

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Diagnóstico del tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas  
y propuesta de mejora en una urbanización del cantón de Samborondón

### **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Christopher Sandy Jouvin Ortiz

María Alexandra Morales Carrión

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mis padres que fueron mi soporte de inicio a fin y el impulso necesario de cada día para no desfallecer en la carrera, al señor Eduardo González que fue mi sustento durante gran parte de mi vida. También a dos personas muy especiales que fueron parte de mi vida universitaria, y a mi grupo de amigos que hicieron que la instancia en la institución sea más llevadera.

### **Christopher Sandy Jouvin Ortiz**

El presente proyecto se lo dedico con todo mi amor y cariño a mi familia, principalmente a mi mami, hermanos y abuelita, por brindarme su apoyo y confiar siempre en mí. Me demostraron la importancia de los valores y el amor incondicional, lo que me han ayudado a mi crecimiento personal y profesional. Finalmente, a mis amigos por regalarme los mejores recuerdos de esta gran etapa de mi vida, los llevo en mi corazón.

### **María Alexandra Morales Carrión**



## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sincero agradecimiento a la Msc. Francesca Escala, nuestra tutora, por su paciencia y por guiarnos a través de sus conocimientos en este proyecto. A la Msc. Nadia Flores por orientarnos de la mejor manera en el desarrollo de la tesis, y al Ingeniero Cristhian Panta por facilitarnos la información necesaria para llevar a cabo la evaluación y diagnóstico del problema en cuestión.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Christopher Jouvin* y *María Alexandra Morales* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Christopher Jouvin



María Alexandra Morales

## EVALUADORES

---

**M.Sc. Nadia Flores**

PROFESOR DE LA MATERIA



---

**M.Sc. Francesca Escala**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El agua residual proveniente de los hogares presenta un alto nivel de contaminación. Esta agua debe ser depurada antes de ser utilizada en diferentes actividades o arrojada a algún cuerpo hídrico. Por tal motivo, son procesadas en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales donde se generan lodos o fangos como subproductos de los tratamientos biológicos. El mal manejo de estos lodos y su excesiva producción acarrearán problemas ambientales y económicos. Este proyecto se basa en una propuesta de diseño que incremente la eficiencia de remoción de contaminantes y origine un lucro para la empresa.

El proyecto se desarrolló en una planta de tratamiento ubicada en el Km 8.5 vía Samborondón, la misma que cuenta con una población de aproximadamente 1750 habitantes y opera bajo condiciones anaeróbicas. Mediante un estudio con base en investigación bibliográfica y diagnóstico de las condiciones operacionales y de infraestructura actuales de la planta; se determinó que los equipos se encontraban subdimensionados. Debido a que la limitación principal es el espacio donde se encuentra la planta, se procedió a rediseñar el sistema actual mediante la implementación de un tratamiento preliminar y el cambio de tratamiento biológico. Finalmente, se realizó un análisis económico para evaluar la rentabilidad.

La reingeniería del sistema se evaluó mediante una comparación de la inversión de capital inicial en contraste con los costos de evacuación y transporte de lodos anuales, en una proyección de 6 años. Esto generó un ahorro económico de \$ 8.942,24. Además, se estableció el incremento de la eficiencia de remoción de un 42% a un 89%.

El diseño es eficiente ya que mejora la calidad del agua de descarga, reduciendo el impacto ambiental. Por otro lado, es viable y rentable debido a que reduce los costos de mantenimiento y transporte, ocasionando que la empresa gane un beneficio.

**Palabras Clave:** Aguas Residuales, Lodo, Sistema, Tratamiento, Diseño.

## ***ABSTRACT***

Water from homes has a high level of contamination. This water must be purified before being used in different activities or thrown into a water body. For this reason, they are processed in Wastewater Treatment Plants where sludge or sludge is generated as by-products of biological treatments. The mismanagement of this sludge and its excessive production led to environmental and economic problems. This project is based on a design proposal that increases the efficiency of pollutant removal and generates a profit for the company.

The project was developed in a treatment plant located at Km 8.5 via Samborondón, which has a population of approximately 1750 inhabitants and operates under anaerobic conditions. Through a study based on bibliographic research and diagnosis of the current operational and infrastructure conditions of the plant; it was determined that the equipment was undersized. Because the main limitation is the space where the plant is located, the current system was redesigned by implementing a preliminary treatment and changing the biological treatment. Finally, an economic analysis was carried out to evaluate profitability.

The reengineering of the system was evaluated by comparing the initial capital investment against the costs of evacuation and transportation of annual sludge, in a projection of 6 years. This generated an economic saving of \$ 8,942.24. In addition, an increase in removal efficiency was established from 42% to 89%.

The design is efficient and improves the discharge water quality, reducing the environmental impact. On the other hand, it is viable and profitable because it reduces maintenance and transportation costs, causing the company to earn a profit.

***Keywords:*** *Wastewater, Sludge, System, Treatment, Design.*



# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	6
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
CAPÍTULO 1 .....	11
1    Introducción .....	11
1.1    Descripción del problema .....	11
1.2    Justificación del problema.....	12
1.3    Objetivos.....	14
1.3.1    Objetivo General .....	14
1.3.2    Objetivos Específicos .....	14
1.4    Marco teórico .....	14
1.4.1    Aguas residuales domésticas.....	14
1.4.2    Lodos .....	20
1.4.3    Sistemas Anaerobios .....	21
1.4.4    Crecimiento Bacteriano .....	24
1.4.5    Consideraciones generales de diseño de un sistema de tratamiento anaerobio.....	25
1.4.6    Filtro Anaerobio.....	25
1.4.7    Descripción del sistema .....	26

1.4.8	Sistema Séptico .....	30
CAPÍTULO 2.....		37
2	Metodología .....	37
2.1	Revisión bibliográfica.....	37
2.2	Diagnóstico .....	38
2.2.1	Diseño .....	38
2.2.2	Balance de Masa.....	41
2.2.3	Operación y Mantenimiento .....	42
2.3	Propuesta .....	45
2.3.1	Esquema .....	45
2.3.2	Volumen del tanque de aireación.....	46
2.3.3	Producción de lodos.....	47
2.3.4	Demanda de oxígeno .....	47
2.3.5	Flujo de aire .....	48
2.3.6	Rejillas de limpieza manual.....	49
2.3.7	Tamiz .....	51
2.3.8	Sedimentador Secundario.....	51
2.4	Análisis Económico.....	52
CAPÍTULO 3.....		53
3	Resultados Y ANALISIS DE RESULTADOS .....	53
3.1	Diagrama de flujo.....	54
3.2	Balance de materia.....	56
3.3	Diseño.....	58
3.4	Costos.....	60
3.4.1	CAPEX .....	60
3.4.2	OPEX .....	62

3.5	Comparación de Inversión Vs Costos.....	63
CAPÍTULO 4.....		65
4	Conclusiones Y Recomendaciones.....	65
4.1	Conclusiones .....	65
4.2	Recomendaciones .....	66
BIBLIOGRAFÍA.....		68
APÉNDICES .....		73
ANEXOS.....		95

## **ABREVIATURAS**

PTARD	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas
PA	Procesos Anaeróbicos
FAFA	Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
PFD	Diagrama de Flujo del Proceso
Afl	Afluente
Efl	Efluente
Mo	Materia orgánica.
NB	Norma Braseliña
CPISCA	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ciencias del Ambiente

## SIMBOLOGÍA

pH	Potencial de Hidrógeno
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
H <sub>2</sub>	Hidrógeno
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfhídrico
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
bDQO	Demanda Química de Oxígeno Biodegradable
rbDQO	Demanda Química de Oxígeno Fácilmente Biodegradable
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno Total de 5 días
SSVLM	Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor de Mezcla
SSLM	Sólidos Suspendidos en el Licor de Mezcla
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
SST	Sólidos Suspendidos Totales

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Etapas en el proceso de degradación anaerobia.....	23
Figura 1.2 Etapas en el proceso de degradación anaerobia.....	23
Figura 1.3 Esquema de un Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente .....	25
Figura 1.4 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas .....	29
Figura 1.5 Diagrama de un Sistema Séptico convencional .....	31
Figura 1.6 Tanque Séptico de dos cámaras .....	31
Figura 2.1 Etapas de la Metodología .....	37
Figura 2.2 Diagrama de flujo del digestor anaeróbico.....	41
Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas propuesto .....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Caudales comunes de las aguas residuales.....	16
Tabla 1.2 Contribución de desechos y carga orgánica. ....	17
Tabla 1.3 Características principales de las aguas residuales. ....	17
Tabla 1.4 Valores típicos de los factores característicos de las aguas residuales.....	19
Tabla 1.5 Ventajas y Desventajas de un Sistema Anaerobio. ....	22
Tabla 1.6 Tiempos de retención.....	34
Tabla 2.1 Dimensiones de los equipos medidos.....	37
Tabla 2.2 Frecuencia de actividades de mantenimiento de la PTARD .....	45
Tabla 3.1 Porcentaje de remoción de sólidos en los equipos.....	57
Tabla 3.2 Datos adicionales.....	57
Tabla 3.3 Hoja de cálculo del PFD.....	57
Tabla 3.4 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce. ....	58
Tabla 3.5 Valores de descarga de la planta al río.....	58
Tabla 3.6 Dimensiones de los equipos . ....	58
Tabla 3.7 Sistema de aireación.....	59
Tabla 3.8 Dimensiones de las rejillas.....	60
Tabla 3.9 Eficiencia de remoción. ....	60
Tabla 3.10 Costos Directos.....	61
Tabla 3.11 Costos Indirectos .....	61
Tabla 3.12 Cálculo de Inversión de Capital Fijo.....	62
Tabla 3.13 Costos Directos Operacionales.....	63
Tabla 3.14 Costos en diferentes años .....	63
Tabla 3.15 Análisis Comparativo de Ahorro.....	64





# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

La producción desmesurada y el mal manejo de los residuos sólidos en el tratamiento de aguas residuales acarrearán severos problemas en el ámbito ambiental, económico y de salud a nivel mundial. Debido al incremento exponencial de la población, se da un aumento de los residuos que, en los últimos tiempos, sobrepasan en cantidad, incluso a la población en cuestión (Sáez & Urdaneta G., 2014). En el tratamiento de aguas la estabilización y vertido de lodos es uno de los problemas de más difícil solución, considera variables ecológicas y económicas, que se han ido complicando progresivamente, esto está derivando en la búsqueda de procesos más eficientes para su tratamiento, disposición y reutilización (Metcalf & Eddy, 2003).

En Ecuador es necesario concientizar sobre la magnitud de los efectos ambientales en la evacuación de aguas residuales, así como el mejoramiento de los diferentes métodos de tratamiento aplicados. Las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas producen lodo como producto secundario de los distintos procesos físicos, químicos y biológicos, que se dan en la operación. Los lodos producidos deben ser tratados con el fin de reducir los grandes volúmenes que se originan, disminuyendo así, los riesgos de problemas ambientales y de salud. Un lodo “limpio”, que se ha sido estabilizado, puede ofrecer beneficios atractivos principalmente en la agricultura donde se puede usar como abono para el mejoramiento de los suelos (Solís, 2016).

La cobertura del servicio de alcantarillado en La Aurora y La Puntilla, parroquias urbanas satélites, es del 85%. Este porcentaje representa la cantidad de urbanizaciones que cuentan con una planta de tratamiento de agua doméstica. Las PTARD son administradas por una determinada empresa con alianza pública privada, la misma que opera, dirige, gestiona y amplía los servicios de abastecimiento y distribución de agua potable; además del procedimiento y mantenimiento de alcantarillado (Amagua C.E.M., 2016).

Actualmente, existe una acumulación excesiva de lodos en estas plantas, en ciertas etapas del proceso; lo que provoca impactos desfavorables tanto para las comunidades como para el medio ambiente. Se infiere que dicho problema es generado, debido al diseño del sistema de tratamiento de acuerdo con la dotación de agua, la forma en que se opera el sistema y la falta de mantenimiento constante; considerando estos factores como variables tentativas por evaluar.

## **1.2 Justificación del problema**

El presente estudio propone una alternativa que radica en la disminución del volumen excesivo de los lodos producidos en las plantas anaerobias de las ciudadelas de la parroquia satélite de Samborondón; sustentado mediante un diagnóstico que determine la incidencia de las variables supuestas, en el problema. Además, se toma en cuenta el impacto que genera en los costos, el impacto ambiental de las zonas aledañas y en la salud de sus moradores.

El efecto económico que genera esta problemática abarca la utilización inadecuada de los camiones hidrocleaners. Estos vehículos tienen la finalidad de eliminar los desechos presentes en pozos sépticos y sumideros mediante su succión. Además, se los utiliza para limpiar tuberías a través de un sistema de alta presión. Generalmente, poseen un tanque cilíndrico de distintas capacidades volumétricas de almacenamiento, dependiendo del trabajo a realizar o de la cantidad de habitantes a la que se le vaya a brindar el servicio (Calle & Padrón, 2020). La empresa distribuye el tiempo en el que se los emplea, entre el transporte de lodos y la limpieza de los alcantarillados, que impacta negativamente en el número de frecuencia de servicio, en los costos de mantenimiento y desgaste de las unidades de transporte mencionadas (Solis, 2016).

En el ámbito ambiental, la acumulación de lodos en los tanques provoca que su capacidad de captar agua residual se reduzca, aminorando los tiempos de retención necesarios para que dicha agua pueda ser tratada correctamente. Por otro lado, en la digestión anaeróbica se producen gases que promueven el efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ) que, en consecuencia, contribuyen de forma general a daños en el medio ambiente (López, 2015).

Tomando en cuenta las variables propuestas como causas y sus consecuencias, es fundamental presentar una propuesta de mejora que permita mitigar el problema principal; beneficiando a la comunidad, empresa prestadora del servicio y mejorando su relación con el medio ambiente.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Evaluar las condiciones actuales de un sistema de tratamiento anaeróbico de aguas residuales domésticas, mediante un análisis de los criterios de diseño para la propuesta de una alternativa a la reducción de lodos.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Proponer una alternativa en el diseño del sistema que permita un proceso óptimo en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la aplicación de un software de diseño y simulación.
- Establecer la cantidad de lodos acumulados durante el proceso a través de un balance de sólidos para la demostración de la eficiencia del diseño propuesto.
- Realizar una evaluación económica mediante la estimación de los gastos de capital, operativo y mantenimiento, para establecer la viabilidad del proyecto.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Aguas residuales domésticas**

Se considera que las aguas residuales domésticas es el agua potable que ha sido utilizada por una comunidad y que contiene todos los materiales agregados al agua durante su uso. Por lo tanto, están compuestas de desechos corporales humanos, como lo son las heces y orina, junto con el agua utilizada en descargas de inodoros y el agua residual resultante del lavado personal, lavandería, preparación de alimentos y limpieza de utensilios de cocina.

Las aguas residuales recién evacuadas son un líquido gris turbio que tiene un aspecto terroso y de olor parcialmente inofensivo. Contiene grandes sólidos flotantes y suspendidos como heces, trapos, recipientes de plástico, sólidos en suspensión más pequeños como heces parcialmente desintegradas, papel, piel vegetal y sólidos muy pequeños en estado coloidal, suspensión no sedimentable, así como contaminantes en solución. Es desagradable en apariencia y peligroso en contenido, principalmente debido al número de organismos causantes de enfermedades (patógenos) que contiene. En climas cálidos, las aguas residuales pueden perder su contenido de oxígeno disuelto y así convertirse en "sépticas", las cuales tienen un olor desagradable, generalmente de sulfuro de hidrógeno. (Mara, 2004)

#### ***1.4.1.1 Caudales de aguas residuales domésticas***

La importancia de medir las variaciones de los caudales consiste en que de ello depende el diseño de los equipos, la manera en que se va a operar el sistema y el tipo de mantenimiento adecuado. Los caudales de las aguas residuales domésticas con los que trabaja una planta de tratamiento varían diariamente. Es así, donde se registran caudales mínimos en horas de la madrugada, mientras que, durante la mañana, entre las seis y pasado el mediodía, y durante la noche, entre las siete y nueve, es donde se producen los caudales más altos (Rada, 2019).

Para las áreas que cuentan con sistemas de recolección de aguas lluvias, los caudales de aguas residuales se determinan comúnmente a partir de registros existentes o mediante mediciones directas. Para áreas residenciales, el caudal de aguas residuales

se deriva de un análisis de datos de población y estimaciones del caudal de aguas residuales per cápita de comunidades similares. Los registros de consumo de agua potable también se pueden utilizar para estimar caudales. Considerando que de toda el agua potable que se consume, entre el 70 y 85% se convierte en agua residual, se podrá obtener un resultado teórico de caudal. En el presente trabajo se empleará el 80% de consumo (Metcalf & Eddy, 2003).

**Tabla 1.1 Caudales comunes de las aguas residuales. [ (Metcalf & Eddy, 2003)]**

Tamaño del hogar, número de personas	Caudal (L/per cápita*día)	
	Rango	Valor Típico
1	285-490	365
2	225-385	288
3	194-335	250
4	155-268	200
5	150-260	193
6	147-253	189
7	140-244	182
8	135-233	174

En varias zonas residenciales, suele estimarse los caudales de aguas residuales con base a la densidad de la población a la contribución a las aguas residuales por habitantes. La contribución diaria de desechos y de carga orgánica se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 1.2 Contribución de desechos y carga orgánica.** (Metcalf & Eddy, 2003)

<b>Fuente (Residencia)</b>	<b>Unidad (Ocupantes permanentes)</b>	<b>Contribución de aguas residuales (L/unidad*d)</b>	<b>Contribución de carga orgánica gDBO<sub>5,20</sub>/d</b>
Alto standing	Persona	160	50
Nivel medio	Persona	130	45
Nivel bajo	Persona	100	40

#### **1.4.1.2 Características físicas, químicas y biológicas del agua residual**

**Tabla 1.3 Características principales de las aguas residuales.** [ (Metcalf & Eddy, 2003)]

<b>Características físicas</b>	<b>Uso o significado de los resultados de prueba</b>
Sólidos (totales, volátiles totales, fijos totales, suspendidos totales, suspendidos volátiles, suspendidos fijos, disueltos totales, disueltos volátiles, disueltos fijos totales)	Evaluar el potencial de reutilización de las aguas residuales y determinar el tipo de operaciones y procesos más adecuados para su tratamiento.
Sólidos sedimentables	Para determinar aquellos sólidos que serán sedimentados por gravedad en un periodo específico de tiempo
Distribución del tamaño de partícula	Para evaluar el desempeño de los procesos del tratamiento
Turbidez	Usado parara evaluar la calidad del agua residual tratada
Color (café claro, gris, negro)	Para evaluar la condición del agua residual (fresca o séptica)
Transmitancia	Usado para evaluar la idoneidad del efluente tratado por desinfección con UV
Olor	Para determinar si los olores son un problema

Temperatura	Importante en el diseño y operación de los procesos biológicos en las instalaciones del tratamiento
Densidad	Empleados para evaluar la idoneidad del efluente tratado para aplicaciones agrícolas.
Conductividad	
<b>Características químicas inorgánicas</b>	
Amonio libre, Nitrógeno orgánico, Nitritos, Nitratos, Nitrógenos totales, Fósforo inorgánico, fósforos totales, fósforos orgánicos	Usado como una medida para determinar la presencia de nutrientes y el grado de descomposición en las aguas residuales, los compuestos oxigenados son usados como medida del grado de oxidación
pH	Medida de acidez y basicidad de una solución acuosa
Alcalinidad	Medida de la capacidad búfer de las aguas residuales
Cloruros	Para evaluar la idoneidad de las aguas residuales para su reutilización agrícola
Sulfatos	Para evaluar el potencial de formación de olores, puede afectar al manejo de los lodos residuales
Metales (As, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Mg, Hg, Mo, Ni, Na, Zn)	Para evaluar la idoneidad de la reutilización y los efectos tóxicos en el tratamiento de aguas residuales. Rastros de metales son importantes en tratamientos biológicos
Compuestos y elementos inorgánicos específicos	Para evaluar la presencia o ausencia de constituyentes específicos.
Varios gases (O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub> )	Para evaluar la presencia o ausencia de gases específicos.
<b>Características químicas orgánicas</b>	



Demanda bioquímica de oxígeno carbonoso de cinco días	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente los residuos
Demanda bioquímica máxima de oxígeno carbonoso	
Demanda de oxígeno nitrogenado	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar biológicamente el nitrógeno en nitrato
Demanda química de oxígeno	A menudo usado como sustituto de la prueba de la demanda biológica de oxígeno.
Carbono orgánico total	
Compuestos orgánicos específicos y clases de compuestos	Para determinar la presencia de compuestos orgánicos específicos y evaluar si se necesita un diseño especial para la remoción.
<b>Características biológicas</b>	
Organismos Coliformes	Para evaluar la presencia de bacterias patogénicas y la efectividad del proceso de desinfección
Microorganismos específicos (bacterias, protozoos, virus)	Para evaluar la presencia de organismos específicos en conexión con la operación de planta y determinar su reutilización.
Toxicidad	Unidad tóxica aguda y crónica

**Tabla 1.4 Valores típicos de los factores característicos de las aguas residuales. [**

**(Metcalf & Eddy, 2003)]**

Parámetros	Todos están expresados en mg/L, exceptuando los sólidos sedimentables y los coliformes totales		
	Débil	Medio	Fuerte
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	50	100	200

Amoniaco (libre)	10	25	50
DBO <sub>5</sub> (como O <sub>2</sub> )	100	200	300
Cloruros	30	50	100
DQO (como O <sub>2</sub> )	250	500	1000
SST	120	210	400
SSV	95	160	315
SSF	25	50	85
Sólidos sedimentables (mL/L)	5	10	20
Sulfatos	20	30	50
SDT	200	500	1000
NTK (como nitrógeno)	20	40	80
COT (como carbono)	75	150	300
P- totales (como fósforo)	5	10	20
Coli-totales (NMP/ 100 mL)	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>

### 1.4.2 Lodos

Los lodos se definen como sólidos eliminados durante el tratamiento de las aguas residuales. El lodo que no ha sido sometido a ningún tipo de tratamiento o estabilización se conoce como lodo crudo. Los sólidos que se tratan más a fondo, primera y segunda etapa de tratamiento, se denominan biosólidos, siendo productos semisólidos principalmente orgánicos que permanecen después de que los sólidos biodegradables son estabilizados biológica o químicamente. Son adecuados para un uso beneficioso, como el compostaje (Davis, 2010).

En el dimensionamiento y selección de los equipos, tuberías y bombas que interceden para el manejo, disposición y tratamiento de los lodos, se toma en cuenta la cantidad de

sólidos que poseen. Con la finalidad de disponer de estos lodos en otras actividades, es necesario estabilizarlos, proceso con el cual se reduce su volumen y organismos patógenos, además aporta en la mitigación de los malos olores que producen. Los métodos más conocidos de estabilización de lodos son la digestión anaerobia y aerobia (Fàbregas, 2020).

### **1.4.3 Sistemas Anaerobios**

Los procesos anaeróbicos se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales durante más de un siglo. Se presentan atractivos, especialmente para aguas residuales de alta resistencia y temperatura cálida porque: no se requiere aireación, lo que ahorra costos de energía y la baja cantidad de sólidos generados. Los PA son capaces de responder rápidamente a la alimentación de aguas residuales después de largos períodos sin la adición de sustrato.

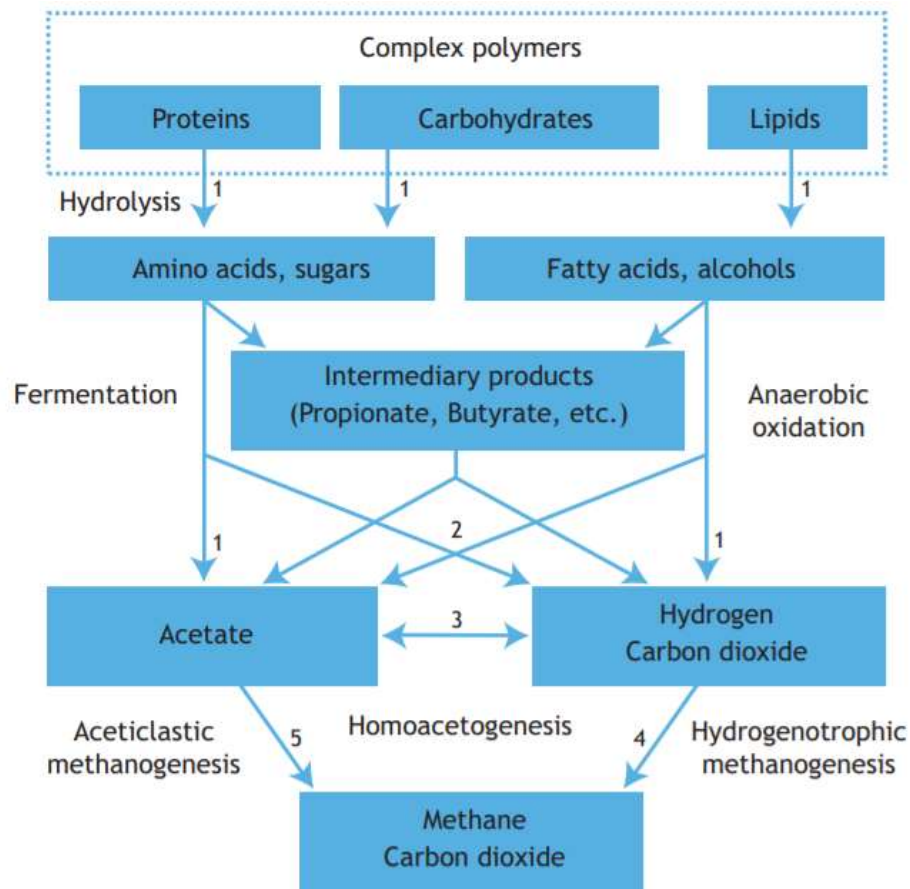
La digestión anaeróbica es un proceso de tratamiento biológico que recupera valiosos productos, energía y nutrientes, de corrientes de desechos orgánicos en formas utilizables. La energía es recuperada en forma de biogás, típicamente una mezcla de 70% en peso de metano ( $\text{CH}_4$ ), 29% en peso dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y un pequeño porcentaje de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (Rittmann, et al., 2001). Los nutrientes valiosos como el nitrógeno y fósforo se recuperan en forma de efluente líquido del digestor o como biosólidos, que pueden aplicarse a tierras agrícolas si el nivel de patógenos es lo suficientemente bajo, para aumentar el crecimiento de los cultivos como fertilizante (Rowse, 2011).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales anaeróbicos clásicos se relacionan con los digestores anteriores desarrollados por Mouras en Francia (1872), Cameron y Travis en Inglaterra (1896 y 1903, respectivamente), e Imhoff en Alemania (1906). Típico de estos sistemas clásicos (tanque séptico y tanque Imhoff) es el flujo de aguas residuales horizontal a través del sistema en la parte superior, mientras que el lodo anaeróbico descansa en el fondo del tanque. Ambos sistemas se aplican hoy en muchos países, especialmente para el tratamiento in situ de aguas residuales de viviendas individuales o para pequeñas comunidades. (Van Haandel et al. 2006).

**Tabla 1.5 Ventajas y Desventajas de un Sistema Anaerobio [ (Metcalf & Eddy, 2003)]**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Requiere menos consumo energético.	Mayor tiempo de puesta en marcha para desarrollar la biomasa necesaria
Menor producción de lodos.	Puede requerir adición de alcalinidad
Pocos nutrientes requeridos.	Puede requerir un tratamiento adicional con un proceso de tratamiento aeróbico para cumplir con los requisitos de descarga.
Producción de metano, fuente potencial de energía.	No es posible la eliminación biológica de nitrógeno y fósforo.
Versátil para el tratamiento de desechos ordinarios y "difíciles".	Mucho más sensible a los efectos adversos de bajas temperaturas en la velocidad de reacción.
Tolerante a cargas pesadas, en realidad cargas pesadas de 5 a 10 kg DQO/m <sup>3</sup> de volumen del reactor son casi una necesidad en comparación con 1 kg DQO/m <sup>3</sup> para la carga del sistema aeróbico.	Puede ser susceptible a alteraciones debido a sustancias tóxicas.
Respuesta rápida a la adición de sustrato después de largos periodos sin alimentación.	Potencial de producción de olores y gases corrosivos.

La vía de degradación anaeróbica de la materia orgánica es un proceso de múltiples pasos de reacciones en serie y en paralelo. Este proceso de degradación de la materia orgánica se desarrolla en cuatro etapas sucesivas, que se ilustran esquemáticamente en la Fig. 1.1. El punto de partida en el esquema para una aplicación particular depende de la naturaleza del residuo a procesar (Van Lier et al., 2012).



**Figura 1.1 Etapas en el proceso de degradación anaerobia. [ (Van Lier et al., 2012)]**

- 1) **Hidrólisis:** Las enzimas excretadas por bacterias fermentativas, las llamadas 'exoenzimas, convierten el material complejo no disuelto en compuestos menos complejos disueltos que pueden atravesar las paredes celulares y las membranas de las bacterias fermentativas.
- 2) **Acidogénesis:** Los compuestos disueltos presentes en las células de las bacterias fermentativas se convierten en una serie de compuestos simples que se excretan. Los compuestos producidos durante esta fase incluyen ácidos grasos volátiles (AGV), alcoholes, ácido láctico, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>S, así como material celular nuevo.
- 3) **Acetogénesis:** Producción de ácido intermediario, donde los productos de la digestión se convierten en acetato, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, así como en material celular nuevo.

- 4) **Metanogénesis:** El acetato, H<sub>2</sub> más el ion carbonato, el anión formiato o el metanol se convierten en metano, CO<sub>2</sub> y material celular nuevo

#### 1.4.4 Crecimiento Bacteriano

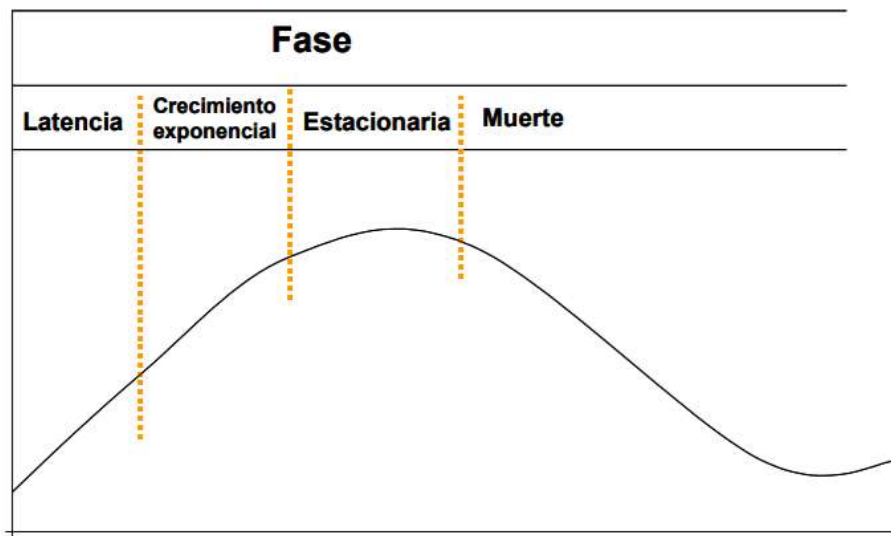


Figura 1.2 Etapas en el proceso de degradación anaerobia. [ (Moeller & Tomasini, 2004)]

- **Fase de latencia:** Se da lugar al añadir un inóculo a un medio de cultivo. Esta fase indica el tiempo que necesitan los organismos para aclimatarse a su nuevo ambiente y empezar a dividirse.
- **Fase exponencial:** Aquí las células se comienzan a dividir cada cierto momento específico en función de su tiempo de generación y su habilidad para procesar el alimento.
- **Fase estacionaria:** Conocida porque las células se mantienen estacionarias. Esto se debe por dos razones principales, una es que ya no existe sustrato o nutrientes necesarios para que las células continúen creciendo. El segundo motivo puede ser que se dé la compensación entre las células que mueren y las que crecen.
- **Fase de muerte exponencial:** En este periodo final la tasa de mortalidad de las bacterias crece, de manera que sobrepasa la producción de células nuevas. (Moeller & Tomasini, 2004).

### 1.4.5 Consideraciones generales de diseño de un sistema de tratamiento anaerobio

El tipo de agua residual y sus características son importantes en la evaluación y diseño de procesos anaeróbicos. Los factores importantes y las características del agua residual que deben tenerse en cuenta en la evaluación de los procesos anaeróbicos para el tratamiento de aguas residuales son (Comisión Nacional del Agua, 2015):

- ✓ Variaciones de flujo y carga
- ✓ Características del agua
- ✓ Concentración orgánica y temperatura
- ✓ Fracción de material orgánico no disuelto
- ✓ Alcalinidad
- ✓ Nutrientes
- ✓ Macronutrientes
- ✓ Compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos
- ✓ Tiempo de retención de sólidos
- ✓ Producción esperada de gas metano
- ✓ Necesidad de eficiencia del tratamiento
- ✓ Producción de sulfuro
- ✓ Toxicidad por amoníaco

### 1.4.6 Filtro Anaerobio

Un filtro anaeróbico es un reactor biológico de lecho fijo con una o más cámaras de filtración en serie. Como el agua residual fluye a través del filtro, las partículas son atrapadas y la materia orgánica es degradada por la biomasa activa que se adhiere a la superficie del material de filtro. El medio de soporte de crecimiento con el que cuenta el filtro, suelen ser piedras, anillos de plástico, etc., colocados al azar. Con esta tecnología, la remoción de sólidos en suspensión y DBO puede ser tan alta como 90%, pero típicamente está entre 50% y 80%. La remoción de nitrógeno es limitada y normalmente no excede el 15% en términos de nitrógeno total (Tilley et al., 2016).

Los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) se aplican al tratamiento de aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales que contienen niveles relativamente bajos de materiales orgánicos. Para evitar un cortocircuito en el flujo a

través de la columna de relleno, se instala un distribuidor en la parte inferior para proporcionar un flujo ascendente homogéneo de aguas residuales. En la parte superior, las aguas residuales tratadas y el biogás producido están separados por un tablero libre (Villegas et al., 2006).

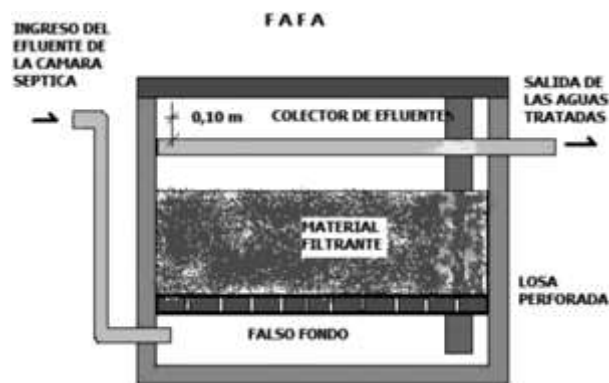


Figura 1.3 Esquema de un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente. [ (Rios, 2009)]

#### 1.4.7 Descripción del sistema

Se puede destacar 4 etapas en el proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, y el tratamiento avanzado.

El objetivo principal de la etapa del pretratamiento es la de favorecer los tratamientos posteriores del proceso, evitando la erosión en las instalaciones y el posible atascamiento en los equipos debido a las partículas de gran tamaño presentes en el agua residual. En esta etapa se destacan los desarenadores, rejillas o tamices (Rada, 2019).

Por el lado del tratamiento primario, los sistemas suelen eliminar las partículas en suspensión, así como la materia orgánica a través de los procesos de sedimentación, filtración, coagulación-floculación. La sedimentación separa las partículas más densas que el agua por acción de la gravedad hasta depositarse en el fondo de la infraestructura.

En la etapa del tratamiento secundario, tienen lugar los procesos biológicos que, en presencia de microorganismos, eliminan la materia orgánica biodegradable. Estos



tratamientos pueden ser de dos clases: aerobios, en presencia de oxígeno, o anaerobios, en ausencia de oxígeno. Para el sistema anaerobio sobre el cual se realiza el presente estudio, se destaca el tanque séptico. Esta estructura posee en su interior tanto la decantación como la digestión anaerobia, ocurriendo ambos procesos simultáneamente. Otro equipo el cual forma parte del sistema en mención es el filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA), que está constituido por un tanque donde se encuentra el medio filtrante, este medio, en el que se encuentran los microorganismos, entra en contacto con el agua residual para posteriormente llevar a cabo la digestión anaerobia (Riffat, 2012).

El tratamiento avanzado o terciario tiene como finalidad la desinfección del agua en su última etapa del proceso, eliminando principalmente organismos patógenos, así como la carga orgánica residual y cualquier sustancia contaminante presente aún en el agua. Entre los métodos de desinfección tenemos:

Cloración, es el método más aplicado comúnmente. Actualmente, se están utilizando algunos derivados que presentan acción del cloro y sus derivados, es de tipo oxidante. Esta reacción de oxidación provocará a ruptura de la pared celular de los organismos eliminándolos en el proceso. Para que la desinfección se pueda llevar a cabo correctamente, hay que tener presentes algunas consideraciones como: el tipo de patógeno a eliminar, pH, tiempo de contacto, concentración de la sustancia desinfectante, turbidez, temperatura, etc. (Osorio et al., 2010). Entre sus principales desventajas se tiene que este tipo de desinfección puede generar subproductos tóxicos y cancerígenos, como: ácidos haloacéticos, halógenos orgánicos, cloraminas o trihalometanos (Rada, 2019).

Otro método de desinfección es la ozonización, método en el que evidentemente se usa el ozono como agente oxidante. Es muy utilizado en la desinfección de agua potable sin embargo también se puede aplicar en aguas residuales. Debido a su corto periodo de existencia, no se lo puede almacenar, por lo que su generación debe ser in situ. Entre los métodos para la producción de ozono tenemos: electrólisis, descarga eléctrica de alto voltaje, y a través de la fotoquímica o radioquímica. En sus desventajas se encuentra el alto coste energético y el hecho de que también se podría dar la formación de

subproductos como bromatos, peróxidos, epóxidos, aldehídos y cetonas, nitrosaminas, etc.

Se considera a la desinfección con luz ultravioleta como un método práctico, porque tiene la capacidad de inactivar a los virus, bacterias, esporas y protozoos. La aplicación de este método tiene lugar en aguas industriales o para depurar agua residual ya tratada. La acción de la luz UV provoca daños fotoquímicos en los ácidos nucleicos de los organismos patógenos. Su principal desventaja es su ineficacia ante aguas residuales turbias y con presencia de sólidos suspendidos totales (Osorio et al., 2010).

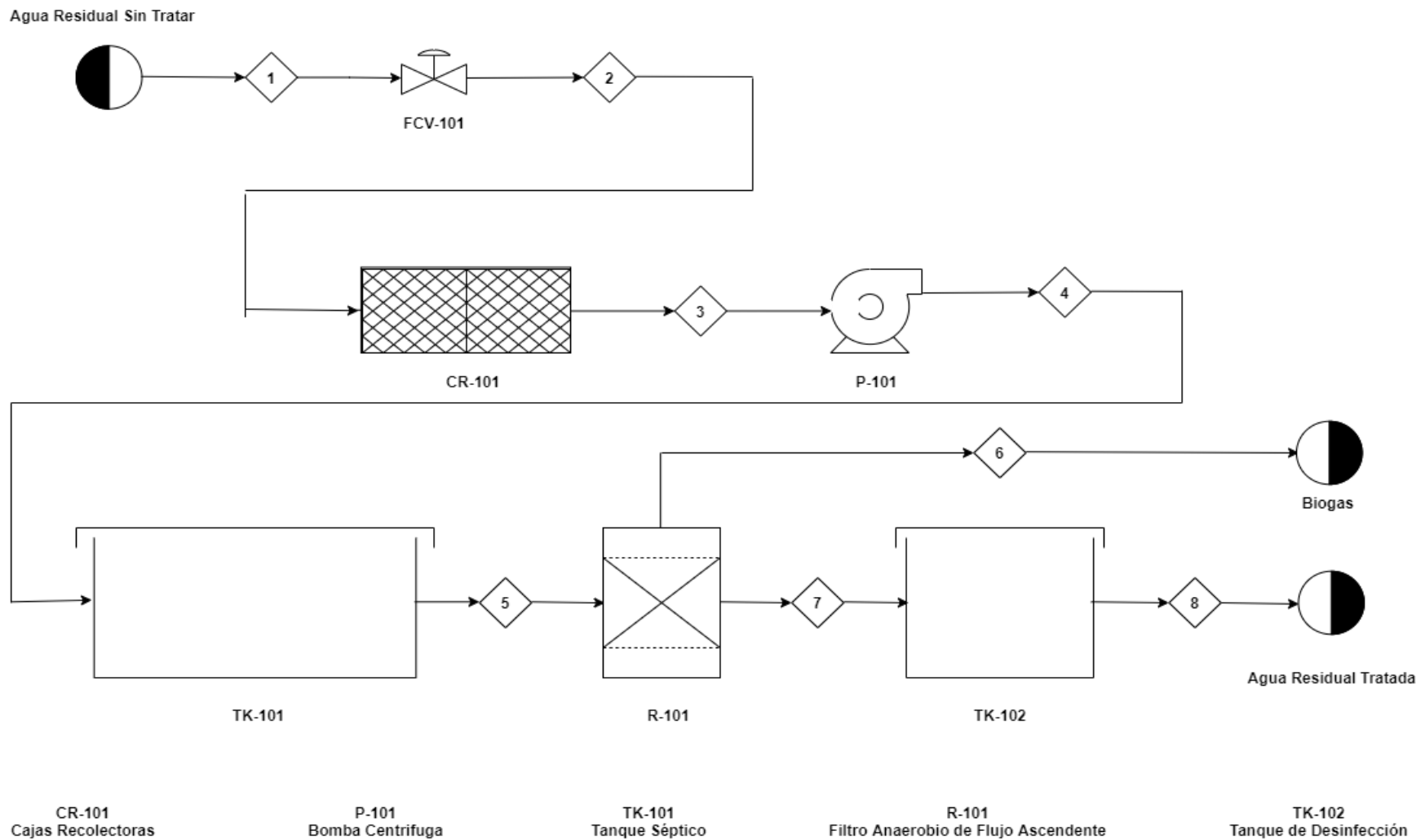


Figura 1.4 Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas. [(Jouvin & Morales, 2021)]

### **1.4.8 Sistema Séptico**

Un sistema séptico es un sistema de tratamiento de aguas residuales subterráneo autónomo. Consta de dos partes principales: un tanque séptico que es seguido por otra etapa de tratamiento que en muchos casos es un sistema de absorción de suelo subterráneo, por ejemplo un campo de drenaje o filtro.

Los sistemas sépticos modificados pueden contener otros mecanismos acoplados como la digestión anaeróbica y las cámaras de desinfección. Algunos tienen modificaciones como un tanque séptico vertical con deflectores que contiene un filtro y una cámara para desinfección. La elección del sistema de tratamiento posterior al tanque dependerá del tratamiento de un sistema individual (Adegoke & Stenstrom, 2019).

El rendimiento del tratamiento se basa en proporcionar suficiente TRH de las aguas residuales en el interior del tanque, lo suficientemente largo para permitir la separación de los sólidos de los líquidos. Para mejorar el proceso de separación de sólidos, el tanque puede diseñarse con una configuración de 2 o 3 cámaras. La salida de la cámara final es hacia el campo de drenaje subterráneo o hacia otras alternativas de tratamiento adicionales. Los mecanismos para la reducción de patógenos en un tanque séptico incluyen la recolección y sedimentación en el lodo, así como la descomposición o digestión (Fernández et al., 2020).

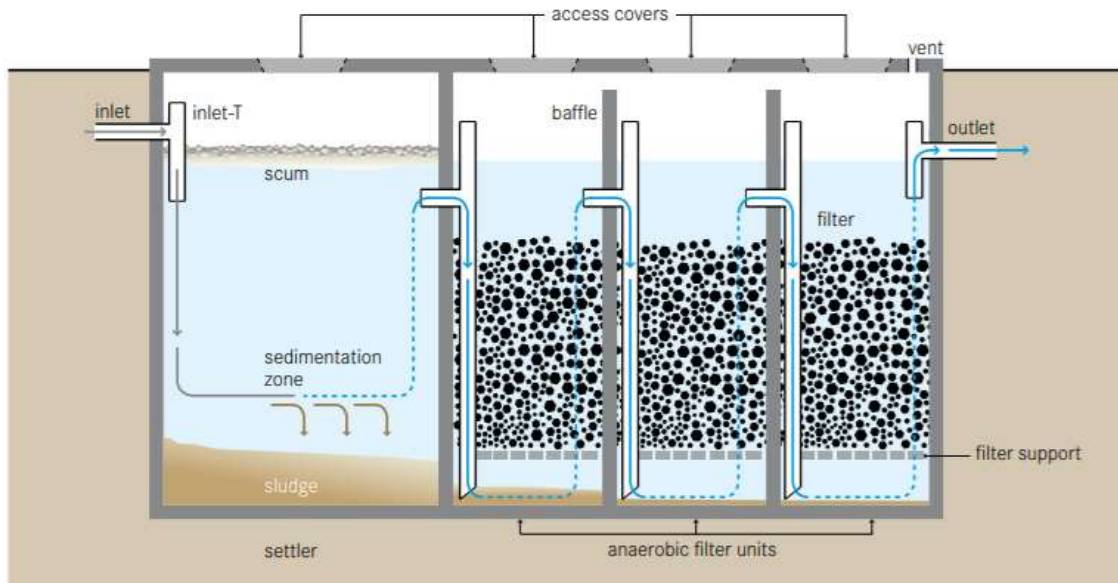


Figura 1.5 Diagrama de un Sistema Séptico convencional. [ (Tilley et al., 2016)]

### 1.4.8.1 Tanque séptico

El tanque séptico es una cámara que se utiliza para el almacenamiento y tratamiento de aguas negras, aguas grises y los lodos resultantes. Por lo general, está construido de hormigón o fibra de vidrio, PVC u otros tipos de plásticos. Las aguas residuales fluyen desde la interfaz de usuario hasta el tanque séptico a través de un sistema de transporte por tuberías (Leguisamon, 2016).

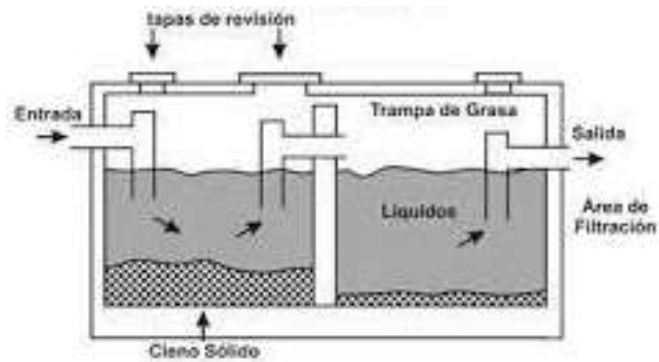


Figura 1.6 Tanque Séptico de dos cámaras. [ (Leguisamon, 2016)]

Los sólidos sedimentables y los lodos parcialmente descompuestos se depositan en el fondo del tanque y se acumulan. Una escoria (incluyendo grasas y grasas) sube a la cima, se permite que el líquido fluya a través de una salida justo debajo de una capa de espuma flotante. Las fugas de los tanques sépticos, debido a grietas en el material de construcción, a menudo se consideran un factor menor; sin embargo, si las fugas del tanque hacen que el nivel de la capa de escoria caiga por debajo del deflector de salida, pueden producirse descargas excesivas de escoria. En el caso extremo, la capa de lodo se secará y compactará, y las prácticas normales de limpieza de tanques no la eliminarán.

Una ventaja de los sistemas sépticos es que son de diseño simple y los convencionales no requieren entrada de productos químicos o energía, lo que los hace generalmente menos costosos de instalar y mantener (Oluwafemi et al., 2019).

#### 1.4.8.1.1 Diseño

Las fórmulas de diseño y consideraciones propuestas se basan en (CEPIS & OPS, 2005).

##### ***Tiempo de retención hidráulico***

$$TRH=1,5 - 0,3*\log(P*Q)$$

Donde,

TRH: Tiempo de retención hidráulico (días)

P: Población servida

Q: Caudal de aporte unitario de aguas residuales (L/habitante\*día)

##### ***Volumen de sedimentación***

$$Vs= 10^{-3} * (P * Q) * TRH$$

Donde,

Vs: Volumen de sedimentación (m<sup>3</sup>)

### ***Volumen de digestión y almacenamiento de lodos***

$$V_d = 0,07 * P * N$$

Donde,

N: Intervalo deseado en años, entre operaciones sucesivas de remoción de lodos

### ***Volumen de lodos producidos***

La cantidad de lodos producidos está sujeta a la temperatura ambiental y la descarga de residuos de la cocina. Comúnmente se considera para un clima cálido 40 L/habitante\*año y para un clima frío 50 L/habitante\*año. Se debe agregar 20 L/ habitante\*ano a los valores anteriores, si existe también la evacuación de lavaderos y otros aparatos.

### ***Volumen de natas***

Generalmente se toma un valor mínimo de 0,7 m<sup>3</sup> para las natas formadas en un tanque séptico.

#### 1.4.8.1.2 Operación y Mantenimiento

Previo al arranque del equipo se recomienda colocar cierta cantidad de agua y lodo provenientes de otra planta, de esta manera el crecimiento de los microorganismos anaerobios será más rápido. La temperatura es un factor de gran influencia en el proceso anaerobio, por tanto, la puesta en marcha del sistema debe ser en los meses más cálidos del año.

Entre mayor sea el funcionamiento del equipo, menor será la necesidad de limpieza. Sin embargo, es recomendable realizarla una vez al año, evitando la acumulación excesiva de lodos o natas que puedan contribuir a una mala operabilidad. El tanque se limpiará

cuando el fondo de la capa de lodos o nata se encuentre a unos 30 cm por debajo de la tubería de salida del efluente (da Silva et al., 2013).

Es necesario controlar la presencia de sedimentos, para evitar que afecten en la distribución del agua residual, por lo que se debe examinar la caja de distribución cada 3 o 6 meses. Adicionalmente, la trampa de grasas debe ser limpiada, retirando la materia sedimentable y flotante, cada 15 días o mensualmente. La limpieza debe realizarse en horas cuando la temperatura del aire y de las aguas residuales alcanzan sus valores más bajos, lo que facilita el retiro del material graso al estar solidificado (Tilley et al., 2016).

#### 1.4.8.1.3 Diseño del Filtro Anaerobio

Las fórmulas de diseño y consideraciones propuestas se basan en (Guamán & Molina, 2015).

#### **Volumen**

$$V=1,60 * P * C * T$$

Donde,

V: Volumen del filtro anaerobio (L)

P: Población servida

TRH: Tiempo de retención hidráulico (días)

C: Caudal de agua residual (L/días)

Para calcular el TRH empleado en la formula se toma en cuenta lo siguiente:

**Tabla 1.6 Tiempos de retención.** [ (Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia, 2000)]

Contribución diaria (l)	Tiempo de retención (días)	Tiempo de retención (h)
Hasta 1500	1,00	24
1501-3000	0,92	22



3001-4550	0,83	20
4501-6000	0,75	18
6001-7500	0,67	16
7501-9000	0,58	14
Mas de 9000	0,50	12

### ***Tiempo de retención hidráulico***

$$TRH= V/Q$$

Donde,

T: Tiempo de retención hidráulica (días)

V: Volumen del tanque (L)

Q: Caudal del agua residual (L/días)

(Lemos, 2007)

#### 1.4.8.1.4 Operación y Mantenimiento del Filtro Anaerobio

Un filtro anaeróbico requiere un período de puesta en marcha de 6 a 9 meses para alcanzar su capacidad de tratamiento completa ya que la biomasa anaeróbica es de crecimiento lento, por lo que primero se debe establecerse en el filtro medios de comunicación. Para reducir el tiempo de puesta en marcha, el filtro se puede inocular con bacterias anaeróbicas, rociando estas sobre el material filtrante.

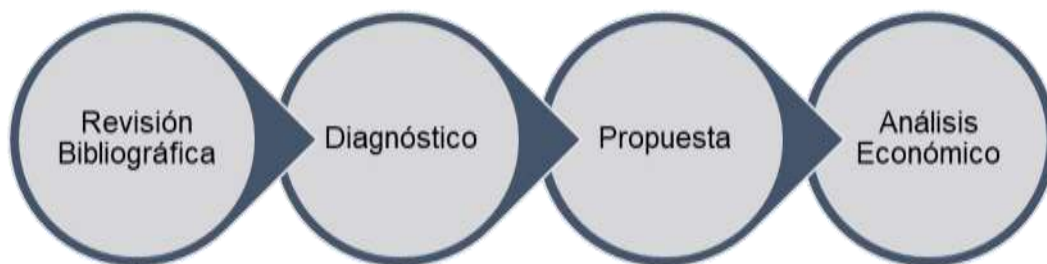
El flujo debe ser aumentado gradualmente con el tiempo. Por la delicada ecología, se debe tener cuidado de no descargar químicos en el filtro anaeróbico. Es necesario monitorear los niveles de escoria y lodo para garantizar que el tanque está funcionando bien. Con el tiempo, los sólidos pueden obstruir los poros del filtro. Además, la creciente masa de la bacteria se volverá demasiado espesa, se romperá y eventualmente tapará los poros. Cuando la eficiencia disminuye, el filtro debe limpiarse. Esto se hace ejecutando el sistema en modo inverso (lavado a contracorriente) o retirando y limpiando el material del filtro, se recomienda que se realice cada 4 a 6 meses. Los tanques de

filtro anaeróbico deben revisarse de vez en cuando para asegurarse de que sean herméticos (Tilley et al., 2016).

# CAPÍTULO 2

## 2 METODOLOGÍA

La metodología se desarrolló con base a la demostración de la validez-viabilidad del proyecto. Para el diseño se empleó un método de tipo no experimental de campo, por tanto, se aplicaron métodos analíticos y de revisión bibliográfica. El tipo de investigación fue explicativa-cuantitativa con datos secundarios, ya que se evaluó una mejora en el diseño del sistema actual.



**Figura 2.1: Etapas de la metodología. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

### 2.1 Revisión bibliográfica

En esta primera etapa se realizó una investigación y evaluación completa, acerca de todos los temas que abarcan el tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas. Con ayuda de libros, papers, documentos encontrados en la web, se lograron conocer los aspectos, parámetros y normas ideales que atribuyen a un adecuado funcionamiento del sistema que se lleva en una PTARD.

## 2.2 Diagnóstico

### 2.2.1 Diseño

#### ***Situación Actual***

La identificación del flujo del sistema que lleva la planta se realizó in situ. Se reconocieron los equipos que intervienen en el proceso y el área que ocupan. Para esto se tomaron medidas de los principales equipos, tanque séptico y filtro anaerobio, con ayuda del ingeniero a cargo.

**Tabla 2.1: Dimensiones de los equipos medidos. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

<b>Equipo</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
Tanque Séptico	196
Filtro Anaerobio	98

#### ***Situación Ideal***

Para el desarrollo de los cálculos se tomó en cuenta fuentes como la norma brasileña (NBR 7229 y NBR 13969), estas normas se encuentran en Anexos. La guía está avalada por la entidad de control y es la que rige el dimensionamiento de los sistemas anaeróbicos de la planta de tratamiento donde la empresa brinda sus servicios; y las especificaciones técnicas para el diseño de una PTAR del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ciencias del Ambiente e información brindada por la empresa.

De acuerdo con la norma brasileña, para el dimensionamiento del tanque séptico se utilizó el volumen útil total, que se calculó con la siguiente fórmula:

$$V = 1000 + N (CT + K Lf)$$

Donde,

V= Volumen (litros) útil de diseño

N= Número de habitantes

C= Contribución de desechos (L/habitante\*día)

K = tasa de acumulación de lodos (días)

T= Tiempo de retención (días)

Lf= Contribución de lodos frescos (L/habitante\*día)

Los datos por emplear en la ecuación se obtuvieron de las normas brasileñas, así:

C = 160 L/hab\*día (Residencia de alto nivel)

Lf = 1 L/hab\*día (Residencia de alto nivel)

K = 217 días (intervalo de 5 años)

T = 1 día (hasta 1500 L de contribución diaria)

Las medidas internas de los tanques deben observar lo seguir:

- a) La profundidad útil, de acuerdo con la norma brasileña, para volúmenes útiles mayores a 10 m<sup>3</sup>, se recomienda sea de máxima de 2.8 m.
- b) Ancho interior mínimo: 0,80 m
- c) Relación longitud/ancho: mínimo 2:1 y máximo 4:1.
- d) La relación de volúmenes de las cámaras será 2:1 entre el volumen de la cámara de entrada con respecto a la cámara de salida.

- e) El área total de las aberturas de paso entre las cámaras debe ser del 5 al 10% de la sección transversal útil del tanque séptico.
- f) El borde superior de las aberturas de paso entre las cámaras debe estar como mínimo a 0.30 por abajo del nivel de agua.
- g) El borde inferior de las aberturas de paso entre las cámaras debe estar a 2/3 de la profundidad útil (h)

El volumen de almacenamiento de lodos esta dado por la siguiente ecuación:

$$V_d = G * P * N$$

Donde,

G = Volumen de lodos producidos por persona y por años en litros

El volumen de lodos producidos en climas cálidos es de 40 litros/habitantes \* años

P = Habitantes

N = intervalo de limpieza de lodos en años

Con base en el diseño del tanque, se determina un intervalo de limpieza de máximo 3 años.

Diseño del volumen útil del lecho filtrante

$$V = 1,60 * N * C * T$$

En donde,

N = Número de habitantes o contribuyentes

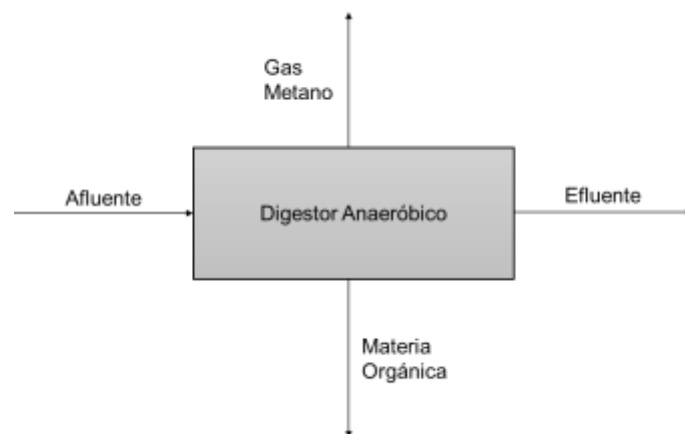
C = Contribución diaria de agua residual doméstica (L /hab \* día)

T = Tiempo de detención hidráulica (día)

## 2.2.2 Balance de Masa

El balance de masa se aplicó al digester anaeróbico, tanque séptico, pues aquí se lleva a cabo la reacción química. Además, se empleó el parámetro de DQO presente en las diferentes corrientes de entrada y salida del digester, para realizar el control del proceso de digestión. Son útiles para determinar la eficiencia del sistema. Se asumió que:

- El flujo volumétrico es el mismo a la entrada y salida del digester.
- El volumen en el digester es constante.
- Se lleva a cabo una reacción química de primer orden en el interior del digester.



**Figura 2.2: Diagrama de flujo del digester anaeróbico. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

El más significativo de los parámetros es la carga contaminante del proceso, la misma que se determina por:

$$C_c = Q \times C$$

Donde,

$C_c$ = masa de carga contaminante, kg/día

$Q$ = flujo volumétrico,  $m^3/s$

$C$ = concentración de contaminantes presentes en el agua residual del proceso específico,  $g/m^3$  o  $mg/L$

Por lo tanto,

$$\frac{dC}{dt} = \sum QC_{in} - \sum QC_{out}$$

$$\frac{dC}{dt} = DQO_{Afl} - DQO_{Efl} - DQO_{MO} - DQO_{CH_4}$$

Para simplificar los cálculos se asumió que se tiene un sistema en estado estacionario, por lo que:

$$0 = DQO_{afl} - DQO_{efl} - DQO_{mo} - DQO_{CH_4}$$

Luego, se determinó los valores individuales de carga en cada corriente. Los valores de concentración de DQO en el afluente y efluente fueron obtenidos de registros llevados por la empresa. La masa de sólidos biológicos sintetizados, lodos, se estimó mediante la ecuación que se indica en el Apéndice B. De igual manera las constantes cinéticas empleadas se indican en la Tabla B del mismo apéndice.

Finalmente, para el análisis de la eficiencia de operación del proceso, remoción de contaminantes, se empleó:

$$C_{efl} = C_{afl} \times \left(1 - \frac{E}{100\%}\right)$$

### **2.2.3 Operación y Mantenimiento**

Las actividades de operación son necesarias para proporcionar que la PTARD produzca la calidad y cantidad deseadas de agua tratada y cumpla con los estándares, mientras que su correcto mantenimiento asegura el trabajo regular y eficiente de los equipos para lograr los objetivos operativos sostenibles.

#### ***Situación Actual***



### **2.2.3.1 Consideraciones operacionales**

El proceso de digestión anaeróbica es sensible a los cambios en las condiciones operativas. De los numerosos parámetros que pueden afectar al funcionamiento destacan dos: temperatura y pH. Para garantizar una producción de gas eficaz y evitar alteraciones del digestor, es necesario llevar un control adecuado de estos parámetros, en el proceso.

#### 2.2.3.1.1 Temperatura

El sistema de digestión anaeróbica que lleva la PTARD instalada en la ciudadela, está diseñado para operar a temperatura ambiente. En la ciudad de Guayaquil la temperatura media anual se encuentra a 24.1 °C. La temperatura de diseño es importante para mantener un funcionamiento estable, también influye en la producción del gas metano, ya que sus microorganismos formadores, son sensibles a los cambios de temperatura.

Actualmente no existe ningún medio adicional de calentamiento al digestor para promover una mayor tasa de reacción. La principal razón es que se requeriría una mayor cantidad de energía, lo que atribuiría paralelamente a un incremento en los costos operacionales. Por otro lado, aplicar calor extra al sistema podría generar menor estabilidad del proceso.

#### 2.2.3.1.2 Control de pH

En la PTARD este parámetro es controlado en el efluente proveniente del digestor anaeróbico. Para su análisis se asumió que es constante, es decir que su valor en el

interior del tanque es igual a la salida de este. El rango en el que se encuentra es efectivo para los metanógenos, siendo un pH de 6,5 a 7,5, con un óptimo rango de 6,8 a 7,2. La estabilidad del proceso de digestión depende de la capacidad amortiguadora del contenido del digestor y la producción de dióxido de carbono.

Cuando el pH se encuentra fuera de este rango es necesario su regulación. La manera en que la empresa regula este parámetro en la digestión anaeróbica es dejando de alimentar al digestor por un periodo corto de tiempo, hasta que se regule el pH en el interior del tanque. No se recomienda la adición de cal ya que la base fuerte puede resultar en la formación de precipitados y, potencialmente, un exceso que resulte en un pH demasiado alto.

### **2.2.3.2 *Mantenimiento***

El mantenimiento que se lleva en la PTARD es responsabilidad del personal de la empresa que brinda los servicios de alcantarillado. La limpieza de los pozos en los inmuebles y el retiro de los lodos en las plantas se realiza con ayuda de los camiones hidrocleaners. Los viajes por retiros de lodos en plantas equivalen al 45% del total de viajes anuales y los viajes de limpieza representan el 55%.

Debido al exceso de lodos que se presenta en el sistema, el porcentaje de retiros de lodos anual aumenta cada año. Esto conlleva a un mayor uso de los camiones para la evacuación de estos. El transporte de lodos afecta la atención al cliente por la falta de disponibilidad de camiones y la acción inoportuna.

A continuación, se detallan las actividades de mantenimiento que actualmente recibe la PTARD, por parte del personal encargado de operación y mantenimiento:

**Tabla 2.2: Frecuencia de actividades de mantenimiento de la PTARD. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

Actividad	Frecuencia
Limpieza y vaciado de solidos de cajas recolectoras	Una vez al mes
Purga de lodos del tanque séptico	Cuatro veces al año
Purga de lodos en el FAFA	Nunca
Limpieza del lecho filtrante	Nunca
Limpieza del tanque séptico y de desinfección	Nunca

### ***Situación Ideal***

El correcto mantenimiento y operación de los equipos de un sistema anaerobio se detalló en el punto 1.4.8.

## **2.3 Propuesta**

La principal limitante para el proyecto es el espacio donde se encuentra la planta de tratamiento. Mantener el proceso anaerobio para tratar las aguas residuales ya no es viable, ya que se necesitaría ampliar el volumen del tanque y anexar un sedimentador. Esto implica disponibilidad de un terreno más grande del que se tiene actualmente. Por esta razón, se realizó una propuesta de reingeniería cambiando el sistema actual por un reactor de digestión aerobia.

### **2.3.1 Esquema**

Con la finalidad de optimizar el proceso y mejorar la eficiencia del reactor, la nueva planta consta de un tratamiento previo. Un sistema de rejillas y un tamizador antes de la entrada al digestor será instalado, cuya finalidad es la remoción de sólidos de gran tamaño. Se implementó un homogeneizador y un reactor biológico de mezcla completa, donde ambos serán abastecidos por un sistema de aireación. Finalmente, el flujo de agua llegará al tanque de desinfección para posteriormente ser descargado en el cuerpo hídrico.

### 2.3.2 Volumen del tanque de aireación

En el diseño se consideró al tanque aireador como un reactor de mezcla completa (CSTR) con recirculación. Para el cálculo del volumen del tanque en este sistema se empleó la fórmula (Rumana, 2013):

$$V = \frac{\theta_c Q Y (S_o - S)}{X(1 + k_d \theta_c)}$$

Donde,

V= Volumen del tanque de aireación, m<sup>3</sup>

$\theta_c$ = Tiempo de retención celular, día

Q= Caudal de agua residual, m<sup>3</sup>/día

Y= Rendimiento de sólidos, mg SSV/mg DBO<sub>5</sub>

S<sub>o</sub>= Concentración del afluente, mg DBO<sub>5</sub>/ L

S= Concentración del efluente, mg DBO<sub>5</sub>/ L

X= Biomasa en el licor de mezcla, mg SSV/L

k<sub>d</sub>= Coeficiente de decaimiento, d<sup>-1</sup>

El tiempo de retención celular se fijó de 4 días, valor que se encuentra dentro del rango para un sistema de aireación, Apéndice C, Tabla D.

Para la determinación del tiempo de retención, se usó la ecuación:

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

TRH= tiempo de retención, día

V= Volumen del tanque, m<sup>3</sup>

Q= Flujo volumétrico del afluente, m<sup>3</sup>/día

### 2.3.3 Producción de lodos

Una estimación de la producción de lodos es importante para el diseño del proceso de las instalaciones de manipulación de lodos y el sistema de aireación. Para estimar la producción de lodos se empleó un método común. Este se basa en reglas empíricas y datos publicados de instalaciones existentes. Lo que permitió un diseño preliminar satisfactorio. El lodo activado neto producido cada día se determina mediante (Davis, 2010):

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

y

$$P_x = Y_{obs} Q (S_o - S) \left( \frac{10^{-6} \text{kg}}{\text{mg}} \right)$$

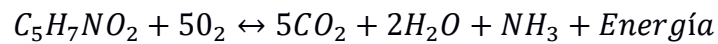
$Y_{obs}$ = Rendimiento observado, kg MLVSS / kg DBO<sub>5</sub> eliminado

$P_x$ = Masa neta de tejido celular producida por día, kg / d

### 2.3.4 Demanda de oxígeno

El oxígeno se utiliza en reacciones en las que el sustrato se degrada produciendo compuestos de alta energía, requeridos para la síntesis celular y la respiración. Se puede hacer una estimación de los requisitos de oxígeno a partir del bCOD de los desechos y la cantidad de biomasa desperdiciada cada día. Si se asume que todo el bCOD se convierte en productos finales, la demanda total de oxígeno sería igual al bCOD. Esto se

debe a que una parte de los residuos se convierte en células nuevas que se desperdician, el bCOD de las células desperdiciadas se debe restar de la demanda de oxígeno total. Esto se describió mediante la siguiente reacción (Davis, 2010):



La relación de pesos moleculares en gramos es:

$$\frac{5(32)}{113} = 1.42$$

Por tanto, la demanda de oxígeno de los lodos residuales activados puede estimarse en 1,42 (Px). La masa de oxígeno requerida puede estimarse como:

$$M_{O_2} = Q(S_o - S) \left( 10^{-3} \frac{kg}{g} \right) - 1,42P_x$$

$M_{O_2}$  = Masa de oxígeno, kg/día

Por conveniencia se aplicó un factor de seguridad igual a 2. Además, se supuso que el  $DBO_5 = rbsDBO_5$  y que es 60% del  $bDBO_5$ :

$$bDBO_5 = \frac{rbsDBO_5}{0,60}$$

### 2.3.5 Flujo de aire

La tasa de transferencia de oxígeno real está dada por (Davis, 2010):

$$AOTR = SOTR \left[ \frac{(\beta)(C_{avg} - C_L)}{C_{s20}} \right] (1,024^{T-20})(\alpha)(F)$$

Donde,

AOTR = Tasa de transferencia de oxígeno real, kg O<sub>2</sub>/h

SOTR = Tasa de transferencia de oxígeno estándar en agua del grifo a 20 °C y cero oxígeno disuelto, kg O<sub>2</sub>/h o kg O<sub>2</sub>/kWh

C<sub>avg</sub> = Concentración promedio de saturación de oxígeno disuelto en agua limpia en el tanque de aireación a temperatura T y elevación H, mg/L

C<sub>L</sub> = Concentración operativa de oxígeno, mg/L

C<sub>s, 20</sub> = Saturación de oxígeno disuelto en agua limpia a 20 C y 1 atm, mg/L

T = temperatura de funcionamiento, °C

F = factor de ensuciamiento

La concentración promedio de saturación de oxígeno disuelto en agua limpia (C<sub>avg</sub>) en un tanque de aireación a temperatura T y elevación H se define como:

$$C_{avg} = (C_{s,T,H})(0,5) \left( \frac{P_d}{P_{atm,H}} + \frac{O_t}{21} \right)$$

Aquí,

C<sub>s, T, H</sub> = Concentración de saturación de oxígeno en agua limpia a temperatura T y elevación H, mg / L

P<sub>d</sub> = Presión a la profundidad de la liberación de aire, kPa

P<sub>atm, H</sub> = Presión atmosférica a la elevación H, kPa

O<sub>t</sub> = porcentaje de concentración de oxígeno que sale del tanque

= (21%) (1-%O<sub>2</sub> absorbido)

El caudal de aire requerido se obtiene de la siguiente relación:

$$AOTR_{Flujo} = \left[ \frac{AOTR}{(Densidad\ del\ aire)(\% \ masa\ de\ O_2\ en\ el\ aire)} \right] \left( \frac{SOTR_{req}}{SOTR_{manuf}} \right)$$

### 2.3.6 Rejillas de limpieza manual

- Rejillas con una inclinación de 45°.

- Los barrotes de hierro serán de 1 cm de ancho y con una separación de 2.5 cm.

El número de barrotes se calculó por la siguiente ecuación:

$$N = \frac{B - L}{b + L}$$

Donde,

B = ancho del canal.

L = espacio entre barrotes

b = ancho de barrotes

Mientras que el número de espacios entre barrotes es igual a:

$$N_{\text{esp}} = N + 1$$

Para hallar el área de apertura de la rejilla, se asumió una profundidad de 1.5 m:

$$A = N_{\text{esp}} * \text{Espacio entre barras} * \text{Profundidad del agua}$$

Finalmente, la velocidad del flujo a través de la rejilla se encontró por la expresión:

$$V_s = \frac{Q}{A}$$

Aquí,

Q = Flujo del afluente en  $\frac{m^3}{s}$

A = Área de apertura de la rejilla

No se consideraron las pérdidas de carga a través de la rejilla. Esto se debe a que como la velocidad de flujo a través de la rejilla es muy pequeña.



### 2.3.7 Tamiz

El tamiz más adecuado para el sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas es el tamiz de disco rotatorio. Estos están siendo empleados como reemplazo de tanques de sedimentación secundarios, pues el material removido es similar al lodo que se obtiene en los sedimentadores primarios (Metcalf & Eddy, 2003).

### 2.3.8 Sedimentador Secundario

Este equipo se diseñó para para lograr dos funciones principales: clarificación de efluentes y espesamiento de los sólidos biológicos. La superficie necesaria para la aclaración se determina a partir de los mismos principios utilizados para un clarificador primario. La superficie requerida para el espesamiento se determinó mediante el método de análisis de flujo de sólidos. Se considero una relación de sólidos suspendidos volátiles y sólidos suspendidos totales de 0.8 (Rumana, 2013).

Se cálculo primero el flujo de retorno de lodos:

$$Q_w = \frac{V_r X - Q_e X_e \theta_c}{X_r \theta_c}$$

Donde,

$V_r$  = Volumen del reactor biológico, m<sup>3</sup>

$Q_e$  = Caudal del efluente, m<sup>3</sup>/día

$X_e$  = Concentración de sólidos biológicos en el afluente

$\theta_c$  = Tiempo de retención celular

$X_r$  = Concentración de fango en el retorno

El área superficial requerida para la sedimentación es:

$$A_s = Carga\ de\ Sólidos_{ingresan} \times Flujo\ de\ Sólidos_{ingresan}$$

Mientras que el área requerida para la clarificación es:

$$A_s = \frac{Q_e}{\text{Velocidad de asentamiento}}$$

El flujo de sólidos y la velocidad de asentamiento se establecieron de acuerdo con datos experimentales de (Rumana, 2013).

El diseño del sedimentador se basó en el área de sedimentación, ya que presenta mayor valor:  $A_s > A_c$ . Así, el diámetro será:

$$\phi = \sqrt{\frac{4 A_s}{\pi}}$$

Y, el volumen del clarificador:

$$V_{sed} = \pi h r^2$$

## 2.4 Análisis Económico

En el análisis económico se estimó los costos de capital y operación de la propuesta planteada. Se elaboró una lista de los equipos a implementar con sus respectivas capacidades, gastos de energía, operación y mantenimiento. La empresa de tecnología multinacional china Alibaba Group fue empleada para conocer los costos de los nuevos equipos del proceso, además de la ayuda de ecuaciones de (Turton et al., 2012).

Debido a que la empresa brinda un servicio y que el estudio se desarrolló para la mejora del proceso llevado en la PTARD, no existirá un lucro por ventas. No obstante, la rentabilidad del proyecto se evaluó mediante el ahorro que se obtiene al comparar los costos por evacuación de lodos vs la inversión de capital inicial para la propuesta de reingeniería del sistema.

# CAPÍTULO 3

## 3 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

El diagnóstico realizado sobre la PTARD permitió comprobar la hipótesis del presente proyecto. El mal funcionamiento del sistema está en gran parte relacionado con el subdimensionamiento de los equipos. El crecimiento poblacional de la urbanización en estudio ocasionó que el caudal del afluente incremente con los años, volviéndose insostenible principalmente para las dimensiones del tanque séptico y del filtro de flujo ascendente.

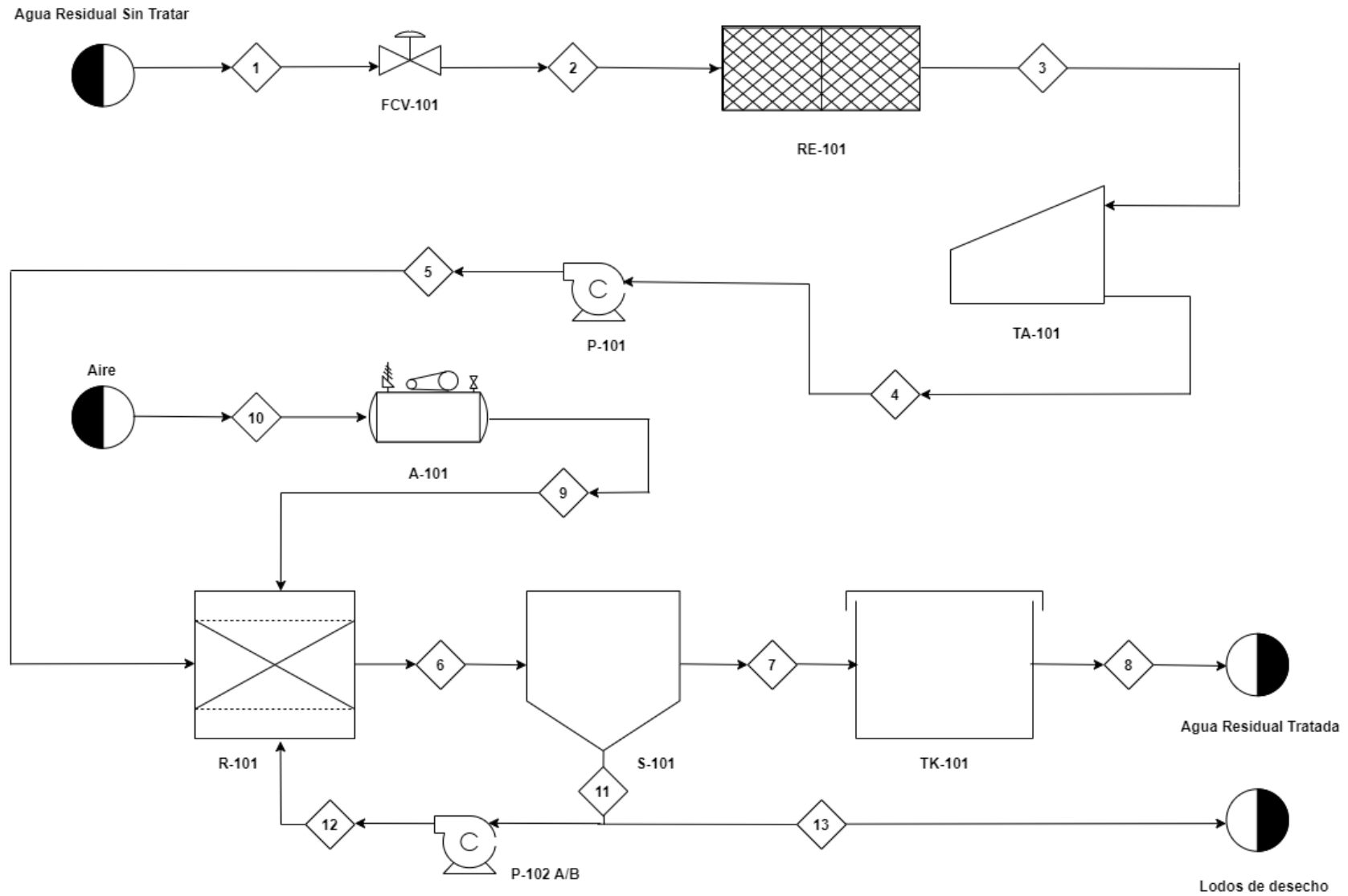
La toma de mediciones se realizaron in situ, donde el volumen de tanque séptico corresponde a  $2/3$  del volumen total del sistema, obteniéndose una capacidad de  $196 \text{ m}^3$ , mientras que los  $98 \text{ m}^3$  restantes corresponden al FAFA. Del diagnóstico se evidenció que el volumen requerido para la digestión anaerobia debe ser mayor, por lo que se concluye que las dimensiones actuales no son apropiadas para el caudal que está ingresando a la planta, provocando de esta manera la acumulación excesiva de lodos.

Se procedió a evaluar los resultados obtenidos para la propuesta planteada, lo que permitirá conocer su validez.

### 3.1 Diagrama de flujo

Para realizar el PFD se empleó la herramienta de creación y edición de diagramas gratuita Draw.io. Al inicio del proceso, el ingreso del agua residual doméstica, corriente 1, es regulada por una válvula manual. La corriente 2 pasa por las rejillas RE-101, este equipo ayuda con el tratamiento preliminar y luego ingresa a un tamiz rotatorio TA-101, el cual constituye el tratamiento primario del agua residual. La corriente 4 es enviada al tanque de aireación R-101, mediante una bomba P-101. Aire es suministrado, corriente 9, al R-101 gracias a un aireador A-101. La corriente 6, efluente, fluye hasta el sedimentador secundario S-101. El tanque de aireación y el sedimentador constituyen el proceso que se conoce como lodos activados. Una parte de los lodos que se generan en el S-101 se recirculan al R 101, corriente 11. Mientras que el resto es desechado, corriente 12. Finalmente, el efluente del sedimentador ingresa al tanque de desinfección, tratamiento avanzado, para posteriormente ser eliminado como agua residual tratada, corriente 8.

Los planos del sistema con sus dimensiones se elaboraron en el software AutoCAD, sección de Anexos.



RE-101 Rejillas      P-101 Bomba Centrífuga      TA-101 Tamiz Estático      A-101 Aireador      R-101 Digestor Aeróbico      S-101 Sedimentador Secundario      P-102 A/B Bomba Centrífuga Dual      TK-101 Tanque de Desinfección

Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas propuesto. [(Jouvin & Morales, 2021)]

### **3.2 Balance de materia**

El balance de masa de sólidos del sistema representado en PFD fue importante para estudiar la dinámica del proceso respecto a los datos que se tienen.

**Tabla 3.1: Porcentaje de remoción de sólidos en los equipos. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

Remoción de solidos			
Equipo	SST	DBO <sub>5</sub>	DQO
TA-101	30%	N/A	N/A
R-101	N/A	89%	89%
S-101	95%	75%	75%
TK-101	40%	45%	45%

**Tabla 3.2: Datos adicionales. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

Concentración de lodos en el R-101	2875
Purga en la corriente 12 (SST)	80%
Purga en la corriente 12 (DBO5)	N/A
Purga en la corriente 12 (DQO)	N/A

**Tabla 3.3: Hoja de cálculo del PFD. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Fase	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L	S/L	Gas	Gas	S/L	S/L	S/L
Temperatura (°C)	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Presión (atm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fase de vapor	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
SST (mg/L)	12633.33	12633.33	1263.33	379	379	2875	143.75	57.50	0	0	2731.25	2185	546.25
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	462	462	462	462	462	411.18	102.80	46.26	0	0	308.39	N/A	N/A
DQO (mg/L)	1000	1000	1000	1000	1000	890	222.50	100.13	0	0	667.50	N/A	N/A

De acuerdo con los datos dados por la empresa y la reingeniería del sistema propuesto, el agua residual tratada que se descargará cumple con los parámetros de calidad establecidos por la Legislación Ecuatoriana (Acuerdo Ministerial No 097-A, 2017).

**Tabla 3.4: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce. (Acuerdo Ministerial No 097-A, 2017)**

Parámetro	Límite máximo permitido
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	100
DQO (mg/L)	200
pH	Entre 6-9
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	130
Temperatura (°C)	Condición natural ± 3

**Tabla 3.5: Valores de descarga de la planta al río. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

Parámetro	Valor
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	46,26
DQO (mg/L)	100,13
pH	7,5
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	57,50
Temperatura (°C)	24

### 3.3 Diseño

Se calcularon las dimensiones de los principales equipos de la propuesta. Esto permitió comparar los valores obtenidos para los sistemas y conocer si se cuenta con el espacio disponible para su montaje. Los detalles de todos los cálculos se encuentran en Apéndice A, B, C y D.

**Tabla 3.6: Dimensiones de los equipos. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

Sistema Anaerobio (Situación actual)	Volumen (m <sup>3</sup> )
Tanque séptico	196
Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	98
<b>Total</b>	<b>294</b>
Sistema Anaerobio (Situación ideal)	
Tanque Séptico	750
Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente	450



<b>Total</b>	<b>1.200</b>
<b>Sistema Aerobio (Propuesta)</b>	
Tanque de Aireación	95
Sedimentador Secundario	23
<b>Total</b>	<b>118</b>

El volumen necesario para mantener una digestión anaerobia es sumamente mayor, 1200 m<sup>3</sup>. Continuar con este sistema en la planta ya no es viable para la empresa. Por lo que el cambio a un sistema aerobio es la mejor opción, pues las dimensiones de los equipos son menores. El tanque de aireación y el sedimentador secundario tienen un volumen de 118 m<sup>3</sup>, lo que representa el 40% del volumen actual del sistema que es de 294 m<sup>3</sup>, valor conjunto del tanque séptico y el filtro anaerobio.

La aplicación de un sedimentador secundario es fundamental. El efluente del reactor de lodos activados u otro proceso de crecimiento suspendido debe aclararse para reducir la concentración de sólidos cumpliendo con los límites de descarga. Al mismo tiempo, el lodo debe espesarse antes de recircularse de nuevo al reactor de lodos activados y antes de continuar con el tratamiento. El sedimentador secundario tiene que lograr ambos criterios.

Se suministra aire u oxígeno al tanque de aireación del proceso de lodos activados para proporcionar el oxígeno requerido por los microorganismos aeróbicos para la degradación de materia orgánica. La cantidad de oxígeno agregada debe ser suficiente para coincidir con la tasa de utilización de oxígeno de los microorganismos, y mantener un pequeño exceso en el tanque.

**Tabla 3.7: Sistema de aireación. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

<b>Demanda de oxígeno (kg/día)</b>	122
<b>Flujo de aire (m<sup>3</sup>/día)</b>	166
<b>Número de aireadores (-)</b>	2

De igual manera se calcularon los principales parámetros para la implementación de rejillas, como parte del tratamiento preliminar. Para el tamiz, se consideró más factible su adquisición directa en el mercado, que su diseño y posterior fabricación.

**Tabla 3.8: Dimensiones de las rejillas. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

<b>Número de barrotes (-)</b>	28
<b>Número de espacios entre barrotes (-)</b>	29
<b>Área de apertura de la rejilla (m<sup>2</sup>)</b>	1,1
<b>Velocidad del flujo a través de la rejilla (m<sup>2</sup>/s)</b>	0,003

La aireación que se le da al tanque impulsa al lodo para que este flote y se mezcle con el agua residual. Se logra entonces una homogenización completa del licor de mezcla, ayudando al desarrollo de los microorganismos y removiendo la materia orgánica. Debido a la implementación de este sistema aerobio, la eficiencia de remoción de contaminantes incrementa significativamente. Este alto porcentaje de remoción permitió alcanzar los parámetros de descarga del agua residual tratada al río.

**Tabla 3.9: Eficiencia de remoción. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

<b>Eficiencia de remoción de contaminantes (%)</b>	
<b>Tratamiento anaerobio</b>	42
<b>Tratamiento aerobio</b>	89

### **3.4 Costos**

El cálculo de los costos de la propuesta evaluada es fundamental para realizar su análisis económico. De esta manera se llegó a conocer la viabilidad y rentabilidad del proyecto. Para ello se realizó una cotización de inversión tomando en cuenta los principales costos de capital y operación.

#### **3.4.1 CAPEX**

El CAPEX, Capital Expenditure en inglés, o Costos de Capital en español permitió determinar los gastos de los nuevos activos fijos a adquirir. Este análisis se realizó fácilmente cotizando en Alibaba Group. Esta empresa tiene estimaciones generales de los costos de equipos dependiendo de ciertas características como: tipo, capacidad, etc. Los detalles de los equipos seleccionados se dan en el Apéndice D.

**Tabla 3.10: Costos Directos. [(Alibaba Group, 2021)]**

Equipo	Nombre de la unidad	Unidad	Costo Total
Tamiz	TA-101	1	\$ 3.880,00
Rejillas	RE-101	1	\$ 299,81
Aireador	A-101	2	\$ 13.598,00
Bomba	P-102	2	\$ 4.068,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 21.845,81</b>

**Tabla 3.11: Costos Indirectos. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

	Aproximación	Costo por Consideración
Contingencia	15% CBM	\$ 3.276,87
Honorarios	3% CBM	\$ 655,37
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 3.932,24</b>

Además, es necesario aplicar un incremento del al costo total del equipo, debido a los costos de entrega e importación, Apéndice D. Lo que da un total de: \$ 3.822,99.

<b>Costo de Capital Total</b>	<b>\$ 29.601,04</b>
-------------------------------	---------------------

### 3.4.1.1 FCI

El FCI por sus siglas en ingles que corresponden a Fixed Capital Investment, que es la Inversión de Capital Fijo. Se obtuvo mediante la Técnica del Factor Lang, que consiste en multiplicar un factor lang al costo del equipo comprado, incluyendo los costos de

entrega. El Factor Lang empleado es 4,1 correspondiente a una planta de procesos solido-liquido, Apéndice D-Tabla G.

**Tabla 3.12: Cálculo de Inversión de Capital Fijo. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

Costos de equipo	\$ 21.845,81
Costos de entrega	\$ 1092,29
Lang Factor	4.1
<b>FCI</b>	<b>\$ 94.046,21</b>

### **3.4.2 OPEX**

El OPEX o mejor conocido como los gastos operativos, son los costos en los que incurre una empresa para llevar a cabo sus operaciones diarias. Para su cálculo se consideró los costos directos e indirectos.

#### **3.4.2.1 Costos Directos**

Aquí intervienen los costos de la materia prima, personal operativo, servicios públicos, mantenimiento, etc. La empresa brinda un servicio por lo que no se tomaron en cuenta los costos de materia prima.

Los costos operativos se calcularon asumiendo el requerimiento de 2 operadores en turnos rotativos de 12 horas por día para mantener la planta en funcionamiento las 24 horas. En Ecuador, el salario básico es de \$ 400. Para el salario anual del operador se consideró el aporte del empleador, el fondo de reserva del segundo año y otros beneficios sociales.

Los costos de las utilidades, servicios públicos, se calcularon teniendo en cuenta el consumo de energía proporcionado o requerido por las bombas y aireadores. La frecuencia de reparaciones y mantenimientos se tomó en cuenta anualmente.

**Tabla 3.13: Costos Directos. [(Jouvin & Morales)]**

Consideración	Valor	Costo Anual
Personal de operación	CoL	\$ 12.000,00
Utilidades	C <sub>UT</sub>	\$ 3.141,00
Reparaciones y mantenimiento	0,06 FCI	\$ 5.642,77
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 20.783,77</b>

### 3.5 Comparación de Inversión Vs Costos

Para la inversión se tomó en cuenta el costo de capital total, además de los costos de operación directos. Los valores de evacuación y transporte de lodos tienen un valor aproximado de \$ 6.000,00 cada uno y esta actividad se la realiza actualmente 4 veces al año, por el exceso de lodos. Estos datos fueron proporcionados por la empresa y son incurridos en el año 2020.

Una proyección de los costos en diferentes años se realizó para saber en qué tiempo se retorna la inversión y se genera un beneficio. En el primer año la inversión cuenta con los costos de capital y operativos, a partir del segundo año se consideró solamente los costos operativos del nuevo sistema, Apéndice D. Por otro lado, se consideró que los costos de evacuación y transporte lodos aumentará un 5% cada año. Esto se debe a que los lodos seguirán creciendo y su exceso será cada vez mayor, por lo que se necesitará una frecuencia de mantenimiento periódica.

**Tabla 3.14: Costos en diferentes años. [(Jouvin & Morales)]**

	Sistema Propuesto	Sistema Actual
Año	Inversión	Costos de Evacuación y Transporte de Lodos
1	\$ 50.384,81	\$ 24.000,00
2	\$ 20.783,77	\$ 25.200,00
3	\$ 20.783,77	\$ 26.460,00
4	\$ 20.783,77	\$ 27.783,00
5	\$ 20.783,77	\$ 29.172,15

<b>Total</b>	<b>\$ 133.519,89</b>	<b>\$ 132.615,15</b>
6	\$ 20.783,77	\$ 30.630,75
<b>Total</b>	<b>\$ 154.303,66</b>	<b>\$ 163.245,90</b>

**Tabla 3.15: Análisis comparativo de ahorro con una proyección de 6 años. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

	<b>Costo</b>
Inversión	\$ 154.303,66
Evacuación y transporte de lodos	\$ 163.245,90
<b>Beneficio</b>	<b>\$ 8.942,24</b>

Con la proyección realizada en la Tabla 3.12 se observa como la inversión de capital inicial se recupera a partir del quinto año. Para el sexto año se realizó el análisis comparativo donde ya se obtiene el lucro esperado. Las cifras obtenidas en la Tabla 3.13, indican la rentabilidad de la reingeniería del sistema actual que se lleva en la PTARD.

# CAPÍTULO 4

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- El diagnóstico realizado del sistema actual determinó que el subdimensionamiento del tanque séptico y FAFA, es el principal causante de la excesiva acumulación de lodos en la planta donde se realizó el estudio, contando con volúmenes de 196 m<sup>3</sup> y 98 m<sup>3</sup>, respectivamente. El subdimensionamiento está ligado a que la planta no fue diseñada estimando un incremento potencial de la población, lo que ocasionó que el caudal actual de 280 m<sup>3</sup>/día de aguas residuales que ingresan para su tratamiento sea muy grande para las dimensiones de los equipos. De acuerdo con las NB (7229 y 13969) y las especificaciones técnicas del CPISCA que rigen los criterios de diseño para sistemas anaeróbicos, se determinó el volumen ideal de los equipos. Estos valores son de 750 m<sup>3</sup> para el tanque séptico y 450 m<sup>3</sup> para el filtro de flujo ascendente.
- Con base al espacio del terreno y a los equipos que disponemos, el sistema que mejor se adapta a estas limitantes es el conformado por un sistema de lodos activados. Este consta de rejillas de limpieza manual como parte del tratamiento preliminar, un tamiz rotatorio para el tratamiento primario y para el tratamiento secundario un reactor de digestión aerobia de mezcla completa y un sedimentador secundario. El diseño de la nueva planta se realizó en el software Draw.io. Al dimensionar los nuevos equipos que conforman este sistema, se concluyó que el proyecto es viable, evidenciándose en la reducción del dimensionamiento, para el tanque séptico se tiene un volumen de 95m<sup>3</sup> y para el sedimentador 23m<sup>3</sup>.
- Mediante una hoja de Excel se planteó el balance de masa del sistema propuesto. Los cálculos permitieron conocer el valor de los parámetros del agua tratada;

dichos parámetros evaluados fueron: DQO, DBO<sub>5</sub> y SST, aquí se aplicó la eficiencia de remoción encontrada del 89%. Tomando en cuenta el Acuerdo Ministerial No. 097-A, la NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA y a la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2169:98. “Agua: Calidad del agua, muestreo, manejo conservación de muestras”, los parámetros obtenidos en la corriente final, el agua residual tratada, cumplen con la política de calidad del Ecuador. Estos valores son DQO: 46,26 mg/L, DBO<sub>5</sub>: 100,13 mg/L y SST: 57,50 mg/L.

- Un análisis comparativo de los costos de inversión en contraste con los de mantenimiento y evacuación de lodos para una proyección de 6 años refleja la rentabilidad del proyecto. Resulta más económico invertir en el mejoramiento de la planta de tratamiento que continuar retirando la cantidad de lodos acumulados en exceso cada año. El beneficio de \$ 8.942,24 se obtiene en el sexto año, ya que aproximadamente a los 5.1 años se recupera la inversión de capital.

## **4.2 Recomendaciones**

- ✓ Debido a que el nuevo sistema empleará menos espacio del que se dispone actualmente, se recomienda colocar un colector de lodos. Este colector permitirá almacenarlos por un periodo corto de tiempo (máximo un día), evitando su constante retiro de la planta, y consecuentemente aminorando los costos operacionales. Por otro lado, es necesario mejorar el sistema eléctrico de la planta de tratamiento para evitar daños o fallos mecánicos en los equipos.
- ✓ Se recomienda asesorar a los operarios sobre el manejo adecuado de la planta. Deben tener conocimiento de cómo manejar el panel de control de los aireadores y el correcto manejo de las bombas. Así como la limpieza de las rejillas, que debe ser constante y el tamiz rotatorio se debe limpiar al menos una vez por día.



- ✓ Realizar un monitoreo constante de los parámetros del efluente permitirá llevar un control de la calidad de agua descargada al río. En caso de complicaciones, el monitoreo permitirá tomar medidas inmediatas.
  
- ✓ Aplicar la propuesta de diseño en todas las plantas que presenten dicho problema, de esta manera se promoverá el cuidado del medio ambiente, se aminorarán los costos operacionales y se mejorará la salud de la población en zonas vulnerables que dependen del río Daule para su abastecimiento.

# BIBLIOGRAFÍA

Acuerdo Ministerial No 097-A, A. 1. (2017). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes*. Quito: Ministerio del Ambiente.

Adegoke, A., & Stenstrom, T.-A. (Enero de 2019). *ResearchGate*. Obtenido de Septic Tanks: [https://www.researchgate.net/publication/331460346\\_Septic\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/331460346_Septic_Systems)

Amagua C.E.M. (2016). *Informe Anual Aguas de Samborondón*. Samborondón: Amagua C.E.M.

Buitrón, G., Reino, C., & Carrera, J. (2011). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales*. Barcelona: CYTD.

Calle, J., & Padrón, P. (2020). *Caracterización de efluentes de fosas sépticas particuales del Cantón Cuenca*. Cuenca: Universidad del Azuay.

CEPIS & OPS. (2005). *Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox*. Obtenido de GUÍAS PARA EL DISEÑO DE TECNOLOGÍAS DE ALCANTARILLADO:  
[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/CEPISO~1.PDF](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CEPISO~1.PDF)

Comisión Nacional del Agua. (2015). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua de México. (2016). *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos Anaerobios*. Coyoacán: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

da Silva, F., Ribeiro, L., Lima, G. S., & Gomes, M. J. (Marzo de 2013). *ResearchGate*.  
Obtenido de Septic tank combined with Anaerobic filter and conventional UASB:  
[https://www.researchgate.net/publication/273222235\\_Septic\\_tank\\_combined\\_with\\_Anaerobic\\_filter\\_and\\_conventional\\_UASB\\_-\\_Results\\_from\\_full\\_scale\\_plants](https://www.researchgate.net/publication/273222235_Septic_tank_combined_with_Anaerobic_filter_and_conventional_UASB_-_Results_from_full_scale_plants)

Davis, M. L. (2010). *Water and Wastewater Engineering-Design Principles and Practice*.  
New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia. (2000). *RAS-SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN*. Bogota: Ministerio de Desarrollo Económico.

Fàbregas, J. (17 de Mayo de 2020). *AIGUES.NET*. Obtenido de AIGUES.NET:  
<https://www.aigues.net/tratamiento-anaerobio-aguas-residuales-alta-biodegradabilidad/>

Fernández, A., Verduzco, M., Senés, C., & Yebra, C. (Octubre de 2020). *ResearchGate*.  
Obtenido de Mathematical Modeling of a Domestic Wastewater Treatment System  
Combining a Septic Tank, an Up Flow Anaerobic Filter, and a Constructed  
Wetland:  
[https://www.researchgate.net/publication/344965998\\_Mathematical\\_Modeling\\_of\\_a\\_Domestic\\_Wastewater\\_Treatment\\_System\\_Combining\\_a\\_Septic\\_Tank\\_an\\_Up\\_Flow\\_Anaerobic\\_Filter\\_and\\_a\\_Constructed\\_Wetland](https://www.researchgate.net/publication/344965998_Mathematical_Modeling_of_a_Domestic_Wastewater_Treatment_System_Combining_a_Septic_Tank_an_Up_Flow_Anaerobic_Filter_and_a_Constructed_Wetland)

Guamán, V., & Molina, M. (2015). *EVALUACIÓN DE LAS PLANTAS DE DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL DE LAS COMUNIDADES DE MACAS Y SAN PEDRO, CANTÓN CUENCA, AZUAY*. Cuenca: Universidad de Cuenca.

Leguisamon, J. (08 de Febrero de 2016). *SlideShare*. Obtenido de Calculo de Tanque  
Septico segun Norma Venezolana:  
<https://www.slideshare.net/JOAN13300/calculo-tanque-septico-de-acuerdo-a-normas-venezolanas>

- Lemos, C. (2007). *Anaerobic Reactors*. London: IWA.
- López, U. (2015). *Inventario de Recursos Energéticos de biomasa biodegradable en Sonora, México*. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Mara, D. (2004). *Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries (1st ed.)*. London: Earthscan.
- Metcalf & Eddy, I. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse (Fourth Edition)*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Moeller, G., & Tomasini, A. (2004). *MICROBIOLOGÍA DE LODOS ACTIVADOS*. Memorias.
- Oluwafemi, A., Hassan, K., Adesola, S., Kiitan, O., & Oladele, J. (2019). Engineering Design of Combined Septic Tank with Treatment Facilities for Partial Treatment of Wastewater. *Journal of Applied Sciences*, 39-47. Obtenido de Engineering Design of Combined Septic Tank with Treatment Facilities for Partial Treatment of Wastewater: [https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2019.39.47#176619\\_b](https://scialert.net/fulltext/?doi=jas.2019.39.47#176619_b)
- Osorio, F., Torres, J., & Mercedes, S. (2010). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes*. Madrid: Díaz de Santos.
- Rada, J. (2019). *Evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tipo anaerobia, que trata un caudal medio diario (Qcmd) de 25 m<sup>3</sup>/d*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Richard, T., Richard, B., Wallace, W., Joseph, S., & Debangsu, B. (2012). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Process*. Michigan: Pearson Education, Inc.

- Riffat, R. (2012). *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*. New York: IWA.
- Rios, R. (2009). DISMINUCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE ORGÁNICA DEL EFLUENTE DE LAS CÁMARAS SÉPTICAS UTILIZADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA CIUDAD DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA. *Revistas Bolivianas [Online]*, 14-23.
- Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *Environmental biotechnology: Principles and Applications (International ed.)*. Singapore: McGraw Hill.
- Rowse, L. (2011). *Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries*. Tampa: University of South Florida.
- Rumana, R. (2013). *FUNDAMENTALS OF WASTEWATER TREATMENT AND ENGINEERING*. London: Taylor & Francis Group, LLC.
- Sáez, A., & Urdaneta G., J. A. (3 de Septiembre de 2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, págs. 121-135.
- Solis, A. (2016). *Estrategia para el mejoramiento del costo-beneficio del tratamiendo de lodos de Amagua C.E.M.* Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2016). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies (2do ed.)*. London: IWA.
- Van Haandel, A., Kato, M. T., Cavalcanti, P. F., & Florencio, L. (2006). *Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater*. Brasil: Springer.
- Van Lier, J., Mahmoud, N., & Grietje, Z. (2012). *Anaerobic Wastewater Treatment*. London: IWA.

Villegas, J., Guerrero, J., Castaño, J., & Paredes, D. (2006). *SciELO*. Obtenido de Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia:  
[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702006000300007](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702006000300007)

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## Dimensionamiento ideal del sistema

Número de habitantes:

$$350 \text{ viviendas} \times \frac{5 \text{ habitantes}}{1 \text{ vivienda}} = 1750 \text{ habitantes (Datos proporcionados por la empresa)}$$

Volumen útil del tanque:

$$V = 1000 + N (CT + K Lf)$$

$$V = 1000 + 1750 \text{ hab} \left( 160 \frac{\text{L}}{\text{hab} * \text{día}} * 1 \text{ día} + 217 \text{ días} * 1 \frac{\text{L}}{\text{hab} * \text{día}} \right)$$

$$V = 660,75 \text{ m}^3$$

Los datos se obtuvieron de las normas brasileñas:

$$C = 160 \text{ L/hab*día (Residencia de alto nivel)}$$

$$Lf = 1 \text{ L/hab*día (Residencia de alto nivel)}$$

$$K = 217 \text{ días (intervalo de 5 años)}$$

$$T = 1 \text{ día (hasta 1500 L de contribución diaria)}$$

Con dicho volumen útil, la altura máxima del tanque séptico fue de 2,8 m.

Dimensiones del tanque séptico:

$$\text{Largo} = X$$

$$\text{Ancho} = Y$$

De acuerdo con la Norma, se asumió que  $X = 2Y$  y una altura útil  $h$  de 2.8 m.



$$X \cdot Y \cdot h = 660.75 \text{ m}^3$$

$$2Y \cdot Y \cdot h = 660.75 \text{ m}^3$$

$$2Y^2 \cdot 2.8 \text{ m}^2 = 660.75 \text{ m}^3$$

$$Y = \sqrt{\frac{660.75}{2 \cdot 2.8}} \quad Y \approx 11 \text{ m}, \text{ entonces } X = 2 \cdot 11, X = 22 \text{ m}$$

Por lo tanto, se construirá un tanque séptico que tendrá las siguientes dimensiones útiles:

Longitud total = 22 m; Ancho = 11 m y Altura = 2.8 m

De acuerdo con la norma se debe considerar un espacio libre adicional a la altura útil que es de 0.3 m.

Altura total = 2.8 + 0.3 = 3.1 m

Con base a esto, el volumen de diseño del tanque es de: 750 m<sup>3</sup>.

Volumen de la Cámara 1 =  $750 \cdot \frac{2}{3} = 500 \text{ m}^3$ .

Volumen de la Cámara 2 =  $750 \cdot \frac{1}{3} = 250 \text{ m}^3$ .

Con la misma altura y ancho, el largo de cada cámara será:

Longitud de cámara 1 =  $\frac{500 \text{ m}^3}{(11 \cdot 3.1) \text{ m}^2} \approx 15 \text{ m}$

Longitud de cámara 2 =  $\frac{250 \text{ m}^3}{(11 \cdot 3.1) \text{ m}^2} \approx 7 \text{ m}$

Volumen de almacenamiento de lodos:

$$V_d = G * P * N$$

$$V_d = \left( \frac{40 \text{ L}}{\text{hab} * \text{años}} * 1750 \text{ hab} * 3 \text{ años} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) = 210 \text{ m}^3$$

Volumen útil del lecho filtrante:

$$V = 1,60 * N * C * T$$

$$V = 1.6 * 1750 \text{ hab} * 160 \frac{\text{L}}{\text{hab} * \text{día}} * 1 \text{ día} \approx 450 \text{ m}^3$$

## APÉNDICE B

### Sistema anaerobio

Tabla B: Resumen de los parámetros de diseño para el crecimiento microbiano en reactores de mezcla completa. [ (Davis, 2010)]

Parameter	Unit	Value	
		Range	Typical
Solids yield, $Y$			
Fermentation	g VSS/g COD	0.06–0.12	0.10
Methanogenesis	g VSS/g COD	0.02–0.06	0.04
Overall combined	g VSS/g COD	0.05–0.10	0.08
Decay coefficient, $k_d$			
Fermentation	g/g · d	0.02–0.06	0.04
Methanogenesis	g/g · d	0.01–0.04	0.02
Overall combined	g/g · d	0.02–0.04	0.03
Maximum specific growth rate, $\mu_m$			
35°C	g/g · d	0.30–0.38	0.35
30°C	g/g · d	0.22–0.28	0.25
25°C	g/g · d	0.18–0.24	0.20
Half-velocity constant, $K_s$			
35°C	mg/L	60–200	160
30°C	mg/L	300–500	360
25°C	mg/L	800–1100	900
Solids retention time (SRT)			
35°C	d	10–20 <sup>a</sup>	15
30°C	d	15–30 <sup>a</sup>	N/A
24°C	d	20–40 <sup>a</sup>	N/A
Methane			
Production at 35°C	m <sup>3</sup> /kg COD	0.4	0.4
Density at 35°C	kg/m <sup>3</sup>	0.6346	0.6346
Content of gas	%	60–70	65
Energy content	kJ/g	50.1	50.1

## La masa de sólidos biológicos sintetizados

$$P_x = \frac{YQ(S_o - S)(10^{-3} \frac{g}{kg})}{1 + k_d(\theta_c)}$$

Donde,

$P_x$ = Masa neta de tejido celular producida por día, kg / d

$Y$ = Rendimiento de sólidos, g SSV/g DQO

$Q$ = caudal, m<sup>3</sup>/d

$S_o$ = bsDQO afluente, g/ m<sup>3</sup>

$S$ = bsDQO efluente, g/ m<sup>3</sup>

$k_d$ = Coeficiente de decaimiento, g/g\*d

$\theta_c$ = Tiempo medio de residencia celular, día

## Caudal del afluente

$$\text{Dotación} = 200 \frac{L}{\text{habitantes} * \text{día}} \quad [\text{Dato brindado por la empresa}]$$

Se considera que el 80% del agua potable se convierte en agua residual:

$$1750 \text{ habitantes} * 200 \frac{L}{\text{habitantes} * \text{día}} * \frac{1 m^3}{1000 L} * 0.8 = 280 \frac{m^3}{\text{día}}$$

## Balance de materia

La carga orgánica diaria aplicada es igual a:

$$DQO_{\text{afl}} = \text{bsDQO} \times Q$$

$$DQO_{\text{afl}} = 1000 \frac{g}{m^3} \times 280 \frac{m^3}{\text{día}}$$

$$DQO_{\text{afI}} = 2,8 \times 10^5 \frac{\text{g}}{\text{dia}}$$

Mientras que la carga orgánica en el efluente es:

$$DQO_{\text{efl}} = bsDQO \times Q$$

$$DQO_{\text{efl}} = 583 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \times 280 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

$$DQO_{\text{afl}} = 163.240 \frac{\text{g}}{\text{dia}}$$

La masa de sólidos biológicos sintetizado:

$$DQO_{\text{mo}} = \frac{Y(DQO_{\text{afl}} - DQO_{\text{efl}})(10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{kg}})}{1 + k_d(\theta_c)}$$

$$DQO_{\text{mo}} = \frac{\left(0,08 \frac{\text{g SSV}}{\text{g DQO}}\right) \times \left[\left(2,8 \times 10^5 \frac{\text{g}}{\text{dia}}\right) - \left(1,4 \times 10^4 \frac{\text{g}}{\text{dia}}\right)\right] \times \left(10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{kg}}\right)}{1 + \left[\left(0,03 \frac{\text{g}}{\text{g} \cdot \text{dia}}\right) \times (1 \text{ dia})\right]}$$

$$DQO_{\text{mo}} = 20,66 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \approx 21 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

Este resultado está en kg de SSV.

La producción específica de lodos se determinó mediante la relación de la producción diaria de lodos (PDL) y la carga orgánica aplicada ( $DQO_{\text{afl}}$ ) (Comisión Nacional del Agua de México, 2016):

$$PEL = \frac{PDL}{DQO_{\text{afl}}}$$

Donde, la PDL es igual a la concentración de sólidos en el efluente por el flujo volumétrico, por lo tanto:

$$PEL = \frac{bsSST \times Q}{DQO_{afl}}$$

$$PEL = \frac{379 \frac{g}{m^3} \times 280 \frac{m^3}{dia} \times (10^{-3} \frac{g}{kg})}{2,8 \times 10^5 \frac{g}{dia} \times (10^{-3} \frac{g}{kg})}$$

$$PEL = 0,379 \frac{kg SST}{kg DQO}$$

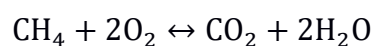
De la ecuación del balance de materia se despeja la carga de gas metano, teniendo:

$$DQO_{CH_4} = DQO_{afl} - DQO_{efl} - DQO_{mo}$$

$$DQO_{CH_4} = 2,8 \times 10^5 \frac{g}{dia} - 163.240 \frac{g}{dia} - 20660 \frac{g}{dia}$$

$$DQO_{CH_4} = 96100 \frac{g}{dia}$$

La pérdida de DQO en la digestión anaeróbica se explica por la producción de metano. El DQO equivalente de metano es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar el metano a dióxido de carbono y agua:



Por tanto, la DQO por mol de metano es  $2(32 \text{ g } O_2/\text{mol}) = 64 \text{ g } O_2/\text{mol } CH_4$ .

La ley de los gases ideales proporciona un método para estimar el volumen de producción de metano para un determinado bsDQO de lodos. En condiciones estándar, 0 C° y 1 atm, el volumen de metano es 22,414 L/mol.

$$\frac{22,414 \frac{L}{mol}}{64 \frac{g}{mol}} = 0,35 \frac{L}{g DQO}$$

Normalmente, esto se estima en el 35% de la producción de gas.

Ya que esta producción se da en condiciones estándar, se corrigió la producción teórica de gas metano para la temperatura real del digester anaeróbico. La temperatura a la cual trabaja el digester anaeróbico en la planta es a temperatura ambiente, aproximadamente 24.1 °C.

$$\text{Producción actual de gas} = \left(0,35 \frac{L \text{ CH}_4}{g \text{ COD}}\right) \times \frac{(273,15 + 24,1) \text{ K}}{273,15 \text{ K}}$$

$$\text{Producción actual de gas} = 0,38 \frac{L \text{ CH}_4}{g \text{ COD}}$$

Una vez que se modificó la producción de gas, fue posible el cálculo del caudal de gas metano:

$$Q_{\text{CH}_4} = DQO_{\text{CH}_4} \times \text{Producción actual de gas}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 96100 \frac{g}{\text{dia}} \times 0,38 \frac{L \text{ CH}_4}{g \text{ COD}} \times \frac{10^{-3} \text{ m}^3}{L}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 36,52 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \approx 37 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

Las ecuaciones y suposiciones empleadas para este balance se extrajeron de (Davis, 2010).

Finalmente, para el análisis de la eficiencia de operación del proceso, remoción de contaminantes, se empleó:

$$C_{\text{efl}} = C_{\text{afl}} \times \left(1 - \frac{E}{100\%}\right)$$

$$DQO_{\text{efl}} = DQO_{\text{afl}} \times \left(1 - \frac{E}{100\%}\right)$$

$$E = \left(1 - \frac{DQO_{\text{efl}}}{DQO_{\text{afl}}}\right) \times 100\%$$

$$E = \left(1 - \frac{163.240 \frac{\text{g}}{\text{dia}}}{2,8 \times 10^5 \frac{\text{g}}{\text{dia}}}\right) \times 100\%$$

$$E = 41,7 \% \approx 42 \%$$



## APÉNDICE C

### Sistema aerobio

**Tabla C: Constantes cinéticas para la digestión aerobia. [ (Davis, 2010)]**

Parameter	Basis	Value <sup>a</sup>	
		Range	Typical
$K_s$	mg/L BOD <sub>5</sub>	25–100	60
$k_d$	d <sup>-1</sup>	0–0.30	0.10
$\mu_m$	d <sup>-1</sup>	1–8	3
$Y$	mg VSS/mg BOD <sub>5</sub>	0.4–0.8	0.6

**Tabla D: Valores típicos del tiempo de retención celular en el tratamiento biológico de lodos activos. (Buitrón et al., 2011)**

Objetivo del Tratamiento	TRS (días)
Eliminación biológica de materia orgánica	3–5
Eliminación biológica de materia orgánica y nitrógeno	5–20
Eliminación biológica de fósforo	5–10
Degradación de compuestos xenobióticos	10–50

#### Volumen del tanque de aireación

$$V = \frac{\theta_c Q Y (S_o - S)}{X(1 + k_d \theta_c)}$$

$$V = \frac{4 \text{ d} \times 280 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 0,6 \frac{\text{mg SSV}}{\text{mg DBO}_5} \times (462 \frac{\text{mg DBO}_5}{\text{L}} - 50 \frac{\text{mg DBO}_5}{\text{L}})}{2.300 \frac{\text{mg SSV}}{\text{L}} \times [1 + (0,1 \text{ d}^{-1} \times 4 \text{ d})]}$$

$$V = 85,98 \text{ m}^3 \approx 86 \text{ m}^3$$

Generalmente para tanques se aplica un factor de seguridad del 10%:

$$V = 86 \text{ m}^3 \times 1,10 = 94,6 \text{ m}^3 \approx 95 \text{ m}^3$$

### Tiempo de retención

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

$$TRH = \frac{95 \text{ m}^3}{280 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}$$

$$TRH = 0,34 \text{ días} = 8,14 \text{ horas} \approx 8 \text{ horas}$$

### Lodo producido

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

$$Y_{\text{obs}} = \frac{0,6 \frac{\text{mg SSV}}{\text{mg DBO}_5}}{1 + (0,1 \text{ d}^{-1} \times 4 \text{ d})}$$

$$Y_{\text{obs}} = 0,43 \frac{\text{mg SSV}}{\text{mg DBO}_5}$$

y,

$$P_x = Y_{\text{obs}} Q (S_o - S) \left( \frac{10^{-6} \text{kg}}{\text{mg}} \right)$$

$$P_x = 0,43 \frac{\text{mg SSV}}{\text{mg DBO}_5} \times 280.000 \frac{\text{L}}{\text{dia}} \times \left( 462 \frac{\text{mg DBO}_5}{\text{L}} - 50 \frac{\text{mg DBO}_5}{\text{L}} \right) \times \left( \frac{10^{-6} \text{kg}}{\text{mg}} \right)$$

$$P_x = 49,60 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \approx 50 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

Este resultado está en kg de SSV, en kg de SST es igual a:

$$P_{x(\text{SST})} = \frac{P_x}{0,8} = \frac{50 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}}{0,8} = 62,50 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

### **Eficiencia de remoción**

$$E = \left( \frac{S_o - S}{S_o} \right) 100\%$$

$$E = \left( \frac{462 \frac{\text{mg DBO}_5}{\text{L}} - 50 \frac{\text{mg DBO}_5}{\text{L}}}{462 \frac{\text{mg DBO}_5}{\text{L}}} \right) 100\%$$

$$E = 89,17 \approx 89\%$$

### **Demanda de oxígeno**

$$M_{O_2} = Q(S_o - S) \left( 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{g}} \right) - 1,42 P_x$$

Convirtiendo el rbsDBO<sub>5</sub> en bDBO<sub>5</sub>:

$$S_o = \frac{462 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{0,60} = 770 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$S = \frac{50 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{0,60} = 83,33 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Retomando:

$$M_{O_2} = \left[ 280.000 \frac{\text{L}}{\text{dia}} \times \left( 770 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 83,33 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \left( 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mg}} \right) \right] - \left( 1,42 \times 49,60 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \right)$$

$$M_{O_2} = 121,84 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \approx 122 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

Factor de seguridad=2:

$$M_{O_2} = 121,84 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \times 2 = 243,68 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} \approx 244 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

### Flujo de aire

$$P_d = P_{\text{atm,H}} + P_{\text{agua}}$$

$$P_d = \frac{\text{Presión atmosférica}}{\text{Peso específico del aire}} + P_{\text{agua}}$$

$$P_d = \frac{101,325 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{9,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}} + 3\text{m}$$

$$P_d = 13,34 \text{ m}$$

$$C_{\text{avg}} = (C_{s,T,H})(0,5) \left( \frac{P_d}{P_{\text{atm,H}}} + \frac{O_t}{21} \right)$$

De la Tabla a 24°C,  $C_{s,T,H} = 8,53 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$

$$C_{\text{avg}} = \left(8,53 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) (0,5) \left(\frac{13,34 \text{ m}}{10,34 \text{ m}} + \frac{19}{21}\right)$$

$$C_{\text{avg}} = 9,36 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

La tasa de transferencia de oxígeno estándar:

$$SOTR_{\text{req}} = \left[ \frac{AOTR_{\text{req}}}{(1,024^{T-20})(\alpha)(F)} \right] \left[ \frac{C_{s,20}}{(\beta)(C_{\text{avg}} - C_L)} \right]$$

$$SOTR_{\text{req}} = \left[ \frac{121,84 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{(1,024^{24-20})(0,5)(0,9)} \right] \left[ \frac{9,17 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{(0,95)(9,36 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 4 \frac{\text{mg}}{\text{L}})} \right]$$

$$SOTR_{\text{req}} = 443,46 \approx 440 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

El SOTR del fabricante ( $SOTR_{\text{manuf}} = 1080 \text{ kg/d}$ )

$$\frac{SOTR_{\text{manuf}}}{SOTR_{\text{req}}} = \frac{1080 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{440 \frac{\text{kg}}{\text{d}}} = 2,45$$

El caudal de aire:

$$AOTR_{\text{Flujo}} = \left[ \frac{AOTR}{(\text{Densidad del aire})(\% \text{ masa de } O_2 \text{ en el aire})} \right] \left( \frac{SOTR_{\text{req}}}{SOTR_{\text{manuf}}} \right)$$

$$AOTR_{\text{Flujo}} = \left[ \frac{121,84 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{(1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(0,232)} \right] \left( \frac{1}{2,45} \right)$$

$$AOTR_{\text{Flujo}} = 166,17 \approx 166 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

El flujo de aire del fabricante es igual a  $150\text{m}^3$ , por tanto, el número de aireadores requeridos:

$$\frac{166 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{150 \frac{\text{m}^3}{\text{día} * \text{aireador}}} = 1,10 \approx 1 \text{ aireador}$$

Sin embargo, se recomienda emplear otro aireador. Uno se tendrá en mantenimiento y otro operando.

### **Diseño de rejillas de limpieza manual**

#### Número de barrotes

$$N = \frac{B - L}{b + L}$$

$$N = \frac{1 \text{ m} - 0.025 \text{ m}}{0.01 \text{ m} + 0.025 \text{ m}} = 28 \text{ barrotes.}$$

#### Número de espacios entre barrotes

$$N_{\text{esp}} = N + 1$$

$$N_{\text{esp}} = 28 + 1 = 29$$

#### Área de apertura de la rejilla

$$A = N_{\text{esp}} * \text{Espacio entre barras} * \text{Profundidad del agua}$$

$$A = 29 * 0.025 \text{ m} * 1.5 \text{ m} = 1.1 \text{ m}^2$$

#### Velocidad del flujo a través de la rejilla

$$V_s = \frac{Q}{A}$$

$$V_s = \frac{0.0032 \text{ m}^3}{s} * \frac{1}{1.1 \text{ m}} = 0.003 \frac{\text{m}^2}{s}$$

### Diseño del Sedimentador Secundario

#### Flujo de retorno de lodos

Concentración de SSLM = 2875 g / m<sup>3</sup>

$$X = \text{SSLM} * 0.8$$

$$X_e = 25 \text{ g} / \text{m}^3$$

$$X_r = 10000 \text{ mg} / \text{L}$$

$$Q_w = \frac{95 \text{ m}^3 * \left( \frac{2875 \text{ g}}{\text{m}^3} * 0.8 \right) - \frac{280 \text{ m}^3}{\text{día}} * \left( \frac{25 \text{ g}}{\text{m}^3} * 0.8 \right) * 4 \text{ días}}{\left( \frac{10000 \text{ g}}{\text{m}^3} * 0.8 \right) * 4 \text{ días}} = 6.13 \frac{\text{m}^3}{\text{días}}$$

Por lo tanto, el flujo que ingresa al clarificador:

$$Q_c = Q + Q_w = \frac{280 \text{ m}^3}{\text{día}} + 6.13 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 286,13 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

#### Carga de sólidos que ingresan al clarificador

$$\text{SSLM} * Q_c = \frac{2.875 \text{ Kg}}{\text{m}^3} * \frac{286.13 \text{ m}^3}{\text{día}} = \frac{822.62 \text{ Kg}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 34.28 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

**Tabla E: Datos experimentales. [ (Rumana, 2013)]**

Concentración de sólidos (g/m <sup>3</sup> )	Flujo de sólidos (Kg/m <sup>2</sup> * h)
1000	5
2000	6.4

3000	6
4000	4.4
5000	2.5
6000	1.68
12000	0.72

De acuerdo con la concentración de 2875 g/m<sup>3</sup>, el flujo de sólidos aproximadamente es de 6 Kg/m<sup>2</sup>\*h.

Área superficial requerida para la sedimentación es de:

$$A_s = \frac{34,28 \text{ Kg}}{h} * \frac{\text{m}^2 * h}{6 \text{ Kg}} = 5.71 \text{ m}^2$$

**Tabla F: Datos experimentales. [ (Rumana, 2013)]**

Concentración de sólidos (g/m <sup>3</sup> )	Velocidad de asentamiento (m/h)
1000	5
2000	3.2
3000	2
4000	1.1
5000	0.5
6000	0.28
12000	0.06

Para la misma concentración de sólidos utilizada anteriormente, la velocidad de asentamiento será aproximadamente de 2.5 m/h

Asumiendo que: Q<sub>w</sub> = 0. El área requerida para la clarificación es:

$$A_c = \frac{\frac{280 \text{ m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}}{\frac{2.5 \text{ m}}{h}} = 4.67 \text{ m}^2$$

Como A<sub>s</sub> > A<sub>c</sub>, el diseño estará basado en el área de sedimentación, con una altura h = 3 m



### Diámetro del sedimentador

$$\varnothing = \sqrt{\frac{4 * 5.71 \text{ m}^2}{\pi}} \approx 3 \text{ m}$$

$$\text{El diseño del área superficial} = \frac{\pi * (3^2)}{4} = 7 \text{ m}^2$$

### Volumen del sedimentador

$$V_{sed} = \pi \times 3 \text{ m} \times (1.5^2) = 21 \text{ m}^3$$

Se considero un factor de seguridad del 10%, por tanto:

$$\text{Volumen de diseño} = 21 \text{ m}^3 \times 1.1 = 23 \text{ m}^3$$

### Tiempo de retención hidráulico

$$\text{TRH}_{sed} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Caudal}} = \frac{23 \text{ m}^3}{11.67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 2 \text{ horas}$$

# APÉNDICE D

## Costos

### Lang Factor

Tabla G: Factores de Lang para plantas químicas. [ (Tourton et al., 2012)]

Tipo de planta	Lang Factor
De procesos solidos	3,9
De procesos solidos-líquidos	4,1
De procesos líquidos	4,8

### Costos de Equipos

Tabla H: Cotización de equipos en el mercado. [(Jouvin&Morales, 2021)]

Equipo	Unidad	Link en el mercado
Tamiz	1	<a href="https://spanish.alibaba.com/product-detail/waste-water-sewage-automatic-self-cleaning-rotary-screen-cleaner-roto-sieve-drum-strainer-machine-1600059479102.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.6325503fYwjVVJ&amp;s=p">https://spanish.alibaba.com/product-detail/waste-water-sewage-automatic-self-cleaning-rotary-screen-cleaner-roto-sieve-drum-strainer-machine-1600059479102.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.6325503fYwjVVJ&amp;s=p</a>
Aireador	1	<a href="https://spanish.alibaba.com/product-detail/treatment-plant-machinery-submersible-aerator-for-fabric-and-yarn-dyeing-wastewater-treatment-1600196910077.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.391a4688NgYTfV&amp;s=p">https://spanish.alibaba.com/product-detail/treatment-plant-machinery-submersible-aerator-for-fabric-and-yarn-dyeing-wastewater-treatment-1600196910077.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.391a4688NgYTfV&amp;s=p</a>
Bomba	2	<a href="https://spanish.alibaba.com/product-detail/rubber-lined-wellpoint-recirculation-salt-mining-concrete-sand-sludge-mud-dredge-acid-horizontal-centrifugal-sewage-slurry-pump-1600310800148.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.36f46376WhExMe&amp;s=p">https://spanish.alibaba.com/product-detail/rubber-lined-wellpoint-recirculation-salt-mining-concrete-sand-sludge-mud-dredge-acid-horizontal-centrifugal-sewage-slurry-pump-1600310800148.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.36f46376WhExMe&amp;s=p</a>

### Costos de transporte e importación de equipos

Tabla 2: Impuestos adicionales a los costos de los equipos.

5% de Transporte	\$ 1092,29
0,5 % de Fodinda	\$ 109,21
12% de IVA	\$ 2621,49

<b>0% de Tributos de Importación</b>	\$ 0
<b>Total</b>	\$ 3.822,99

### Costos de Operación

**Tabla I: Personal de operación. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

<b>Detalle</b>	<b>M.O.X/Mes</b>	<b>Meses</b>	<b>Costo Anual</b>
Salario de los operadores	\$800,00	12	\$ 9.600,00
Salario de los operadores /Beneficios Sociales	\$ 200,00	12	\$ 2.400,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1.000,00</b>		<b>\$ 12.000,00</b>

**Tabla J: Requisitos de utilidad. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

<b>Utilidad</b>	<b>Servicio (kWh/año)</b>	<b>Costo (\$/kWh)</b>	<b>Costo Total</b>
Electricidad	300	10,47	\$ 3.141,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 3.141,00</b>

**Tabla 3: Inversión de capital en una proyección de 5 años. [(Jouvin & Morales, 2021)]**

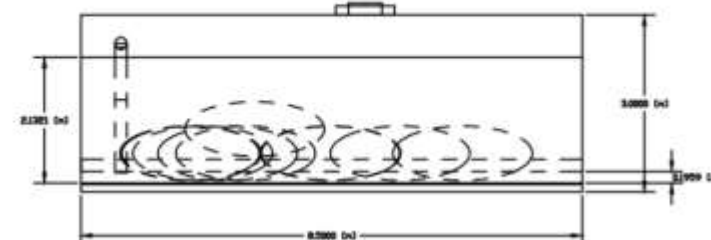
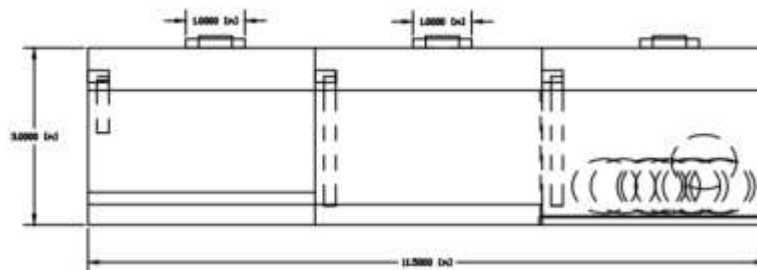
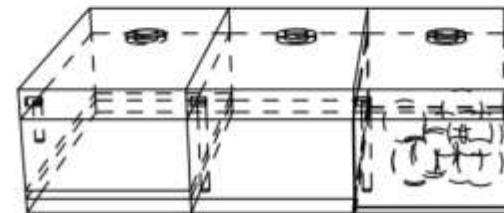
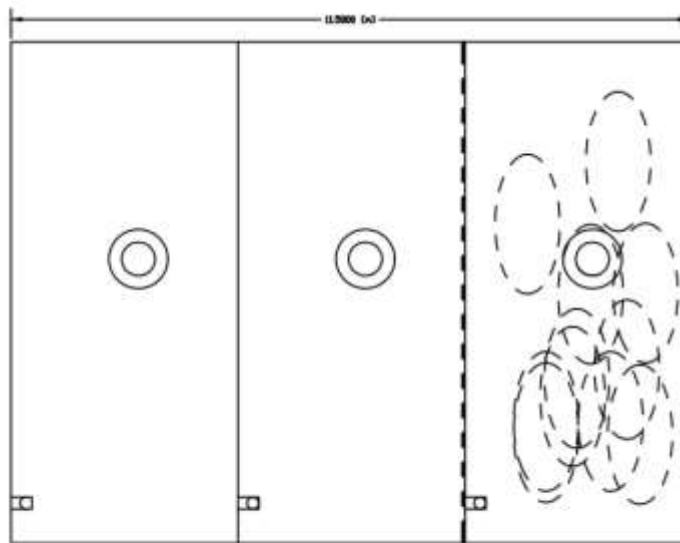
<b>Año</b>	<b>Costos de Capital</b>	<b>Costos de Operación</b>	<b>Total</b>
<b>1</b>	\$ 29.601,04	\$ 20.783,77	\$ 50.384,81
<b>2</b>	-	\$ 20.783,77	\$ 20.783,77
<b>3</b>	-	\$ 20.783,77	\$ 20.783,77
<b>4</b>	-	\$ 20.783,77	\$ 20.783,77
<b>5</b>	-	\$ 20.783,77	\$ 20.783,77



# ANEXOS

## Sistema Anaerobio (Actual)

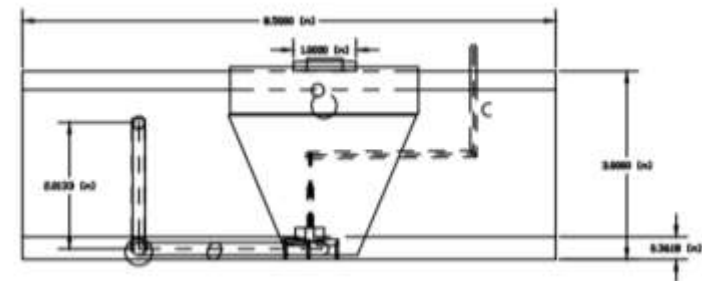
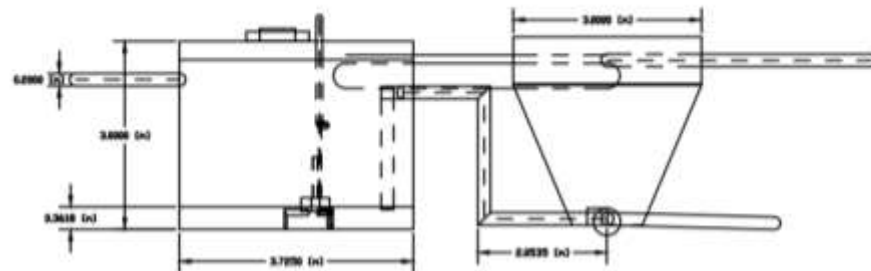
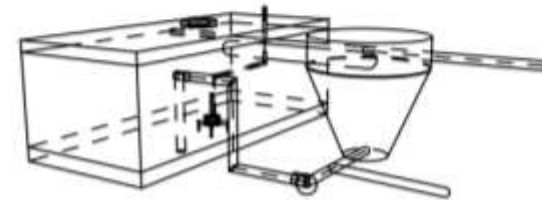
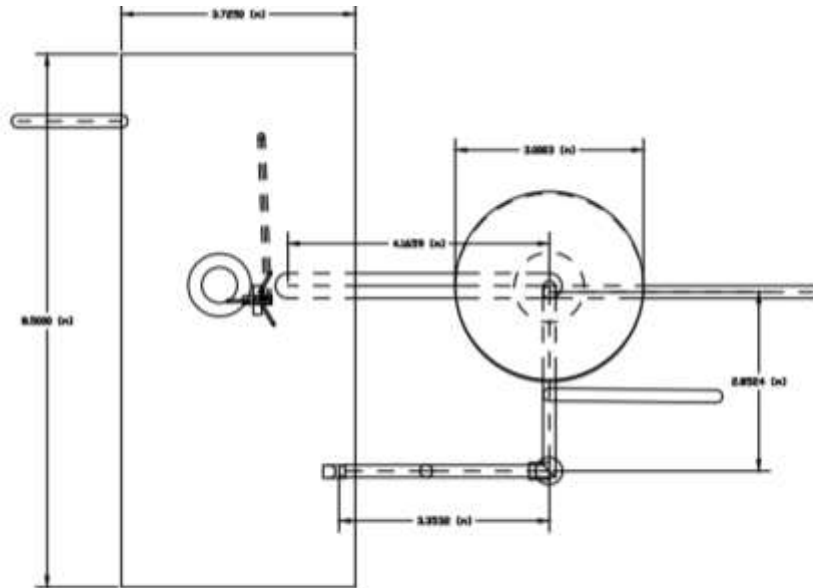
Está constituido por un tanque séptico de dos cámaras y un filtro anaerobio de flujo ascendente con piedra como medio filtra





## Sistema Aerobio (Propuesta)

Está constituido por un tanque de aireación y un sedimentador secundario.





# Normas Brasileñas 7229/1993

4	Cópia não autorizada	NBR 7229/1993
<p><b>5.3 Contribuição de despejos</b></p> <p>No cálculo da contribuição de despejos, deve ser considerado o seguinte:</p> <p>a) número de pessoas a serem atendidas;</p> <p>b) 80% do consumo local de água. Em casos plenamente justificados, podem ser adotados percentuais diferentes de 80% e, na falta de dados locais relativos ao consumo, são adotadas as vazões e contribuições constantes na Tabela 1;</p> <p>c) nos prédios em que haja, simultaneamente, ocupantes permanentes e temporários, a vazão total de contribuição resulta da soma das vazões correspondentes a cada tipo de ocupante.</p>		
<p><b>5.4 Período de detenção dos despejos</b></p> <p>Os tanques sépticos devem ser projetados para períodos mínimos de detenção, conforme a Tabela 2.</p>		
<p><b>5.5 Contribuição de lodo fresco</b></p> <p>A contribuição de lodo fresco é estimada conforme a Tabela 1. Para os casos de esgotos não-domésticos, de acordo com 4.1.2, a contribuição deve ser fixada a partir de observações de campo ou em laboratório, pelos indicadores menos favoráveis.</p>		
<p><b>5.6 Taxa de acumulação total de lodo</b></p> <p>5.6.1 A taxa de acumulação total de lodo, em dias, é obtida em função de:</p> <p>a) volumes de lodo digerido e em digestão, produzidos por cada usuário, em litros;</p> <p>b) faixas de temperatura ambiente (média do mês mais frio, em graus Celsius);</p> <p>c) intervalo entre limpezas, em anos.</p>		
<p><b>5.6.2</b> As taxas resultantes são as da Tabela 3. Para acumulação em períodos superiores a cinco anos, devem ser estudadas as condições particulares de contribuição, acumulação e adensamento do lodo em cada caso.</p>		
<p><b>5.7 Dimensionamento do tanque séptico</b></p> <p>O volume útil total do tanque séptico deve ser calculado pela fórmula:</p> $V = 1000 + N (CT + KLf)$ <p>Onde:</p> <p>V = volume útil, em litros</p> <p>N = número de pessoas ou unidades de contribuição</p> <p>C = contribuição de despejos, em litro/pessoa x dia ou em litro/unidade x dia (ver Tabela 1)</p> <p>T = período de detenção, em dias (ver Tabela 2)</p> <p>K = taxa de acumulação de lodo digerido em dias, equivalente ao tempo de acumulação de lodo fresco (ver Tabela 3)</p> <p>Lf = contribuição de lodo fresco, em litro/pessoa x dia ou em litro/unidade x dia (ver Tabela 1)</p>		

**Tabela 1 - Contribuição diária de esgoto (C) e de lodo fresco (Lf) por tipo de prédio e de ocupante**

Prédio	Unidade	Unid.: L	
		Contribuição de esgotos (C) e lodo fresco (Lf)	
<b>1. Ocupantes permanentes</b>			
- residência			
padrão alto	pessoa	160	1
padrão médio	pessoa	130	1
padrão baixo	pessoa	100	1
- hotel (exceto lavanderia e cozinha)	pessoa	100	1
- alojamento provisório	pessoa	80	1
<b>2. Ocupantes temporários</b>			
- fábrica em geral	pessoa	70	0,30
- escritório	pessoa	50	0,20
- edifícios públicos ou comerciais	pessoa	50	0,20
- escolas (externatos) e locais de longa permanência	pessoa	50	0,20
- bares	pessoa	6	0,10
- restaurantes e similares	refeição	25	0,10
- cinemas, teatros e locais de curta permanência	lugar	2	0,02
- sanitários públicos <sup>(A)</sup>	bacia sanitária	480	4,0

<sup>(A)</sup> Apenas de acesso aberto ao público (estação rodoviária, ferroviária, logradouro público, estádio esportivo, etc.).

**Tabela 2 - Período de detenção dos despejos, por faixa de contribuição diária**

Contribuição diária (L)	Tempo de detenção	
	Dias	Horas
Até 1500	1,00	24
De 1501 a 3000	0,92	22
De 3001 a 4500	0,83	20
De 4501 a 6000	0,75	18
De 6001 a 7500	0,67	16
De 7501 a 9000	0,58	14
Mais que 9000	0,50	12

**Tabela 3 - Taxa de acumulação total de lodo (K), em dias, por intervalo entre limpezas e temperatura do mês mais frio**

Intervalo entre limpezas (anos)	Valores de K por faixa de temperatura ambiente (t), em °C		
	t ≤ 10	10 < t ≤ 20	t > 20
1	94	65	57
2	134	105	97
3	174	145	137
4	214	185	177
5	254	225	217

#### 5.8 Geometria dos tanques

**Tabela 4 - Profundidade útil mínima e máxima, por faixa de volume útil**

Volume útil (m <sup>3</sup> )	Profundidade útil mínima (m)	Profundidade útil máxima (m)
Até 6,0	1,20	2,20
De 6,0 a 10,0	1,50	2,50
Mais que 10,0	1,80	2,80

#### 5.10 Número de câmaras

O emprego de câmaras múltiplas em série é recomendado especialmente para os tanques de volumes pequeno a médio, servindo até 30 pessoas. Para observância de melhor desempenho quanto à qualidade dos efluentes, recomendam-se os seguintes números de câmaras:

- tanques cilíndricos: três câmaras em série;
- tanques prismáticos retangulares: duas câmaras em série.

#### 5.11 Proporção entre as câmaras (ver Figura 4 do Anexo A)

Conforme sua conformação, cilíndrica ou prismática, os tanques têm as seguintes proporções entre câmaras:

- tanques cilíndricos: 2:1 em volume, da entrada para a saída;
- tanques prismáticos retangulares: 2:1 em volume, da entrada para a saída.

#### 5.12 Intercomunicação entre as câmaras

As câmaras devem comunicar-se mediante aberturas com área equivalente a 5% da seção vertical útil do tanque no plano de conexão entre elas. As seguintes relações de

# Normas Brasileñas 13969/1997

Cópia não autorizada

4

NBR 13969:1997

**3.30 agentes patogênicos:** Agentes biológicos contidos no esgoto, responsáveis pela transmissão de doenças, tais como vírus, bactérias, protozoários etc.

**3.31 macronutrientes inorgânicos:** Componentes inorgânicos dos poluentes contidos no esgoto, essencialmente os derivados de nitrogênio e fósforo.

**3.32 desidratação de lodos:** Processos naturais ou mecânicos, através dos quais se reduz o conteúdo líquido do lodo, para posterior disposição final.

**3.33 taxa nominal de transferência de oxigênio:** Taxa que mede a capacidade de um equipamento de aeração de transferir oxigênio livre para o meio hídrico, sob condições-padrão de 20°C e 1,0 atm, em água limpa.

**3.34 esgoto comercial:** Despejos líquidos oriundos de atividades comerciais, passíveis de serem tratados biologicamente.

**3.35 lagoa com plantas aquáticas:** Tratamento onde o esgoto é mantido em um tanque raso com plantas aquáticas flutuantes, cuja remoção de poluentes se dá através de plantas e microorganismos fixos nas raízes das mesmas.

**3.36 leito de secagem:** Unidade destinada à desidratação de lodo removido, por processo natural de evaporação e

outras condições sejam satisfatórias. Os efluentes do filtro anaeróbio podem exalar odores e ter cor escura.

## 4.1.1 Dimensionamento

### 4.1.1.1 Volume

O volume útil do leito filtrante ( $V_u$ ), em litros, é obtido pela equação:

$$V_u = 1,6 NCT$$

onde:

N é o número de contribuintes;

C é a contribuição de despejos, em litros x habitantes/dia (conforme a tabela 3);

T é o tempo de detenção hidráulica, em dias (conforme a tabela 4).

NOTA - O volume útil mínimo do leito filtrante deve ser de 1 000 L.

A altura do leito filtrante, já incluindo a altura do fundo falso, deve ser limitada a 1,20 m.

A altura do fundo falso deve ser limitada a 0,60 m, já incluindo a espessura da laje.

Activar

## 4 Tratamento complementar dos efluentes de tanque séptico

As seções a seguir, de 4.1 a 4.4, detalham as alternativas técnicas para o tratamento do efluente de tanque séptico. São alternativas que resultam, ainda, na emissão do efluente tratado que deve ser disposto em algum corpo receptor. Para facilitar o trabalho do usuário na consulta desta Norma com respeito à escolha do processo a ser selecionado, são apresentadas as tabelas 1 e 2, que indicam, respectivamente e de modo genérico, as faixas de remoção das alternativas apresentadas e as respectivas características principais. Conforme representado no anexo B, figura B.1, são indicadas algumas alternativas de layout da disposição das unidades de pós-tratamento/reuso do efluente de tanque séptico.

Todas as tubulações de transporte de esgoto do sistema devem ser protegidas contra cargas rodantes para não causar extravasamento ou obstrução do sistema.

### 4.1 Filtro anaeróbio de leito fixo com fluxo ascendente; filtro anaeróbio

O filtro anaeróbio consiste em um reator biológico onde o esgoto é depurado por meio de microorganismos não aeróbios, dispersos tanto no espaço vazio do reator quanto nas superfícies do meio filtrante. Este é utilizado mais como retenção dos sólidos.

Todo processo anaeróbio, é bastante afetado pela variação de temperatura do esgoto; sua aplicação deve ser feita de modo criterioso. O processo é eficiente na redução de cargas orgânicas elevadas, desde que as

condições de fundo falso, no caso de haver alternativas de construção de fundo falso, todo o volume do leito pode ser preenchido por meio filtrante. Nesse caso, o esgoto afluente deve ser introduzido até o fundo, a partir do qual é distribuído sobre todo o fundo do filtro através de tubos perfurados (ver anexo B, figuras B.2 e B.3);

A altura total do filtro anaeróbio, em metros (ver anexo B, figura B.5), é obtida pela equação:

$$H = h + h_1 + h_2$$

onde:

H é a altura total interna do filtro anaeróbio;

h é a altura total do leito filtrante;

$h_1$  é a altura da calha coletora;

$h_2$  é a altura sobressalente (variável).

### 4.1.1.2 Perda de carga hidráulica entre o tanque séptico e o filtro anaeróbio

A perda de carga hidráulica a ser prevista entre o nível mínimo no tanque séptico e o nível máximo no filtro anaeróbio é de 0,10 m.

### 4.1.1.3 Sistema de distribuição de esgoto no filtro anaeróbio

A distribuição de esgoto afluente no fundo do filtro anaeróbio deve ser feita:

a) através de tubos verticais com bocais perpendiculares ao fundo plano, com uma distância entre aqueles de 0,30 m (ver anexo B, figura B.5); a área

Activar