos residuales -Costos de energía un tanto elevados -Susceptible a cambios climáticos
Lagunas de aereación Lagunas de estabilización	En su forma más simple las lagunas de estabilización son cuencas de tierra que utilizan procesos naturales que envuelven algas y bacterias para estabilizar la materia orgánica presente en el agua residual. Las lagunas son poco profundas para que la luz y el oxígeno puedan penetrar en todas las profundidades. Las lagunas de aereación son similares a las de estabilización excepto que se suministra constantemente oxígeno por aereación o mezcla para mantener las condiciones aeróbicas. El lodo producido sedimenta en ciertas áreas de la laguna y forma una capa en el fondo.	-Compuestos orgánicos en bajas concentraciones -Algunos compuestos inorgánicos	-Remueve constituyentes disueltos -Mantenimiento bajo -Es un proceso de destrucción -Relativamente seguro -Costos de capital bajos -Costos de energía bajos -Facilidad de operación -Lodos residuales infrecuentes	-Emisiones volátiles -Susceptible a cambios climáticos -Requerimiento de bastante espacio -No hay control en la operación
Filtros percoladores Reactores de película fija	En los procesos biológicos de película fija los microorganismos permanecen adheridos a una superficie fija. La población microbiana fija forma una capa que absorbe nutrientes del agua residual que pasa sobre la película.	-Compuestos orgánicos en bajas concentraciones -Algunos compuestos inorgánicos	-Remueve constituyentes disueltos -Mantenimiento bajo -Es un proceso de destrucción -Relativamente seguro -Lodos residuales relativamente bajos	-Emisiones volátiles -Susceptible a cambios climáticos -Costos de capital y costos de operación relativamente altos -Susceptible a ensuciamiento

Continuación Tabla No. 3: Tecnologías de tratamiento biológico

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Degradación anaeróbica	Los procesos de tratamiento anaeróbico son similares a los procesos aeróbicos excepto que la degradación biológica de los contaminantes ocurre en ausencia de oxígeno. Los procesos anaeróbicos no producen tanta biomasa como los aeróbicos, pero el proceso es más lento. Los microorganismos utilizados no solamente no requieren oxígeno, sino no pueden sobrevivir en ambientes con oxígeno.	-Compuestos orgánicos en bajas concentraciones -Compuestos orgánicos clorinados -Algunos compuestos inorgánicos	-Remueve constituyentes disueltos -Es un proceso de destrucción -Trata residuos clorinados -Produce metano -Generación de lodos reducida	-Susceptible a cambios climáticos -Costos de capital y costos de operación relativamente altos -Altos costos de energía si no hay recuperación del metano

(Belhateche: 32-51)

Una vez se tiene una comprensión básica técnica de los varios procesos empleados en tratamiento de aguas residuales industriales, se puede seleccionar el proceso o procesos que mejor se adapte a las necesidades.

3. Selección de flujos de diseño y cargas de masa. La capacidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales está normalmente basada en el flujo diario en el año de diseño más un subsidio por crecimiento futuro. Sin embargo, las plantas tienen que ser diseñada para cumplir un número de condiciones que son influenciadas por el flujo, características del agua residual y las concentraciones de los constituyentes.

El objetivo general del tratamiento de aguas residuales es proveer un sistema de tratamiento que es capaz de hacer frente a un amplio rango de probables condiciones de agua residual mientras se cumplen los requerimientos de desempeño.

a. Flujo de diseño. El desarrollo y previsión de flujos es necesario para determinar la capacidad de diseño y los requerimientos hidráulicos para el sistema de tratamiento. Los flujos necesitan ser desarrollados tanto para el período inicial de operación como para un futuro período.

b. Razón fundamental para la selección de flujos. La razón fundamental para la selección de flujos está basada en consideraciones hidráulicas y de proceso. Las unidades de proceso y los conductos hidráulicos deben ser dimensionados para acomodar los flujos pico anticipados que pasarán a través de la planta de tratamiento. Muchas de las unidades de proceso son diseñadas basándose en el tiempo de retención o la razón de flujo (flujo por unidad de área superficial). Dado que el desempeño de estas unidades puede ser afectado significativamente por variaciones las condiciones de flujo o cargas de masa, se deben considerar en el diseño los flujos pico y mínimo.

## D. Ecuación de flujo

El flujo de ingreso varía durante el día. La ecuación de flujo es utilizada para reducir el incremento repentino del flujo de ingreso y balancear las fluctuaciones en el sistema de recolección o en los sistemas de almacenamiento. Esto beneficia el rendimiento de los procesos de tratamiento posteriores y reduce el tamaño y costo de las unidades de tratamiento.

Beneficios de ecuación de flujo:

- El tratamiento biológico es mejorado porque las cargas repentinas son eliminadas y el pH es estabilizado.

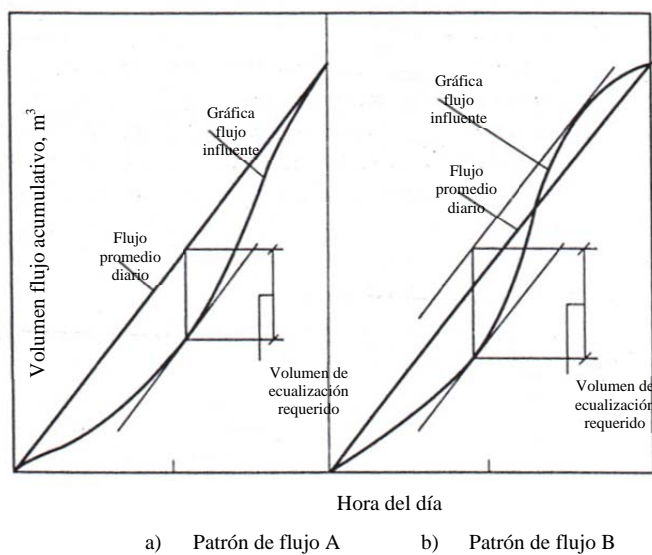
- La calidad del efluente obtenido del sedimentador secundario es mejorado a través de consistencia en la carga del agua.
- En el tratamiento químico la amortiguación de la carga másica mejora el control de alimentación de químicos y la confiabilidad del proceso.
- En general mejora el desempeño de las operaciones de tratamiento.

Desventajas de la equalización de flujo:

- Se necesitan áreas grandes para dichos tanques.
- Se requiere operación adicional y mantenimiento.
- Se incrementa el costo de capital.

El volumen del tanque requerido para la equalización de flujo es determinado utilizando un diagrama de volumen acumulativo en el cual el flujo acumulativo es graficado versus la hora del día. El flujo diario promedio, también dibujado en el mismo diagrama, es la línea recta dibujada del origen al último punto del diagrama. Para determinar el volumen requerido, se dibuja tangente a la curva una línea paralela a la línea de flujo diario promedio. El volumen requerido es igual a la distancia vertical del punto de tangencia a la línea recta que representa el flujo promedio. Si la curva de flujo pasa sobre la línea que representa el flujo promedio, el diagrama debe ser limitado con dos líneas que son paralelas a la línea de flujo promedio y tangentes a las extremidades del diagrama del flujo. Ambos casos se muestran en la siguiente figura:

Figura No. 1: Diagrama esquemático para la determinación del volumen requerido de tanques de equalización



(Metcalf: 336)

## E. Trampas de grasas

Los métodos estándar definen grasas y aceites como grupos de sustancias con características físicas similares, determinadas cuantitativamente con base en su solubilidad común con freón o hexano. El término grasas y aceites incluye materiales de origen vegetal, materiales de tejido animal, petróleo o componentes del petróleo y otros materiales extraídos por el solvente. Al petróleo y a sus componentes también se les denomina hidrocarburos o aceites no polares.

En aguas residuales domésticas el contenido de grasas y aceite puede ser del orden de 30 a 50 mg/L y constituir alrededor del 20% de la DBO; en aguas residuales industriales la concentración es generalmente mucho mayor.

El sistema más sencillo para remoción de aceites y grasas no emulsificadas es la trampa de grasas. Ésta es un tanque diseñado para retener las grasas y aceites, así como para permitir su limpieza y mantenimiento apropiado. La trampa debe tener un diseño hidráulico y un tiempo de retención adecuado para el propósito propuesto; la distancia entre la entrada y la salida ha de ser suficiente para permitir la separación diferencial por gravedad y no dejar escapar grasas por la unidad de salida.

Una trampa de grasas es una cámara pequeña de flotación en la cual la grasa flota a la superficie libre del agua y es retenida, mientras que el agua más clara subyacente es descargada. En una trampa de grasas no hay equipo mecánico, la entrada del agua residual se hace por debajo de la superficie del agua y la salida generalmente por el fondo. Normalmente se diseña con tiempos de retención de 15 a 30 minutos.

El mantenimiento pobre es lo que hace que en la mayoría de los casos las trampas para grasas no funcionen adecuadamente, la falta de limpieza continua permite la acumulación excesiva de grasa en la trampa y su descarga con el efluente. Para un buen funcionamiento de la trampa deben evitarse las cargas hidráulicas súbitas sobre ella ya que esto puede producir agitación excesiva del contenido de la trampa, impide la retención y flotación de la grasa y permite su escape por la unidad de salida.

Las trampas de grasas deben localizarse lo más cerca posible de la fuente de agua residual y antes del sedimentador primario o de cualquier otra unidad que requiera este dispositivo para prevenir problemas de obstrucción, adherencia a piezas especiales, acumulación en las unidades de tratamiento y malos olores.

## F. Coagulación y floculación

El proceso de mezcla es una operación unitaria importante en muchas fases del tratamiento de aguas residuales incluyendo:

- Mezcla de una sustancia completamente con otra
- Mezcla de líquidos miscibles
- Floculación de las partículas de aguas residuales

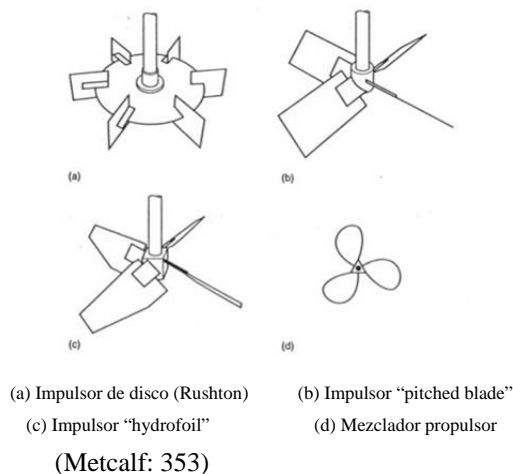
La mayoría de operaciones de mezcla en aguas residuales pueden ser clasificadas como mezcla rápida continua o como mezcla continua. Una de las aplicaciones principales de la mezcla rápida continua es la mezcla de químicos con aguas residuales para floculación. La mezcla continua es utilizada cuando el contenido en un tanque debe mantenerse en suspensión como en tanques de equalización, floculación, lagunas de aireación y digestores aerobios.

Coagulación es el proceso que incluye las reacciones y mecanismos envueltos en la desestabilización química de partículas y en la formación de partículas de mayor tamaño. En general, un coagulante es el químico que es agregado para desestabilizar las partículas coloidales en el agua residual de modo que se pueda darla formación de flocs. Un floculante es un químico, típicamente orgánico, agregado para mejorar el proceso de floculación. El término floculación es usado para describir el proceso por el cual el tamaño de las partículas aumenta como resultado de las colisiones entre partículas. El propósito de la floculación es producir partículas que pueden ser removidas por procedimientos de separación poco costosos como sedimentación por gravedad y filtración.

Las partículas en el agua residual pueden, para propósitos prácticos, ser clasificadas como partículas en suspensión y coloidales. Las partículas en suspensión son generalmente de mayor tamaño que  $1.0 \mu\text{m}$  y pueden ser removidas por sedimentación por gravedad. Dado que las partículas coloidales no pueden ser removidas por sedimentación en un período razonable de tiempo, la utilización de químicos coagulantes y floculantes debe usarse para ayudar en la remoción de estas partículas.

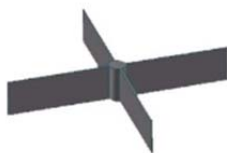
1. Turbinas y propulsores para coagulación y floculación. Mezcladores de turbina y propulsores son utilizados comúnmente en procesos de tratamiento de aguas residuales para mezcla de químicos, para mantener material en suspensión y para aireación. Los mezcladores de turbina o propulsores son usualmente construidos con un eje vertical manejado por un reductor de velocidad y un motor eléctrico. Impulsores típicos utilizados para mezcla se muestran en la siguiente figura:

Figura No. 2: Impulsores utilizados para mezcla



El elemento rotatorio de los floculadores con turbina y propulsor consiste en tres o cuatro paletas adjuntas a un eje vertical. El floculador es manejado con un dispositivo de reducción de velocidad. Las paletas de los floculadores son utilizadas para aumentar el contacto de las partículas mientras que al mismo tiempo provee los gradientes de velocidad para la mezcla. Los diseños típicos de turbinas y propulsores utilizados para floculación son turbinas de paletas planas.

Figura No. 3: Turbina de paletas planas



(VertMarkets, 2011)

2. Pruebas de jarras. Las pruebas de jarras son simulaciones en laboratorio de las operaciones de coagulación, floculación y sedimentación que se realizan en plantas de tratamiento de aguas.

La prueba de jarras determina las condiciones de operación óptimas generalmente para el tratamiento de aguas. La prueba de jarras permite ajustar el pH, hacer variaciones en las dosis de las diferentes sustancias químicas que se añaden a las muestras y recrear a pequeña escala lo que se podría ver en un equipo de tamaño industrial. Una prueba de jarras puede simular los proceso de coagulación o floculación que promueven la remoción de coloides suspendidos y materia orgánica.

Al igual que otras pruebas analíticas el método ha sido estandarizado para facilitar la comparación y convalidación de los resultados.

## G. Sedimentación

La sedimentación es el proceso de remoción de partículas sólidas más pesadas que el agua por gravedad.

En el tratamiento de aguas residuales la sedimentación se usa para remover materiales orgánicos e inorgánicos que son sedimentables en condiciones de flujo continuo. Esta remueve arena, materia particulada en los tanques primarios de sedimentación y flóculos químicos de una unidad de precipitación química.

Después que el agua residual pasa los procesos preliminares entra a los tanques de sedimentación. Los lodos sedimentados en el tanque se remueven por raspadores mecánicos o son bombeados. Las sustancias flotantes en la superficie del tanque son removidos por un dispositivo. El efluente pasa a unidades de tratamiento secundario o es descargado dependiendo de la legislación nacional.

Respecto a la forma del tanque, un tanque largo y angosto se acerca al ideal más que los tanques circulares. La forma del tanque afecta enormemente las características hidráulicas y de sedimentación de partículas. Tanques cuadrados, circulares y tanques que tienen una longitud menor que el doble del ancho, generalmente no son formas deseadas para sedimentación. Los tanques largos, estrechos y poco profundos tienen las mejores características hidráulicas para sedimentación de partículas. Un tanque de sedimentación debe tener una zona de entrada, una zona de salida, una zona de lodos y una zona de sedimentación. Se puede requerir de accesorios en la zona de entrada, vertederos de salida, equipo de remoción de lodos, y posiblemente un incremento adicional de volumen para almacenamiento de lodos.

La velocidad del agua de entrada debe ser tan baja como sea posible. La función de la zona de entrada es distribuir adecuadamente el flujo de modo que toda el área de sección transversal del tanque sea utilizada. Se recomienda colocar una pared difusora para distribuir el flujo. Los agujeros de la pared difusora deben distribuirse uniformemente a través de la pared que cubre la sección transversal de entrada. Se debe cuidar que el tamaño de los agujeros de la pantalla sea adecuado para evitar romper el floculo que viene del tratamiento químico.

La zona de salida de un sedimentador consiste básicamente en vertederos con una carga de  $0.10 - 0.25$   $m^3/\text{min}/m$ .

## H. Tratamiento biológico de lodos activados

En los proceso de tratamiento biológico en suspensión, bajo suministro continuo de aire, los microorganismos aerobios vivos son mezclados completamente con los compuestos orgánicos en el agua residual y usan dichos compuestos como alimento para su crecimiento. Conforme los microorganismos crecen se agrupan o flocculan para formar una masa activa microbiana. Es por esto que se llama floculación biológica o lodos activados.

El proceso de tratamiento biológico de lodos activados es posiblemente el más utilizada para procesos de tratamiento secundario de aguas residuales.

El agua residual ingresa continuamente a un tanque de aireación donde flóculos biológicos desarrollados previamente se ponen en contacto con la materia orgánica del agua residual. Se inyecta continuamente aire al tanque de aireación como una fuente de oxígeno para mantener el sistema aerobio y el lodo activado en suspensión.

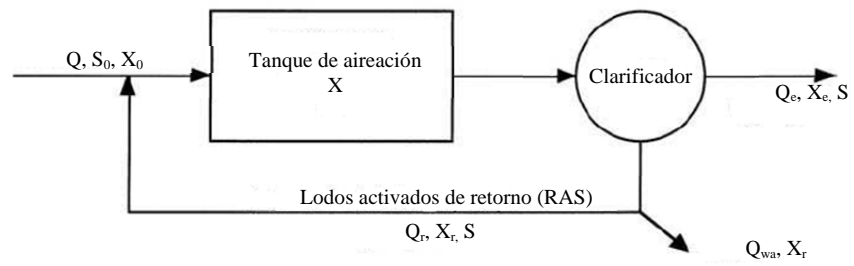
Cuando un sistema nuevo de lodos activados es comenzado, debe sembrarse con lodo activado de una planta en operación. Si no se dispone de semilla de lodos, los lodos activados pueden ser preparados por aireación continua, sedimentación y retorno de los sólidos sedimentados al agua residual por varias semanas (4-6 semanas).

La mezcla de agua residual y lodo activado en el tanque de aireación es llamada “licor mezclado”. La masa biológica o biomasa en el licor mezclado es llamada “sólidos suspendidos del licor mezclado” (MLSS) o “sólidos suspendidos volátiles del licor mezclado” (MLVSS).

El crecimiento microbiano en el licor mezclado se mantiene en la fase de crecimiento para asegurar buenas propiedades de sedimentación.

Después de un cierto tiempo de reacción (4 a 8 horas), el licor mezclado es descargado del tanque de aireación a un sedimentador secundario donde los sólidos suspendidos son sedimentados por gravedad. La mayoría de los lodos biológicos sedimentados se retornan al tanque de aireación para mantener una alta población de microorganismos que permite un rápido rompimiento de la materia orgánica en el agua residual. En la siguiente figura se muestra un esquema general de tratamiento de lodos activados.

Figura No. 4: Esquema general de un proceso de tratamiento biológico de lodos activados



(Lin: 628)

### III. JUSTIFICACIÓN

La elaboración de este trabajo de graduación surgió por el interés de la empresa en implementar un tratamiento químico para mejorar el funcionamiento de la planta que actualmente se encuentra en operación. Sin embargo, con este trabajo no sólo se propone el tratamiento químico, sino el proceso completo para lograr un efluente con carga contaminante que cumpla con los requerimientos del “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” acuerdo gubernativo número 232-2006.

Al realizar el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales se tomará en cuenta la proyección de crecimiento en la producción y en base a eso se realizó el diseño, de modo que se invierta en la implementación de una planta que se irá adaptando y funcionará correctamente con el crecimiento de la empresa. El caudal que actualmente debe manejar la planta es de 1.46 m<sup>3</sup>/h, y dado que se diseñará en base a un 5% de crecimiento anual en la producción para un tiempo de vida de la planta de 15 años, el caudal de diseño es de 3.04 m<sup>3</sup>/h.

Además, se realizará un diseño con el que se cumpla con los límites máximos permisibles de parámetros de calidad del agua en el reglamento mencionado anteriormente, hasta el último período en que se encuentra definido, el cual es Mayo de 2024. De acuerdo a dicho reglamento el agua que se descarga a cuerpos receptores debe tener 100 mg/L de Demanda Bioquímica de Oxígeno, 100 mg/L de sólidos suspendidos y 10 mg/L de grasas y aceites.

Con el mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas la empresa puede obtener la ventaja de poder realizar mercadeo para crear en los consumidores una imagen de marca amigable con el ambiente y con esto aumentar ventas. Además, puede constituir una fuente de oportunidad para comercializar con clientes que exijan que los productos que adquieren contaminen al mínimo el ambiente, ya que conforme transcurre el tiempo el interés en temas medioambientales va en incremento. Por otra parte, cabe mencionar que la empresa debe estar preparada para ir cumpliendo con los parámetros establecidos para las diferentes etapas del Reglamento, de modo que se puedan evitar costosas multas que además de incurrir en gastos creen una mala imagen de la marca, o en el peor de los casos causen el cierre de la empresa.

Finalmente, en la elaboración de este trabajo se aplicarán todos los conocimientos teóricos adquiridos para resolver un problema real que actualmente inquieta resolver y con lo cual la empresa se verá beneficiada.

## IV. OBJETIVOS

### A. OBJETIVO GENERAL

Llevar a cabo el diseño de una planta de tratamiento de las aguas residuales procedentes del área de Producción de una industria alimenticia, para lograr un efluente con la menor cantidad de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos, que cumpla con los requerimientos de la legislación.

### B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Llevar a cabo el diagnóstico de carga de las aguas residuales obtenidas.
2. Realizar el diagrama de flujo del proceso de tratamiento de las aguas residuales.
3. Realizar el balance de masa del proceso de tratamiento de las aguas residuales.
4. Determinar el equipo que se debe implementar en el desarrollo de la planta de tratamiento de aguas residuales.
5. Llevar a cabo los planos de distribución de la planta de tratamiento de aguas residuales diseñada.
6. Elaborar el análisis financiero para la implementación de la planta de tratamiento de aguas residuales diseñada.

## V. PROBLEMA A RESOLVER

Actualmente la empresa en la que se realizará este trabajo de graduación, está interesada en implementar un tratamiento químico para mejorar la planta de aguas residuales que tiene en operación. Con la realización de este proyecto no se propone únicamente un proceso de tratamiento químico, sino todo el sistema de tratamiento físico, químico y microbiológico que permita cumplir con los parámetros de caracterización del agua definidos hasta el último período (Mayo 2024) en el “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” acuerdo gubernativo número 232-2006.

Se tomará en cuenta la composición del agua residual y el caudal para elaborar el diseño, de modo que se pueda obtener una planta con una operación adecuada y de la que se obtenga un efluente con el mínimo de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos que puedan ser descargados sin ningún daño a la salud o al ambiente, y siempre dentro de los márgenes de regulación de ley.

## VI. METODOLOGÍA

Durante todo el desarrollo del trabajo se realizó revisión bibliográfica constante para obtener la información necesaria que constituyeron las bases teóricas para la elaboración del trabajo. Se hizo una investigación exhausta en fuentes confiables para asegurarse de tener los conocimientos que se aplicaron para la elaboración de un correcto diseño.

Para la elaboración de este trabajo de graduación inicialmente se elaboró una propuesta de lo que se realizaría para entregarlo a la empresa, de modo que las autoridades pertinentes de esta lo evaluaron y aprobaron la elaboración del trabajo.

Para llevar a cabo el diseño de la planta de tratamiento fue necesario llevar a cabo el diagnóstico de carga de las aguas residuales que se obtienen de la planta de producción. Para la obtención de esta información se llevó a cabo el análisis de contenido del agua con una muestra compuesta tomada durante 24 horas por equipo especializado de una empresa externa contratada. Además, dicha empresa también realizó mediciones de caudal de las aguas residuales a tratar durante el mismo período de tiempo de 24 horas.

Para evaluar el tratamiento químico se realizaron cinco pruebas de jarras, en las que se determinó la calidad inicial del agua y la calidad final después de haber sido sometida a tratamiento químico en diferentes variaciones de este. Con esto se tenían diversos datos de calidad de agua cruda los cuales correspondían a la muestra compuesta analizada por la empresa externa y a las muestras de agua cruda de las cinco pruebas de jarras. Para realizar el diseño se tomaron los parámetros más altos de caracterización de los datos anteriores, de modo que se pudiera asegurar que la planta funcionara aún con la máxima carga de contaminantes.

Se hizo la interpretación de los datos obtenidos anteriormente para determinar las necesidades del proceso a diseñar, con el cual se obtenía un efluente con la menor cantidad de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos correspondientes al “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” acuerdo gubernativo número 232-2006, del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Posterior a la determinación de las etapas del proceso de tratamiento de las aguas, se determinó el equipo que se necesita para llevar a cabo dicho proceso. También se hicieron cotizaciones de este equipo para posteriormente determinar el costo de la implementación de la planta. Además, se elaboraron los planos de distribución de la planta diseñada con la mayor cantidad de detalle, utilizando un software de dibujo.

Para finalizar el contenido del trabajo de graduación, se presenta el análisis financiero del proyecto para que la empresa pueda evaluar la posibilidad de implementar la planta diseñada. Para esto se determinó la inversión necesaria para la construcción de la planta y el costo de su operación, de modo que se pudo calcular la cantidad de ingresos anuales que la empresa debe aumentar durante diez años para obtener retorno de inversión.

## VII. RESULTADOS

Tabla No. 4: Especificaciones para el tanque de ecuilización

	<b>Valor</b>
Volumen tanque (m <sup>3</sup> )	33.47
Diámetro tanque (m)	3.49
Altura tanque (m)	3.49
Ancho deflectores (m)	0.29
Diámetro impulsor (m)	1.164
Altura del mezclador (m)	1.16
Velocidad de agitación (rpm)	30
Potencia de agitación (hp)	5.48
Tipo de impulsor	Rushton de 6 paletas
Diámetro tubería salida	50.80 mm (2 in)
Material tanque	Concreto

Tabla No. 5: Especificaciones para el tanque de solución de ácido sulfúrico

	<b>Valor</b>
Volumen tanque (m <sup>3</sup> )	0.06
Altura tanque (m)	0.69
Diámetro externo tanque (m)	0.33
Grosor pared tanque (m)	4.76X10 <sup>-3</sup>
Diametro interno tanque (m)	0.33
Diámetro impulsor (m)	0.108
Altura impulsor (m)	0.23
Velocidad de agitación (rpm)	125
Potencia de agitación (hp)	0.02
Tipo de impulsor	Rushton de 6 paletas
Diámetro tubería salida	6.35 mm (1/4 in)
Material tanque	Polietileno de alta densidad

Tabla No. 6: Flujo de diseño para la planta de tratamiento

	<b>Valor</b>
Flujo de diseño (m <sup>3</sup> /h)	3.04

Tabla No. 7: Especificaciones para las trampas de grasas

	<b>Trampa 1</b>	<b>Trampa 2</b>
Volumen de agua (m <sup>3</sup> )	1.27	1.01
Largo (m)	1.41	1.31
Altura de agua (m)	1.28	1.19
Ancho (m)	0.70	0.65
Altura libre sobre superficie (m)	0.64	0.64
Altura total (m)	1.92	1.83
Diámetro tubería salida	38.10 mm (1 ½ in)	38.10 mm (1 ½ in)
Material	Concreto	Concreto

Tabla No. 8: Flujos volumétricos y másicos de las trampas de grasas

		<b>Influente de agua</b>	<b>Efluente de agua</b>	<b>Efluente de grasas</b>
<b>Trampa 1</b>	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)	3.04	3.03	8.76X10 <sup>-3</sup>
	Flujo másico (kg/h)	3031.31	3022.57	8.74
<b>Trampa 2</b>	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)	3.03	3.03	1.31X10 <sup>-3</sup>
	Flujo másico (kg/h)	3022.57	3021.27	1.31

Tabla No. 9: Parámetros de calidad del influente y efluente de las trampas de grasas

	<b>Trampa 1</b>		<b>Trampa 2</b>	
	<b>Agua influente</b>	<b>Agua efluente</b>	<b>Agua influente</b>	<b>Agua efluente</b>
DBO (mg/L)	20337.29	14236.11	14236.11	9965.27
Sólidos suspendidos (mg/L)	11450.00	8015.00	8015.00	5610.50
Grasas y aceites (mg/L)	3380.85	507.13	507.13	76.07

Tabla No. 10: Especificaciones para los tanques de coagulación y floculación

	<b>Tanque coagulación</b>	<b>Tanque floculación</b>
Volumen de agua (m <sup>3</sup> )	0.05	1.01
Volumen total tanque (m <sup>3</sup> )	0.13	1.61
Diámetro tanque (m)	0.40	1.09
Altura de agua (m)	0.40	1.09
Altura sobre superficie agua (m)	0.64	0.64
Altura total tanque (m)	1.04	1.73
Diámetro impulsor (m)	0.134	0.363
Ancho deflectores (m)	0.03	0.09
Altura mezclador (m)	0.13	0.36

Continuación Tabla No. 10: Especificaciones para los tanques de coagulación y floculación

	<b>Tanque coagulación</b>	<b>Tanque floculación</b>
Velocidad de agitación (rpm)	100	40
Potencia de agitación (hp)	0.03	0.06
Tipo de impulsor	Rushton de 6 paletas	Impulsor de 4 paletas planas
Diámetro tubería salida	38.10 mm (1 ½ in)	38.10 mm (1 ½ in)
Material tanque	Concreto	Concreto

Tabla No. 11: Flujos volumétricos y máscicos de los tanques de coagulación y floculación

		<b>Influente de agua</b>	<b>Influente solución coagulante/floculante</b>	<b>Efluente de agua</b>
<b>Coagulación</b>	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)	3.03	0.01	3.04
	Flujo máscico (kg/h)	3021.27	12.15	3033.41
<b>Floculación</b>	Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)	3.04	0.05	3.09
	Flujo máscico (kg/h)	3033.41	50.71	3084.12

Tabla No. 12: Especificaciones para los tanques de solución de coagulante y floculante

	<b>Tanque sol. coagulante</b>	<b>Tanque sol. floculante</b>
Volumen tanque (m <sup>3</sup> )	0.11	0.30
Altura tanque (m)	0.76	1.22
Diámetro externo tanque (m)	0.46	0.61
Grosor pared tanque (m)	4.76X10 <sup>-3</sup>	6.35X10 <sup>-3</sup>
Diámetro interno tanque (m)	0.45	0.60
Diámetro impulsor (m)	0.151	0.201
Altura impulsor (m)	0.25	0.41
Velocidad de agitación (rpm)	125	125
Potencia de agitación (hp)	0.05	0.08
Tipo de impulsor	Rushton de 6 paletas	Rushton de 6 paletas
Diámetro tubería salida	25.40 mm (1 in)	25.40 mm (1 in)
Material tanque	Polietileno de alta densidad	Polietileno de alta densidad

Tabla No. 13: Especificaciones para impulsores

	<b>Tipo de impulsor</b>	<b>Diámetro de impulsor (m)</b>	<b>Largo de paletas (m)</b>	<b>Ancho de paletas (m)</b>	<b>Diámetro del eje (m)</b>	<b>Diámetro de disco (m)</b>
Tanque de ecualización	Rushton	1.164	0.291	0.233	0.076 m	0.873
Tanque de solución de ácido	Rushton	0.108	0.027	0.022	0.019	0.081
Tanque de coagulación	Rushton	0.134	0.033	0.027	0.019	0.100
Tanque de floculación	Impulsor de 4 paletas planas	0.363	Que cumpla con diámetro	0.073	0.025	No aplica
Tanque de solución coagulante	Rushton	0.151	0.038	0.030	0.019	0.113
Tanque de solución floculante	Rushton	0.201	0.050	0.040	0.019	0.151

Tabla No. 14: Especificaciones para el sedimentador primario

	<b>Valor</b>
Volumen de agua en el tanque (m <sup>3</sup> )	3.09
Altura zona de clarificación tanque (m)	1.50
Ancho (m)	0.59
Largo (m)	3.52
Altura zona de lodos (m)	0.15
Altura sobre superficie de agua (m)	0.64
Altura total de sedimentador (m)	2.29
Ubicación de descarga de lodos (m)	1.17
Ubicación de pantalla difusora (m)	1.00
Largo de vertedero (m)	0.29
Altura de vertedero (m)	0.29
Diámetro de tubería de salida sedimentador	38.10 mm (1 ½ in)
Diámetro de tubería de descarga de lodos	50.80 mm (2 in)
Material tanque	Concreto

Tabla No. 15: Especificaciones de pantalla difusora

	Valor
Altura de pantalla (m)	1.50
Diámetro de orificio (m)	0.05
Área de orificio (m <sup>2</sup> )	1.96X10 <sup>-3</sup>
Número de orificios	9
Distancia orilla de pantalla a orificios (m)	0.30
Número de filas de orificios	3
Número de columnas de orificios	3
Espaciamiento entre filas (m)	0.45
Espaciamiento entre columnas (m)	0.15

Tabla No. 16: Flujos volumétricos y másicos del sedimentador primario

	Influyente de agua	Efluente de lodos	Efluente de agua
Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)	3.09	0.33	2.76
Flujo másico (kg/h)	3084.12	345.82	2738.30

Tabla No. 17: Parámetros de calidad del influente y efluente del sedimentador primario

	Agua influente	Agua efluente
DBO (mg/L)	9965.27	6121.10
Sólidos suspendidos (mg/L)	5610.50	773.86
Grasas y aceites (mg/L)	76.07	20.76

Tabla No. 18: Especificaciones para los aireadores del tratamiento biológico

	Valor
Altura de agua en aireador (m)	5.00
Altura sobre superficie de agua en aireador (m)	0.64
Altura total de aireador (m)	5.64
Ancho aireador (m)	4.58
Largo aireador (m)	9.17
Volumen de agua en aireador (m <sup>3</sup> )	210.01
Flujo de aire requerido (m <sup>3</sup> /h)	127.80
Cantidad de aireadores a utilizar	3
Diámetro de tubería de salida del aireador (mm)	25.40 mm (1 in)
Material del aireador	Concreto

Tabla No. 19: Flujos másicos y volumétricos del aireador del tratamiento biológico

	Influente de agua	Influente de lodos de retorno	Efluente de agua
Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)	2.76	1.32	4.08
Flujo másico (kg/h)	2738.30	1377.28	4115.57

Tabla No. 20: Especificaciones para el sedimentador del tratamiento biológico

	Valor
Diámetro sedimentador (m)	4.16
Altura zona de engrosamiento (m)	1.99
Altura zona de almacenamiento de sólidos (m)	2.65
Altura zona de sedimentación (m)	1.50
Altura sobre superficie de agua (m)	0.64
Altura total de sedimentador (m)	6.77
Cantidad de sedimentadores	3
Diámetro de tubería de salida del sedimentador (mm)	25.40 mm (1 in)
Diámetro de tubería de lodos (mm)	50.80 mm (2 in)
Material del sedimentador	Concreto

Tabla No. 21: Flujos másicos y volumétricos de los sedimentadores del tratamiento biológico

	Influente de agua	Efluente de lodos de retorno	Efluente de lodos de desecho	Efluente de agua
Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)	4.08	1.32	2.53	0.23
Flujo másico (kg/h)	4115.57	1377.28	2651.72	86.57

Tabla No. 22: Parámetros de calidad del influente y efluente del tratamiento biológico

	Agua influente	Agua efluente
DBO (mg/L)	6121.10	100
Sólidos suspendidos (mg/L)	773.86	100
Grasas y aceites (mg/L)	20.76	5.66

Tabla No. 23: Datos obtenidos en cálculo de bombas

	Bomba salida tanque homogenización	Bomba descarga lodos sedimentador 1 <sup>o</sup>	Bomba descarga lodos sedimentador 2 <sup>o</sup>
Cabeza estática de bomba (m)	3.49	2.29	7.41
Cabeza dinámica por fricción de superficie (m)	0.19	0.17	0.98
Cabeza dinámica por accesorios (m)	0.08	0.31	0.31
Cabeza total de bomba (m)	3.76	2.77	8.70
Flujos (m <sup>3</sup> /h)	3.04	0.33	4.06

Tabla No. 24: Flujo de caja del proyecto

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Ingresos</b>		Q840,759.56	Q840,759.56	Q840,759.56	Q840,759.56	Q840,759.56	Q840,759.56	Q840,759.56	Q840,759.56	Q840,759.56	Q840,759.56
<b>Egresos por operación</b>		-Q548,904.57	-Q548,904.57	-Q548,904.57	-Q548,904.57	-Q548,904.57	-Q548,904.57	-Q548,904.57	-Q548,904.57	-Q548,904.57	-Q548,904.57
<b>Depreciación equipo</b>		-Q69,515.41	-Q125,127.73	-Q100,102.18	-Q80,081.75	-Q64,093.20	-Q51,232.85	-Q45,532.59	-Q45,532.59	-Q45,532.59	-Q45,532.59
<b>Utilidad antes de impuestos</b>		Q222,339.58	Q166,727.26	Q191,752.80	Q211,773.24	Q227,761.78	Q240,622.14	Q246,322.40	Q246,322.40	Q246,322.40	Q246,322.40
<b>Impuesto (31%)</b>		-Q68,925.27	-Q51,685.45	-Q59,443.37	-Q65,649.70	-Q70,606.15	-Q74,592.86	-Q76,359.94	-Q76,359.94	-Q76,359.94	-Q76,359.94
<b>Utilidad después de impuestos</b>		Q153,414.31	Q115,041.81	Q132,309.44	Q146,123.54	Q157,155.63	Q166,029.27	Q169,962.45	Q169,962.45	Q169,962.45	Q169,962.45
<b>Inversión</b>	-Q1,682,272.83										
<b>Depreciación equipo</b>		Q69,515.41	Q125,127.73	Q100,102.18	Q80,081.75	Q64,093.20	Q51,232.85	Q45,532.59	Q45,532.59	Q45,532.59	Q45,532.59
<b>Flujo de caja</b>	-Q1,682,272.83	Q222,929.72	Q240,169.54	Q232,411.62	Q226,205.28	Q221,248.84	Q217,262.13	Q215,495.05	Q215,495.05	Q215,495.05	Q215,495.05

**TIR** 5.5%

**VAN** Q0.00

Tabla No. 25: Equipo necesario para implementación de planta

<b>TANQUE DE ECUALIZACIÓN DE FLUJO</b>							
<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tipo</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Precio unitario (\$ o Q)</b>	<b>Precio total (\$ o Q)</b>	<b>Precio total (Q)</b>	<b>Proveedor</b>
Bomba de salida	1	Bomba sumergible	Bomba sumergible con impulsor abierto. Material: acero al carbón. Potencia: 3/4 hp.	Q7,419.69	Q7,419.69	Q7,419.69	Hidrotecnia S.A
Válvula de regulación de flujo	1	Válvula de mariposa	Tamaño: 2". Material: Hierro negro	Q430.00	Q430.00	Q430.00	Cole-Parmer
Medidor de flujo	1	Medidor de flujo electromagnético	Tamaño: 2". Material: PVC	\$710.00	\$710.00	Q5,538.00	Cole-Parmer
Impulsor de tanque de ecualización con motor	1	Impulsor de disco de 6 paletas (Rushton)	Diámetro impulsor: 1.164 m. Largo paletas: 0.291 m. Ancho paletas: 0.233 m. Diámetro eje: 0.076 m. Diámetro disco: 0.873 m. Material: Acero al carbón. Potencia motor: 6 hp	Q15,300.00	Q15,300.00	Q15,300.00	Servicios y ventas industriales
Tanque de ecualización de flujo	1	----	Dimensiones: Diámetro y altura 3.68 m. Material: Concreto	Q28,699.41	Q28,699.41	Q28,699.41	Innovación en Arquitectura y Construcción INARCO S.A.
Tanque de solución de ácido sulfúrico	1	-----	Capacidad: 57 L. Dimensiones: Altura 27" (0.69 m), Diámetro 13" (0.33 m). Material: Polietileno A.D.	\$123.00	\$123.00	Q959.40	Cole-Parmer
Impulsor tanque de solución de ácido con motor	1	Impulsor de disco de 6 paletas (Rushton)	Diámetro impulsor: 0.108 m. Largo paletas: 0.027 m. Ancho paletas: 0.022 m. Diámetro eje: 0.019 m. Diámetro disco: 0.081 m. Material: Acero al carbón. Potencia motor: 1/3 hp	Q850.00	Q850.00	Q850.00	Servicios y ventas industriales
Válvula de dosificación de ácido	1	Válvula solenoid	Material: PTFE. Voltaje: 24 VDC. Potencia: 4.00 W. Tiempo de respuesta: 20 milisegundos	\$118.00	\$118.00	Q920.40	Cole-Parmer
Controlador de pH	1	Controlador proporcional	Rango de pH: 0.00-14.00. Rango de temperatura: -9.9 a 125.0°C.	\$749.00	\$749.00	Q5,842.20	Cole-Parmer
Electrodo de pH	1	Electrodo industrial de grafito	Rango de pH: 0.00 - 12.00. Rango de temperatura: 0 a 110°C.	\$295.00	\$295.00	Q2,301.00	Cole-Parmer
<b>TRAMPAS DE GRASAS</b>							
<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tipo</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Precio unitario (\$ o Q)</b>	<b>Precio total (\$ o Q)</b>	<b>Precio total (Q)</b>	<b>Proveedor</b>
Tanque 1	1	-----	Dimensiones: 1.41 X 0.70 X 1.92 m. Material: Concreto	Q4,478.53	Q4,478.53	Q4,478.53	Innovación en Arquitectura y Construcción INARCO S.A.
Tanque 2	1	-----	Dimensiones: 1.31 X 0.65 X 1.31 m. Material: Concreto	Q3,690.81	Q3,690.81	Q3,690.81	Innovación en Arquitectura y Construcción INARCO S.A.

Continuación Tabla No. 25: Equipo necesario para implementación de planta

COAGULACIÓN							
Equipo	Cantidad	Tipo	Especificaciones	Precio unitario (\$ o Q)	Precio total (\$ o Q)	Precio total (Q)	Proveedor
Tanque de coagulación	1	-----	Dimensiones: Diámetro 0.40 y altura 1.04 m. Material: Concreto	Q1,516.66	Q1,516.66	Q1,516.66	Innovación en Arquitectura y Construcción INARCO S.A.
Tanque de solución de coagulante	1	-----	Capacidad: 114 L. Dimensiones: Altura 30" (0.76 m), Diámetro 18" (0.46 m). Material: Polietileno A.D.	\$194.00	\$194.00	Q1,513.20	Cole-Parmer
Impulsor tanque de coagulación con motor	1	Impulsor de disco de 6 paletas (Rushton)	Diámetro impulsor: 0.134 m. Largo paletas: 0.033 m. Ancho paletas: 0.027 m. Diámetro eje: 0.019 m. Diámetro disco: 0.100 m. Material: Acero al carbón. Potencia motor: 1/3 hp	Q950.00	Q950.00	Q950.00	Servicios y ventas industriales
Impulsor tanque solución coagulante con motor	1	Impulsor de disco de 6 paletas (Rushton)	Diámetro impulsor: 0.151 m. Largo paletas: 0.038 m. Ancho paletas: 0.030 m. Diámetro eje: 0.019 m. Diámetro disco: 0.113 m. Material: Acero al carbón. Potencia motor: 1/3 hp	Q850.00	Q850.00	Q850.00	Servicios y ventas industriales
Válvula de dosificación de coagulante	1	Válvula de bola	Tamaño: 1". Material: PVC	\$28.50	\$28.50	Q222.30	Cole-Parmer
Medidor de flujo de coagulante	1	Medidor de flujo electromagnético	Tamaño: 1". Material:PVC	\$699.00	\$699.00	Q5,452.20	Cole-Parmer
FLOCULACIÓN							
Equipo	Cantidad	Tipo	Especificaciones	Precio unitario (\$ o Q)	Precio total (\$ o Q)	Precio total (Q)	Proveedor
Tanque de floculación	1	-----	Dimensiones: Diámetro 1.09 y altura 1.73 m. Material: Concreto	Q3,378.24	Q3,378.24	Q3,378.24	Innovación en Arquitectura y Construcción INARCO S.A.
Tanque de solución de floculante	1	-----	Capacidad: 303 L. Dimensiones: Altura 48" (1.22 m), Diámetro 24" (0.61 m). Material: Polietileno A.D.	\$477.00	\$477.00	Q3,720.60	Cole-Parmer
Impulsor tanque de floculación con motor	1	Impulsor de 4 paletas planas	Diámetro impulsor: 0.363 m. Ancho paletas: 0.073 m. Diámetro eje: 0.025 m. Material: Acero al carbón. Potencia motor: 1/3 hp	Q1,900.00	Q1,900.00	Q1,900.00	Servicios y ventas industriales
Impulsor tanque solución floculante con motor	1	Impulsor de disco de 6 paletas (Rushton)	Diámetro impulsor: 0.201 m. Largo paletas: 0.050 m. Ancho paletas: 0.040 m. Diámetro eje: 0.019 m. Diámetro disco: 0.151 m. Material: Acero al carbón. Potencia motor: 1/3 hp	Q925.00	Q925.00	Q925.00	Servicios y ventas industriales
Válvula de dosificación de floculante	1	Válvula de bola	Tamaño: 1". Material: PVC	\$28.50	\$28.50	Q222.30	Cole-Parmer
Medidor de flujo de floculante	1	Medidor de flujo electromagnético	Tamaño: 1". Material:PVC	\$699.00	\$699.00	Q5,452.20	Cole-Parmer

Continuación Tabla No. 25: Equipo necesario para implementación de planta

<b>SEDIMENTADOR PRIMARIO</b>							
<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tipo</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Precio unitario (\$ o Q)</b>	<b>Precio total (\$ o Q)</b>	<b>Precio total (Q)</b>	<b>Proveedor</b>
Tanque	1	-----	Dimensiones: 3.52 X 0.59 X 2.29 m. Material: Concreto	Q8,597.86	Q8,597.86	Q8,597.86	Innovación en Arquitectura y Construcción INARCO S.A.
Bomba para limpieza de lodos	1	Bomba sumergible	Bomba sumergible con impulsor abierto. Material: acero al carbón. Potencia: 3/4 hp.	Q7,419.69	Q7,419.69	Q7,419.69	Hidrotecnia S.A
Válvula para descarga de lodos	1	Válvula de mariposa	Tamaño: 2". Material: Hierro negro	Q430.00	Q430.00	Q430.00	Multiválvulas
<b>TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LODOS ACTIVADOS</b>							
<b>Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tipo</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Precio unitario (\$ o Q)</b>	<b>Precio total (\$ o Q)</b>	<b>Precio total (Q)</b>	<b>Proveedor</b>
Tanque de aireación	3	-----	Dimensiones: 9.17 X 4.58 X 5.64 m. Material: Concreto	Q91,411.96	Q274,235.88	Q274,235.88	Innovación en Arquitectura y Construcción INARCO S.A.
Compresor	1	Compresor rotativo de tornillo	Flujo efectivo aire: 75 ft <sup>3</sup> /min. Presión de aire: 7.5 bar (109 psi). Consumo energético: 40 hP (30 kW).	Q65,500.00	Q65,500.00	Q65,500.00	Grupo Gama
Bomba para retirar y retornar lodos	3	Bomba sumergible	Bomba sumergible con impulsor abierto. Material: acero al carbón. Potencia: 3/4 hp.	Q7,419.69	Q22,259.07	Q22,259.07	Hidrotecnia S.A
Válvula para retornar y retirar lodos	6	Válvula de mariposa	Tamaño: 2". Material: Hierro negro	Q430.00	Q2,580.00	Q2,580.00	Multiválvulas
Medidor de flujo de retorno de lodos	3	Medidor de flujo electromagnético	Tamaño: 2". Material: PVC	\$710.00	\$2130.00	Q16,614.00	Cole-Parmer
Tanque clarificador	3	-----	Dimensiones: Diámetro 4.16 y altura 6.77 m. Material: Concreto	Q64,995.14	Q194,985.42	Q194,985.42	Innovación en Arquitectura y Construcción INARCO S.A.
					<b>COSTO TOTAL EQUIPO</b>	<b>Q695,154.06</b>	

\*Tipo de cambio tomado del Banco de Guatemala en fecha 17/11/2011 (\$1=Q7.80693)

Figura No. 5: Balance de masa del proceso

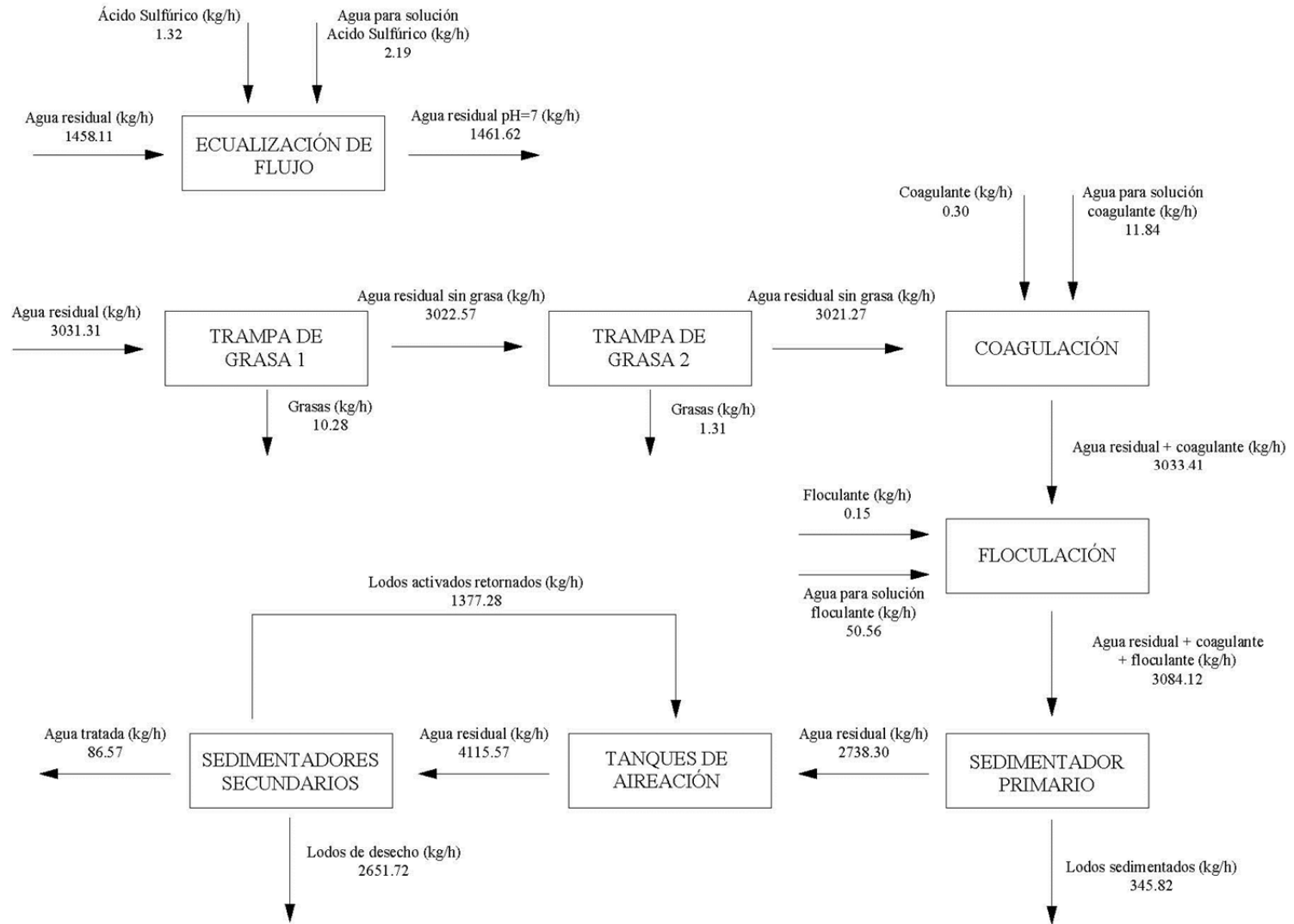


Figura No. 6: Diagrama de flujo

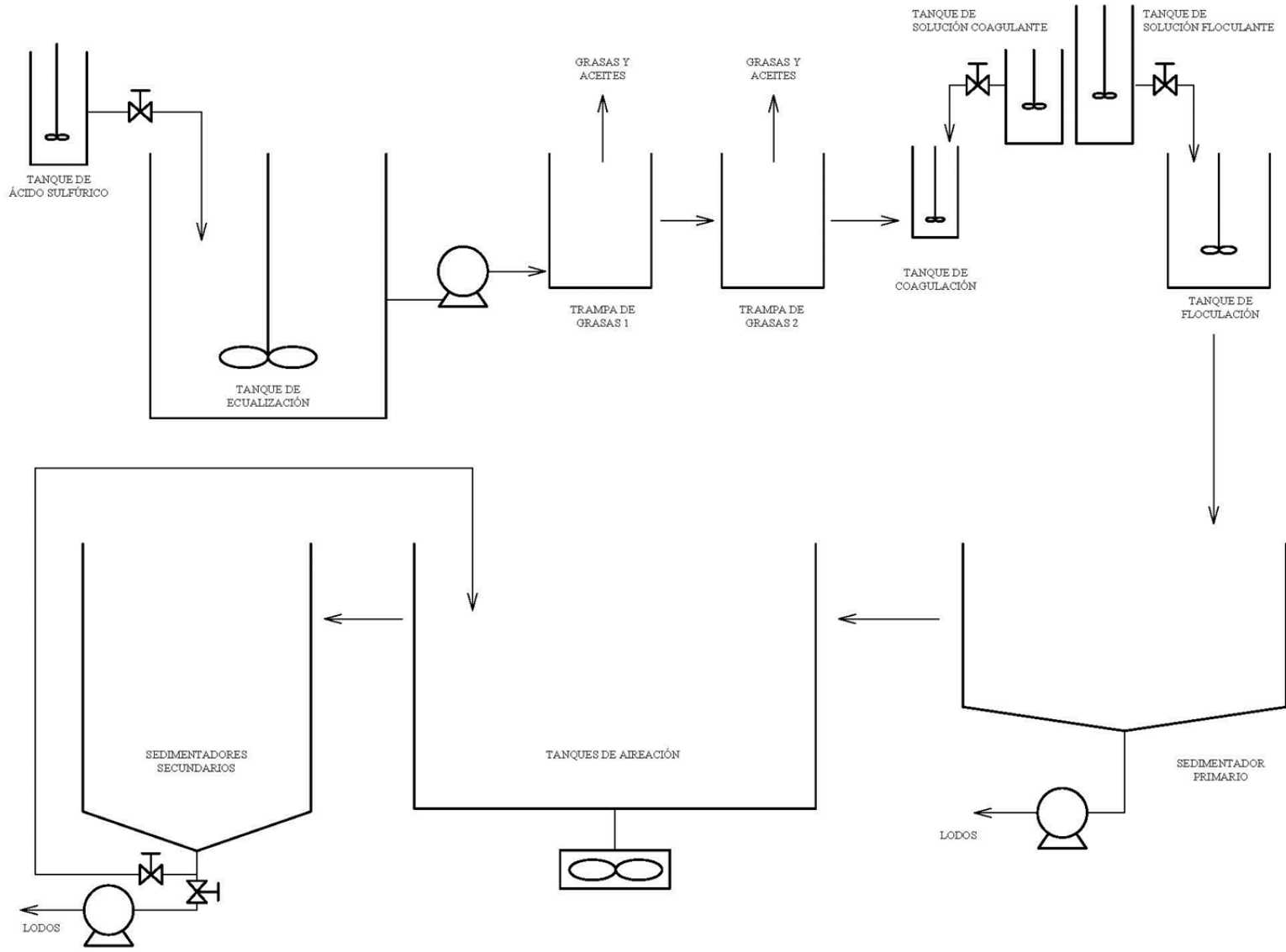


Figura No. 7: Distribución de la planta de tratamiento, vista de sección

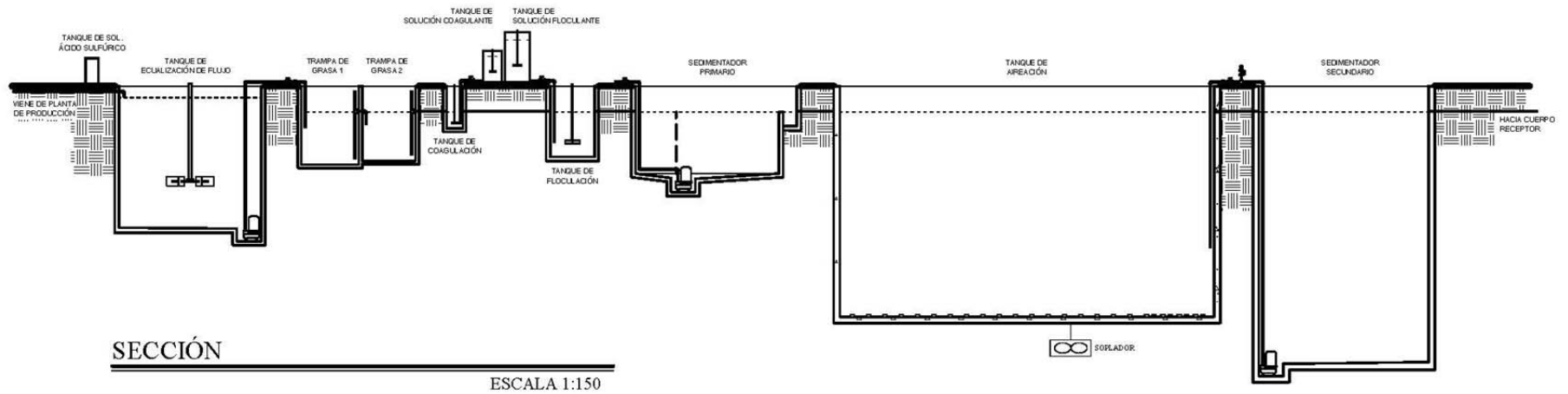


Figura No. 8: Distribución de la planta de tratamiento, vista de planta

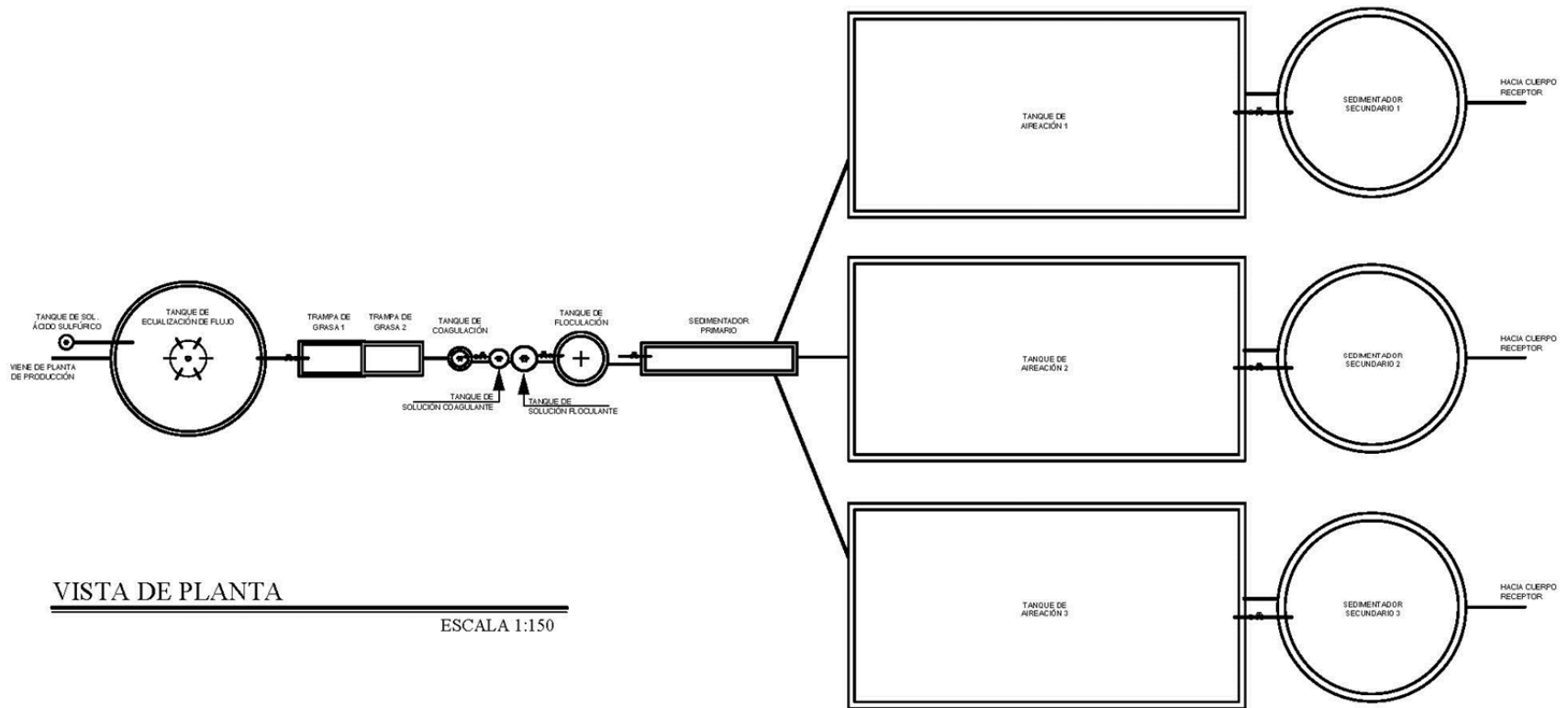
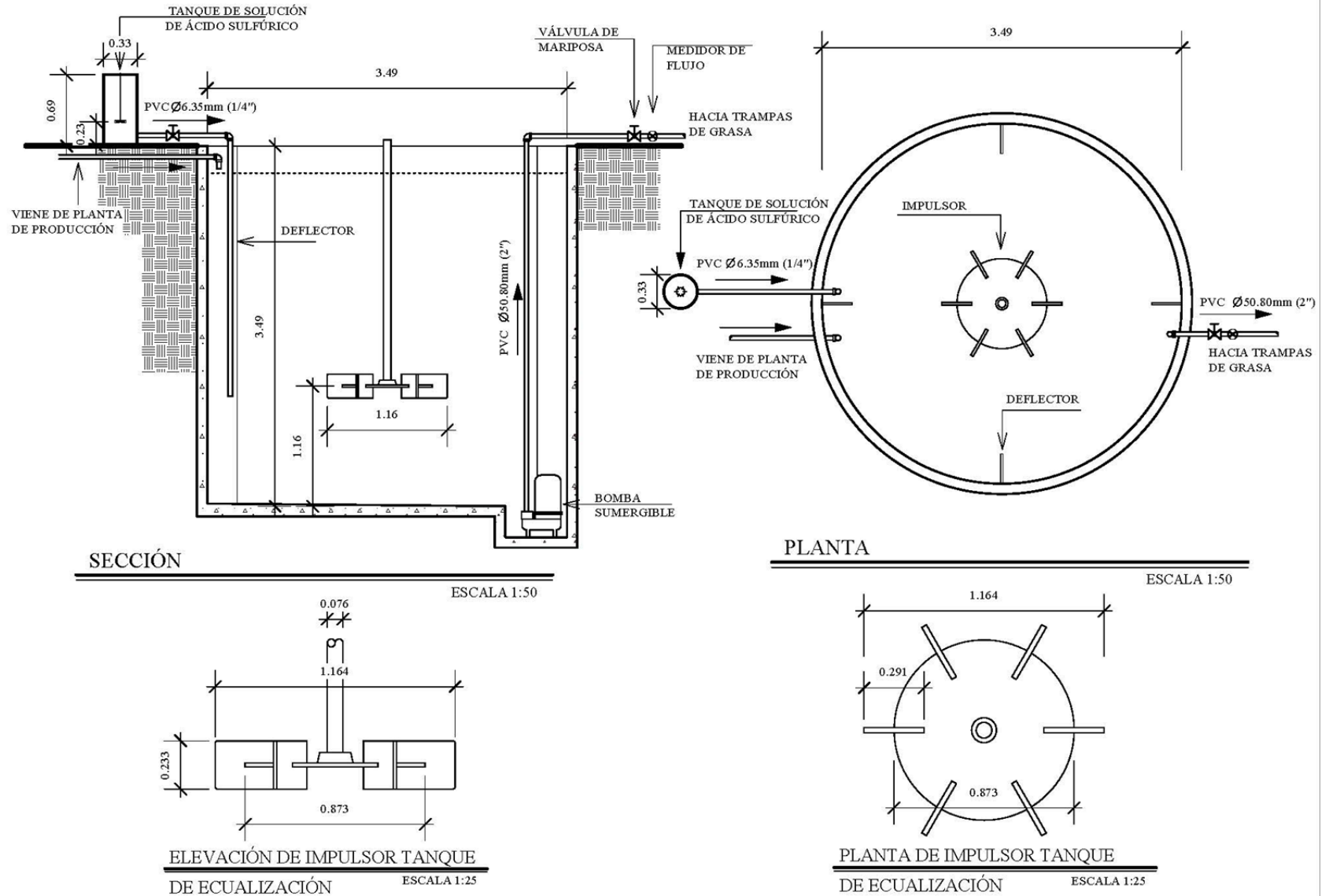
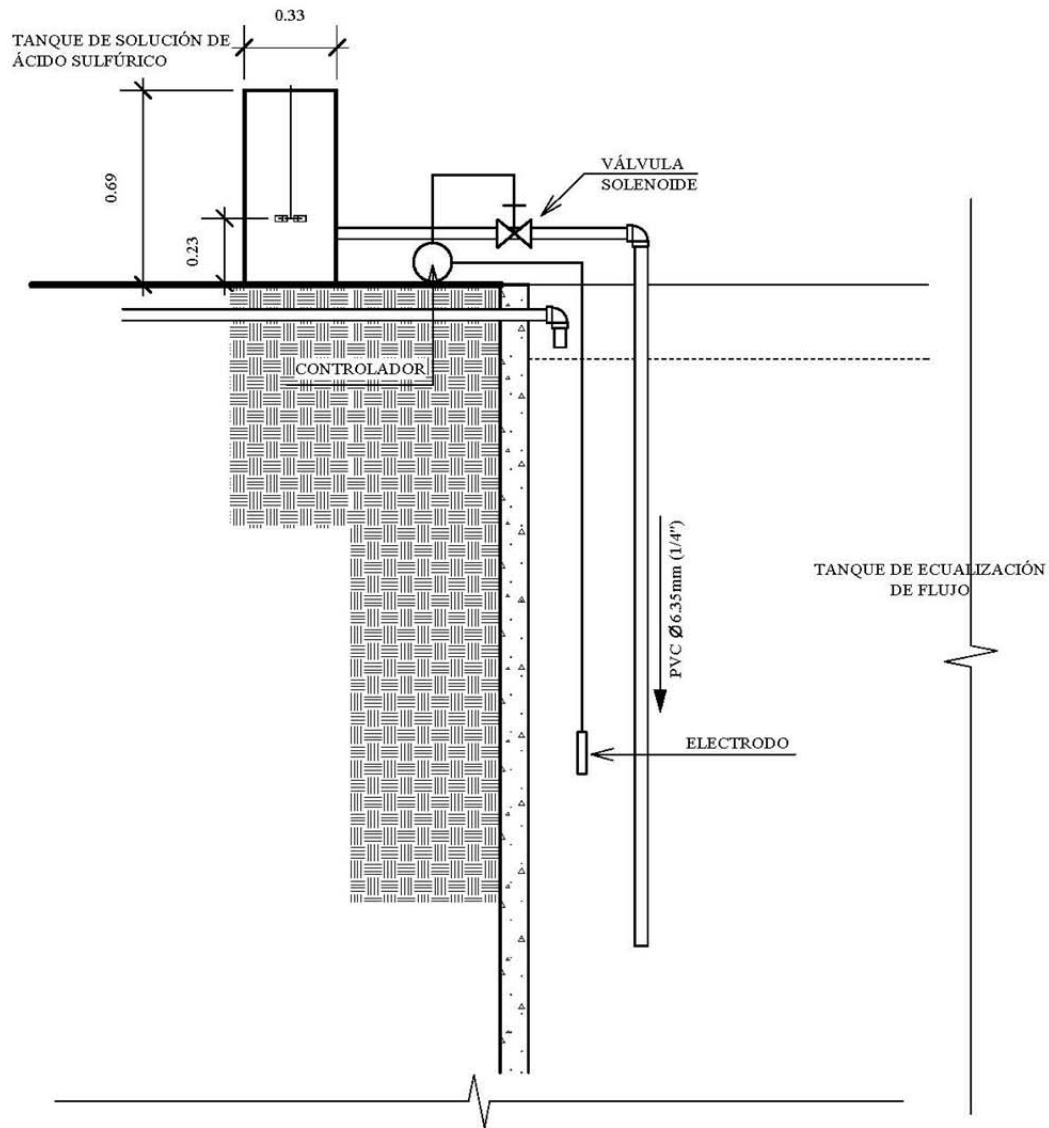


Figura No. 9: Detalle de tanque de equalización de flujo y de tanque de ácido sulfúrico

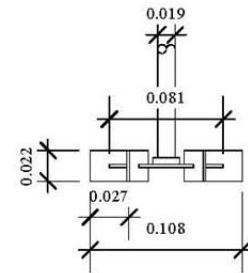
Nota: todas las medidas se encuentran dadas en metros.



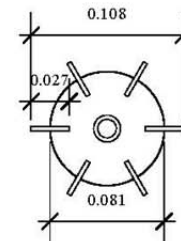


**SECCIÓN**

ESCALA 1:25



**ELEVACIÓN IMPULSOR TANQUE  
DE ÁCIDO SULFÚRICO** ESCALA 1:5



**PLANTA IMPULSOR TANQUE  
DE ÁCIDO SULFÚRICO** ESCALA 1:5

Figura No. 10: Detalle de trampas de grasa

Nota: todas las medidas se encuentran dadas en metros.

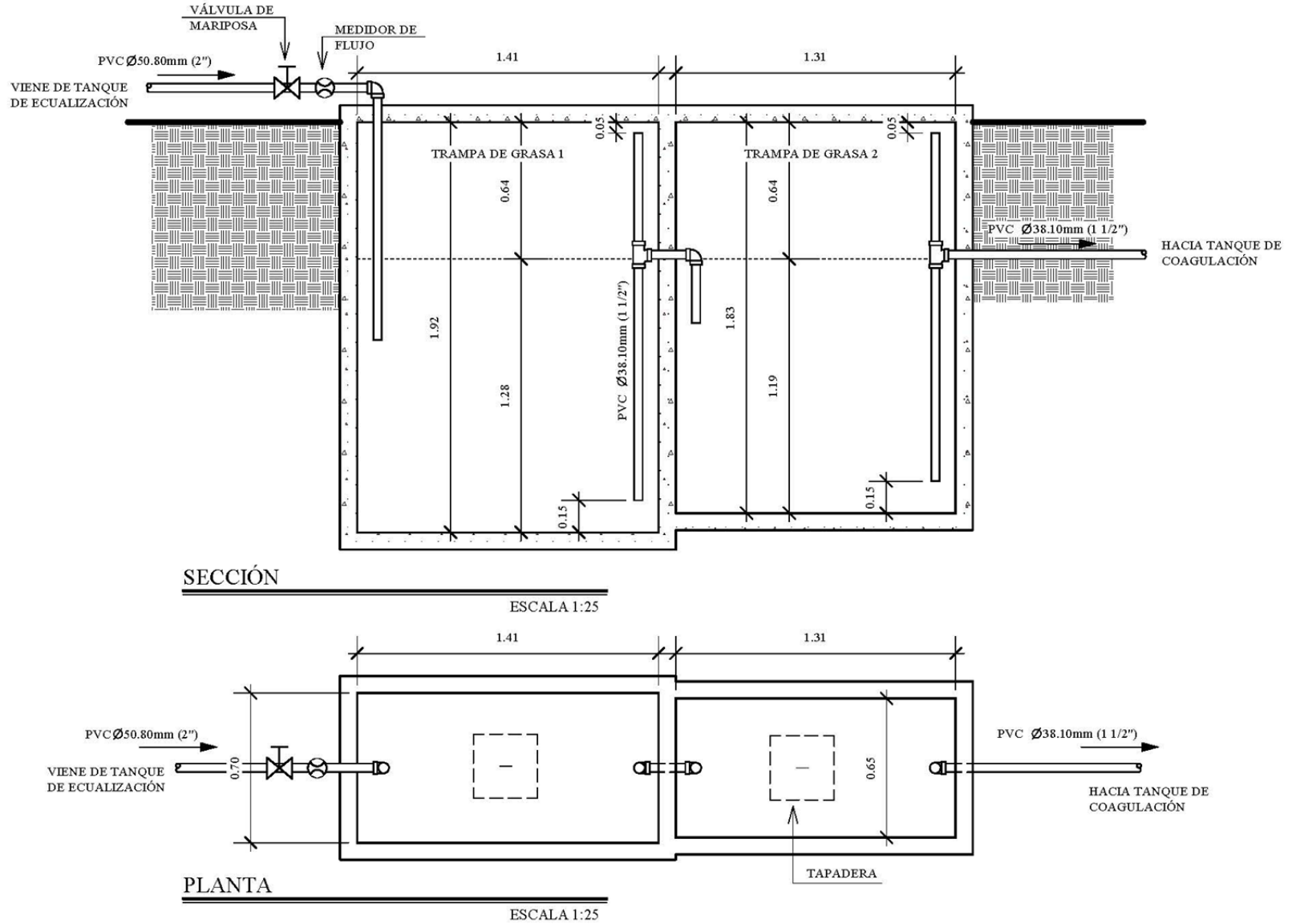
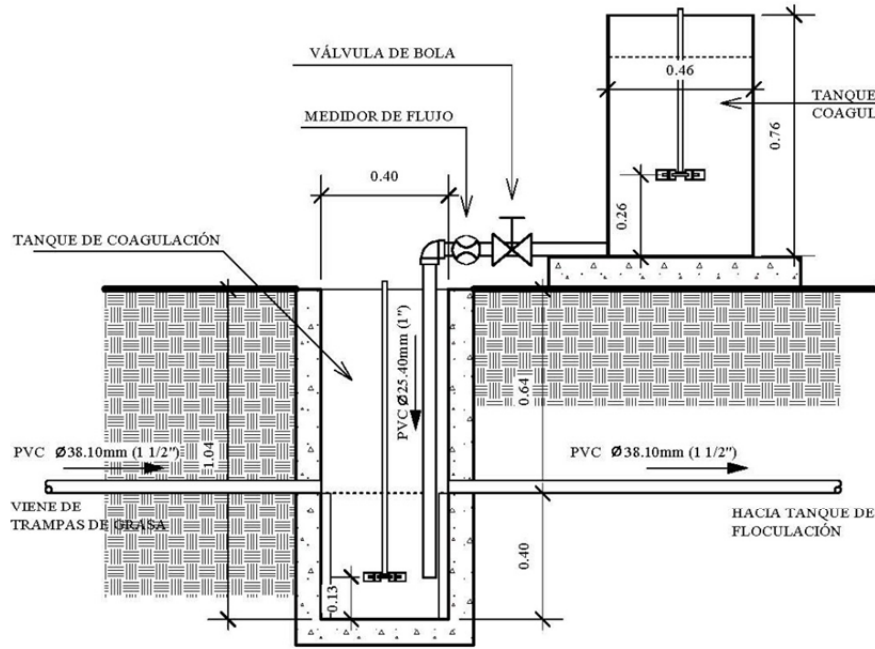
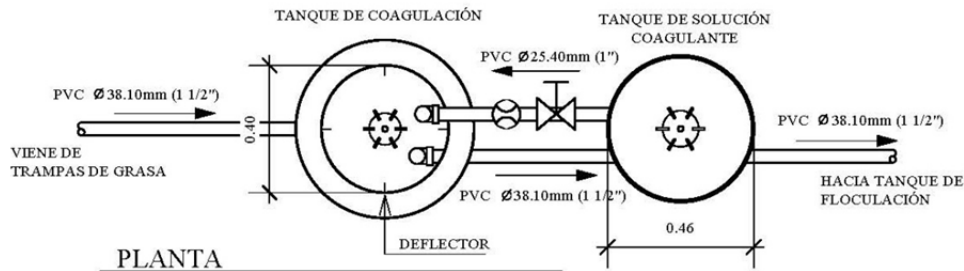


Figura No. 11: Detalle de sistema de coagulación

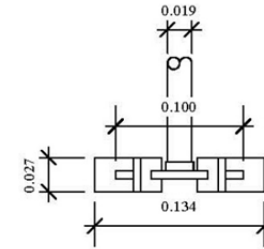
Nota: todas las medidas se encuentran dadas en metros.



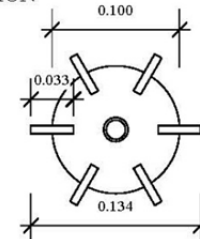
SECCIÓN  
ESCALA 1:20



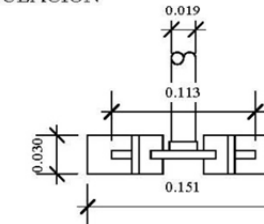
PLANTA  
ESCALA 1:20



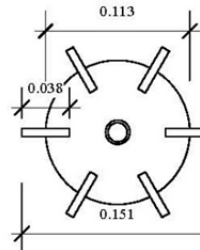
ELEVACIÓN DE IMPULSOR DE TANQUE  
DE COAGULACIÓN  
ESCALA 1:5



PLANTA DE IMPULSOR DE TANQUE  
DE COAGULACIÓN  
ESCALA 1:5

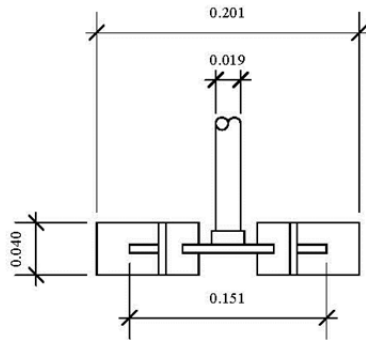


ELEVACIÓN DE IMPULSOR DE TANQUE  
DE SOLUCIÓN COAGULANTE  
ESCALA 1:5



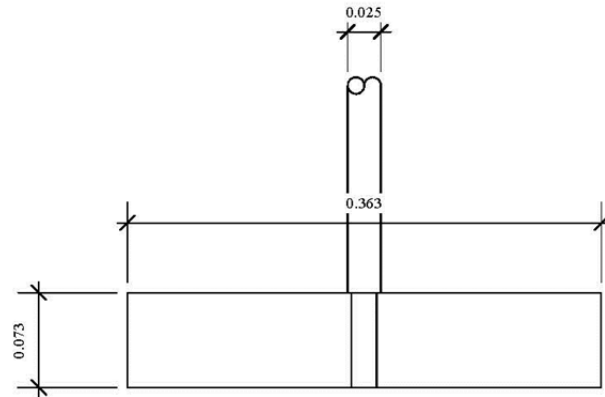
PLANTA DE IMPULSOR DE TANQUE  
DE SOLUCIÓN COAGULANTE  
ESCALA 1:5





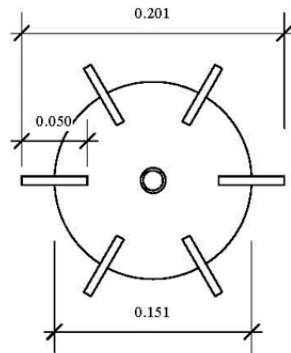
ELEVACIÓN DE IMPULSOR DE TANQUE  
DE SOLUCIÓN FLOCULANTE

ESCALA 1:5



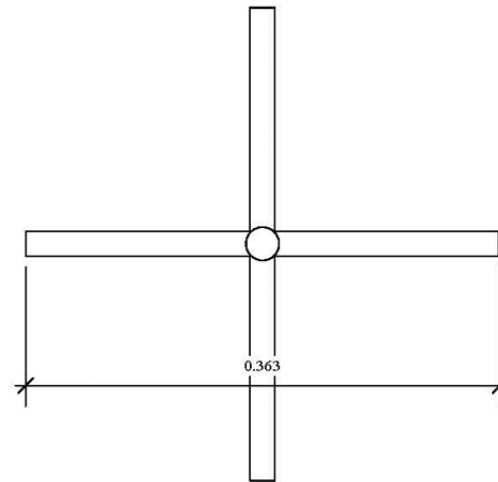
ELEVACIÓN DE IMPULSOR DE TANQUE  
DE FLOCULACIÓN

ESCALA 1:5



PLANTA DE IMPULSOR DE TANQUE  
DE SOLUCIÓN FLOCULANTE

ESCALA 1:5



PLANTA DE IMPULSOR DE TANQUE  
DE FLOCULACIÓN

ESCALA 1:5

Figura No. 13: Detalle de sedimentador primario

Nota: todas las medidas se encuentran dadas en metros.

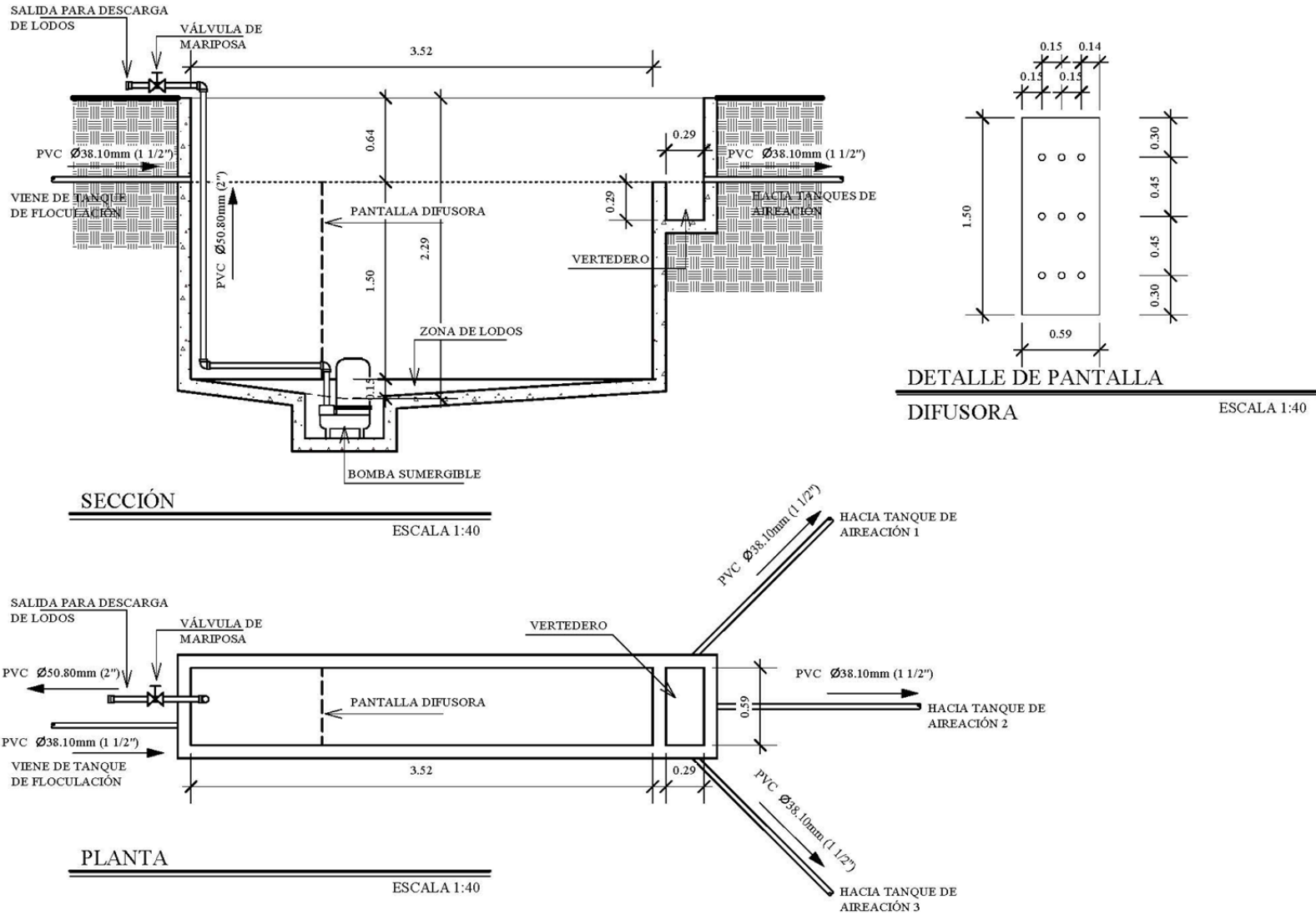


Figura No. 14: Detalle de tanques de aireación

Nota: todas las medidas se encuentran dadas en metros.

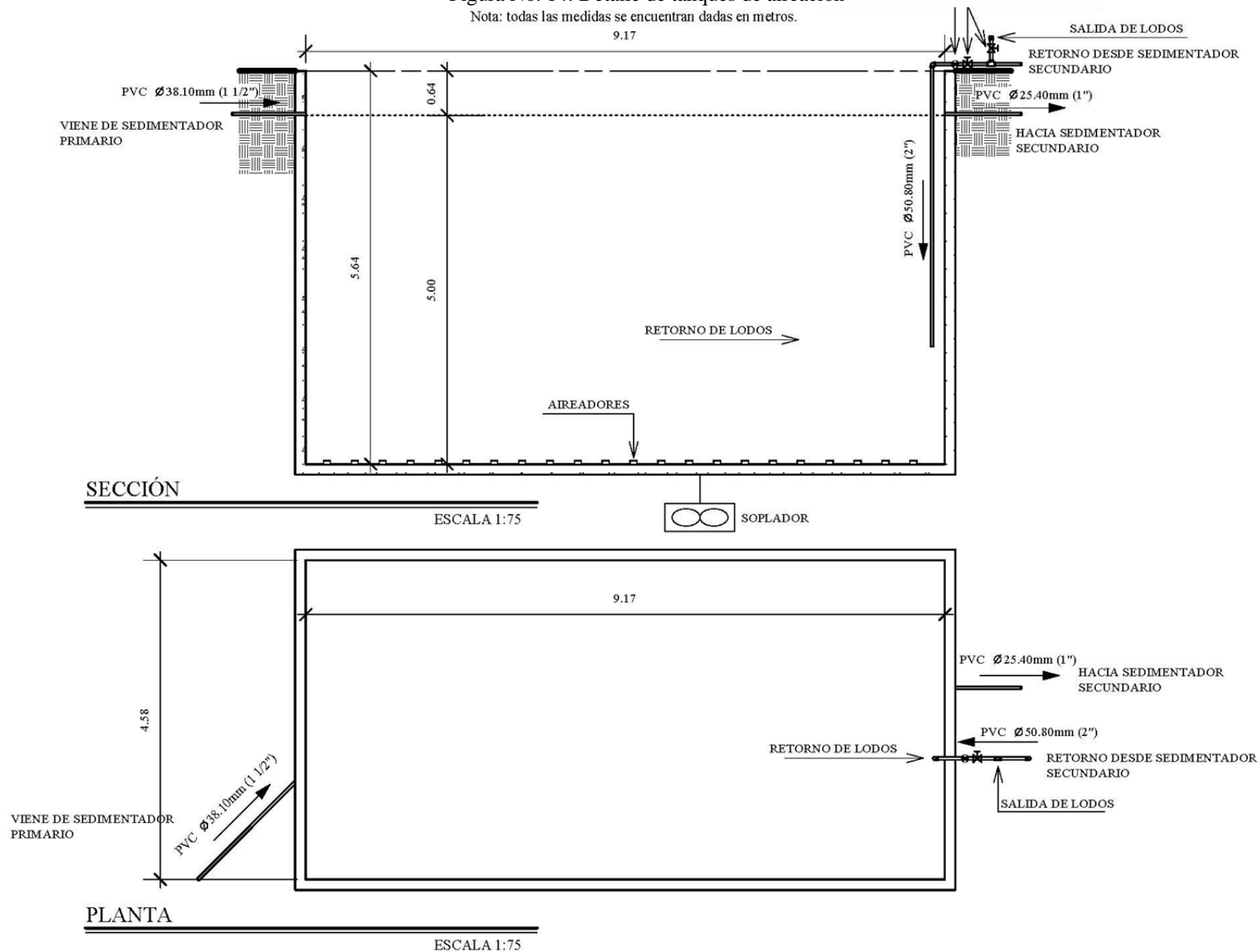
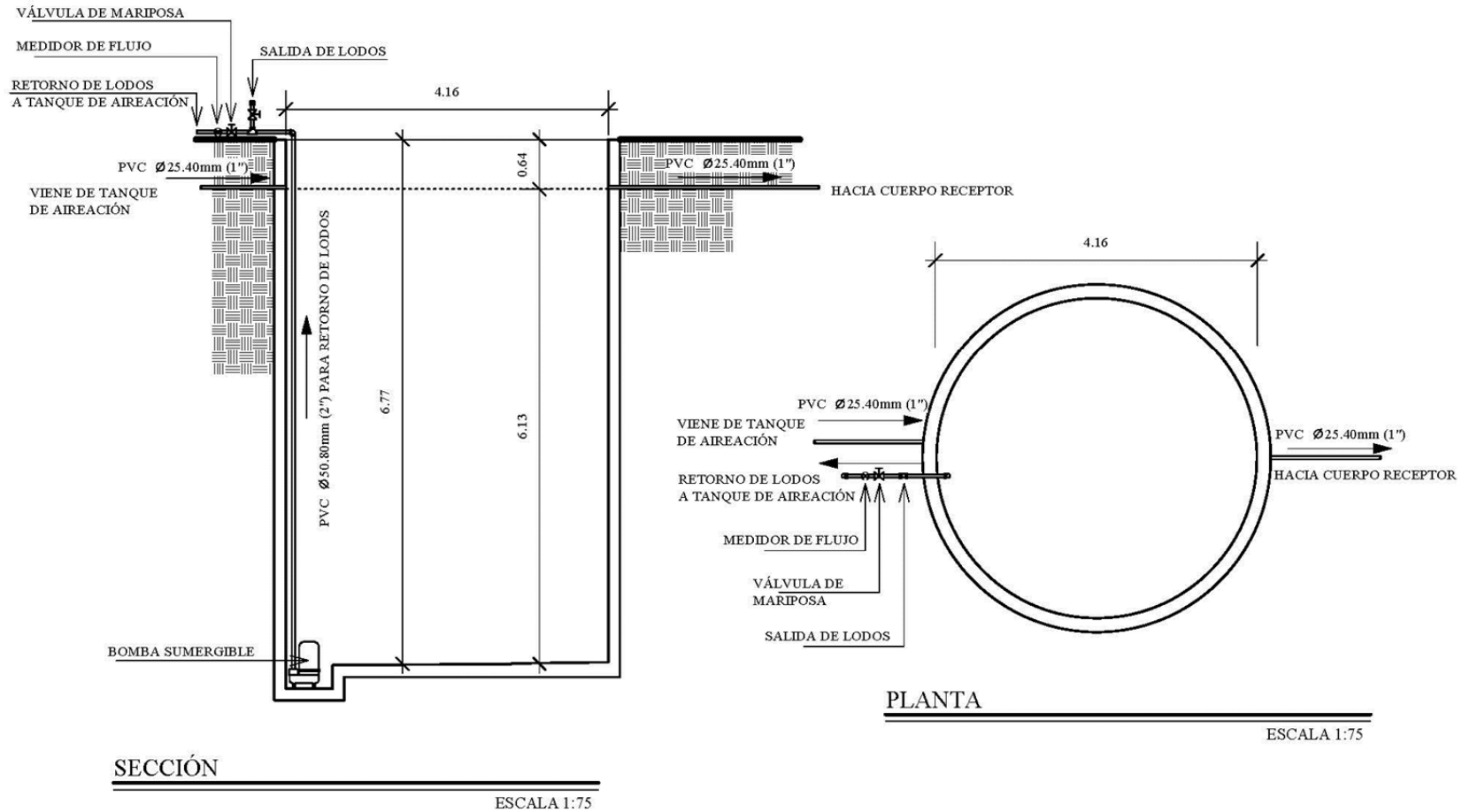


Figura No. 15: Detalle de sedimentadores secundarios

Nota: todas las medidas se encuentran dadas en metros.



## VIII. DISCUSIÓN

El objetivo primordial de realización de este trabajo fue diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales y evaluar la posibilidad de su implementación. El punto de partida para la realización del proyecto fueron los análisis de los contaminantes del agua de proceso que se debía tratar. Se llevó a cabo un análisis de caudal y de calidad del agua por medio de una empresa externa, y los datos se muestran en la Tabla No. 29 y Tabla No. 30 respectivamente (página No. 67 y No. 69). Sin embargo, al momento de hacer la prueba de jarras para determinar la dosis de coagulante y floculante para el tratamiento químico del agua, se obtuvieron más datos de caracterización de esta.

El agua que se debe tratar consiste básicamente en agua de cocimiento de maíz, sin embargo, en el efluente también se descargan grasas y aceites de la limpieza realizada a unas freidoras, lo cual generalmente se obtiene durante el fin de semana que es cuando se hace dicha limpieza. Es por esto, que la calidad del agua obtenida varía enormemente entre los días de la semana. Esto se pudo comprobar al momento de realizar las pruebas de jarras, ya que se obtuvieron parámetros muy diferentes del agua cruda para muestras tomadas durante diferentes días. En la Tabla No. 33 (página 70) se muestran los parámetros de agua cruda de una muestra obtenida en un día de limpieza de freidoras, lo cual indica una carga alta de DBO, DQO, sólidos suspendidos y grasas. Además, el aspecto visual del agua constataba la presencia de una alta cantidad de grasas. Sin embargo, se tomó la muestra y se llevó a cabo el tratamiento químico para determinar su funcionamiento con un alto contenido grasas, y de obtener resultados negativos poder definir en qué valor de grasas no es recomendable realizar el tratamiento químico, de modo que se pueda diseñar el proceso de la planta asegurando que a esta etapa se ingrese un agua con la calidad requerida para el correcto funcionamiento de los químicos utilizados.

La prueba de jarras se realizó por días, en la primera prueba se determinó el pH óptimo de tratamiento haciendo 5 muestras con pH de 11, 10, 9, 8 y 7. Dado que el agua cruda tiene un pH cercano a 10 por el proceso de producción del que viene en el cual le agregan cal, se utilizó una solución de ácido sulfúrico al 25% para disminuir el pH, e Hidróxido de calcio para la solución a la que se debía aumentar el pH. Para la prueba, se agregó coagulante y floculante en la cantidad promedio que el proveedor de químicos indicó, y se dejó sedimentar los sólidos para luego analizar el agua obtenida sin dichos sólidos. Como se puede observar en la Tabla No. 31, a un pH de 7 se obtiene el agua con la menor cantidad de sólidos suspendidos, y a pesar que no es la muestra con la que se obtuvo la menor cantidad de DBO y DQO, constituye una de las menores. Es por esto que se eligió este valor de pH como el óptimo. En la segunda prueba se determinó la dosis óptima de coagulante, Policloruro de aluminio, entre los rangos sugeridos por el proveedor de químicos, el cual era de 0 a 250 ppm. Como se muestra en la Tabla No. 32 (página No. 70), la menor cantidad de sólidos suspendidos se obtiene a una dosis de 100 ppm, y aunque el DBO y el DQO no se obtienen en la cantidad menor, se observó que el comportamiento de estos parámetros siempre disminuía al aumentar la dosificación de químico, pero se estaba sobre el límite

sugerido e implicaría costos más elevados de operación por uso de mayor cantidad de coagulante, y siempre obteniendo un agua con altos sólidos suspendidos. Para la tercera prueba en la que se tenía pensado analizar la dosificación de floculante, se presentó el problema que la muestra de agua presentaba alto contenido de grasas y aceites, por lo que se decidió realizar prueba de coagulación y floculación con el pH y dosificación de coagulante determinados anteriormente, y con dosificación de floculante en el valor promedio indicado por el proveedor de químicos. De este modo se buscaba determinar si el tratamiento funcionaba adecuadamente con un alto contenido de grasas, para que de no ser así determinar un valor límite de grasas en el agua en que no era recomendable el tratamiento, y también determinar aún con alto contenido de grasas la disminución de los parámetros de calidad del agua. Al hacer la prueba se observaron resultados negativos, ya que se obtenían sólidos sedimentados, pero también se obtenía una alta cantidad de materia flotante en la superficie del agua, lo cual incluía grasas. Los resultados de dicha prueba se muestran en la Tabla No. 33 (página No. 70), en donde se especifica que para un contenido de grasas y aceites de 3380.85 mg/L en el agua cruda, no es recomendable realizar el tratamiento químico, por lo que se debe asegurar que la planta se diseñe con procesos de eliminación de grasas antes del proceso de coagulación y floculación. Sin embargo, como se muestra en la tabla mencionada anteriormente, sí se obtuvo un aumento apreciable en la calidad del agua.

Después de esta prueba, se pudo captar la necesidad de realizar mediciones de grasas y aceites del agua cruda para determinar en qué cantidades de este parámetro sí funcionaba adecuadamente el tratamiento químico.

Para la prueba de jarras 4, de determinación de dosis de floculante, se obtuvo que la dosificación óptima de Poliacrilamida aniónica era de 50 ppm, lo cual se encuentra cerca del límite recomendado por el proveedor de químicos, pero es con que se obtuvo la menor cantidad de DBO, DQO y sólidos suspendidos. Además, en esta prueba se determinó que para un contenido de grasas de 511.86 mg/L sí se obtenían resultados adecuados del tratamiento químico, ya que se obtenía un agua completamente libre de sólidos flotantes. Por último, se llevó a cabo una prueba con pH, dosis de coagulante y dosis de floculante óptimos, para determinar la disminución de los parámetros de calidad del agua que se obtenían luego del tratamiento químico y dejar sedimentar los lodos del agua. Los resultados se muestran en la Tabla No. 35 (página No. 71).

Para el diseño de la planta de tratamiento de aguas se utilizó como parámetros de calidad del agua residual, el valor más alto de sólidos suspendidos, grasas y aceites, DBO y DQO, de todos los datos obtenidos de caracterización de agua realizada por la empresa externa y en las pruebas de jarras. Como se explicó anteriormente, estos valores corresponden a la muestra del día de la prueba de jarras 3 en que el agua iba con alto contenido de grasas y aceites por el lavado de freidoras. Esta agua tenía una DBO de 20337 mg/L, DQO de 67400 mg/L, sólidos suspendidos de 11450.00 mg/L, y grasas y aceites de 3380.85 mg/L. Estos fueron los datos a partir de los cuales se diseñó la planta. Además, otro parámetro importante

para el diseño es el flujo del agua residual, el cual se calculó como el promedio del flujo actual más el 5% de crecimiento anual para un tiempo de vida de la planta de 15 años.

Con la caracterización del agua se determinó que si se hacía el diseño a partir de la cantidad máxima de grasas y aceites sería necesaria la colocación de trampas de grasa como pretratamiento del agua para que ésta no obstruyera el tratamiento químico y los posteriores pasos del proceso. Se colocaron dos trampas de grasas, ya que como se muestra en la Tabla No. 9 (página No. 30), se obtenía de la primera trampa de grasas agua con alto contenido de grasas que aunque se encontraba cercana a los valores de los que se tenía certeza que funcionaba el tratamiento, valores para el agua cruda de 511.86 mg/L en la prueba de dosificación de floculante y 276.68 mg/L en la prueba de porcentaje de disminución de parámetros, se prefirió colocar una segunda trampa para asegurar que el agua realmente ingrese al tratamiento químico con una pequeña cantidad de grasas y aceites, para que dicho tratamiento funcione adecuadamente.

La razón por la que se utilizaron como químicos el Policloruro de Aluminio y la Poliacrilamida aniónica fue que en la empresa se tenían antecedentes de análisis de jarras realizadas anteriormente en las que se sabía que estos químicos funcionaban para el tratamiento, y que productos como el Sulfato de Aluminio no eran de utilidad. Además, se pidió sugerencia a diferentes proveedores de químicos a quienes se dio información sobre la naturaleza del agua residual y constataron que con estos productos era posible la remoción de contaminantes, lo cual se comprobó en todas las pruebas de jarras realizadas.

Cada tipo de tratamiento físico, químico y biológico se eligió en base a parámetros de evaluación colocados en orden de importancia y a los cuales se les asignaba un valor de acuerdo a este orden. Estos parámetros de evaluación incluían costos de operación, costos de mantenimiento, costos de energía, seguridad y facilidad de operación, entre otros. Dependiendo de si la tecnología presentaba ventaja, desventaja o no se tenían datos respecto al parámetro, se le daba su valoración, para luego sumar y obtener el puntaje para cada tipo de tratamiento. Se optó por el tratamiento químico de precipitación por medio de aditivos coagulantes y floculantes, ya que como se muestra en la matriz de selección de tratamientos químicos de la Tabla No. 27 (página No. 65) es la mejor opción de todas las tecnologías de tratamiento. Del mismo modo que para el tratamiento de precipitación química, se optó por el tratamiento físico de separación por gravedad ya que como se muestra en la Tabla No. 26 (página No. 65) es la mejor opción de las tecnologías posibles. Para la elección del tratamiento biológico, como se muestra en la Tabla No. 28 (página No. 66), se obtiene puntuación mayor para la tecnología de lagunas de estabilización, pero esta compite fuertemente con la tecnología de lodos activados, y se puede observar que la diferencia radica únicamente en que el ahorro energético de la laguna es mayor que para los lodos activados. Sin embargo, se eligió la tecnología de lodos activados ya que se encuentra mayor cantidad de documentación para diseño, por lo que se podía tener un mejor resultado de diseño.

Por otra parte, se determinó que anterior a estos procesos era necesario realizar ecualización del agua para evitar cambios súbitos en la calidad del agua y el flujo, lo que podría disminuir la correcta operación de todos los procesos, al ser estos susceptibles a los cambios.

Para los procesos que se sabía que modificaban la calidad del agua como las trampas de grasa y la sedimentación, se determinó el cambio en los parámetros en que se basó el análisis de calidad como DBO, grasas y aceites y sólidos suspendidos. En el caso de las trampas de grasa los porcentajes de disminución de dichos parámetros son teóricos, pero en el caso del sedimentador, los valores corresponden a los determinados en las pruebas de jarras realizadas. Así pues, en la sección de Resultados se muestran los parámetros del agua de entrada y salida para estos tratamientos. Para el tratamiento biológico se sabe que se lograrán alcanzar los parámetros requeridos de DBO y sólidos suspendidos ya que se diseña en base a los valores que debe tener el efluente de agua, y los cuales son los que exige el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales en su “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” acuerdo gubernativo número 232-2006. En el caso de las grasas y aceites, no se obtuvo el valor teórico de disminución para el tratamiento de lodos activados, por lo que no se puede saber a ciencia cierta cuál será su valor en el efluente de la planta. Sin embargo, aunque las grasas no son degradadas por el tratamiento biológico, se supuso que por la sedimentación de lodos que se da en el sedimentador secundario, se obtenía la misma remoción que en la sedimentación primaria de 72%. Con esto se tiene que el efluente de la planta de tratamiento tiene un contenido de grasas y aceites de 5.66 mg/L, lo cual cumple con los requerimientos del reglamento.

Es importante discutir las razones por las que se obtuvo un sistema de tratamiento biológico de mayores dimensiones respecto a las demás unidades como se puede observar en la Figura No. 8 (página 42); ya que se tiene un tanque de aireación 9.17 m de largo, 4.58 m de ancho y 5.64 m de alto, mientras que por ejemplo, el sedimentador primario es de 3.53 m de largo, 0.59 m de ancho y 2.29 m de alto. Esto se debe principalmente a que de acuerdo a las relaciones de diseño el tiempo de retención del agua en el tratamiento de lodos activados es de 10 días, lo cual es un tiempo mucho mayor en comparación con el tiempo de retención de por ejemplo, la trampa de grasas que es de 20 minutos, o incluso el tiempo del sedimentador primario que es 1 hora. Es por esto que se hace obvia la razón de la abismal diferencia. Por otra parte, es importante destacar que el sistema de lodos activados se diseñó en base a la diferencia de calidad del agua que se quería tener en el tratamiento biológico, principalmente de DBO. Se puede ver en la Tabla No. 17 (página No. 33) que el valor de DBO de ingreso al tratamiento biológico es de 6121.10 mg/L, mientras que se diseñó para lograr un efluente con DBO de 100 mg/L, de acuerdo a los requerimientos del último período en que se encuentra definido el reglamento de descarga de aguas residuales. Esto implica una alta disminución de DBO en el tratamiento biológico, por lo que se necesita un equipo de gran tamaño. Es importante mencionar que toda la planta se diseñó con base en los valores más altos de parámetros del agua residual, los cuales como se discutió anteriormente correspondían a un día de alta carga de grasas por

lavado de freidoras. Sin embargo, podría pensarse en la posibilidad de tratar únicamente en ella el agua de cocimiento de maíz y dar tratamiento aparte y especial a las grasas del lavado de freidoras.

Todas las unidades de proceso se diseñaron principalmente de acuerdo al tiempo de retención requerido para cada proceso, los cuales son parámetros de diseño basados en fuentes bibliográficas y se encuentran en el inciso “D. Parámetros de diseño”, de la sección “XII. Apéndice” (página 121). Como los valores de volumen de tanques se diseñaban a partir del caudal y el tiempo de retención en el sistema, el volumen obtenido correspondía al volumen de fluido. Sin embargo, se debe construir un sistema con mayor capacidad dejando un espacio de volumen libre sobre la superficie de agua. En el caso de las trampas de grasa se sabía de las bases de diseño cuál debía ser la altura sobre el agua, mientras que para los demás procesos se utilizó esta misma altura ya que se diseñó la planta de forma que el agua de todo el proceso fluyera a través de las unidades por rebalse, para evitar consumo energético en la movilización del agua para su tratamiento. Es por esto que la tubería de ingreso y salida de todas las unidades se colocó al mismo nivel como se puede observar en la Figura No. 7 de distribución de la planta (página 41), o en el detalle de cada parte del proceso en la sección de Resultados.

Los tanques de almacenamiento de químicos coagulante, floculante y ácido sulfúrico se obtendrán prefabricados, ya que su volumen puede ser pequeño y no es necesario que tengan un diseño específico como los tanques de proceso. Sin embargo, como es necesaria la agitación de las soluciones, los impulsores agitadores sí fueron diseñados en base a las dimensiones del tanque.

A partir de las especificaciones calculadas de tanques y equipo requerido para el proceso se realizaron las cotizaciones correspondientes para determinar la inversión necesaria para el proyecto. Se trató de obtener cotizaciones de equipo más similar al requerido para la planta. Sin embargo, para el sistema de aireación del tratamiento biológico, dado que se requería un flujo promedio de  $127.80 \text{ m}^3/\text{h}$  o  $75.22 \text{ ft}^3/\text{min}$ , a una presión baja de  $150.36 \text{ kPa}$  o  $1.50 \text{ bar}$ , se requería un soplador y no un compresor, ya que con el primero se puede obtener el flujo requerido a una presión baja, y el segundo se utiliza para mayores presiones, pero únicamente se pudo obtener la cotización de un compresor que cumplía con el flujo requerido pero cuya presión era de  $7.5 \text{ bar}$ .

En el caso de los impulsores de agitación, dado que se obtenían en los cálculos valores muy específicos de diámetro de impulsor, largo y ancho de paletas, entre otros, se realizó la cotización para la fabricación de estos, de modo que sean adquiridos con las especificaciones exactas para la correcta agitación de acuerdo al diseño del tanque en el que se colocarán. La mayoría de impulsores se eligieron tipo disco o Rushton, ya que con estos se obtiene una adecuada agitación y son utilizados para dispersión entre líquidos como es necesario en este caso. Además, se eligió para el proceso de coagulación, por ser este el recomendado en fuentes bibliográficas. Por su parte, para el proceso de floculación era sugerido utilizar un impulsor de paletas planas, por lo que se diseñó de este tipo.

Las bombas se eligieron de impulsor abierto, ya que se trabaja agua residual con lodos y sólidos, de manera que este es el tipo adecuado de bomba con que se evita la obstrucción por el fluido sucio, logrando así un mayor tiempo de vida útil de equipo. Además, las bombas elegidas son de tipo sumergible lo que presenta ventajas para el manejo de sólidos y lodos, y proporciona una fuerza de elevación significativa, lo cual es requerido para retirar los fluidos de los tanques que se tienen por ser estos de gran altura (3.49 m para el tanque de equalización, 2.29 m para el sedimentador primario, y 6.77 m para el sedimentador secundario).

Del mismo modo, las válvulas para el agua residual y los lodos se eligieron tipo mariposa, ya que son las más adecuadas para fluidos con sólidos y tienen mayor ciclo de vida útil, además de ser regulables y no tener un costo tan elevado. Sin embargo, únicamente se consiguió válvulas de 2'', por lo que se decidió colocar tubería de ese diámetro en las líneas donde se debían colocar este tipo de válvulas. Para las válvulas de dosificación de coagulante y floculante se eligieron de tipo bola ya que no se trata de fluidos con lodos, estas tienen alto ciclo de vida útil y son regulables. En cuanto al sistema de dosificación de ácido para neutralización del agua cruda, se diseñó un sistema de control simple de regulación de flujo en base al pH del agua en el tanque de equalización. El sistema a instalar consiste en un electrodo (elemento primario de control), un controlador, y una válvula (elemento final de control), cuya apertura o cierre está regulada por la señal enviada por el controlador en base a la medición del electrodo. La válvula que se eligió es una válvula solenoide ya que este tipo de válvulas puede operar en base a instrucciones del controlador requerido. Dado que para la operación de una válvula solenoide se admiten únicamente dos estados: completamente abierta o completamente cerrada, esta válvula no funciona como reguladora de flujo, si no opera en base a tiempos en que se abre para llegar al valor de pH requerido y luego cierra su flujo.

Para la construcción de la planta se requiere de medidores de flujo para el agua influente a la planta, para la solución coagulante y floculante del tratamiento químico, y medidores de flujo para los lodos de retorno en el tratamiento biológico. En el caso del agua influente y de los lodos de retorno el factor principal que debía regir la selección del medidor de flujo era el manejo adecuado de fluidos sucios y sólidos. Se determinó que para líquidos con estas condiciones el medidor más adecuado era el de flujo electromagnético. En el caso de los medidores de flujo para la solución coagulante y floculante el factor determinante para la selección del tipo de medidor correspondía a la naturaleza química de dichas soluciones. Se determinó que para fluidos agresivos como lo son el coagulante y floculante, se podía elegir un medidor de flujo electromagnético, ya que es adecuado para estos tipos de fluidos, y su costo no es tan elevado respecto a otros que también son capaces de manejar fluidos agresivos.

Se determinó que los tanques de proceso que contenían agua residual podían construirse de concreto, mientras que se investigó que para todos los químicos era resistente el Polietileno de alta densidad. Toda la tubería puede utilizarse de PVC, incluso la de salida de los tanques de químicos, ya que se determinó que es resistente a estos a la temperatura de operación. Por esta misma razón, todos los medidores de flujo se buscaron en este material. Las válvulas por las que pasa agua residual y lodos, las

cuales se explicó anteriormente que son de tipo mariposa, se cotizaron de hierro negro, mientras que las válvulas para la dosificación de coagulante y floculante pueden ser de PVC. Para el control de flujo del ácido con la válvula solenoide se buscó una cuyo material fuera resistente a la corrosión en contacto con una solución de ácido sulfúrico, obteniendo así una válvula adecuada de PTFE. Todos los impulsores fueron cotizados de acero al carbón, ya que es un metal resistente a los fluidos con que se está trabajando. Del mismo modo, se determinó que el material de las bombas debía ser acero al carbón, pero se consiguió únicamente la cotización de una bomba de hierro fundido que es la del precio que se presenta.

El tamaño de tubería se determinó como se muestra en el cálculo No. 8 de la sección “C. Cálculos realizados” en el Apéndice (página 112), basándose en la velocidad requerida del fluido. Sin embargo, como se explicó anteriormente, para líneas de tuberías donde se debían colocar válvulas de mariposa se sugirió colocar tubería de 2” ya que es el tamaño mínimo conseguido de una válvula de este tipo.

Para realizar el análisis económico de la planta se determinó la inversión total para la implementación de la planta y los costos de operación. El horizonte de tiempo en que se evaluó el proyecto es de 10 años, el cual es el tiempo que generalmente se utiliza para análisis económico.

El valor de inversión se determinó a partir de la cotización de todo el equipo necesario para la planta, el cual se muestra en la Tabla No. 25 (Página No. 36), y de otros costos como la instalación del equipo, tuberías y contingencias. Así pues como se muestra en la Tabla No. 45 (Página No. 116), se determinó que se debía realizar una inversión de Q1,682,272.83 para poner en funcionamiento la planta. Además, se determinó sobre la inversión en equipo la depreciación anual de este para incluirlo en el análisis económico, tomando como período de depreciación de equipos 10 años y utilizando el método SMARC. La Tabla No. 46 (Página No. 117) muestra los datos de depreciación para cada año.

Los costos de operación se definieron como la suma de costos de sueldos a operadores, costos de mantenimiento de equipo y costos de químicos utilizados. La determinación de estos costos se encuentra explicada en los incisos c., d., e. y f., de la sección “11. Cálculos realizados en análisis económico”, en la parte “C. Cálculos realizados” en el Apéndice (página 117). Se pensó en la cantidad de operadores que se requerían con base en las actividades a realizar en la planta, las cuales incluían preparación de soluciones de químicos, limpieza de dos trampas de grasas, descarga de lodos de un sedimentador primario y tres sedimentadores secundarios, entre otras; con lo que se estimó necesitar 3 operadores por turno. Para una operación de 24 horas de la planta se determinó que se necesitarían 3 turnos: uno en jornada diurna (la cual no puede ser mayor a 8 horas) y dos en jornada nocturna (la cual no puede ser mayor a 6 horas), para evitar el pago de horas extras que sería más costoso para la empresa. El detalle de las jornadas se encuentra en la Tabla No. 48 (página 118). El costo anual de la empresa para el pago de todos los sueldos a operadores con prestaciones y bonificación es de Q319,720.10. El costo anual por mantenimiento determinado en base a la inversión total, es de Q84,113.64. Mientras que el costo anual de los productos químicos utilizados es de Q145,070.83, con lo que se obtiene un costo total anual de operación de Q548,904.57.

Con base en la inversión, la depreciación y los costos de operación se construyó el flujo de caja, el cual se encuentra explicado en el inciso g., de la sección “11. Cálculos realizados en análisis económico” del Apéndice (página 120). Un criterio de evaluación de proyectos lo constituye la determinación del Valor Actual Neto (VAN). Este criterio plantea que el proyecto debe aceptarse si su VAN es igual o superior a cero, donde el VAN es la diferencia entre todos sus ingresos y egresos expresados en moneda actual, es decir que el VAN es calculado sobre todos los flujos de caja del período de evaluación. Dado que este proyecto no tiene ingresos directos por productos, se determinó la cantidad monetaria en que se deben incrementar anualmente los ingresos para que el VAN del proyecto sea 0 y por lo tanto se recupere su inversión durante el período de análisis. Este valor determinado fue de Q840,759.56, como se muestra en el flujo de caja en la Tabla No. 24 de la sección de Resultados (página No. 35). Se debe evaluar incrementar las ventas y/o aumentar el precio del producto en base a la cantidad de ventas actuales a valores razonables.

El valor en que se deben incrementar las ventas no es tan elevado comparado con los beneficios que se obtendrían al construir una planta que cumple con los requerimientos del reglamento de aguas hasta el último período en que se encuentra definido, el cual es el año 2024.

Entre los beneficios que puede tener la empresa al implementar una planta de tratamiento de aguas residuales es crear una imagen de marca amigable con el ambiente, lo cual pueda constituir una importante manera de realizar mercadeo. Por otra parte, puede ser fuente de oportunidades para poder vender el producto a través de clientes que exijan que las empresas proveedoras de sus productos no contaminen el medio ambiente en sus procesos de producción. Es también importante recordar que de no cumplir con los requerimientos de la legislación nacional para la descarga de aguas, la empresa podría incurrir en gastos por multas, que no solamente corresponden un gasto fuerte, si no pueden perjudicar en la disminución de ventas por la mala imagen de la marca en los consumidores, o incluso en el peor de los casos podría hacer que la empresa sea clausurada. Es importante recordar que las exigencias de los consumidores van cambiando, y actualmente se encuentra frente a un mundo cada vez más consciente de la importancia en los temas de conservación medioambiental, lo cual crea en las industrias la necesidad de cumplir con dichas exigencias. Por otra parte, también corresponde a la ética profesional el hacer su labor para que las industrias tengan conciencia de la importancia de evitar la contaminación del medio ambiente no sólo para la conservación de este, sino también para evitar daños en la salud humana.

## IX. CONCLUSIONES

A. El diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales se realizó para un caudal de  $3.04 \text{ m}^3/\text{h}$ , con un contenido de grasas y aceites de  $3380.85 \text{ mg/L}$ , Demanda Bioquímica de Oxígeno de  $20337 \text{ mg/L}$ , y sólidos suspendidos de  $11450 \text{ mg/L}$ .

B. Las etapas necesarias para el tratamiento del agua residual son: ecualización de flujo, dos trampas de grasas, tratamiento químico de coagulación y floculación, sedimentación primaria y tratamiento biológico de lodos activados. A partir de estos procesos se obtiene un efluente con Demanda Bioquímica de Oxígeno de  $100 \text{ mg/L}$ , sólidos suspendidos de  $100 \text{ mg/L}$ , y con grasas y aceites de  $5.66 \text{ mg/L}$ .

C. Para la implementación de la planta de tratamiento de aguas residuales se requiere de los siguientes equipos: bombas sumergibles, válvulas reguladoras de flujo de agua residual y de dosificación de químicos, medidores de flujo, impulsores con sus respectivos motores, tanques, un electrodo y controlador de pH, y un soplador.

D. Para la implementación de la planta diseñada se necesita una inversión de Q1,682,272.83. La cantidad monetaria en que se deben incrementar anualmente los ingresos de la empresa durante 10 años para que se recupere esta inversión es de Q840,759.56.

## X. RECOMENDACIONES

- A. Realizar análisis de mercado acerca de la influencia de una imagen de marca amigable con el ambiente, en la preferencia de los consumidores.
  
- B. Realizar un estudio para ver cuál debe ser el aumento en el precio de los productos de modo que se recupere la inversión sin perder mercado.
  
- C. Después de implementar la planta, durante su operación, se debe monitorear que las cargas de contaminantes del agua residual sean iguales o menores que en las que se basó para su diseño.
  
- D. Estudiar la posibilidad de utilización de los lodos obtenidos para implementar nuevos procesos en la empresa, o comercializarlos y obtener de esto beneficio económico.

## XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

*Water Treatment Plant Design*. 2005. Baruth, Edward E. ed.; American Society of Civil Engineers.; American Water Works Association. Fourth edition. New York, USA. McGraw-Hill

Belhateche, Dannelle. 1955. «Choose Appropriate Wastewater Treatment Technologies». *Revista Chemical Engineering Progress*. [USA]. August 1995: 32-51

Cole-Parmer. 2009/2010. *Catálogo de productos*. 2032 pp.

Guatemala. 2009. Ministerio de trabajo y previsión social. *Código de trabajo y sus reformas*. Guatemala. 266 pp.

Couper, James. 2005. *Chemical Process Equipment: Selection and Design*. Elsevier. Second edition. Amsterdam. 814 pp.

Hendricks, David. 2006. *Water Treatment Unit Processes*. CRC Press. Florida, USA. 1266 pp.

Lin, Shun Dar. 2007. *Water and Wastewater Calculations Manual*. Second edition. McGraw-Hill. New York, USA. 945 pp.

McCabe, W; Smith, J; Harriott, P. 2007. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Séptima edición. McGraw-Hill. México. 1189 pp.

Metcalf & Eddy, Inc. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Fourth edition. Tata McGraw-Hill Edition. New Delhi, India. 1819 pp.

*Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*. 2005. Organización panamericana de la salud. Lima, Perú. 34 pp.

*Especificaciones técnicas para el diseño de trampa de grasa*. 2005. Organización panamericana de la salud. Lima, Perú. 10 pp.

Paul E.; Atiemo-Oben, V; Kresta, S. 2004. *Handbook of Industrial Mixing*. John Wiley & Sons Inc. USA. 1377 pp

Perry, R; Green, D. W. 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. Eight edition. McGraw-Hill. USA. p22-58 – 22-78

Romero, J. 2004. *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Tercera edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 1248 pp.

Sapag, N; Sapag, R. 2008. *Preparación y evaluación de proyectos*. Quinta edición. McGraw-Hill. Mexico. 445 pp

Towler, G; Sinnott, R. 2008. *Chemical Engineering Design. Principles, practice and economics of plant and process design*. First edition. Butterworth-Heinemann. Gran Bretaña. 1245 pp.

*Wastewater Treatment Plant Desing*. 1977. Water Pollution Control Federation; American Society of Civil Engineers. Washington D.C., USA. 560 pp

## XII. APÉNDICE

### A. Matrices de selección de tratamientos

Para la selección de los procesos de tratamiento se determinaron los parámetros más influyentes para la elección del proceso, luego se asignó una valoración a cada parámetro dependiendo del orden de prioridad o interés a evaluar. Finalmente, dependiendo de si el proceso presentaba como una ventaja o desventaja del parámetro se determinó su valoración.

Tabla No. 26: Matriz para la selección de tratamiento físico

Parámetro	Valoración parámetro	Separación por gravedad	Flotación con aire	Coalescencia de aceites	Evaporación	Filtración	Adsorción	Extracción con aire
Costo	8	8	8	0	0	0	8	8
Mantenimiento	7	7	0	7	0	0	0	0
Costos de energía	6	6	0	6	0	6	0	0
Disposición de lodos o residuos	5	0	0	0	5	0	0	0
Emisiones volátiles	4	0	0	0	0	0	0	0
Seguridad	3	3	3	3	3	3	3	3
Facilidad de operación	2	2	0	2	2	2	2	0
Remoción de constituyentes disueltos	1	0	0	0	1	1	1	1
		26	11	18	11	12	14	12

Tabla No. 27: Matriz para la selección de tratamiento químico

Parámetro	Valoración parámetro	Precipitación química	Recuperación electrolítica	Intercambio iónico	Ósmosis inversa	Oxidación/Reducción química
Costo	9	0	0	0	0	0
Mantenimiento	8	8	0	0	0	0
Costos de energía	7	7	0	0	0	0
Disposición de lodos o residuos	6	0	6	0	0	6
Recuperación de metales	5	5	5	5	5	0
Seguridad	4	4	4	4	4	0
Facilidad de operación	3	3	3	3	3	0
Remoción de constituyentes disueltos	2	2	2	2	2	2
Reutilización del agua	1	0	0	1	1	0
		29	20	15	15	8

Tabla No. 28: Matriz para la selección de tratamiento biológico

<b>Parámetro</b>	<b>Valoración Parámetro</b>	<b>Lodos activados</b>	<b>Lagunas de aireación/estabilización</b>	<b>Filtros percoladores/ Reactores película fija</b>	<b>Degradación anaeróbica</b>
Costo	8	8	8	0	0
Mantenimiento	7	7	7	7	0
Costos de energía	6	0	6	0	0
Requerimiento de espacio grande	5	0	0	0	0
Disposición de lodos o residuos	4	4	4	4	0
Seguridad	3	3	3	3	0
Facilidad de operación	2	2	2	0	0
Susceptibilidad a cambios climáticos	1	0	0	0	0
		24	30	14	0

## B. Datos originales

Tabla No. 29: Resultados de medición de caudal durante 24 horas

<b>Hora</b>	<b>Caudal (L/s)</b>
0:00	1.23
0:15	0.14
0:30	0.83
0:45	0.14
1:00	0.50
1:15	0.49
1:30	0.25
1:45	0.43
2:00	0.21
2:15	0.16
2:30	0.37
2:45	0.31
3:00	0.14
3:15	0.27
3:30	0.36
3:45	0.41
4:00	0.32
4:15	0.67
4:30	0.22
4:45	0.28
5:00	0.38
5:15	0.25
5:30	0.22
5:45	0.22
6:00	0.41
6:15	1.09
6:30	0.46
6:45	0.24
7:00	1.90
7:15	0.49
7:30	0.18
7:45	0.30
8:00	0.21
8:15	1.04
8:30	1.76
8:45	0.28

Continuación Tabla No. 29: Resultados de medición de caudal durante 24 horas

<b>Hora</b>	<b>Caudal (L/s)</b>
9:00	0.15
9:15	0.25
9:30	0.17
9:45	0.22
10:00	0.32
10:15	0.49
10:30	0.49
10:45	0.62
11:00	0.50
11:15	0.37
11:30	0.09
11:45	0.55
12:00	0.10
12:15	0.02
12:30	0.22
12:45	0.35
13:00	0.26
13:15	0.22
13:30	0.12
13:45	0.07
14:00	0.22
14:15	0.37
14:30	0.46
14:45	0.61
15:00	0.09
15:15	0.10
15:30	0.05
15:45	0.17
16:00	0.35
16:15	2.18
16:30	0.28
16:45	0.23
17:00	0.13
17:15	0.17
17:30	0.05
17:45	0.14
18:00	0.09
18:15	0.30
18:30	0.19

Continuación Tabla No. 29: Resultados de medición de caudal durante 24 horas

<b>Hora</b>	<b>Caudal (L/s)</b>
18:45	0.19
19:00	0.10
19:15	0.50
19:30	2.46
19:45	0.24
20:00	0.49
20:15	0.38
20:30	0.49
20:45	0.21
21:00	0.28
21:15	1.07
21:30	0.76
21:45	0.48
22:00	0.60
22:15	0.20
22:30	0.20
22:45	0.50
23:00	0.20
23:15	0.11
23:30	0.24
23:45	0.38
PROMEDIO	0.41

Tabla No. 30: Caracterización de muestra compuesta obtenida durante 24 horas

<b>Parámetro</b>	<b>Medición</b>
Demanda química de oxígeno DQO (mg/L)	12800.0
Demanda bioquímica de oxígeno DBO (mg/L)	7075.2
Relación DQO / DBO	1.8
Sólidos sedimentables (mL/L)	100.0
Materia flotante	Presente
Sólidos en suspensión (mg/L)	4866.0
Grasas y aceites (mg/L)	12.0
Color (Pt/Co)	1210.0
Nitrógeno total (mg/L)	137.5
Fósforo total (mg/L)	8.4
Coliformes fecales (NMP/100ml)	55000

Tabla No. 31: Resultados obtenidos para prueba de jarras 1 de determinación de pH óptimo

<b>Muestra</b>	<b>pH inicial</b>	<b>pH final</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>SS (mg/L)</b>
1	11.07	10.79	2680	1489	324.17
2	10.05	9.66	2720	1511	305.00
3	9.01	8.86	2880	1600	290.83
4	8.02	8.63	2850	1583	273.33
5	7.06	8.72	2720	1511	271.67

Tabla No. 32: Resultados obtenidos para prueba de jarras 2 de determinación de dosis optima de coagulante, Policloruro de aluminio

<b>Muestra</b>	<b>pH inicial</b>	<b>Dosificación coagulante (ppm)</b>	<b>Dosificación floculante (ppm)</b>	<b>pH final</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>SS (mg/L)</b>
1	7.05	0	35	8.25	10430	5794	456.67
2	7.01	50	35	8.09	10260	5700	465.00
3	7.00	100	35	8.04	10300	5722	405.00
4	7.05	150	35	7.99	10170	5650	448.33
5	7.03	200	35	7.90	10140	5633	433.33
6	7.01	250	35	7.88	10020	5567	481.67

Tabla No. 33: Resultados obtenidos para prueba de jarras 3 de determinación de exceso de grasas y aceites para tratamiento químico

<b>Muestra</b>	<b>pH inicial</b>	<b>Dosificación coagulante (ppm)</b>	<b>Dosificación floculante (ppm)</b>	<b>pH final</b>	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>SS (mg/L)</b>	<b>Grasas y aceites (mg/L)</b>
Agua cruda	10	0	0	-----	67400	20337	11450.00	3380.85
1	7	100	50	8	46200	13940	925.00	1070.00

Tabla No. 34: Resultados obtenidos para prueba de jarras 4 de determinación de dosis óptima de floculante, Poliacrilamida aniónica

Muestra	pH inicial	Dosificación coagulante (ppm)	Dosificación floculante (ppm)	pH final	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	SS (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)
Agua cruda	9.57	0	0	-----	16720	9289	4592.50	511.86
1	7.02	100	0	7.45	9000	5000	1085.00	No determinado
2	6.98	100	10	7.00	8620	4789	920.00	No determinado
3	6.99	100	20	7.86	8200	4556	780.00	No determinado
4	6.99	100	30	7.76	7940	4411	800.00	No determinado
5	7.01	100	40	8.27	7920	4400	875.00	No determinado
6	7.01	100	50	8.25	7560	4200	730.00	No determinado

Tabla No. 35: Resultados obtenidos para prueba de jarras 5 de determinación de disminución de parámetros con dosificaciones óptimas de tratamiento determinadas anteriormente

Muestra	pH inicial	Dosificación coagulante (ppm)	Dosificación floculante (ppm)	pH final	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	SS (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)
Agua cruda	10.41	0	0	-----	6600	2034	3125	276.68
1	7.03	100	50	7.57	3950	1091	375	96.07
2	7.01	100	50	7.36	3920	1141	395	54.92
				Remoción (%)	40	45	88	73

Tabla No. 36: Límites máximos permisibles de aguas residuales a cuerpos receptores según el artículo 20 del “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9

Continuación Tabla No. 36: Límites máximos permisibles de aguas residuales a cuerpos receptores según el artículo 20 del “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^8$	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500
DBO	Miligramos por litro	700	250	100	100	100

## C. Cálculos realizados

### 1. Tanque de homogenización

a. Volumen del tanque. Para la determinación del volumen del tanque de homogenización se utilizó el método gráfico. Dado que se tenían datos de caudal a cada 15 minutos, se determinó a partir de estos, el flujo volumétrico máximo entre cada hora.

Tabla No. 37: Datos de caudal obtenidos para el agua de influente o agua de proceso

Hora	Caudal (L/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
0:00	1.23	0.00123	4.43
0:15	0.14	0.00014	0.50
0:30	0.83	0.00083	2.99
0:45	0.14	0.00014	0.50
1:00	0.50	0.00050	1.80
1:15	0.49	0.00049	1.76
1:30	0.25	0.00025	0.90
1:45	0.43	0.00043	1.55

Continuación Tabla No. 37: Datos de caudal obtenidos para el agua de influente o agua de proceso

<b>Hora</b>	<b>Caudal (L/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>
2:00	0.21	0.00021	0.76
2:15	0.16	0.00016	0.58
2:30	0.37	0.00037	1.33
2:45	0.31	0.00031	1.12
3:00	0.14	0.00014	0.50
3:15	0.27	0.00027	0.97
3:30	0.36	0.00036	1.30
3:45	0.41	0.00041	1.48
4:00	0.32	0.00032	1.15
4:15	0.67	0.00067	2.41
4:30	0.22	0.00022	0.79
4:45	0.28	0.00028	1.01
5:00	0.38	0.00038	1.37
5:15	0.25	0.00025	0.90
5:30	0.22	0.00022	0.79
5:45	0.22	0.00022	0.79
6:00	0.41	0.00041	1.48
6:15	1.09	0.00109	3.92
6:30	0.46	0.00046	1.66
6:45	0.24	0.00024	0.86
7:00	1.90	0.00190	6.84
7:15	0.49	0.00049	1.76
7:30	0.18	0.00018	0.65
7:45	0.30	0.00030	1.08
8:00	0.21	0.00021	0.76
8:15	1.04	0.00104	3.74
8:30	1.76	0.00176	6.34
8:45	0.28	0.00028	1.01
9:00	0.15	0.00015	0.54
9:15	0.25	0.00025	0.90
9:30	0.17	0.00017	0.61
9:45	0.22	0.00022	0.79
10:00	0.32	0.00032	1.15
10:15	0.49	0.00049	1.76
10:30	0.49	0.00049	1.76
10:45	0.62	0.00062	2.23
11:00	0.50	0.00050	1.80
11:15	0.37	0.00037	1.33
11:30	0.09	0.00009	0.32

Continuación Tabla No. 37: Datos de caudal obtenidos para el agua de influente o agua de proceso

<b>Hora</b>	<b>Caudal (L/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b>
11:45	0.55	0.00055	1.98
12:00	0.10	0.00010	0.36
12:15	0.02	0.00002	0.07
12:30	0.22	0.00022	0.79
12:45	0.35	0.00035	1.26
13:00	0.26	0.00026	0.94
13:15	0.22	0.00022	0.79
13:30	0.12	0.00012	0.43
13:45	0.07	0.00007	0.25
14:00	0.22	0.00022	0.79
14:15	0.37	0.00037	1.33
14:30	0.46	0.00046	1.66
14:45	0.61	0.00061	2.20
15:00	0.09	0.00009	0.32
15:15	0.10	0.00010	0.36
15:30	0.05	0.00005	0.18
15:45	0.17	0.00017	0.61
16:00	0.35	0.00035	1.26
16:15	2.18	0.00218	7.85
16:30	0.28	0.00028	1.01
16:45	0.23	0.00023	0.83
17:00	0.13	0.00013	0.47
17:15	0.17	0.00017	0.61
17:30	0.05	0.00005	0.18
17:45	0.14	0.00014	0.50
18:00	0.09	0.00009	0.32
18:15	0.30	0.00030	1.08
18:30	0.19	0.00019	0.68
18:45	0.19	0.00019	0.68
19:00	0.10	0.00010	0.36
19:15	0.50	0.00050	1.80
19:30	2.46	0.00246	8.86
19:45	0.24	0.00024	0.86
20:00	0.49	0.00049	1.76
20:15	0.38	0.00038	1.37
20:30	0.49	0.00049	1.76
20:45	0.21	0.00021	0.76
21:00	0.28	0.00028	1.01
21:15	1.07	0.00107	3.85

Continuación Tabla No. 37: Datos de caudal obtenidos para el agua de influente o agua de proceso

Hora	Caudal (L/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
21:30	0.76	0.00076	2.74
21:45	0.48	0.00048	1.73
22:00	0.60	0.00060	2.16
22:15	0.20	0.00020	0.72
22:30	0.20	0.00020	0.72
22:45	0.50	0.00050	1.80
23:00	0.20	0.00020	0.72
23:15	0.11	0.00011	0.40
23:30	0.24	0.00024	0.86
23:45	0.38	0.00038	1.37
PROMEDIO	0.41	0.00041	1.46

A partir de estos datos se determinó el caudal máximo entre cada hora, y dichos datos se encuentran detallados en la siguiente tabla.

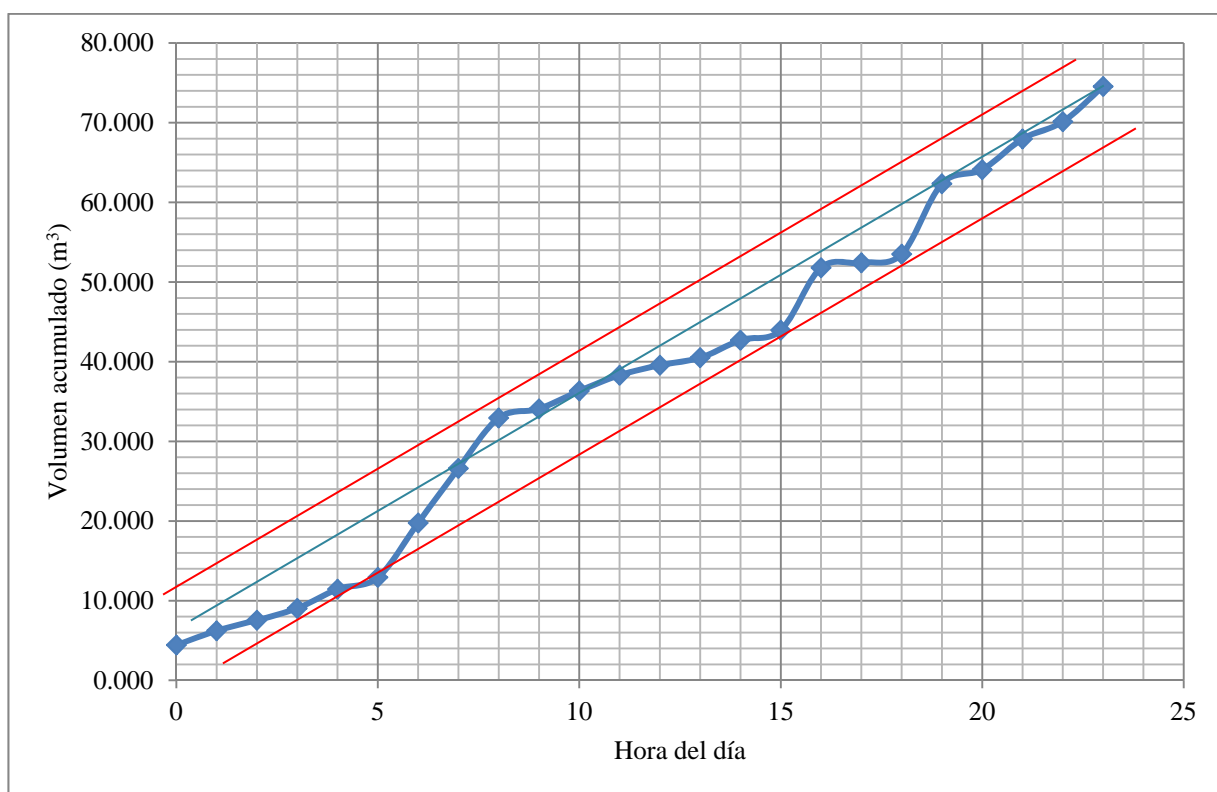
Tabla No. 38: Caudal máximo para cada hora y datos para el cálculo de volumen de tanque de equalización

Hora del día		Flujo (m <sup>3</sup> /s)	Volumen en 1 hora (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
0	0:00 a 1:00	0.00123	4.428	4.428
1	1:00 a 2:00	0.00050	1.800	6.228
2	2:00 a 3:00	0.00037	1.332	7.560
3	3:00 a 4:00	0.00041	1.476	9.036
4	4:00 a 5:00	0.00067	2.412	11.448
5	5:00 a 6:00	0.00041	1.476	12.924
6	6:00 a 7:00	0.00190	6.840	19.764
7	7:00 a 8:00	0.00190	6.840	26.604
8	8:00 a 9:00	0.00176	6.336	32.940
9	9:00 a 10:00	0.00032	1.152	34.092
10	10:00 a 11:00	0.00062	2.232	36.324
11	11:00 a 12:00	0.00055	1.980	38.304
12	12:00 a 13:00	0.00035	1.260	39.564
13	13:00 a 14:00	0.00026	0.936	40.500
14	14:00 a 15:00	0.00061	2.196	42.696
15	15:00 a 16:00	0.00035	1.260	43.956
16	16:00 a 17:00	0.00218	7.848	51.804
17	17:00 a 18:00	0.00017	0.612	52.416

Continuación Tabla No. 38: Caudal máximo para cada hora y datos para el cálculo de volumen de tanque de ecuación

Hora del día		Flujo (m <sup>3</sup> /s)	Volumen en 1 hora (m <sup>3</sup> )	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )
18	18:00 a 19:00	0.00030	1.080	53.496
19	19:00 a 20:00	0.00246	8.856	62.352
20	20:00 a 21:00	0.00049	1.764	64.116
21	21:00 a 22:00	0.00107	3.852	67.968
22	22:00 a 23:00	0.00060	2.160	70.128
23	23:00 a 0:00	0.00123	4.428	74.556

Figura No. 16: Gráfica para la determinación del volumen de tanque de ecuación



A partir de esta gráfica se determina que el volumen del tanque de ecuación debe ser de 14 m<sup>3</sup>.

Dado que puede haber variaciones inesperadas en el flujo, se debe calcular el volumen con un factor de seguridad de 15%. Con lo que se obtiene un volumen de:

$$V = V \times \text{Factor de seguridad}$$

$$V = (14\text{m}^3)(0.15)$$

$$V = 16.10 \text{ m}^3$$

Este volumen es el adecuado para el caudal medido, sin embargo, se espera tener un crecimiento en la producción del 5% anual, por lo que se debe tomar esto en cuenta para un tiempo de vida de 15 años de la planta de tratamiento que se diseña.

Tabla No. 39: Volumen de tanque de homogenización tomando un crecimiento de planta de 5% anual

Año	Volumen (m <sup>3</sup> )
0	16.10
1	16.91
2	17.75
3	18.64
4	19.57
5	20.55
6	21.58
7	22.65
8	23.79
9	24.98
10	26.23
11	27.54
12	28.91
13	30.36
14	31.88
15	33.47

A partir de esto se determina que el volumen del tanque de equalización debe ser de 33.47 m<sup>3</sup>.

b. Diámetro y altura del tanque, tamaño de deflectores. Para determinar el diámetro y la altura del tanque se utilizaron las relaciones de diseño para tanques agitados mostradas en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”

El volumen de un tanque cilíndrico está dado por:

$$V = \pi \frac{D_t^2}{4} H$$

Donde,

$V$ : Volumen del tanque

$D_t$ : Diámetro del tanque

$H$ : Altura del tanque

Dado que la relación entre diámetro y altura es 1, el diámetro y la altura deben ser iguales, por lo que la ecuación anterior se convierte en:

$$V = \pi \frac{D_t^3}{4}$$

Despejando para  $D_t$  con el volumen obtenido en el cálculo a., se obtiene que tanto el diámetro como la altura del tanque son:

$$D_t = H = \sqrt[3]{\frac{4V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4(33.47 \text{ m}^3)}{\pi}} = 3.49 \text{ m}$$

El tamaño de los deflectores se determina a partir del diámetro calculado anteriormente con la relación de diseño para tanques agitados mostradas en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”. De acuerdo a dicha relación la longitud del deflector es:

$$J = \frac{D_t}{12} = \frac{3.49 \text{ m}}{12} = 0.29 \text{ m}$$

Por lo general, el número de deflectores es 4. (McCabe: 262)

c. Diámetro del impulsor, largo y ancho de paletas. El diámetro del impulsor y el largo y ancho de sus paletas se determina a partir de las relaciones de diseño de tanques agitados mostradas en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”. De acuerdo a esta relación el diámetro del impulsor es:

$$D_a = \frac{D_t}{3} = \frac{3.49 \text{ m}}{3} = 1.164 \text{ m}$$

Además, el largo de las paletas es:

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{1.164 \text{ m}}{4} = 0.291 \text{ m}$$

El ancho de paletas es:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{1.164 \text{ m}}{5} = 0.233 \text{ m}$$

d. Altura de colocación del mezclador. Para determinar la altura del mezclador en el tanque se utiliza la relación de diseño entre dicho valor y el diámetro del tanque, mostrada en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”. De acuerdo a esta relación, la altura del mezclador es:

$$E = \frac{D_t}{3} = \frac{3.49 \text{ m}}{3} = 1.16 \text{ m}$$

e. Diámetro de disco del impulsor. Se estima que el diámetro del disco del impulsor corresponde a  $\frac{3}{4}$  del diámetro total del impulsor. Con esto se tiene:

$$D_d = \frac{3}{4} D_a = \frac{3}{4} (1.164 \text{ m}) = 0.873 \text{ m}$$

f. Potencia de agitación. La potencia de mezcla requerida se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$P = N_p \rho n D^3$$

Donde,

$P$ : Potencia requerida, W ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$ )

$N_p$ : Número de potencia para el impulsor, adimensional. Para el impulsor elegido, el cual es un impulsor Rushton, se tiene que este valor es 5.2.

$\rho$ : Densidad del fluido,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$n$ : Velocidad de agitación, revoluciones por segundo rev/s

$D$ : Diámetro del impulsor, m

Para la mezcla de fluidos se puede utilizar una velocidad de agitación de 20-150 rpm dependiendo del proceso que se esté llevando a cabo. Dado que en el tanque de homogenización se requiere que los lodos no sedimenten en el tanque, que haya aireación del agua residual y que se mezcle el ácido sulfúrico de neutralización, se estima que una velocidad de 30 rpm resulta adecuada. Por lo tanto, se requiere una potencia de agitación de:

$$P = (5.2) \left( 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( \frac{30 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) (1.164 \text{ m})^3 = 4091.48 \text{ W} = 5.48 \text{ hP}$$

g. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico. Dado que se necesitan cerca de 3 L de solución de ácido por hora, como se muestra posteriormente en el inciso i., se estima que se puede tener un tanque de 60 L para poder preparar dicha solución aproximadamente cada 20 horas como máximo. Dado que este volumen es pequeño, se piensa en la posibilidad de poder adquirirlo ya fabricado de alguna resina termoplástica. De acuerdo a la tabla de corrosión de materiales (Towler, Sinnott: 1106), se

determinó que para almacenamiento de Ácido sulfúrico se puede utilizar un tanque de Polietileno de alta densidad como material. Se cotizó de marca Cole-Parmer, y se eligió un tanque cilíndrico de 15 galones o 57 L. Las dimensiones del tanque son:

Tabla No. 40: Especificaciones del proveedor del tanque de solución de ácido sulfúrico

<b>Altura</b>	27 in = 0.69 m
<b>Diámetro externo</b>	13 in = 0.33m
<b>Graduación</b>	4 L
<b>Grosor de pared</b>	3/16 in
<b>Diámetro interno</b>	13 in – 3/16 in = 205/16 in = 0.33 m

h. Dimensionamiento del agitador de solución de ácido sulfúrico. Ya que es un tanque que se obtiene fabricado, se puede observar que no cumple con la relación de diseño para tanques agitados de tener una altura igual al diámetro interno. Sin embargo, se utilizarán las mismas relaciones de diseño para calcular el diámetro y la altura de colocación del impulsor.

El diámetro del impulsor y el largo y ancho de sus paletas se determina a partir de las relaciones de diseño de tanques agitados mostradas en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”. De acuerdo a esta relación el diámetro del impulsor es:

$$D_a = \frac{D_t}{3} = \frac{0.33 \text{ m}}{3} = 0.108 \text{ m}$$

Además, el largo de las paletas es:

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{0.108 \text{ m}}{4} = 0.027 \text{ m}$$

El ancho de paletas es:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{0.108 \text{ m}}{5} = 0.022 \text{ m}$$

Para determinar la altura del mezclador se tomará la altura del tanque como parámetro de diseño, ya que se considera más relevante que el diámetro del tanque, por ser esta bastante mayor. De acuerdo a esto, la altura de colocación del mezclador es:

$$E = \frac{h}{3} = \frac{0.69 \text{ m}}{3} = 0.229 \text{ m}$$

Se estima que el diámetro del disco del impulsor corresponde a  $\frac{3}{4}$  del diámetro total del impulsor. Con esto se tiene:

$$D_d = \frac{3}{4}D_a = \frac{3}{4}(0.108 \text{ m}) = 0.081 \text{ m}$$

La potencia de agitación se calcula del mismo modo que mostrado en el inciso f., utilizando siempre el número de potencia del impulsor Rushton, una velocidad de agitación 125 rpm para una correcta mezcla de la solución y el diámetro de impulsor anteriormente calculado. Se obtiene que la potencia de agitación es de 0.02 hp.

i. Flujos máscicos y caudales de las corrientes de entrada y salida del tanque de ecuilización. El flujo de agua residual se toma como el promedio de las mediciones de caudal durante 24 horas, que como se muestra en la Tabla No. 37 corresponde a 0.41 L/s (1462.50 L/h) o 1.46 m<sup>3</sup>/h. Tomando como densidad del agua residual la densidad del agua, 997 kg/m<sup>3</sup>, se tiene que el flujo máscico de agua residual del influente al tanque de ecuilización es:

$$\dot{m}_{\text{influyente}} = 1.46 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1458.11 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

En prueba de jarras se determinó que la cantidad promedio de solución de ácido sulfúrico necesaria para que 1 L de agua residual llegara a pH de 7 era de aproximadamente 2 mL. La solución con la que se neutralizó era al 25%.

Con el flujo de agua residual de 0.41 L/s y sabiendo que la solución de ácido es al 25% se tiene un flujo de dicha solución de:

$$Q_{\text{sol ácido sulfúrico}} = 0.41 \frac{\text{L agua residual}}{\text{s}} \times \frac{2 \text{ mL sol}}{1 \text{ L agua residual}} \times \frac{1 \text{ L sol}}{1000 \text{ mL sol}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 2.93 \frac{\text{L}}{\text{h}}$$

Con este dato y sabiendo que la solución con que se neutraliza es al 25% en volumen, se tiene que el flujo de ácido sulfúrico debe ser:

$$Q_{\text{ácido sulfúrico}} = 2.93 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times 0.25 = 0.73 \frac{\text{L}}{\text{h}} = 7.31 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Sabiendo que la densidad del ácido sulfúrico es  $1800 \text{ kg/m}^3$ , se tiene que el flujo másico de ácido sulfúrico es:

$$\dot{m}_{\text{ácido sulfúrico}} = 7.31 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.32 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

De manera análoga a los anteriores dos cálculos se tiene que el caudal y el flujo másico de agua para la solución de ácido sulfúrico son:

$$Q_{\text{agua}} = 2.93 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times (1 - 0.25) = 2.19 \frac{\text{L}}{\text{h}} = 2.19 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{agua}} = 2.19 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2.19 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Con los datos anteriores se tiene que el caudal y el flujo másico de salida del tanque de equalización son:

$$\begin{aligned} Q_{\text{efluente}} &= 1462.50 \frac{\text{L agua residual}}{\text{h}} + 0.73 \frac{\text{L ácido sulfúrico}}{\text{h}} + 2.19 \frac{\text{L agua}}{\text{h}} = 1465.43 \frac{\text{L}}{\text{h}} \\ &= 1.47 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{\text{efluente}} = 1458.11 \frac{\text{kg agua residual}}{\text{h}} + 1.32 \frac{\text{kg ácido sulfúrico}}{\text{h}} + 2.19 \frac{\text{kg agua}}{\text{h}} = 1461.62 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

2. Flujo de diseño. Para la determinación del flujo de diseño se utiliza un promedio de todos los flujos obtenidos en la medición de caudal de 24 horas. Como se muestra en la Tabla No. 37, este valor es de  $0.41 \text{ L/s}$ , o  $1.46 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Debido a que se espera un crecimiento del 5% anual para un tiempo de vida de la planta de 15 años, el flujo para el que se debe diseñar la planta es  $3.04 \text{ m}^3/\text{h}$ , como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla No. 41: Flujo de diseño para crecimiento de planta de 5% anual

Año	Volumen (m <sup>3</sup> /h)
0	1.46
1	1.54
2	1.61
3	1.69
4	1.78
5	1.87
6	1.96
7	2.06
8	2.16
9	2.27
10	2.38
11	2.50
12	2.63
13	2.76
14	2.90
15	3.04

### 3. Trampa de grasas

a. Volumen de la trampa de grasas. Para la determinación del volumen del tanque se debe tomar en cuenta el flujo del agua residual y el tiempo de residencia requerido en la trampa de grasas, el cual es de 25 minutos (Romero: 730). Con esto se tiene que el volumen de agua en la trampa de grasas es:

$$V_{agua} = Q \times t$$

Donde,

$V_{agua}$ : Volumen de agua en la trampa de grasas

$Q$ : Caudal o flujo de diseño

$t$ : Tiempo de residencia dentro de la trampa de grasas

$$V_{agua} = \left( 3.04 \frac{m^3}{h} \right) \times \left( 25 \text{ min} \times \frac{1 h}{60 \text{ min}} \right) = 1.27 m^3$$

b. Dimensiones de la trampa de grasas. Para determinar las dimensiones se utilizan las relaciones de diseño para trampas de grasa. La longitud de la trampa debe ser de 1.3 a 2 veces la profundidad total, lo cual da un promedio de 1.65 veces la profundidad, y la relación largo ancho debe ser 2:1 (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente). Dado que esta profundidad total a la que se refiere, incluye 2/3 de profundidad de fluido, y 1/3 de área libre sobre el fluido, se tiene que la longitud de la trampa debe ser de 1.1 veces la profundidad del fluido, como se muestra:

$$1.65 \times \frac{2}{3} = 1.1$$

Este valor debe obtenerse ya que se calcularán las dimensiones de la trampa en base al volumen de fluido determinado en el cálculo anterior.

Con esto se tiene que:

$$L = 1.1h_{agua}$$

$$h_{agua} = \frac{L}{1.1}$$

$$\frac{L}{w} = 2$$

$$w = \frac{L}{2}$$

Se diseñará una trampa de grasas rectangular, por lo que el volumen de agua está dado por:

$$V_{agua} = L \times h_{agua} \times w = L \times \frac{L}{1.1} \times \frac{L}{2} = \frac{L^3}{2.2}$$

$$L = \sqrt[3]{2.2V_{agua}} = \sqrt[3]{2.2(1.27 \text{ m}^3)} = 1.41 \text{ m}$$

Por lo que se obtiene una altura de fluido y un ancho de trampa de grasa de:

$$h_{agua} = \frac{L}{1.1} = \frac{1.41 \text{ m}}{1.1} = 1.28 \text{ m}$$

$$w = \frac{L}{2} = \frac{1.41 \text{ m}}{2} = 0.70 \text{ m}$$

Como se dijo anteriormente, la altura libre sobre la superficie del fluido corresponde a 1/3 de la altura total, y la altura del agua calculada corresponde a 2/3 de la altura total. Por lo tanto se puede determinar que la altura libre sobre la superficie del fluido es:

$$h_{sobre\ superficie\ agua} = \frac{h_{agua}}{2} = \frac{1.28\ m}{2} = 0.64\ m$$

Por lo que la altura total de la trampa es:

$$h_{total} = h_{agua} + h_{sobre\ superficie\ agua} = 1.28\ m + 0.64\ m = 1.92\ m$$

c. Caudal de grasas acumuladas en la trampa y caudal del efluente. En una trampa de grasas se tiene una remoción del 85% de las grasas. Se realizaron análisis durante diferentes días al agua residual a tratar, y de todas las muestras tomadas se determinó que la concentración máxima de grasas es de 3380.85 mg/L, que corresponde al agua cruda de la prueba de jarras 3 mostrada en la Tabla No. 33. Utilizando como densidad del agua residual 997 kg/m<sup>3</sup>, se tiene que esta concentración es de 3391.02 mg/kg. Además, con el dato de densidad se determinó que el flujo de ingreso de 3.04 m<sup>3</sup>/h corresponde a 3031.31 kg/h.

Con esto se tiene que el flujo másico de aceites que ingresan a la planta es de:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{grasas\ ingreso\ a\ trampa\ 1} &= 3031.31 \frac{kg\ agua}{h} \times 3391.02 \frac{mg\ grasas}{kg\ agua} \times \frac{1\ g}{1000\ mg} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} \\ &= 10.28 \frac{kg\ grasas}{h} \end{aligned}$$

Dado que se tiene un 85% de remoción de grasas, la cantidad de grasas acumuladas o retenidas en la trampa es de:

$$\dot{m}_{grasas\ retenidas\ en\ trampa\ 1} = 10.28 \frac{kg}{h} \times 0.85 = 8.74 \frac{kg}{h}$$

Por lo que el flujo de agua de salida es de:

$$\dot{m}_{efluente\ trampa\ 1} = 3031.31 \frac{kg}{h} - 8.74 \frac{kg}{h} = 3022.57 \frac{kg}{h}$$

Con el dato de densidad del agua se tiene que este flujo corresponde a 3.03 m<sup>3</sup>/h.

Además, se determinó que la concentración de grasas del efluente de la trampa 1 que pasa a la trampa 2 es de:

$$Grasas_{efluente} = Grasas_{influyente} - (Grasas_{influyente} \times \% \text{ de remoción en tratamiento})$$

$$Grasas_{efluente\ trampa\ 1} = 3380.85 \frac{mg}{L} - \left(3380.85 \frac{mg}{L} \times 0.85\right) = 507.13 \frac{mg}{L}$$

Ahora se calculan los flujos volumétricos. El flujo volumétrico del influente se sabe previamente que es 3.04 m<sup>3</sup>/h. A partir del flujo másico del efluente de la trampa y la densidad aproximada del agua se determina el flujo volumétrico:

$$Q_{efluente\ trampa\ 1} = \frac{3022.57 \frac{kg}{h}}{997 \frac{kg}{m^3}} = 3.03 \frac{m^3}{h}$$

A partir de esto se determina el flujo volumétrico de grasas y aceites retenidos o efluentes de la trampa de grasas:

$$Q_{grasas\ retenidas\ en\ trampa\ 1} = 3.04 \frac{m^3}{h} - 3.03 \frac{m^3}{h} = 8.76 \times 10^{-3} \frac{m^3}{h}$$

Se realizaron los mismos cálculos para la trampa de grasas 2, utilizando como flujo de ingreso el flujo de efluente de la trampa 1, y como concentración de grasas del agua a tratar, la concentración del efluente de la trampa 1 determinada anteriormente. Los datos obtenidos se muestran en la sección “VII. Resultados”.

- d. Demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos del efluente de la trampa de grasas

$$\begin{aligned} DBO_{efluente} &= DBO_{influyente} - (DBO_{influyente})(\% \text{ de remoción en tratamiento}) \\ &= 20337.29 \frac{mg}{L} - \left(20337.29 \frac{mg}{L}\right) (30\%) = 14236.11 \frac{mg}{L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} SS_{efluente} &= SS_{influyente} - (SS_{influyente})(\% \text{ de remoción en tratamiento}) \\ &= 11450 \frac{mg}{L} - \left(11450 \frac{mg}{L}\right) (30\%) = 8015 \frac{mg}{L} \end{aligned}$$

Se realizó el mismo cálculo para la trampa de grasas 2, utilizando como DBO y sólidos suspendidos del influente los valores del efluente de la trampa de grasas 1.

#### 4. Tanque de coagulación

a. Volumen de agua en el tanque. Para la determinación del volumen de agua en el tanque se debe tomar en cuenta el flujo del agua residual que sale de la trampa de grasas 2, y el tiempo de residencia requerido en el tanque para la coagulación. El tiempo de residencia para coagulación es de 60 segundos (Metcalf: 346). Con esto se tiene que el volumen de agua en el tanque es:

$$V_{agua} = Q \times t$$

Donde,

$V_{agua}$ : Volumen de agua en el tanque de coagulación

$Q$ : Caudal influente del tanque de coagulación (efluente de trampa de grasas 2)

$t$ : Tiempo de residencia dentro del tanque de coagulación

$$V_{agua} = \left(3.03 \frac{m^3}{h}\right) \times \left(60s \times \frac{1h}{3600s}\right) = 0.05 m^3$$

b. Diámetro y altura del tanque. Para determinar el diámetro y la altura del tanque se utilizaron las relaciones de diseño para un tanque de agitación mostrados en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”.

Ya que se diseñará un tanque cilíndrico el volumen está dado por:

$$V_{agua} = \pi \frac{D_t^2}{4} h_{agua}$$

Donde,

$V_{agua}$ : Volumen de agua en el tanque

$D_t$ : Diámetro del tanque

$h_{agua}$ : Altura del agua ya que se está determinando a partir del volumen de agua

Dado que la relación entre diámetro y altura del agua es 1, el diámetro y la altura deben ser iguales, por lo que la ecuación anterior se convierte en:

$$V_{agua} = \pi \frac{D_t^3}{4}$$

Despejando para  $D_t$  con el volumen obtenido en el cálculo a., se obtiene que tanto el diámetro como la altura de agua en el tanque son:

$$D_t = h_{agua} = \sqrt[3]{\frac{4V_{agua}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4(0.05 \text{ m}^3)}{\pi}} = 0.40 \text{ m}$$

Como se muestra en la Figura No. 7 de la sección “VII. Resultados”, todo el flujo de la planta se diseñó por rebalse para evitar consumo eléctrico con bombas, por lo que la altura libre sobre la superficie será la misma que la determinada para la trampa de grasas, la cual es de 0.64 m. Con esto se tiene que la altura total del tanque de coagulación es:

$$h_{total} = h_{agua} + h_{sobre \text{ superficie } agua} = 0.40 \text{ m} + 0.64 \text{ m} = 1.04 \text{ m}$$

c. Tamaño de deflectores. El tamaño de los deflectores se determina a partir del diámetro del tanque calculado anteriormente con la relación de diseño mostrada en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”. De acuerdo a dicha relación la longitud del deflector es:

$$J = \frac{D_t}{12} = \frac{0.40 \text{ m}}{12} = 0.03 \text{ m}$$

Por lo general, el número de deflectores es 4. (McCabe: 262)

d. Diámetro del impulsor. El diámetro del impulsor y el largo y ancho de sus paletas se determina a partir de las relaciones de diseño de tanques agitados mostradas en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”. De acuerdo a esta relación el diámetro del impulsor es:

$$D_a = \frac{D_t}{3} = \frac{0.40 \text{ m}}{3} = 0.134 \text{ m}$$

Además, el largo de las paletas es:

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{0.134 \text{ m}}{4} = 0.033 \text{ m}$$

El ancho de paletas es:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{0.134 \text{ m}}{5} = 0.027 \text{ m}$$

e. Altura de colocación del impulsor. Para determinar la altura del mezclador en el tanque se utiliza la relación de diseño entre dicho valor y el diámetro del tanque, mostrada en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”. De acuerdo a esta relación, la altura del mezclador es:

$$E = \frac{D_t}{3} = \frac{0.40 \text{ m}}{3} = 0.13 \text{ m}$$

f. Diámetro de disco del impulsor. Se estima que el diámetro del disco del impulsor corresponde a  $\frac{3}{4}$  del diámetro total del impulsor. Con esto se tiene:

$$D_d = \frac{3}{4} D_a = \frac{3}{4} (0.134 \text{ m}) = 0.100 \text{ m}$$

g. Potencia de agitación. Para la coagulación se sugiere una agitación de 100 rpm, que corresponde también a la velocidad utilizada para la prueba de jarras realizada.

La potencia de mezcla requerida se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$P = N_p \rho n D^3$$

Donde,

$P$ : Potencia requerida, W ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$ )

$N_p$ : Número de potencia para el impulsor, adimensional. Para el impulsor elegido, el cual es un impulsor tipo Rushton, se tiene que este valor es 5.2.

$\rho$ : Densidad del fluido,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$n$ : Velocidad de agitación, revoluciones por segundo rev/s

$D$ : Diámetro del impulsor, m

Por lo tanto, se requiere una potencia de agitación de:

$$P = (5.2) \left( 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left( \frac{100 \text{ rev}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) (0.134 \text{ m})^3 = 20.58 \text{ W} = 0.03 \text{ hP}$$

h. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de solución de coagulante. Dado que se necesitan cerca de 12 L de solución de coagulante por hora, como se muestra posteriormente en el inciso j., se estima que se puede tener un tanque de 100 L para poder preparar dicha solución aproximadamente cada 8 horas como máximo. Dado que este volumen es pequeño, se piensa en la posibilidad de poder adquirirlo

ya fabricado de alguna resina termoplástica. De acuerdo a la tabla de corrosión de materiales (Towler, Sinnott: 1106), se determinó que para almacenamiento de Policloruro de aluminio se puede utilizar un tanque de Polietileno de alta densidad como material.

Se cotizó de marca Cole-Parmer, y se eligió un tanque cilíndrico de 30 galones o 114 L. Las dimensiones del tanque son:

Tabla No. 42: Especificaciones del proveedor del tanque de solución de coagulante

<b>Altura</b>	30 in = 0.76 m
<b>Diámetro externo</b>	18 in = 0.46 m
<b>Graduación</b>	10 L
<b>Grosor de pared</b>	3/16 in
<b>Diámetro interno</b>	18 in – 3/16 in = 285/16 in = 0.45 m

i. Dimensionamiento del agitador de solución de coagulante. Ya que es un tanque que se obtiene fabricado, se puede observar que no cumple con la relación de diseño para tanques agitados de tener una altura igual al diámetro interno. Sin embargo, se utilizarán las mismas relaciones de diseño para calcular el diámetro y la altura de colocación del impulsor.

El diámetro del impulsor y el largo y ancho de sus paletas se determina a partir de las relaciones de diseño de tanques agitados mostradas en la sección “D. Parámetros de diseño”, apartado “1. Tanques agitados”. De acuerdo a esta relación el diámetro del impulsor es:

$$D_a = \frac{D_t}{3} = \frac{0.45 \text{ m}}{3} = 0.151 \text{ m}$$

Además, el largo de las paletas es:

$$L = \frac{D_a}{4} = \frac{0.151 \text{ m}}{4} = 0.037 \text{ m}$$

El ancho de paletas es:

$$W = \frac{D_a}{5} = \frac{0.151 \text{ m}}{5} = 0.030 \text{ m}$$

Para determinar la altura del mezclador se tomará la altura del tanque como parámetro de diseño, ya que se considera más relevante que el diámetro del tanque, por ser esta bastante mayor. De acuerdo a esto, la altura de colocación del mezclador es:

$$E = \frac{h}{3} = \frac{0.76 \text{ m}}{3} = 0.25 \text{ m}$$

Se estima que el diámetro del disco del impulsor corresponde a  $\frac{3}{4}$  del diámetro total del impulsor. Con esto se tiene:

$$D_d = \frac{3}{4}D_a = \frac{3}{4}(0.151 \text{ m}) = 0.113 \text{ m}$$

La potencia de agitación se calcula del mismo modo que mostrado en el inciso g., utilizando siempre el número de potencia del impulsor Rushton, una velocidad de agitación 125 rpm para una correcta mezcla y el diámetro de impulsor anteriormente calculado. Se obtiene que la potencia de agitación es de 0.05 hp.

j. Flujo máscicos y caudales de las corrientes de entrada y salida del tanque de coagulación. Se determinó en prueba de jarras de coagulación y sedimentación, que la dosis óptima de coagulante es la correspondiente a 100 mg/L. La ficha técnica del coagulante utilizado se muestra al final de esta sección de Anexo. A partir de esta dosificación, y el caudal de ingreso al tanque de coagulación, de 3.03 m<sup>3</sup>/h o 3030.36 L/h, se tiene que el flujo de coagulante debe ser:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{coagulante} &= 100 \frac{\text{mg coagulante}}{\text{L agua residual}} \times 3030.36 \frac{\text{L agua residual}}{\text{h}} = 303035.81 \frac{\text{mg coagulante}}{\text{h}} \\ &= 0.30 \frac{\text{kg coagulante}}{\text{h}} \end{aligned}$$

De acuerdo a especificaciones del proveedor del coagulante, la solución debe prepararse en una proporción de 2 mL de coagulante por 100 mL de solución. Con la densidad especificada en la ficha técnica, se tiene que esta solución tiene una concentración de 0.025 g/mL. Con esto se determina que el flujo de solución de coagulante debe ser de:

$$\begin{aligned} Q_{solución\ coagulante} &= 303035.81 \frac{\text{mg coagulante}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ mL sol coagulante}}{0.025 \text{ g coagulante}} \\ &= 12121.43 \frac{\text{mL sol coagulante}}{\text{h}} = 12.12 \frac{\text{L sol coagulante}}{\text{h}} \end{aligned}$$

El flujo de agua necesario para la preparación de la solución coagulante se determina a partir de la cantidad de la masa de coagulante y el volumen de agua utilizado para hacer la solución:

$$\begin{aligned} \frac{2 \text{ mL coagulante}}{100 \text{ mL sol coagulante}} \times \frac{1.25 \text{ g coagulante}}{1 \text{ mL coagulante}} &= \frac{2.50 \text{ g coagulante}}{100 \text{ mL sol coagulante}} \\ &= \frac{2.50 \text{ g coagulante}}{100 \text{ mL solución} - 2 \text{ mL coagulante}} = \frac{2.50 \text{ g coagulante}}{98 \text{ mL agua}} \end{aligned}$$

$Q_{\text{agua de solución coagulante}}$

$$\begin{aligned} &= 3030.36 \frac{\text{L agua residual}}{\text{h}} \times 100 \frac{\text{mg coagulante}}{\text{L agua residual}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{98 \text{ mL agua}}{2.5 \text{ g coagulante}} \\ &\times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} = 11.88 \frac{\text{L agua}}{\text{h}} \end{aligned}$$

A partir de este valor y la densidad del agua de  $997 \text{ kg/m}^3$ , se tiene que el flujo másico del agua para la solución de coagulante es  $11.84 \text{ kg/h}$ .

Para determinar el flujo del efluente del tanque de coagulación se determinó que el flujo del influente o agua de ingreso corresponde al flujo de salida de la trampa de grasas 2. Con esto se determinó que el flujo del efluente es:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{efluente tanque coagulación}} &= 3021.27 \frac{\text{kg influente}}{\text{h}} + 0.30 \frac{\text{kg coagulante}}{\text{h}} + 11.84 \frac{\text{kg agua}}{\text{h}} \\ &= 3033.41 \frac{\text{kg efluente}}{\text{h}} \end{aligned}$$

Además, el caudal del efluente es:

$$\begin{aligned} Q_{\text{efluente}} &= 3030.36 \frac{\text{L influente}}{\text{h}} + 12.12 \frac{\text{L sol coagulante}}{\text{h}} = 3042.48 \frac{\text{L efluente}}{\text{h}} \\ &= 3.04 \frac{\text{m}^3 \text{ efluente}}{\text{h}} \end{aligned}$$

## 5. Tanque de floculación

a. Volumen de agua en el tanque. Para la determinación del volumen de agua en el tanque se debe tomar en cuenta el flujo del agua residual de salida del tanque de coagulación, y el tiempo de residencia requerido en el tanque para la floculación. El tiempo de residencia para floculación es de 10 a 30 minutos (Metcalf: 346).

$$V_{agua} = Q \times t$$

Donde,

$V_{agua}$ : Volumen de agua en el tanque de floculación

$Q$ : Caudal influente del tanque de floculación (efluente del tanque de coagulación)

$t$ : Tiempo de residencia dentro del tanque de floculación

$$V_{agua} = \left(3.04 \frac{m^3}{h}\right) \times \left(20 \text{ min} \times \frac{1h}{60\text{min}}\right) = 1.01 m^3$$

b. Diámetro y altura del tanque. Se determinó con el mismo procedimiento que el detallado en el inciso b. de la sección “4. Tanque de coagulación”.

c. Tamaño de deflectores. Se determinó con el mismo procedimiento que el detallado en el inciso c. de la sección “4. Tanque de coagulación”.

d. Diámetro del impulsor. Se determinó con el mismo procedimiento que el detallado en el inciso d. de la sección “4. Tanque de coagulación”.

e. Altura de colocación del impulsor. Se determinó con el mismo procedimiento que el detallado en el inciso e. de la sección “4. Tanque de coagulación”.

f. Potencia de agitación. Se determinó con el mismo procedimiento que el detallado en el inciso g. de la sección “4. Tanque de coagulación”.

g. Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de solución de floculante. Dado que se necesitan cerca de 50 L de solución de floculante por hora, como se muestra posteriormente en el inciso i., se estima que se puede tener un tanque de 300 L para poder preparar dicha solución aproximadamente cada 6 horas como máximo. Dado que este volumen es relativamente pequeño, se piensa en la posibilidad de poder adquirirlo ya fabricado de alguna resina termoplástica. De acuerdo a la tabla de corrosión de materiales (Towler, Sinnott: 1106), se determinó que para almacenamiento de Poliacrilamida aniónica se puede utilizar un tanque de Polietileno de alta densidad como material.

Se cotizó de marca Cole-Parmer, y se eligió un tanque cilíndrico de 80 galones o 303 L. Las dimensiones del tanque son:

Tabla No. 43: Especificaciones del proveedor del tanque de solución de floculante

<b>Altura</b>	48 in = 1.22 m
<b>Diámetro externo</b>	24 in = 0.61 m
<b>Graduación</b>	20 L
<b>Grosor de pared</b>	1/4 in
<b>Diámetro interno</b>	24 in – 1/4 in = 95/4 in = 0.60 m

h. Dimensionamiento del agitador de solución de floculante. Se determinó con el mismo procedimiento que el detallado en el inciso i. de la sección “4. Tanque de coagulación”.

i. Flujo máscicos y caudales de las corrientes de entrada y salida del tanque de floculación. Se determinó en prueba de jarras de floculación y sedimentación, que la dosis óptima de floculante es la correspondiente a 50 mg/L. La ficha técnica del floculante utilizado se muestra al final de esta sección de Anexo. A partir de esta dosificación, y el caudal de ingreso al tanque de floculación, de 3.04 m<sup>3</sup>/h o 3042.48 L/h, se tiene que el flujo de floculante debe ser:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{floculante} &= 50 \frac{mg \text{ floculante}}{L \text{ agua residual}} \times 3042.48 \frac{L \text{ agua residual}}{h} = 152123.97 \frac{mg \text{ floculante}}{h} \\ &= 0.15 \frac{kg \text{ floculante}}{h}\end{aligned}$$

De acuerdo a especificaciones del proveedor del floculante, la solución debe prepararse en una proporción de 0.3 g de floculante por 100 mL de solución. Con esto se determina que el flujo de solución de floculante debe ser de:

$$\begin{aligned}Q_{solución \text{ floculante}} &= 152123.97 \frac{mg \text{ floculante}}{h} \times \frac{1 g}{1000 mg} \times \frac{100 mL \text{ sol floculante}}{0.3 g \text{ floculante}} \\ &= 50707.99 \frac{mL \text{ sol floculante}}{h} = 50.71 \frac{L \text{ sol floculante}}{h}\end{aligned}$$

El flujo de agua necesario para la preparación de la solución floculante se determina a partir de la cantidad de la masa de floculante y el volumen de agua utilizado para hacer la solución:

$$\frac{0.3 g \text{ floculante}}{100 mL \text{ sol floculante}} = \frac{0.3 g \text{ floculante}}{100 mL \text{ agua}}$$

$Q_{\text{agua de solución coagulante}}$

$$= 3042.48 \frac{L \text{ agua residual}}{h} \times 50 \frac{mg \text{ floculante}}{L \text{ agua residual}} \times \frac{1 g}{1000 mg} \times \frac{100 mL \text{ agua}}{0.3 g \text{ floculante}} \\ \times \frac{1 L}{1000 mL} = 50.71 \frac{L \text{ agua}}{h}$$

A partir de este valor y la densidad del agua de  $997 \text{ kg/m}^3$ , se tiene que el flujo másico del agua para la solución de floculante es  $50.56 \text{ kg/h}$ .

Para determinar el flujo másico del efluente del tanque de floculación se determinó que el flujo másico del influente es el correspondiente al flujo másico del efluente del tanque de coagulación obtenido en el inciso j., de la sección “4. Tanque de coagulación”. Con esto se tiene que el flujo másico del efluente es:

$$\dot{m}_{\text{efluente tanque coagulación}} = 3033.41 \frac{kg \text{ influente}}{h} + 0.15 \frac{kg \text{ floculante}}{h} + 50.56 \frac{kg \text{ agua}}{h} \\ = 3084.12 \frac{kg \text{ efluente}}{h}$$

Además, el caudal del efluente es:

$$Q_{\text{efluente}} = 3042.48 \frac{L \text{ influente}}{h} + 50.71 \frac{L \text{ sol floculante}}{h} = 3093.19 \frac{L \text{ efluente}}{h} = 3.09 \frac{m^3 \text{ efluente}}{h}$$

## 6. Sedimentador primario

a. Volumen de sedimentación. Para la determinación del volumen de agua en el tanque se debe tomar en cuenta el flujo del agua residual de salida del tanque de floculación, y el tiempo de residencia requerido en el tanque para la sedimentación. El tiempo de residencia para la sedimentación es 1 hora (Hendricks: 180).

$$V_{\text{agua}} = Q \times t$$

Donde,

$V_{\text{agua}}$ : Volumen de agua en el tanque de sedimentación

$Q$ : Caudal influente del sedimentador (efluente del tanque de floculación)

$t$ : Tiempo de residencia dentro del tanque de sedimentación

$$V_{agua} = \left(3.09 \frac{m^3}{h}\right) \times (1h) = 3.09 m^3$$

b. Dimensiones del tanque de sedimentación. Se debe suponer una altura de zona de sedimentación o altura de agua de 1.5 m, y se debe tomar la relación de diseño para tanques de sedimentación de:

$$\frac{L}{w} = 6$$

$$L = 6w$$

Donde,

$L$ : Largo del tanque

$w$ : Ancho del tanque

Tomando en cuenta que se está diseñando un tanque rectangular se determinan las dimensiones:

$$V_{agua} = h_{agua} \times L \times w$$

Donde,

$V_{agua}$ : Volumen de agua en el sedimentador

$h_{agua}$ : Altura del agua en el sedimentador

$$V_{agua} = h_{agua} \times 6w \times w$$

$$w = \sqrt{\frac{V_{agua}}{6 h_{agua}}} = \sqrt{\frac{3.09 m^3}{6 (1.50 m)}} = 0.59 m$$

$$L = 6(0.59 m) = 3.52 m$$

La altura de la zona de lodos del sedimentador se toma entre el 5 y 10% de la altura de la zona de sedimentación (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente). Por lo que esta profundidad es:

$$h_{zona\ lodos} = (1.50 m)(0.1) = 0.15 m$$

Como se muestra en la Figura No. 7 de la sección "VII. Resultados", todo el flujo de la planta se diseñó por rebalse para evitar consumo eléctrico con bombas, por lo que la altura libre sobre la

superficie será la misma que la determinada para la trampa de grasas, la cual es de 0.64 m. Con esto se tiene que la altura total del tanque de sedimentación es:

$$h_{total} = h_{agua} + h_{zona\ lodos} + h_{sobre\ superficie\ agua} = 1.50\ m + 0.15\ m + 0.64\ m = 2.29\ m$$

c. Determinación de ubicación de descarga de lodos. La descarga de lodos se debe ubicar en el primer tercio de la unidad, pues el 80% del volumen de los lodos se deposita en esa zona. (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente)

Por lo tanto, la distancia de la pared del sedimentador a la descarga de lodos es:

$$L_{descarga\ de\ lodos} = \frac{L}{3} = \frac{3.52\ m}{3} = 1.17\ m$$

d. Carga de Demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales

$$Carga\ DBO = DBO_{influyente} \times Q$$

*Carga DBO*: Carga diaria de demanda bioquímica de oxígeno en influente del sedimentador primario

*DBO<sub>influyente</sub>*: Demanda bioquímica de oxígeno del influente del sedimentador primario

*Q*: Caudal del agua residual que ingresa al sedimentador primario

$$Carga\ TSS = TSS_{influyente} \times Q$$

*Carga TSS*: Carga diaria de sólidos suspendidos en influente del sedimentador primario

*TSS<sub>influyente</sub>*: Sólidos suspendidos del influente del sedimentador primario

*Q*: Caudal del agua residual que ingresa al sedimentador primario

La Demanda bioquímica de oxígeno que ingresa al sedimentador es la misma que la que sale de la segunda trampa de grasas, valor que fue determinado en la sección “3. Trampa de grasas”, como 9965.27 mg/L.

$$Carga\ DBO = \left( 9965.27 \frac{mg}{L} \times \frac{1\ g}{1000\ mg} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} \times \frac{1000\ L}{1\ m^3} \right) \left( 3.09 \frac{m^3}{h} \times \frac{24\ h}{1\ día} \right) = 739.78 \frac{kg}{día}$$

Del mismo modo que el DBO, los sólidos suspendidos totales se toman como los determinados en el efluente de la segunda trampa de grasas, valor que es igual a 5610.50 mg/L. Con lo que se obtiene:

$$Carga\ TSS = \left( 5610.50 \frac{mg}{L} \times \frac{1\ g}{1000\ mg} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} \times \frac{1000\ L}{1\ m^3} \right) \left( 3.09 \frac{m^3}{h} \times \frac{24\ h}{1\ día} \right) = 416.50 \frac{kg}{día}$$

e. Demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales removidos

$$DBO_{removido} = Carga\ DBO \times \% \text{ Remoción DBO en sedimentador}$$

*DBO<sub>removido</sub>*: Demanda bioquímica de oxígeno removida en el sedimentador primario

*Carga DBO*: Carga diaria de demanda bioquímica de oxígeno en influente del sedimentador primario

*% Remoción DBO en sedimentador*: Porcentaje de remoción de demanda bioquímica de oxígeno en sedimentador primario. En prueba de jarras se obtuvo que luego de aplicar coagulante, floculante y dejar sedimentar, se obtenía una disminución de 46% de DBO.

$$TSS_{removido} = Carga\ TSS \times \% \text{ Remoción TSS en sedimentador}$$

*TSS<sub>removido</sub>*: Sólidos suspendidos removidos en el sedimentador primario

*Carga TSS*: Carga diaria de sólidos suspendidos en influente del sedimentador primario

*% Remoción TSS en sedimentador*: Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos en sedimentador primario. En prueba de jarras se obtuvo que luego de aplicar coagulante, floculante y dejar sedimentar, se obtenía una disminución de 88% de sólidos suspendidos.

$$DBO_{removido} = 739.78 \frac{kg}{día} \times 45\% = 333.91 \frac{kg}{día}$$

$$TSS_{removido} = 416.50 \frac{kg}{día} \times 88\% = 365.19 \frac{kg}{día}$$

f. Flujo de lodos residuales del sedimentador primario

$$Q_{lodos} = \frac{TSS_{removido}}{G \cdot E_{lodo} \times \rho_{agua}}$$

*Q<sub>lodos</sub>*: Caudal o flujo de lodos del sedimentador primario

$TSS_{removido}$ : Sólidos suspendidos removidos en el sedimentador primario

% sólidos en lodos: Porcentaje de sólidos en los lodos de descarga, 4.4% (Lin: 636)

$G.E_{lodos}$ : Gravedad específica de los lodos removidos, 1.05 (Lin: 636)

$\rho_{agua}$ : Densidad del agua, 997 kg/m<sup>3</sup>

$$Q_{lodos} = \frac{365.19 \frac{kg \text{ sólido}}{día} \times \frac{1 \text{ kg lodo}}{0.044 \text{ kg sólido}}}{\left(1.05 \times 997 \frac{kg}{m^3}\right) \frac{kg \text{ lodo}}{m^3 \text{ lodo}}} = 7.93 \frac{m^3 \text{ lodo}}{día} = 0.33 \frac{m^3 \text{ lodo}}{h}$$

$$\dot{m}_{lodos} = 0.33 \frac{m^3 \text{ lodo}}{h} \times 1.05 \times 997 \frac{kg}{m^3} = 345.82 \frac{kg}{h}$$

g. Flujo del efluente del sedimentador primario

$$Q_{efluente} = Q - Q_{lodos}$$

$Q_{efluente}$ : Caudal del agua residual efluente del sedimentador primario

$Q$ : Caudal de agua residual influente del sedimentador primario

$Q_{lodos}$ : Caudal o flujo de lodos del sedimentador primario

$$Q_{efluente} = \left(3.09 \frac{m^3}{h} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}\right) - 7.93 \frac{m^3 \text{ lodo}}{día} = 66.31 \frac{m^3 \text{ agua residual}}{día} = 2.76 \frac{m^3 \text{ agua residual}}{h}$$

$$\dot{m}_{efluente} = \dot{m}_{influyente} - \dot{m}_{lodos}$$

El flujo másico de influente es el determinado como flujo másico del efluente del tanque de floculación en el inciso i. de la sección “5. Tanque de floculación”, el cual es 3084.12 kg/h. Por lo tanto, el flujo másico del efluente del sedimentador primario es:

$$\dot{m}_{efluente} = 3084.12 \frac{kg}{h} - 345.82 \frac{kg}{h} = 2738.30 \frac{kg}{h}$$

h. Demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales del efluente del sedimentador primario

$$DBO_{efluente} = \frac{Carga \text{ DBO} - DBO_{removido}}{Q_{efluente}}$$

$DBO_{efluente}$ : Demanda bioquímica de oxígeno del efluente del sedimentador primario

*Carga DBO*: Carga diaria de demanda bioquímica de oxígeno en influente del sedimentador primario

$DBO_{removido}$ : Demanda bioquímica de oxígeno removida en el sedimentador primario

$Q_{efluente}$ : Caudal del efluente del sedimentador primario

$$TSS_{efluente} = \frac{Carga\ TSS - TSS_{removido}}{Q_{efluente}}$$

$TSS_{efluente}$ : Sólidos suspendidos del efluente del sedimentador primario

*Carga TSS*: Carga diaria de sólidos suspendidos en influente del sedimentador primario

$TSS_{removido}$ : Sólidos suspendidos removidos en el sedimentador primario

$Q_{efluente}$ : Caudal del efluente del sedimentador primario

$$DBO_{efluente} = \frac{\left(739.79 \frac{kg}{día} - 333.91 \frac{kg}{día}\right) \times \frac{1000\ g}{1\ kg} \times \frac{1000\ mg}{1\ g}}{66.31 \frac{m^3\ agua\ residual}{día} \times \frac{1000\ L}{1\ m^3}} = 6121.10 \frac{mg}{L}$$

$$TSS_{efluente} = \frac{\left(416.50 \frac{kg}{día} - 365.19 \frac{kg}{día}\right) \times \frac{1000\ g}{1\ kg} \times \frac{1000\ mg}{1\ g}}{66.31 \frac{m^3\ agua\ residual}{día} \times \frac{1000\ L}{1\ m^3}} = 773.86 \frac{mg}{L}$$

i. Grasas y aceites removidos y del efluente

$$Grasas_{removidas} = Grasas_{influyente} \times \% \text{ Remoción de grasas en sedimentador}$$

$$Grasas_{efluente} = Grasas_{influyente} - Grasas_{removidas}$$

$Grasas_{removidas}$ : Concentración de grasas y aceites removida en sedimentador primario

$Grasas_{influyente}$ : Concentración de grasas y aceites del agua influente al sedimentador primario. La cantidad de grasas y aceites que ingresan al sedimentador corresponde a la cantidad que sale de la segunda trampa de grasas, valor determinado como 76.07 mg/L.

*% Remoción de grasas en sedimentador*: Porcentaje de remoción de grasas en sedimentador primario. En prueba de jarras se obtuvo que luego de aplicar coagulante, floculante y dejar sedimentar, se obtenía una disminución de 73% de grasas y aceites.

$Grasas_{efluente}$ : Concentración de grasas y aceites en el efluente del sedimentador primario

$$Grasas_{removidas} = \left(76.07 \frac{mg}{L}\right) \times (73\%) = 55.31 \frac{mg}{L}$$

$$\text{Grasas}_{\text{efluente}} = \left(76.07 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) - \left(55.31 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) = 20.76 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

j. Longitud de vertedero. Para determinar la longitud del vertedero se toma en cuenta que la carga del vertedero es entre 0.10 y 0.25 m<sup>3</sup>/min/m, con un promedio de 0.175 (Hendricks: 180). Con esto se tiene que la longitud es:

$$L_{\text{vertedero}} = \frac{Q_{\text{efluente}}}{Q_{\text{vertedero}}}$$

Donde,

$L_{\text{vertedero}}$ : Longitud del vertedero

$Q_{\text{efluente}}$ : Caudal de agua residual efluente que sale del vertedero

$Q_{\text{vertedero}}$ : Carga del vertedero

$$L_{\text{vertedero}} = \frac{2.76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{0.175 \frac{\text{m}^3}{\text{min} \cdot \text{m}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}}} = 0.29 \text{ m}$$

Se toma el alto del vertedero igual a la longitud de este.

k. Diseño de pantalla difusora. De acuerdo a los criterios de diseño mostrados en el inciso “4. Tanques de sedimentación” de la sección “D. Parámetros de diseño” en esta sección de Apéndice, se toma una velocidad de paso entre los orificios,  $v_o$ , de 0.05 m/s, y se determina el área total de los orificios a partir de la siguiente ecuación:

$$A_o = \frac{Q}{v_o}$$

Donde,

$A_o$ : Área total de los orificios

$Q$ : Caudal influente del sedimentador (efluente del tanque de floculación)

$v_o$ : Velocidad de paso entre los orificios

A partir de esto se determina que el área total de los orificios de la pantalla difusora es de:

$$A_o = \frac{3.09 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0.05 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.017 \text{ m}^2 = 171.84 \text{ cm}^2$$

Se adopta un diámetro de orificio,  $d_o$ , de 5 cm. Entonces se determina el área de cada orificio:

$$a_o = \pi \frac{d_o^2}{4}$$

Donde,

$a_o$ : Área de cada orificio

$d_o$ : Diámetro de orificio

Lo que da un área de los orificios de diseño de:

$$a_o = \pi \frac{(5\text{cm})^2}{4} = 19.63 \text{ cm}^2$$

Se determina el número de orificios,  $n$ , a partir de las áreas calculadas anteriormente:

$$n = \frac{A_o}{a_o} = \frac{171.84 \text{ cm}^2}{19.63 \text{ cm}^2} = 8.75 \approx 9 \text{ orificios}$$

Dado que la pantalla difusora debe tener orificios desde 1/5 bajo la parte superior del área de sedimentación hasta 1/5 arriba de la parte inferior del área de sedimentación, la porción de altura de la pantalla difusora que debe tener orificios se determina a partir de:

$$h_{\text{zona de orificios}} = h_{\text{agua}} - \frac{2}{5} h_{\text{agua}}$$

Donde,

$h_{\text{zona de orificios}}$ : Altura de la pantalla difusora que debe tener orificios

$h_{\text{agua}}$ : Altura del agua en el tanque de sedimentación o altura en la zona de clarificación. Se toma esta altura ya que se colocará la pantalla difusora del nivel del agua al inicio de la zona de lodos para evitar acumulación de lodos en ella.

Por lo que la altura de la pantalla difusora con orificios es:

$$h_{\text{zona de orificios}} = 1.50 \text{ m} - \frac{2}{5} (1.50 \text{ m}) = 0.90 \text{ m}$$

Assumiendo un número de filas de orificios,  $n_f$ , de 3, se tiene que el número de columnas,  $n_c$ , es:

$$n_c = \frac{n}{n_f} = \frac{9 \text{ orificios}}{3 \text{ filas}} = 3 \text{ columnas}$$

La longitud de espaciamento entre filas,  $z_1$ , está determinado por:

$$z_1 = \frac{h_{\text{zona de orificios}}}{n_f - 1} = \frac{0.90 \text{ m}}{3 \text{ filas} - 1} = 0.45 \text{ m}$$

La longitud de espaciamento entre columnas,  $z_2$ , de la pantalla difusora está dado por:

$$z_2 = \frac{w}{n_c + 1} = \frac{0.59 \text{ m}}{3 \text{ columnas} + 1} = 0.15 \text{ m}$$

7. Sistema biológico de lodos activados. De los cálculos anteriores del sedimentador primario se tiene que las características del flujo de ingreso al tratamiento biológico son:

$$Q = 2.76 \frac{\text{m}^3 \text{ agua residual}}{h}$$

$$DBO_{\text{influyente}} = S_0 = 6121.10 \frac{\text{mg}}{L}$$

$$TSS_{\text{influyente}} = 773.86 \frac{\text{mg}}{L}$$

a. DBO del efluente del tratamiento biológico. La DBO del efluente puede calcularse por la siguiente ecuación, la cual representa la diferencia entre la DBO total del efluente y la DBO de los sólidos suspendidos del mismo, suponiendo que 63% de los SS del efluente son biodegradables y que la relación entre la DBO5 y la DBO última carbonácea es igual a 0.67 (Romero: 453).

$$S_e = DBO_e - (0.63)(0.67)(1.42 TSS_e)$$

Donde,

$S_e$ : DBO del efluente del tratamiento biológico

$DBO_e$ : DBO deseado del efluente del tratamiento biológico

$TSS_e$ : Sólidos suspendidos deseados del efluente del tratamiento biológico

Esta ecuación sirve para corregir la DBO total del efluente por la contribución de la DBO de los sólidos suspendidos que se escapan del sedimentador.

$$S_e = 100 \frac{mg}{L} - (0.63)(0.67) \left( 1.42 \times 100 \frac{mg}{L} \right) = 40.06 \frac{mg}{L}$$

b. Volumen de agua en el reactor o tanque de aireación

$$V_{agua} = \frac{\theta_c Q Y (S_0 - S_e)}{MLVSS(1 + k_d \theta_c)}$$

Donde,

$V_{agua}$ : Volumen de agua en el reactor

$\theta_c$ : Tiempo de retención del reactor, 10 días (Romero: 451)

$Q$ : Caudal del influente del tanque de aireación

$Y$ : Coeficiente de producción de crecimiento o relación de la masa de células formadas a la masa de sustrato consumido, 0.6 mg VSS/mg DBO (Romero: 454)

$S_0$ : DBO del influente del tratamiento biológico

$S_e$ : DBO del efluente del tratamiento biológico

$MLVSS$ : Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor, 2400 mg/L (Romero: 451)

$k_d$ : Coeficiente de declinación endógena, 0.06 d<sup>-1</sup> (Romero: 454)

$$V_{agua} = \frac{(10 \text{ días}) \left( 2.76 \frac{m^3}{h} \times \frac{24 h}{1 \text{ día}} \right) (0.6) \left( 6121.10 \frac{mg}{L} - 40.06 \frac{mg}{L} \right)}{2400 \frac{mg}{L} \left( 1 + \left( \frac{0.06}{\text{día}} \times 10 \text{ días} \right) \right)} = 630.03 m^3$$

c. Dimensiones del tanque de aireación. Para este cálculo se utiliza una relación ancho-largo de 1:2, y la altura del tanque de aireación debe estar entre 3 y 9 m (Lin: 368). En este caso se toma una altura del agua de 5 m. Dado que el volumen obtenido en el cálculo anterior es bastante grande, se realizarán tres tanques de aireación de 210.01 m<sup>3</sup> cada uno, con las siguientes dimensiones:

$$V_{agua} = w \times L \times h_{agua}$$

$$L = 2w$$

$$V_{agua} = w \times 2w \times h_{agua}$$

$$V_{agua} = 2h_{agua}w^2$$

$$w = \sqrt{\frac{V_{agua}}{2h_{agua}}} = \sqrt{\frac{210.01 m^3}{2(5.00 m)}} = 4.58 m$$

$$L = 2w = 2(4.58 \text{ m}) = 9.17 \text{ m}$$

La altura del agua se supuso de 5 m, y como se muestra en la Figura No. 7, se dejará una altura libre sobre la superficie del agua igual a la de la trampa de grasa para un diseño de flujo por rebalse en toda la planta. Por lo que se tiene que la altura total del tanque de aireación es:

$$h_{total} = h_{agua} + h_{sobre\ superficie\ agua} = 5.00 \text{ m} + 0.64 \text{ m} = 5.64 \text{ m}$$

d. Flujo de lodos de desecho del tratamiento biológico

$$\theta_c = \frac{(V_{agua})(MLVSS)}{(Q_{wa})(MLVSS) + (Q_e)(X_e)}$$

$$X_e = TSS_e \times \frac{VSS}{TSS}$$

$$\frac{VSS}{TSS} = 0.8$$

Donde,

$V_{agua}$ : Volumen de agua en el reactor

$\theta_c$ : Tiempo de retención del reactor, 10 días (Romero: 451)

$MLVSS$ : Concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor, 2400 mg/L (Romero: 451)

$Q_{wa}$ : Flujo de lodos de desecho del tratamiento biológico

$Q_e$ : Flujo del efluente tratado

$X_e$ : Sólidos suspendidos volátiles del efluente tratado

$TSS_e$ : Sólidos suspendidos totales del efluente tratado

$$10 \text{ días} = \frac{(544.90 \text{ m}^3) \left(2400 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{(Q_{wa}) \left(2400 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) + \left(2.76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}\right) \left(100 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 0.8\right)}$$

$$Q_{wa} = 60.79 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 2.53 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

De esto se tiene que el flujo másico de lodos de desecho es:

$$\dot{m}_{wa} = 2.53 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 1.05 \times 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2651.72 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

e. Flujo de retorno de lodos activados. Se toma como cantidad de sólidos suspendidos volátiles en el aireador 2400 mg/L (Romero: 451), y se toma la cantidad de sólidos suspendidos totales en los lodos de retorno como 9300 mg/L (Lin:635).

$$VSS_{\text{aireador}}(Q + Q_r) = VSS_{\text{lodos de retorno}} Q_r$$

$$VSS_{\text{lodos de retorno}} = TSS_{\text{lodos de retorno}} \times \frac{VSS}{TSS}$$

$$\frac{VSS}{TSS} = 0.8$$

Donde,

$VSS_{\text{aireador}}$ : Sólidos suspendidos volátiles en el aireador, 2400 mg/L (Romero: 451)

$Q$ : Caudal del influente del tanque de aireación

$Q_r$ : Caudal de lodos de retorno al tanque de aireación

$VSS_{\text{lodos de retorno}}$ : Sólidos suspendidos volátiles en los lodos de retorno

$TSS_{\text{lodos de retorno}}$ : Sólidos suspendidos totales en los lodos de retorno, 9300 mg/L (Lin: 635)

Despejando se obtiene:

$$Q_r = \frac{VSS_{\text{aireador}} Q}{VSS_{\text{lodos de retorno}} - VSS_{\text{aireador}}} = \frac{\left(2400 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) \left(2.76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}\right)}{\left(9300 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 0.8\right) - \left(2400 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)} = 31.58 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 1.32 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

De esto se tiene que el flujo másico de lodos de retorno es:

$$\dot{m}_r = 1.32 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 1.05 \times 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1377.28 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

f. Requerimiento teórico de oxígeno

$$\text{Masa teórica } O_2 = \frac{Q(S_0 - S_e)}{f} - 1.42P_x$$

$Q$ : Caudal del influente del tanque de aireación

$S_0$ : DBO del influente del tratamiento biológico

$S_e$ : DBO del efluente del tratamiento biológico

$f$ : Relación entre DBO<sub>5</sub> y DBO última carbonácea, 0.67 (Romero, 453)

$P_x$ : Incremento en la masa de sólidos suspendidos volátiles en el aireador

$$P_x = Y_{obs}Q(S_0 - S_e)$$

$Y_{obs}$ : Rendimiento observado de todo el sistema

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + k_d\theta_c}$$

$Y$ : Coeficiente de producción de crecimiento o relación de la masa de células formadas a la masa de sustrato consumido, 0.6 mg VSS/mg DBO (Romero: 454)

$\theta_c$ : Tiempo de retención del reactor, 10 días (Romero: 451)

$k_d$ : Coeficiente de declinación endógena, 0.06 d<sup>-1</sup>(Romero: 454)

$$Y_{obs} = \frac{0.6}{1 + \left(\frac{0.06}{\text{día}}\right)(10 \text{ días})} = 0.38$$

$$\begin{aligned} P_x &= (0.38) \left( 2.76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \right) \left( 6121.10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 40.06 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \left( \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) \left( \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \\ &= 151.21 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \end{aligned}$$

*Masa teórica O<sub>2</sub>*

$$\begin{aligned} &= \frac{\left( 2.76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \right) \left( 6121.10 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 40.06 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \left( \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) \left( \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right)}{0.67} \\ &- (1.42) \left( 151.21 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) = 387.11 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \end{aligned}$$

g. Aire real requerido. Se asume que la densidad del aire es 1.202 kg/m<sup>3</sup> y contiene 21% de oxígeno en peso. Se utiliza un factor de seguridad de 2 para determinar el volumen de aire para dimensionar los sopladores. (Lin: 641)

$$\text{Volumen teórico aire} = \frac{\text{Masa teórica } O_2}{1.202 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.21 \frac{\text{g } O_2}{\text{g aire}}}$$

$$\text{Volumen real aire} = \text{Volumen teórico aire} \times 2$$

$$\text{Volumen teórico aire} = \frac{387.11 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{1.202 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.21 \frac{\text{g } O_2}{\text{g aire}}} = 1533.59 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Volumen real aire} = 1533.59 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 2 = 3067.18 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 127.80 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

h. Flujo a sedimentador secundario

$$Q_{\text{influyente sedimentador secundario}} = Q_{\text{influyente tanque de aireación}} + Q_r$$

$$Q_{\text{influyente sedimentador secundario}} = 2.76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 1.32 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 4.08 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 97.88 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Se diseñará un sedimentador para cada aireador, es decir que se tendrán 3 sedimentadores, cada uno con un flujo de 1.36 m<sup>3</sup>/h o 32.63 m<sup>3</sup>/día.

$$\dot{m}_{\text{influyente sedimentador secundario}} = \dot{m}_{\text{influyente tanque de aireación}} + \dot{m}_r$$

El flujo másico del influente del tanque de aireación corresponde al flujo másico del efluente del sedimentador primario, el cual fue determinado en el inciso g. de la sección “6. Sedimentador primario”, y es igual a 2738.30 kg/h. Por lo tanto, se tiene que el flujo másico del influente del sedimentador secundario es:

$$\dot{m}_{\text{influyente sedimentador secundario}} = 2738.30 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 1377.28 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 4115.57 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

i. Área y diámetro del sedimentador secundario

$$A = \frac{Q_{\text{influyente sedimentador secundario}} MLSS}{SF}$$

$$MLSS = MLVSS \times \frac{TSS}{VSS}$$

$$\frac{VSS}{TSS} = 0.8$$

Donde,

*A*: Área del sedimentador secundario

*Q<sub>influyente sedimentador secundario</sub>*: Caudal influente del sedimentador secundario

*MLSS*: Concentración de sólidos suspendidos en sedimentador secundario

*SF*: Flujo límite de sólidos, para una concentración de 9300 mg/L de sólidos suspendidos totales en los lodos de retorno, se tiene que este valor es 0.30 kg/m<sup>2</sup>-h (Lin: 644)

*MLVSS*: Sólidos suspendidos volátiles en sedimentador secundario, 2400 mg/L

$$A = \frac{\left(1.36 \frac{m^3}{h}\right) \left(2400 \frac{mg}{L} \times \frac{1}{0.8}\right) \left(\frac{1 g}{1000 mg} \times \frac{1 kg}{1000 g}\right) \left(\frac{1000 L}{1 m^3}\right)}{0.30 \frac{kg}{m^2 \cdot h}} = 13.59 m^2$$

$$A = \pi \frac{D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(13.59 m^2)}{\pi}} = 4.16 m$$

j. Profundidad de la zona de engrosamiento del sedimentador. La profundidad total del sedimentador es la suma de las profundidades requeridas de la zona de agua clara, la zona de engrosamiento y la zona de almacenamiento de lodos.

Para estimar la zona de engrosamiento se asume que la masa de sólidos retenidos en el sedimentador secundario es 30% de la masa de sólidos en el tanque de aireación, y que la concentración promedio de sólidos en la zona de lodos es 7000 mg/L (Lin: 646).

En el sistema se tienen tres tanques de aireación y tres sedimentadores secundarios.

La masa total de sólidos en cada tanque de aireación es:

$$m_{\text{sólidos tanque de aireación}} = MLSS \times w \times L \times h$$

$m_{\text{sólidos tanque de aireación}}$

$$\begin{aligned} &= \left(2400 \frac{mg}{L} \times \frac{1}{0.8} \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1 g}{1000 mg} \times \frac{1 kg}{1000 g}\right) \times 4.58 m \times 9.17 m \times 5.00 m \\ &= 630.03 kg \end{aligned}$$

La masa de sólidos en el sedimentador secundario es:

$$\begin{aligned} m_{\text{sólidos en sedimentador}} &= m_{\text{sólidos tanque de aireación}} \times \frac{3 \text{ tanques aireación}}{3 \text{ sedimentadores}} \times 30\% = 630.03 kg \times 0.3 \\ &= 189.01 kg \end{aligned}$$

De esto se tiene que la profundidad de la zona de engrosamiento es:

$$\begin{aligned}
 h_{\text{zona engrosamiento}} &= \frac{m_{\text{sólidos en sedimentador}}}{A \times \text{Concentración sólidos en la zona de lodos}} \\
 &= \frac{189.01 \text{ kg}}{(13.59 \text{ m}^2) \left( 7000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right)} = 1.99 \text{ m}
 \end{aligned}$$

k. Profundidad de la zona de lodos. Esta zona debe diseñarse para el almacenamiento del exceso de sólidos en un período de tiempo en el que no se puede manejar la cantidad de lodos. Se asume una capacidad de almacenamiento para un día.

$$m_{\text{sólidos almacenamiento}} = P_x \times \text{días de capacidad almacenamiento} \times \frac{TSS}{VSS}$$

$$\frac{VSS}{TSS} = 0.8$$

El valor de  $P_x$  fue determinado previamente en el inciso f. como 151.21 kg/día. Como se asume una capacidad de almacenamiento de lodos para un día se tiene:

$$m_{\text{sólidos almacenamiento sedimentadores}} = 151.21 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \times 1 \text{ día} \times \frac{1}{0.8} = 189.01 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la masa de sólidos almacenados por sedimentador es:

$$m_{\text{sólidos almacenamiento por sedimentador}} = \frac{189.01 \text{ kg}}{3 \text{ sedimentadores}} = 63.00 \text{ kg}$$

Los sólidos totales en cada sedimentador son:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{sólidos totales}} &= m_{\text{sólidos en sedimentador}} + m_{\text{sólidos almacenamiento por sedimentador}} \\
 &= 189.01 \text{ kg} + 63.00 \text{ kg} = 252.01 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{\text{zona lodos}} &= \frac{m_{\text{sólidos totales}}}{A \times \text{Concentración sólidos en la zona de lodos}} \\
 &= \frac{252.01 \text{ kg}}{(13.59 \text{ m}^2) \left( 7000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right)} = 2.65 \text{ m}
 \end{aligned}$$

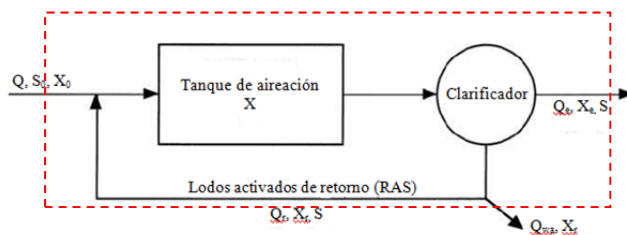
l. Profundidad total del sedimentador

$$h_{\text{sedimentador}} = h_{\text{zona engrosamiento}} + h_{\text{zona lodos}} + h_{\text{zona agua clara}} + h_{\text{sobre superficie agua}}$$

La zona de agua clara es comúnmente entre 1.5 y 2 m (Lin: 647), y sabiendo del diagrama de flujo, que la altura de la zona libre sobre la superficie es igual a la determinada para la trampa de grasas de 0.64 m:

$$h_{\text{sedimentador}} = 1.99 \text{ m} + 2.65 \text{ m} + 1.50 \text{ m} + 0.64 \text{ m} = 6.77 \text{ m}$$

m. Flujo del efluente de agua tratada. Haciendo un balance de los flujos en todo el sistema de tratamiento biológico:



$$Q_e = Q - Q_{wa} = 2.76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 2.53 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0.23 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Haciendo nuevamente un balance y tomando como flujo másico de entrada al sistema biológico, el flujo de salida del sedimentador primario de 2738.30 kg/h:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_{\text{efluente sedimentador primario}} - \dot{m}_{wa} = 2738.30 \frac{\text{kg}}{\text{h}} - 2651.72 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 86.57 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

n. Cantidad de grasas y aceites en el efluente del tratamiento biológico. Aunque las grasas no son degradadas por el tratamiento biológico, se supuso que por la sedimentación de lodos que se da en el sedimentador secundario, se obtenía la misma remoción que en la sedimentación primaria de 73%. Las grasas y aceites que ingresan al tratamiento biológico corresponden a las de salida del sedimentador primario, cuyo valor es de 20.76 mg/L como se muestra en la Tabla No. 17. Con esto se tiene que el efluente de la planta de tratamiento tiene un contenido de grasas y aceites de:

$$\text{Grasas}_{\text{efluente}} = \text{Grasas}_{\text{influyente}} - (\text{Grasas}_{\text{influyente}} \times \% \text{ de remoción en tratamiento})$$

$$\text{Grasas}_{\text{efluente}} = 20.76 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - \left( 20.76 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 0.73 \right) = 5.66 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

8. Cálculo para determinación de tamaño de tubería. Para la determinación del diámetro de tubería se utilizó la velocidad típica de líquidos no viscosos, la cual es de 1 a 3 m/s. (Towler, Sinnott: 265). Sabiendo el flujo de agua en cada tubería se determinó el diámetro.

$$d_{tubería} = \frac{Q}{\bar{v}}$$

Donde,

$d_{tubería}$ : Diámetro de tubería

$Q$ : Caudal del flujo en la tubería

$\bar{v}$ : Velocidad lineal del fluido

Haciendo como ejemplo, el diámetro de tubería para el flujo de salida de la trampa de grasas 1 se tiene:

$$A_{tubería} = \frac{3.03 \frac{m^3}{h} \times \frac{1 h}{3600 s}}{1 \frac{m}{s}} = 0.00084 m^2$$

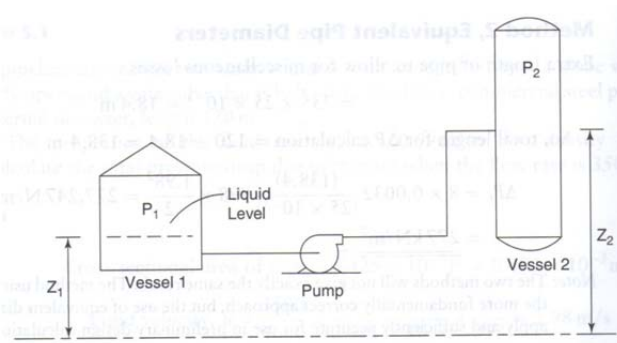
$$d_{interno tubería} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(0.00084 m^2)}{\pi}} = 0.033 m = 1.29 in \approx 1.5 in = 38.10 mm$$

Se realizó el mismo cálculo para todas las tuberías.

9. Cálculo de bombas. Para realizar el cálculo de bombas es necesario determinar la cabeza estática y la cabeza dinámica que debe ser capaz la bomba de vencer para el transporte del fluido.

Para el sistema mostrado en la siguiente figura se determinará la cabeza total.

Figura No. 17: Sistema de bombeo



(Towler, Sinnott: 252)

a. Cabeza estática

$$\Delta z = z_2 - z_1$$

$$\Delta P = P_2 - P_1$$

$$\text{Cabeza estática} = \Delta z + \Delta P$$

b. Cabeza dinámica. Se determina primero la cabeza que se debe vencer por la fricción generada entre el fluido y la superficie de la tubería.

$$\Delta P_{\text{tubería}} = 8f \frac{L}{d_{\text{interno tubería}}} \frac{\rho u^2}{2}$$

Donde,

$\Delta P_{\text{tubería}}$ : Caída de presión o cabeza a vencer en tubería por la fricción de la superficie

$f$ : Factor de fricción

$L$ : Longitud de tubería

$d_{\text{interno tubería}}$ : Diámetro interno de tubería

$\rho$ : Densidad del fluido

$u$ : Velocidad del fluido

Para determinar el factor de fricción es necesario calcular previamente el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho d_{\text{interno tubería}} u}{\mu}$$

Donde,

$Re$ : Número de Reynolds

$\mu$ : Viscosidad del fluido

También se debe determinar la cabeza que se debe vencer por el paso del fluido a través de accesorios como válvulas, uniones, codos, entre otros.

$$\Delta P_{\text{accesorios}} = \frac{u^2}{2g} K_T$$

Donde,

$\Delta P_{\text{accesorios}}$ : Caída de presión o cabeza a vencer en tubería por accesorios

$g$ : Fuerza gravitacional  $9.81 \text{ m/s}^2$

$K_T$ : Sumatoria de los números de cabezas de velocidad  $K$  para todos los accesorios en la tubería

$$\text{Cabeza dinámica} = \Delta P_{\text{tubería}} + \Delta P_{\text{accesorios}}$$

c. Cabeza total. La cabeza total que debe ser capaz de vencer la bomba es:

$$\text{Cabeza total} = \text{Cabeza estática} + \text{Cabeza dinámica}$$

Haciendo como ejemplo el cálculo de la bomba para transportar el fluido del tanque de homogenización a la trampa de grasas 1 se tiene (Referirse a Tabla No. 4):

La diferencia de altura es aproximadamente la altura del tanque, ya que la tubería se colocará cerca del fondo. Dado que no hay diferencia de presión apreciable se tiene que

$$\Delta z = 3.49 \text{ m} = \text{Cabeza estática}$$

$$Re = \frac{\rho d_{\text{interno tubería}} u}{\mu} = \frac{\left(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(50.80 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right) \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{0.00089 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 56907.42$$

Para la determinación del factor de fricción se sabe que la rugosidad absoluta  $k$ , de tuberías de PVC es  $0.00084 \text{ in}$  (Lin: 242), con lo que se debe determinar la rugosidad relativa para obtener el factor de fricción den la gráfica del factor de fricción.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{k}{D} = \frac{0.00084 \text{ in}}{2 \text{ in}} = 0.00042$$

En la gráfica del factor de fricción para tuberías circulares se determinó que:

$$f = 0.0060$$

$$\Delta P_{\text{tubería}} = 8(0.0060) \frac{3.49 \text{ m} + 0.50 \text{ m}}{2 \text{ in} \times \frac{1 \text{ m}}{39.37 \text{ in}}} \frac{\left(997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 1880.77 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P_{tubería} = \frac{1880.77 \frac{N}{m^2}}{\left(997 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} = 0.19 m$$

Dado que únicamente se cuenta con un codo recto, el valor de  $K_T$  es el correspondiente a este accesorio, que es 1.5.

$$\Delta P_{accesorios} = \frac{\left(1 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} (1.5) = 0.08 m$$

$$Cabeza\ dinámica = 0.19 m + 0.08 m = 0.27 m$$

$$Cabeza\ total = 3.49 m + 0.27 m = 3.76 m$$

Se realizó el mismo cálculo para todas las bombas requeridas de la planta.

10. Cálculo de soplador de aire para tanque de aireación en tratamiento biológico. Para poder dimensionar un soplador se debe determinar el flujo de aire requerido y la presión que el aire debe tener.

El flujo de aire se determinó en el cálculo No. 7 de la sección “G. Sistema biológico de lodos activados”, el cual es de 122.05 m<sup>3</sup>/h o 71.84 cfm.

La presión con la que debe ingresar el aire al tanque de aireación debe por lo menos corresponder a la suma de la presión atmosférica y la presión de la columna de agua por la que debe pasar (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente). Así se tiene que para la planta se debe obtener aire con una presión de:

$$P_{aire} = P_{atm} + P_{hidrostática\ de\ columna\ de\ agua}$$

$$P_{aire} = 101.325 kPa + \left(5.00 m H_2O \times \frac{100 cm}{1 m} \times \frac{0.09806 kPa}{100 cm H_2O}\right) = 150.36 kPa = 1.50 bar$$

A partir de estos datos se puede cotizar y dimensionar el equipo necesario.

## 11. Cálculos realizados en análisis económico

a. Cálculo de la inversión. Para determinar la inversión total que se debe hacer para la construcción de la planta, se toman los factores sugeridos en el Manual del Ingeniero Químico para determinar ciertos valores de inversión a partir de la inversión en equipo. Estos valores son: (Perry: 9-70)

Tabla No. 44: Porcentajes para determinación de inversión

	<b>Porcentaje de inversión en equipo</b>
Instalación	76%
Tuberías	30%
Contingencias	36%
Supervisión de ingenieros	41%

A partir del valor de inversión en equipo mostrado en la Tabla no. 25 como Q695,154.06, se tiene que la inversión total de la planta es:

Tabla No. 45: Inversión total en planta

	<b>Inversión</b>
Equipo	Q695,154.06
Instalación	Q528,317.09
Tuberías	Q208,546.22
Contingencias	Q250,255.46
<b>TOTAL</b>	<b>Q1,682,272.83</b>

b. Cálculo de depreciación por método SMARC. Para la depreciación de equipo se toma un período de 10 años. Dado que es método SMARC las tasas de interés pueden variar entre años. De acuerdo a la tasa de interés se determina la cantidad de dinero que se deprecia anualmente y el valor en libros del equipo (Calderón: 20)

$$\text{Depreciación anual}_{\text{año } n} = \text{Valor en libros equipo}_{\text{año } 0} \times \text{tasa de interés SMARC}_{\text{año } n}$$

$$\text{Valor en libros equipo}_{\text{año } n} = \text{Valor en libros equipo}_{\text{año } n-1} - \text{Depreciación anual}_{\text{año } n}$$

Así, se determinó que la depreciación anual del equipo del proyecto es:

Tabla No. 46: Depreciación anual de equipo

<b>Año</b>	<b>Tasa</b>	<b>Depreciación</b>	<b>Valor en libros</b>
0			Q695,154.06
1	0.1	Q69,515.41	Q625,638.65
2	0.18	Q125,127.73	Q500,510.92
3	0.144	Q100,102.18	Q400,408.74
4	0.1152	Q80,081.75	Q320,326.99
5	0.0922	Q64,093.20	Q256,233.79
6	0.0737	Q51,232.85	Q205,000.93
7	0.0655	Q45,532.59	Q159,468.34
8	0.0655	Q45,532.59	Q113,935.75
9	0.0655	Q45,532.59	Q68,403.16
10	0.0655	Q45,532.59	Q22,870.57
11	0.0328	Q22,801.05	Q69.52

c. Planilla de sueldos a operadores de planta. Para calcular la planilla de trabajadores de la planta se tomó como base el sueldo mínimo del año en curso, y la bonificación por decreto de acuerdo a la legislación nacional.

Se determinó la cantidad que se debe descontar al empleado para pago de servicios al Instituto Guatemalteco de Seguridad Social IGSS como el 4.83% del salario base, el cual es el salario mínimo menos la bonificación por decreto. Con esto se determinó el sueldo líquido a pagar a un empleado. Los resultados son:

Tabla No. 47: Sueldo a pagar por empleado

	<b>Valor</b>
Sueldo mínimo	Q2,161.00
Bonificación	Q250.00
Salario base	Q1,911.00
IGSS	Q92.30
Sueldo líquido a pagar al empleado	Q2,068.70

Dado que es una planta que no se está construyendo automatizada, se estima que el número de operadores necesarios son 3. Con base en la producción continua de 24 horas de lunes a sábado, se deben organizar los turnos de los operadores.

La jornada de trabajo para horario diurno es de 8 horas y para nocturno es de 6 horas. Para trabajar más horas de las anteriormente indicadas se deberá pagar horas extraordinarias. Con esto se determinó que lo más conveniente para poder operar la planta las 24 horas la planta evitando el pago de

horas extras que resultaría más costoso para la empresa, se debían organizar 3 turnos por día. Además, de acuerdo a la ley se sabe que no se pueden trabajar en total de horas a la semana más de 44 horas para jornada diurna y más de 36 para jornada nocturna. Así, se organizaron los siguientes turnos:

Tabla No. 48: Descripción de horarios de operadores

<b>Horario</b>	<b>Horas de trabajo por día</b>	<b>Horas de trabajo de lunes a viernes</b>	<b>Máximo permisible horas semanales de trabajo</b>	<b>Horas para sábado</b>
7:00 am - 4:00 pm	8	40	44	4
5:00 pm - 11:00 pm	6	30	36	6
12:00 am - 6:00 am	6	30	36	6

Como se puede observar en la anterior tabla, para trabajar el día sábado únicamente sobran 4 horas para cada operador en jornada diurna, mientras que los operadores en jornada nocturna todavía pueden cubrir su turno de 6 horas en este día. Para organizar a los operadores de la jornada diurna se puede pensar en distribuir a los tres operadores de modo que haya momentos en que la planta tenga únicamente un operador pero nunca se quede sola. Por ejemplo, un operador podría trabajar de 7:00 am a 11:00 am, otro operador podría trabajar de 9:00 am a 1:00 pm, y el tercer operador podría estar de 12:00 pm a 4:00 pm.

De lo anterior se puede determinar que se necesitan 9 empleados para cumplir con los 3 puestos requeridos en los 3 turnos de trabajo. Con esto se tiene que el costo de salarios para la operación de la planta es:

Tabla No. 49: Costo total anual de salarios de operadores

	<b>Valor</b>
Total salario base empleados	Q17,199.00
Total bonificación empleados	Q2,250.00
IRTRA	Q171.99
Aguinaldo	Q1,432.68
Bono 14	Q1,432.68
Indemnización	Q1,432.68
Vacaciones	Q717.20
IGSS	Q1,835.13
INTECAP	Q171.99
<b>TOTAL SUELDOS A PAGAR POR MES</b>	<b>Q26,643.34</b>
<b>TOTAL SUELDOS A PAGAR POR AÑO</b>	<b>Q319,720.10</b>

Para la determinación de lo anterior se utilizaron los siguientes porcentajes:

Tabla No. 50: Porcentajes sobre salario base para determinación de prestaciones laborales

	<b>Porcentaje sobre salario base</b>
IRTRA	1%
Aguinaldo	8.33%
Bono 14	8.33%
Indemnización	8.33%
Vacaciones	4.17%
IGSS	10.67%
INTECAP	1%

d. Costo anual de mantenimiento de equipo. El costo anual de mantenimiento de equipo corresponde al 5% de la inversión total de la planta (Towler, Sinnott: 303). De modo que se tiene para la planta:

$$\text{Costo mantenimiento} = \text{Inversión total} \times 5\%$$

$$\text{Costo mantenimiento} = Q1,682,272.83 \times 5\% = Q84,113.64$$

e. Costo de químicos empleados en operación de la planta. Como se especificó anteriormente, se operarán 6 días a la semana. Dado que el año tiene 52 semanas, se espera operación de la planta de 312 días por año. Con esto se determinó que las cantidades de químicos utilizados son:

Tabla No. 51: Costo anual de químicos utilizados

	<b>Coagulante</b>	<b>Floculante</b>	<b>Ácido sulfúrico</b>
Cantidad de químico utilizado (kg/h)	0.30	0.15	1.32
Cantidad de químico utilizado (kg/día)	7.27	3.65	31.59
Cantidad de químico utilizado (kg/año)	2269.13	1139.10	9856.08
Costo químico (Q/kg)	Q11.50	Q72.00	Q3.75
Costo anual	Q26,095.02	Q82,015.51	Q36,960.30
<b>TOTAL COSTO QUÍMICOS POR AÑO</b>	<b>Q145,070.83</b>		

f. Costo de operación anual total. El costo total de operación se determina sumando el costo anual de sueldos, el costo de mantenimiento de equipo y el costo de químicos. Con esto se obtiene:

Tabla No. 52: Costos de operación anual

	<b>Costo anual</b>
Sueldos	Q319,720.10
Mantenimiento	Q84,113.64
Químicos	Q145,070.83
<b>TOTAL</b>	<b>Q548,904.57</b>

g. Flujo de caja. La construcción de los flujos de caja puede basarse en una estructura general que se aplica a cualquier finalidad del estudio de proyectos. Para un proyecto que busca medir la rentabilidad de la inversión el ordenamiento es: (Sapag: 294)

+Ingresos afectos a impuestos
-Egresos afectos a impuestos
-Gastos no desembolsables
<hr/>
= Utilidad antes de impuesto
-Impuesto
<hr/>
=Utilidad después de impuesto
+Ajustes por gastos no desembolsables
-Egresos no afectos a impuestos
<hr/>
=Flujo de caja

Ingresos y egresos afectos a impuesto son todos aquellos que aumentan o disminuyen la utilidad contable de la empresa (Sapag: 294). En el caso del proyecto el ingreso serían ventas en el producto de la empresa y egresos serían los gastos anuales por operación de la planta de tratamiento de aguas.

Gastos no desembolsables son los gastos que para fines de tributación son deducibles, pero que no ocasionan salidas de caja, como la depreciación. Por no ser salidas de caja se restan primero para aprovechar su descuento tributario, y se suman en el ítem de “Ajuste por gastos no desembolsables”, con lo cual se incluye sólo su efecto tributario. (Sapag: 294)

Egresos no afectos a impuestos son las inversiones, ya que no aumentan ni disminuyen la riqueza contable de la empresa por el solo hecho de adquirirlos. (Sapag: 294)

Un criterio de evaluación de proyectos lo constituye la determinación del Valor Actual Neto (VAN). Este criterio plantea que el proyecto debe aceptarse si su VAN es igual o superior a cero, donde el VAN es la diferencia entre todos sus ingresos y egresos expresados en moneda actual, es decir que el VAN es calculado sobre todos los flujos de caja del período de evaluación. Dado que este proyecto no tiene ingresos directos por productos, se determinó la cantidad monetaria en que se deben incrementar

anualmente los ingresos para que el VAN del proyecto sea 0 y por lo tanto se recupere su inversión durante el período de análisis.

En una hoja de cálculo de Excel se realizó el flujo de caja con un ingreso igual a 0, y se calculó el VAN con la función “VNA” en dicho programa. Para esta función se debe ingresar una tasa con cuyo valor se traslada el valor del dinero del futuro al tiempo presente para todos los períodos de evaluación. La tasa utilizada de 5.5% se obtuvo del Banco de Guatemala, la cual es la tasa de interés líder que está definida como la que más influencia ejerce sobre el comportamiento de la inflación. Dado que únicamente se tenían egresos colocando un ingreso igual a 0 en el flujo de caja, se obtenía un VAN negativo. Para determinar el valor de ingreso que hacía que el Valor Actual Neto fuera 0 se utilizó la función de Excel de “Análisis Y si” para búsqueda de un objetivo. Se definió que la celda del VAN fuera igual a 0 cambiando la celda de Ingresos del flujo de caja, y de esta manera se obtuvo la cantidad en que se debía incrementar los ingresos de la empresa anualmente para que no hubiera pérdidas en el proyecto. Este valor determinado fue de Q840,759.56, como se muestra en la Tabla No. 24 de la sección de Resultados. Además, se calculó la Tasa Interna de Retorno, pero como el Valor Actual Neto se definió como 0, esta tasa resultó igual a la tasa con que se determinó el VAN, ya que la TIR se define como la tasa que hace que el VAN sea cero. La TIR representa otra forma de evaluar un proyecto y en el análisis mientras más alta sea la TIR será mejor el proyecto.

## D. Parámetros de diseño

### 1. Tanques agitados

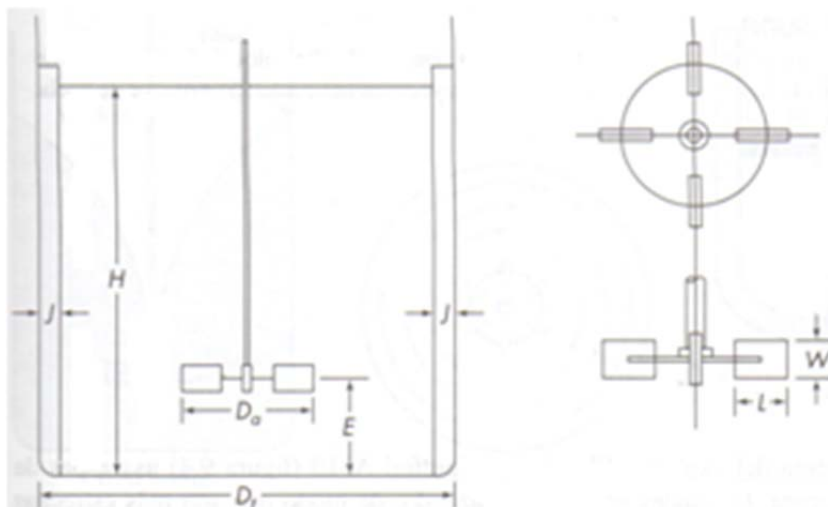


Tabla No. 53: Parámetros de diseño para tanques agitados

Parámetro	Valor
$\frac{D_a}{D_t}$	$\frac{1}{3}$
$\frac{H}{D_t}$	1
$\frac{J}{D_t}$	$\frac{1}{12}$
$\frac{E}{D_t}$	$\frac{1}{3}$
$\frac{W}{D_a}$	$\frac{1}{5}$
$\frac{L}{D_a}$	$\frac{1}{4}$

## 2. Trampas de grasa

Tabla No. 54: Parámetros de diseño para trampas de grasa

Parámetro	Valor
Tiempo de retención	25 min
$\frac{Largo}{Ancho}$	2
Altura del agua	2/3 de la altura total de la trampa
Altura sobre superficie del agua	1/3 de la altura total de la trampa

## 3. Coagulación y floculación

Tabla No. 55: Parámetros de diseño para tanques de coagulación y floculación

Parámetro	Valor para coagulación	Valor para floculación
Tiempo de retención	1 min	20 min
Tipo de agitador	Impulsor Rushton de 6 paletas	Impulsor de 4 paletas planas
Frecuencia de agitación	100 rpm	40 rpm

#### 4. Tanques de sedimentación

Tabla No. 56: Parámetros de diseño para tanques de sedimentación

Parámetro	Valor
Tiempo de retención	1-4 horas
$\frac{Largo}{Ancho}$	3-6
Altura de zona de sedimentación	1.5-2.5 m
Altura de zona de lodos	10% de la altura de la zona de sedimentación
Altura de pantalla difusora	Igual a altura de zona de sedimentación
Distancia entre entrada y pantalla difusora	0.7-1.0 m
Velocidad en los orificios de pantalla difusora	Menor a 0.15 m/s
Distancia de parte superior y parte inferior a orificios de pantalla difusora	1/5 de la altura de la pantalla difusora
Colocación de descarga de lodos	En el primer tercio de la unidad
Carga de vertedero	0.10 – 0.25 m <sup>3</sup> /min/m

#### 5. Sistema biológico de lodos activados

Tabla No. 57: Parámetros de diseño para sistema biológico de lodos activados

	Valor
Tiempo de retención	10 días
Relación de masa de células formadas a masa de sustrato consumido, $Y$	0.6 mg VSS/mg DBO
Sólidos suspendidos volátiles del tanque de aireación, $MLVSS$	2400 mg/L
Coefficiente de declinación endógena, $k_d$	0.06 d <sup>-1</sup>
Altura de agua en tanque de aireación	3 – 9 m
$\frac{Largo\ aireador}{Ancho\ aireador}$	$\frac{2}{1}$
Sólidos suspendidos totales de los lodos de retorno, $TSS_{lodos\ de\ retorno}$	9300 mg/L
$\frac{DBO}{DBO_u}$	0.67
Porcentaje de la masa de sólidos del tanque de aireación que se retienen en sedimentador secundario	30%
Concentración promedio de sólidos en la zona de lodos de sedimentador secundario	7000 mg/L
Altura de zona de agua clara de sedimentador secundario	1.5 – 2 m

## E. Hojas técnicas de coagulante y floculante



QUIMIPRODUCTOS

VÍA A MATAMOROS 540 COL. GARZA CANTÚ  
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N.L. C.P. 66480 MÉXICO  
TELS. 01 81 83066500 Nacional  
52 81 83066500 Internacional  
www.quimiproduktos.com.mx

## Boletín Técnico

### HIDROFLOC C Coagulante

#### • DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

HIDROFLOC C es una reciente innovación tecnológica producto de la investigación en el área de tratamiento de agua.

HIDROFLOC C es un polímero base polihidroxialuminato que en solución concentrada forma iones solvatados. Con el producto se obtiene un floculo de mayor peso y por lo tanto, hace más eficientes los equipos de tratamiento de agua (cal y cal-soda).

HIDROFLOC C se recomienda para el tratamiento de aguas potables, ya que es totalmente seguro en la eliminación de partículas orgánicas en suspensión, coloides, grasas, aceites, partículas metálicas, fosfatos y algunos gérmenes y microorganismos del agua.

La mayor ventaja del HIDROFLOC C es que presenta menores residuales de aluminio en el agua tratada que los que se obtienen con el uso del sulfato de aluminio, por lo tanto disminuye el riesgo de que se rebasen los niveles establecidos por la USEPA (United States Environmental Protection Agency) en el agua de bebidas.

#### • VENTAJAS SOBRESALIENTES

- Se tiene mayor control y estabilidad de la alcalinidad del agua.
- No se hidroliza formando ácido libre.

#### • INFORMACIÓN DEL PRODUCTO

Clasificación:	Coagulante
Apariencia:	Líquido.
Color:	Incoloro a Blanco
pH solución al 30 %:	3.8 - 4.4
% Sólidos:	40 - 55
Densidad a 25°C ± 1 °C(gr/cc):	1.1 - 1.4

Se recomienda una concentración máxima de operación de 0.3 %.

#### • APLICACIÓN

Dosificación: Para encontrar la dosificación óptima se recomienda que se corran pruebas de jarras con el agua del sistema.

Normalmente se utilizan de 20 a 40 ppm para procesos de suavización con cal y depende de la cantidad de sólidos en cada sistema.

#### • PRESENTACIÓN

- Pórron con 50 Kg
- Tambor con 200 Kg
- Tambor con 250 Kg

#### • PRECAUCIONES

Almacenaje: Se recomienda almacenar en lugares techados y libres de humedad.

Preferentemente utilizar antes de 1 año.

Seguridad: Utilizar el equipo de seguridad como lentes y guantes de hule, para evitar el contacto con la piel, ojos y membranas mucosas.

En caso de contacto con los ojos lávese inmediatamente con suficiente agua durante 15 minutos y solicite atención médica.

En caso de contacto con la piel y membranas mucosas, lávese con suficiente agua.

EXCLUSIVAMENTE PARA USO INDUSTRIAL.

*La satisfacción del cliente es nuestro certificado de calidad. Más de 30 años de experiencia lo respaldan.*

NOTA: LOS DATOS AQUÍ CONTENIDOS SOLO SE REFIERE AL MATERIAL ESPECIFICADO. QUIMIPRODUCTOS, S.A. DE C.V. NO ASUME NINGUNA RESPONSABILIDAD POR LAS CONDICIONES DE USO O DE ALMACENAMIENTO NO ESPECIFICADAS.

COMERCIALIZADORA PTAR S.A.	<b>FICHA TECNICA</b>	EMISION: SEPTIEMBRE, 2011.
AUTORIZADO: ING. EPTO. TECNICO TEL. (502) 45656488	<b>POLÍMERO FLOCULANTE MAGNAFLOC A-CH10</b>	FECHA: 3 - OCTUBRE - 2011

### GENERALIDADES

MAGNAFLOC es un polímero floculante de característica aniónica y ultra alto peso molecular, presentado en polvo. Es un excelente floculante debido a la rapidez y formación de grandes flocs pesados.

Reduce uso de sales inorgánicas, eficiente a bajas dosis, muy soluble en agua.

### PERFIL DE CALIDAD

<b>DESCRIPCION</b>	Polímero de acrilamida altamente aniónico de alto peso molecular. Excelente floculante, debido a sus características actúa rápidamente, floculando y sedimentando.
<b>DOSIS A SER APLICADA EN PROCESO</b>	Dosis deben ser fijadas luego de realizar análisis de jarras, cilindros, etc.
<b>RECOMENDACIONES SOBRE LA APLICACIÓN</b>	Asegurarse que el polímero se disuelva correcta y totalmente en agua antes de ser utilizado en PTAR. Consulte al asesor.
<b>TIEMPO DE VIDA</b>	Se recomienda 2 años respetando las normas de almacenamiento.
<b>ALMACENAMIENTO</b>	Guarde en un lugar seco. Temperatura mayor a 20°C, con el recipiente tapado.
<b>PRESENTACION</b>	Saco 25 Kg. Libre de contaminación, olores extraños e impurezas visibles.
<b>NORMA DE CALIDAD</b>	Entrega de certificado de garantía en cada entrega. El producto no posee contaminación física, química ni biológica. El producto está libre de olores atípicos, libre de humedad.

COMERCIALIZADORA S.A. S.T.M.A	<b>FICHA TECNICA</b>	EMISION: SEPTIEMBRE, 2011
AUTORIZADO: ING. PTO. TECNICO L. (502) 45656488	<b>POLÍMERO FLOCULANTE MAGNAFLOC A-CF10</b>	FECHA: 3 - OCTUBRE - 2011

### PERFIL FISICOQUÍMICO

PRUEBA	ESPECIFICACION
Apariencia	Polvo blanco
pH al 0.25% a 25°C	5.50 – 7.00
Densidad a 25°C	0.6 – 0.7 g/ml
Peso molecular	Alto
Viscosidad 0.25% a 25 °C	150 – 250 cP