

Propuesta de un Plan de Monitoreo del Sistema de Pretratamiento de Efluentes en una
Planta de Producción de Biocombustibles.

Paula Jimena Becerra Molina

Trabajo de grado para optar el Título de Ingeniero Químico

Modalidad: Trabajo De Investigación

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira (Magíster en Ingeniería Química)

Codirector

Nelson Moreno (Doctor en Química – PhD)

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímica

Escuela Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mis amados padres, Nini Johana Molina y Mauricio Cataño, pilares fundamentales de mi vida, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia no hay sueño que no pueda alcanzarse. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Les agradezco por una crianza llena de amor y por el apoyo incondicional que me han brindado para perseguir cada uno de mis sueños. Esta tesis es, en gran parte, fruto de su sacrificio y dedicación.

A mi familia, por ser mi refugio y mi motivación en los momentos más difíciles. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi corazón y en este camino que hoy culmino.

A mis amigos, por acompañarme en las risas, en los desvelos y en esos momentos en los que todo parecía imposible. Gracias por ser mi red de apoyo y por llenar mi vida de alegría.

A mi pareja, el cual estuvo presente en los semestres más difíciles de mi carrera y por escucharme, comprenderme y animarme en cada paso.

Paula Jimena Becerra Molina.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, por iluminar mi camino cuando todo parecía oscuro y por no permitir que me diera por vencida, aun cuando las circunstancias parecían insuperables. Tu amor y tu presencia han sido mi mayor inspiración, y sé que esta meta alcanzada es también obra de tu gracia.

A mi director y codirector, gracias por ser una guía, un apoyo y tenerme la paciencia durante este proceso. A mis profesores, por su invaluable enseñanza y contribución a mi crecimiento académico. Gracias a todos quienes hicieron posible este logro y por formarme y prepararme no solo para el mundo laboral, sino para la vida misma.

A mi mamá, te agradezco por todo lo que me has dado durante 23 años, gracias por apoyarme desde el primer día que decidí ser ingeniera química, valoro demasiado todo el esfuerzo que has hecho para ayudarme hacer realidad mi sueño como profesional. Por ende, este título también es tuyo.

Paula Jimena Becerra Molina.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Marco de referencia	13
2.1 Marco de antecedentes	13
2.2 Marco teórico	15
2.3 Marco conceptual.....	16
3. Marco legal	19
4. Metodología	22
5. Resultados.....	23
5.1 Definición de parámetros y métodos de análisis.....	23
5.2 Identificación de los efluentes.....	24
5.3 Cuantificación y caracterización de los Efluentes.....	31
5.4 Desarrollo e implementación del plan de monitoreo y control de calidad de efluentes.....	31
Conclusiones	44
Recomendaciones	46
Referencias bibliográficas.....	47

Lista de Tablas

	Pág
Tabla 1.	19
Marco Legal	19
Tabla 2.	23
<i>Parámetros definidos para la caracterización.</i>	23
Tabla 3.	24
<i>Método de análisis</i>	24
Tabla 4.	28
<i>Parámetros establecidos por PTAR externa.</i>	28
Tabla 5.	31
<i>Resultados de puntos de muestreos de planta de refinación.</i>	31
Tabla 6.	32
<i>Resultados de puntos de muestreos de unidad de filtración.</i>	32
Tabla 7.	33
<i>Resultados de puntos de muestreos de planta biocombustible.</i>	33
Tabla 8.	35
<i>Resultados de puntos de muestreos de fat-trap general.</i>	35

Tabla 9.	36
<i>Resultados comparativos de los afluentes de la planta de biocombustibles antes del tratamiento final frente a los parámetros requeridos por la planta de tratamiento externa.</i>	<i>36</i>
Tabla 10.	40
<i>Modelo de registro y trazabilidad.....</i>	<i>40</i>

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.	22
<i>Metodología para plan de mejora de sistema de tratamiento de Efluentes.</i>	22
Figura 2.	25
<i>Identificación de efluentes.</i>	25
Figura 3.	29
<i>Pretratamiento de efluentes industriales- fat trap biocombustible y general.</i>	29
Figura 4.	30
<i>Frecuencia de descarga de fat-Trap general a ptar.</i>	30
Figura 5.	37
<i>Diagrama específico de fat-trap general.</i>	37

Resumen

Título: Propuesta de un Plan de Monitoreo del Sistema de Pretratamiento de Efluentes en una Planta de Producción de Biocombustibles *

Autor: Paula Jimena Becerra Molina **

Palabras Clave: Efluentes industriales, aguas residuales no domésticas, pretratamiento, monitoreo, normatividad ambiental.

Descripción: El presente trabajo de grado diagnostica el sistema de pretratamiento de efluentes en una planta productora de biocombustibles, con el fin de identificar oportunidades de mejora y formular un plan de monitoreo que asegure el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015.

La investigación incluyó la identificación de los puntos de generación de aguas residuales no domésticas (ARnD), su caracterización fisicoquímica y la comparación con los límites permisibles establecidos por la legislación ambiental y la planta de tratamiento receptora. Se detectaron desviaciones en parámetros críticos como pH, grasas, aceites y sólidos suspendidos, por lo que se propusieron acciones técnicas y operativas orientadas a optimizar el sistema de pretratamiento. Entre estas, destacan la implementación de protocolos operativos estandarizados, un sistema de monitoreo digital y un plan de mantenimiento para trampas de grasa (*Fat-Traps*).

Como resultado, se presenta una propuesta integral para fortalecer la gestión hídrica industrial, minimizar los impactos ambientales y garantizar la sostenibilidad operativa del proceso.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. Magíster en Ingeniería Química. Codirector: Nelson Moreno. Doctor en Química – PhD

Abstract

Title: Proposal for a Monitoring Plan of the Pretreatment System of Effluents in a Biofuel Production Plant *

Author: Paula Jimena Becerra Molina¹

Key Words: Industrial effluents, non-domestic wastewater, pretreatment, monitoring, environmental regulation.

Description: This undergraduate thesis diagnoses the effluent pretreatment system in a biofuel production plant to identify improvement opportunities and formulate a monitoring plan that ensures compliance with current environmental regulations, specifically Resolution 0631 of 2015. The research included the identification of non-domestic wastewater (NDWW) generation points, their physicochemical characterization, and a comparison against the permissible limits established by environmental legislation and the receiving treatment plant. Deviations were detected in critical parameters such as pH, fats, oils, and suspended solids; therefore, technical and operational actions were proposed to optimize the pretreatment system. These include the implementation of standard operating protocols, a digital monitoring system, and a maintenance plan for grease traps (Fat-Traps).

As a result, an integrated proposal is presented to strengthen industrial water management, minimize environmental impacts, and guarantee the operational sustainability of the process.

* Degree Work

¹ Faculty of Physicochemical Sciences. School of Chemical Engineering. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira. Mater in Chemical Engineering. Co-director: Nelson Moreno. PhD in Chemistry

Introducción

La producción de biocombustibles se presenta como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la transición energética global. No obstante, sus procesos industriales generan efluentes con altas cargas contaminantes que requieren un manejo adecuado para minimizar su impacto ambiental. A nivel mundial, el pretratamiento de estos residuos líquidos, que suelen contener grasas, aceites, materia orgánica, glicerina y metanol, constituye una etapa esencial para garantizar la eficiencia de los sistemas de tratamiento y el cumplimiento de normativas internacionales (FAO, 2020; IEA, 2019; EPA, 2021).

En Colombia, la industria de biocombustibles ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, consolidándose como uno de los principales productores de biodiésel y etanol en América Latina. Este avance ha sido impulsado por políticas gubernamentales que promueven la mezcla de biocombustibles con combustibles fósiles y por la disponibilidad de materias primas agrícolas como la palma de aceite y la caña de azúcar (Ministerio de Minas y Energía, 2020; Fedepalma, 2021). Sin embargo, este desarrollo también ha traído consigo importantes desafíos ambientales, particularmente en la gestión de aguas residuales no domésticas (ARnD), reguladas en el país por disposiciones como la resolución 0631 del 2015, que establece parámetros estrictos para el vertimiento de aguas residuales.

En este contexto, se hace indispensable realizar diagnósticos integrales de los afluentes generados en las distintas etapas productivas, con el propósito de caracterizar sus parámetros de

control, evaluar la eficiencia de los sistemas de pretratamiento y garantizar el cumplimiento de la legislación ambiental vigente.

En este sentido, se busca responder a la siguiente pregunta: *¿Cómo pueden los parámetros de los afluentes generados en la industria de los Biocombustibles mejorar su calidad y eficiencia en el tratamiento previo a su disposición final?*

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

- Realizar un diagnóstico del sistema de pretratamiento de efluentes en una planta productora de biocombustible proponiendo un plan de monitoreo que garantice el cumplimiento de los estándares exigidos por la empresa que recibe y trata sus vertimientos, asegurando así la correcta disposición de las aguas residuales.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar los puntos de generación de efluentes en las distintas unidades del proceso mediante el análisis del diseño de planta (PFD) y verificación en campo, estableciendo puntos de muestreo estratégicos.
- Analizar las características fisicoquímicas de los efluentes generados para determinar su composición y niveles de contaminantes, identificando los parámetros críticos que requieren tratamiento.
- Desarrollar un plan de monitoreo del sistema de tratamiento de efluentes que incluya protocolos operativos y mecanismos de control de calidad, asegurando el cumplimiento continuo de los estándares ambientales.

2. Marco de referencia

2.1 Marco de antecedentes

2.1.1 Antecedentes internacionales

Según (Julio Cesar Marin, 2015) en el trabajo denominado tratamiento de aguas residuales de una industria procesadora de pescado en reactores anaeróbicos discontinuos, se evaluó el tratamiento de las aguas residuales de la industria, donde su objetivo principal fue el de determinar los reactores anaeróbicos discontinuos, donde se establecieron normas ambientales vigentes en materia de vertimiento, y donde se analizaron de forma continua ensayos en laboratorios para determinar qué tan contaminantes eran.

(Leticia Raquel, 2018), En su trabajo denominado Tratamiento de efluentes acuosos provenientes de la industria de biodiesel, utilizando tecnología de membranas, en el cual hablan sobre los afluentes que son provenientes de producción de biodiesel, donde se observaron y examinaron todos los contaminantes que están presentes en este proceso y en cuales pueden ser las impurezas que al vertiesen contaminen de alguna forma al medio ambiente, por eso su objetivo principal fue el de desarrollar tecnologías de membranas para el tratamiento de efluentes acuosos provenientes del biodiesel, donde se hicieron análisis a las membranas y se realizaron las experiencias en una celda de flujo cruzado.

(Choya, Planta de tratamiento de aguas residuales procedentes de la producción de biodiesel, 2015) Este trabajo tuvo como objetivo principal el de dimensionar las líneas de aguas en una instalación de tratamiento de aguas residuales generadas por una industria de producción de biodiesel, donde su tratamiento propuesto constó de un pretratamiento integrado por un desbaste con reja de finos y tamizado, homogeneización con ajuste de pH, coagulación-floculación y flotación DAF. El tratamiento biológico posterior estuvo compuesto por una etapa anaerobia en

reactor UASB y una etapa aerobia de fangos activos, que permite cumplir los límites de vertido establecidos por la legislación vigente.

En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha incentivado la investigación sobre el reúso de efluentes tratados en procesos industriales, lo que ha llevado a la integración de tecnologías de recuperación de agua en plantas de biodiésel.

2.1.2 Antecedentes nacionales

(Arnol Stiven Garzon Rojas, 2016) en su trabajo denominado; Estudio para la optimización de los sistemas de alcantarillado de aguas residuales y aguas lluvias en la cabecera municipal de la vega (Cundinamarca), su principal objetivo fue el de analizar y el de identificar los diferentes parámetros a nivel legal y técnico, para el desarrollo y ejecución de los sistemas de alcantarillado, que orientados bajo un procedimiento investigativo se dieron claridad de temas que no se contaba.

Según (Barrera, 2021) en su informe llamado Apoyo en la formulación del sistema de gestión ambiental de la empresa Aguas del puerto S.A ESP de puerto Berrio - Antioquia, basado en la norma ISO 14001; 2015. Como objetivo principal planteo el desarrollo de sus actividades las cuales conlleva al consumo de distintos recursos naturales y la generación de residuos que, sin una adecuada gestión, tienden a producir tanto impactos ambientales como el incumplimiento de la normativa legal. Por tal motivo, se vio la necesidad de formular un sistema de gestión ambiental basado en la NTC ISO 14001:2015 que permitiera evitar, mitigar o compensar los impactos perjudiciales al ambiente, como también contribuir a la mejora continua del aspecto ambiental de la empresa.

2.2 Marco teórico

Las aguas residuales son aquellas “aguas usadas y los sólidos que por uno u otro medio se introducen en cloacas y son transportadas mediante el sistema de alcantarillado”, estas aguas están contaminadas y sin un previo tratamiento no son de uso recomendable. De acuerdo con su procedencia se pueden clasificar en aguas residuales domésticas, aguas residuales municipales y aguas residuales industriales. (Buitrago, 2017)

Por otro lado, el crecimiento de la industria no sólo ha generado una contaminación creciente de los recursos hídricos. El alto consumo de energía ligado a la industrialización es en la actualidad la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes acidificantes. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) la emisión de estos últimos contaminantes se ha reducido de modo significativo gracias al tratamiento de los gases de combustión y a la utilización de combustibles más limpios, entre los que destaca el biodiesel, promovido durante los últimos años como alternativa al diésel del petróleo por las similares propiedades que ambos presentan. (Choya, 2015)

Químicamente, el biodiesel es una mezcla de ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos que cumplen las especificaciones impuestas por la norma de calidad (EN14214 en Europa, ASTM D6751 en EEUU). Se obtiene principalmente a partir de aceites de plantas oleaginosas (como colza, girasol, palma o soja), si bien se pueden utilizar igualmente aceites de fritura usados y grasas animales (Choya, 2015)

En comparación con el diésel de petróleo, el biodiesel supone una bajada en las emisiones de gases de escape, afianza el apoyo al desarrollo económico rural, y procede de una fuente de producción de carácter renovable, presentándose además como una solución de reciclaje para los aceites residuales domésticos y de procesado de alimentos. La producción de biodiesel se basa en la transesterificación de ácidos grasos. Esta reacción propicia la conversión de los ácidos grasos a ésteres metílicos. Sin embargo, para que la mezcla de ésteres metílicos resultante pueda ser denominada como biodiesel, debe someterse a una etapa de purificación. En esta etapa compuesta por sucesivos lavados con agua, se generan grandes volúmenes de aguas residuales, que supondrían graves daños medioambientales si fueran devueltas al medio sin recibir tratamiento previo. Estas aguas de lavado arrastran las impurezas contenidas en la mezcla de ésteres metílicos (principalmente trazas de grasas, aceites, catalizador básico, sales, jabones, trazas de glicerol y metanol), de modo que además contienen una elevada carga contaminante. (Choya, 2015)

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica e inorgánica presente en un agua residual mediante un agente químico fuerte. Se utiliza como indicador de la contaminación del agua y su posible impacto ambiental (Metcalf & Eddy, 2014).

2.3.2 Aguas Residuales No Domésticas (ARnD)

Las Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) provienen de actividades industriales, comerciales o institucionales, y pueden contener sustancias químicas peligrosas, metales pesados y otros contaminantes que requieren un tratamiento especializado para cumplir con la normativa

ambiental (Resolución 0631 de 2015, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia).

2.3.3 Afluentes y Efluentes

Un afluente es el agua que entra a un sistema de tratamiento, ya sea desde fuentes naturales o de origen industrial. En contraste, un efluente es el agua que sale del sistema de tratamiento tras haber sido procesada, cumpliendo o no con los estándares de calidad ambiental exigidos (Tchobanoglous et al., 2011).

2.3.4 Pretratamiento de Aguas Residuales

El pretratamiento es la primera etapa en el proceso de depuración del agua residual. Su objetivo es la remoción de sólidos gruesos, arenas, aceites y grasas, minimizando así el impacto en las siguientes fases del tratamiento. Tecnologías comunes incluyen rejillas, sedimentadores y sistemas de flotación por aire disuelto (DAF) (Metcalf & Eddy, 2014).

2.3.5 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) es una instalación diseñada para remover contaminantes de las aguas residuales mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Estas plantas pueden incluir sistemas como biorreactores de membrana (MBR) y lodos activados (Metcalf & Eddy, 2014).

2.3.6 Grasas y aceites en aguas residuales

Las grasas y aceites presentes en las aguas residuales provienen de actividades industriales, comerciales y domésticas, como la preparación de alimentos y la manufactura de productos químicos. Estos compuestos pueden formar incrustaciones en tuberías y dificultar el tratamiento

biológico del agua, por lo que su remoción en la etapa de pretratamiento es crucial (Seven Seas Water, 2023).

2.3.7 Fat-Trap y la retención de grasas

El sistema Fat-Trap es una tecnología diseñada para capturar y retener grasas y aceites en las aguas residuales antes de que ingresen a los sistemas de tratamiento. Funciona mediante separadores mecánicos o trampas de grasa que previenen la acumulación de estos compuestos en tuberías y equipos de tratamiento, mejorando la eficiencia del sistema (PCi Membranes, 2024).

3. Marco legal

Tabla 1.

Marco Legal Normatividad	Expedida por	Establece
Ley 9 de 1979	El congreso de Colombia	Conocida como Código Sanitario Nacional. Establece los procedimientos y las medidas para llevar a cabo la regulación y control de los vertimientos. (Colombia C. d., 1979)
Ley 142 de 1994	Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones	Artículo 2: El estado intervendrá en los servicios públicos, conforme a las reglas de competencia de que trata esta Ley, en el marco de lo dispuesto en los artículos 334, 336, y 365 a 370 de la Constitución Política. Artículo 6: Prestación directa de servicios por parte de los municipios. Los municipios prestarán directamente los servicios públicos de su competencia, cuando las características técnicas y económicas del servicio, y las conveniencias generales lo permitan y aconsejen. Artículo 9: Derecho de los usuarios. Los usuarios de los servicios públicos tienen derecho, además de los consagrados en el Estatuto

		Nacional del Usuario y demás normas que consagren derechos a su favor, siempre que no contradigan esta ley. (Colombia E. c., 1994)
		ARTÍCULO 5: Las autoridades territoriales y/o empresas prestadoras de servicios públicos domiciliarios de agua potable y saneamiento básico, exigirán para la ejecución de diseños, consultorías, interventorías, obras y servicios propios del sector, que la persona natural o jurídica ejecutora acredite los requisitos de idoneidad y experiencia fijados en el presente Reglamento Técnico.
Resolución 1096 de 2000	Por el cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS	ARTÍCULO 10: Los proyectos que se lleven a cabo en el territorio nacional en el sector de agua potable y saneamiento básico, cubiertos por el alcance de este Reglamento deberán ser ejecutados por profesionales que tengan las calidades y los requisitos de idoneidad que trata el Título II. ARTÍCULO 15: La entidad territorial correspondiente debe presentar en forma concreta el (los) problema(s) o la(s) necesidad(es) que se va(n) a abordar con el proyecto de agua potable o saneamiento básico, con el fin de

		justificar su ejecución en la medida en que se obtengan beneficios sociales en al área de su jurisdicción. (Economico, 2000)
Decreto 3930 de 2010	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Proclama el uso de aguas residuales industriales y otras disposiciones modificando artículos y títulos de la ley 2811 de 1974. (sostenible, Republica de Colombia , 2010)
Resolución 1256 del 2021	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Establece el uso de las aguas residuales y acoge a otras condiciones. (sostenible, Republica Colombia , 2021)
Resolución 0631 del 2015	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	Reglamenta la caracterización y los máximos permitidos en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales a los sistemas de alcantarillado público y dictan otras disposiciones (Minambiente, 2015)

Nota: Autor

4. Metodología

Para este diagnóstico se plantea la metodología descrita en la figura 1, que contempla 4 fases: Fase 1. Definición de parámetros y métodos de análisis, Fase 2. Identificación de los afluentes, Fase 3. Cuantificación y caracterización de los afluentes y efluentes, Fase 4. Desarrollo e implementación del plan de monitoreo y control de calidad de efluentes

Figura 1.
Metodología para plan de mejora de sistema de tratamiento de Efluentes.



Nota: Autor

5. Resultados

5.1 Definición de parámetros y métodos de análisis

El plan de caracterización se estructuró con base en los análisis fisicoquímicos disponibles en el laboratorio de la planta de producción de biocombustibles, considerando los siguientes parámetros:

Tabla 2.

Parámetros definidos para la caracterización.

Parámetros
T°C
pH
Acidez
Composición
Sólidos
MeOH
Methylester
PFAD
Agua
Á Cítrico
Caudal kg/h

Nota: Autor

En cuanto a la metodología de los análisis llevados a cabo en estas caracterizaciones se definen de la siguiente manera:

Tabla 3.*Método de análisis*

Parámetro	Método de análisis
Temperatura	-
pH	ASTM 1293
Acidez	NTC 287
Sólidos Suspendidos	SM 2540
MeOH	NTC 287 y UNE-EN ISO 12937:2001
Grasas y aceites	SM 5520B
Agua	UNE-EN ISO 12937:2001 ERRATUM 2008
Á. Cítrico	Valoración (Titulación)
Caudal	Método del volumen-tiempo

Nota: Autor

5.2 Identificación de los efluentes.

Mediante la revisión de los diagramas de flujo de procesos (PFD) de las distintas unidades de la planta de producción de biocombustible, se identificaron los equipos con mayor generación de efluentes en las áreas de refinación, filtración y la planta de producción del biocombustible. Con base en esta información, se elaboró un diagrama que representa los equipos identificados.

pigmentos, metales, etc., con el mínimo daño posible a los glicéridos y la mínima pérdida de sustancias deseables.

En esta planta se identificaron los siguientes equipos los cuales generan mayor cantidad de afluentes:

Tanque de recuperación de aceite

El tanque de recuperación de aceite del proceso de cambio de filtros tiene una capacidad de 10 m³. La frecuencia de descarga es de 4 veces al día, se deja decantar durante 2 horas para recuperar el aceite. En cada descarga, se vierte un 40% de su capacidad nominal.

Tanque de agua-soda del desodorizador

Es el tanque que suministra agua-soda al Desodorizador para el lavado de las piernas barométricas, ayuda a limpiar los jabones que se puedan formar dentro del equipo debido a la saponificación, aportando un flujo constante de agua a la caja de inspección. Su normal funcionamiento contribuye a mantener el vacío dentro de la unidad.

Tanque de agua soda de intercambiadores de calor

Tanque que suministra agua soda a los intercambiadores para el lavado CIP de estos, cuenta con una capacidad de 3,85 m³ frecuencia de descarga de dos veces por día, se descarga un 80% de su capacidad en cada descarga.

5.2.2 Unidad de filtración

La unidad de filtración es una unidad auxiliar de la planta de producción del biocombustible que se encarga de la filtración en frío del residuo haze llevando el biocombustible

a temperatura cercanas al punto de nube 14 °C, para remover las sustancias causantes de la formación de sedimentos conocidos como “haze”.

Línea unidad de filtración

Línea proveniente de las tres bombas usadas en la unidad de filtración; las ARnD de esa unidad se unen en un solo punto para hacer vertimiento en la caja de inspección ubicada cerca a planta de refinación.

5.2.3 Planta de producción de biocombustible.

La planta produce Biocombustible por la mezcla de RBD y metanol, en presencia de metilato de sodio, por medio de una reacción denominada transesterificación. Como subproducto se genera glicerina (siendo inmisible en la fase de éster metílico) y se separa del producto principal.

De esta planta se identificaron los siguientes equipos los cuales generan mayor cantidad de afluentes:

Drenaje de centrifugas

En este tramo de tubería subterránea de 2" se encuentran las descargas permanentes de los equipos listados, los cuales generan una descarga continua hacia el cárcamo de la planta de biocombustible de 1512Kg/h.

Intercambiador de placa

Intercambiador de placas ubicado en el segundo piso de la planta que calienta la glicerina proveniente del tanque de glicerina cruda a través de una bomba que se dirige hacia el tanque de la unidad de glicerina recruda, calienta mediante en flujo de vapor de baja presión 3,5 bar. Descarga permanente al cárcamo.

Tanque sello hidráulico

El tanque que actúa como sello hidráulico del separador de la unidad de glicerina de la planta tiene una capacidad de 0,042 m³. Su frecuencia de descarga es constante, vertiendo un 1,25% de su capacidad en cada descarga.

5.2.4 Pretratamiento de efluentes industriales- fat trap biocombustible y general.

El pretratamiento de las aguas residuales industriales se da para eliminar el contenido de aceites, grasas y sólidos en suspensión. Un adecuado pretratamiento, generalmente en unidades de flotación que separan la mayor cantidad de grasa posible del agua, como es el caso del Fat-trap, evita la generación de problemas en el tratamiento posterior, el cual es realizado por una PTAR externa que presta el servicio a la planta de biocombustibles bajo un acuerdo de servicios industriales. Esta planta establece ciertas condiciones para la adecuada prestación del servicio, por lo que la planta de biocombustibles se basa en ellas para realizar la entrega de las ARnD al tratamiento previo que brinda la PTAR antes de su disposición final.

Tabla 4.

Parámetros establecidos por PTAR externa.

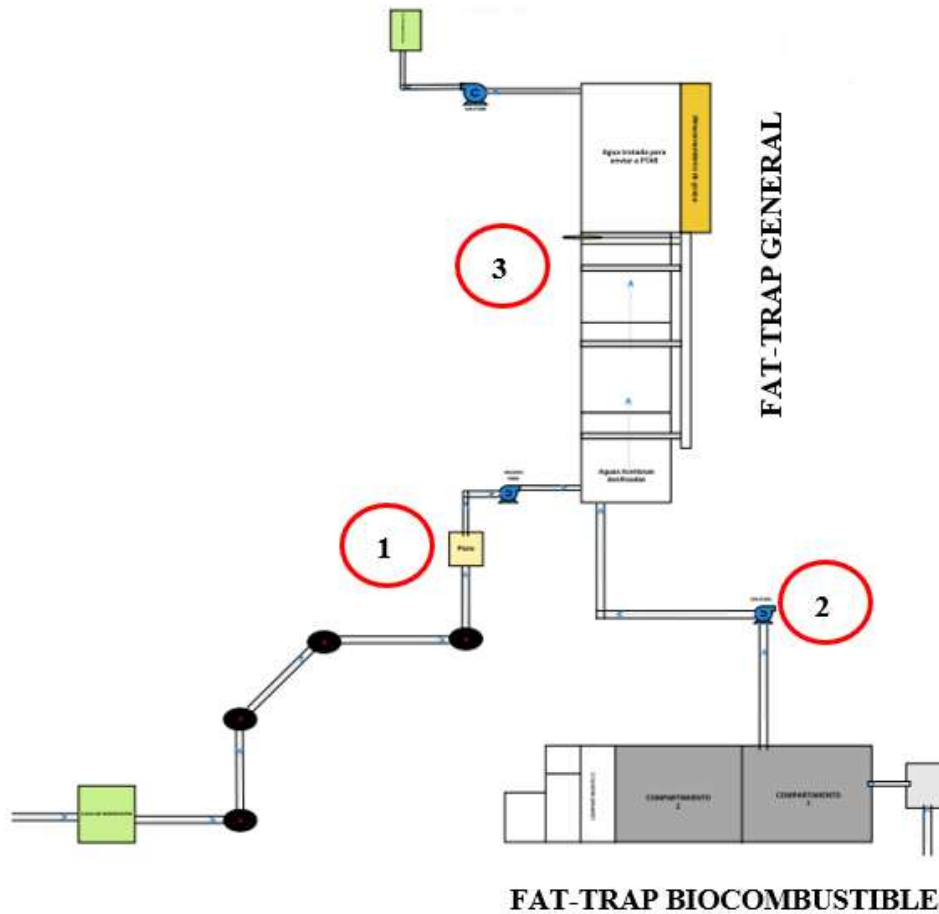
<i>PARÁMETRO</i>	PARÁMETROS EXIGIDOS POR PTAR
<i>Temperatura °C</i>	40
<i>pH</i>	7,5 – 8,5
<i>Sólidos Suspendidos</i>	0.0556 %
<i>Grasas y aceites</i>	0.1446 %

Nota: Autor

Figura 3.

Pretratamiento de efluentes industriales- fat trap biocombustible y general.

Nota: Autor

**5.2.5 Salida de planta refinación hacia fat-trap general**

El volumen del cárcamo de la planta de refinación es de 2.27m^3 . La línea que conecta entre el cárcamo y la trampa grasa de refinería tiene un vol. de 0.164m^3 . El volumen total del cárcamo de esta planta es de 2.24m^3 y la caja de inspección es de 0.73m^3 ; lo cual nos daría un volumen total de 6.8m^3 , de los cuales se descarga el 30% que va al Fat-Trap general.

5.2.6 Salida fat-trap biocombustible a fat-trap general

Se envía el 39,5% del volumen del compartimiento 1 del Fat-Trap de Biocombustible, que es de 17,2 m³. En promedio, se envían 6,79 m³ dos veces por turno al Fat-Trap General. La densidad es de aproximadamente 0,94 kg/L.

Para finiquitar estos afluentes pasan por su respectivo pretratamiento en el Fat-Trap General antes de ser enviados a PTAR. Esta salida del Fat-Trap General se identificó de la siguiente manera:

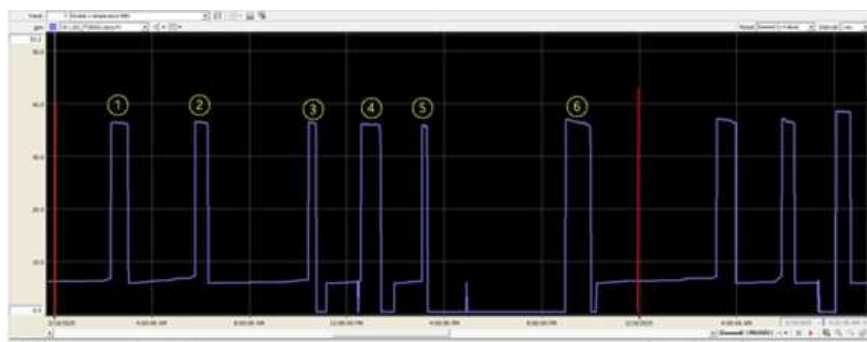
5.2.7 Fat-trap general

Actualmente, el sistema de trampa de grasas general está diseñado para capturar y separar las grasas y aceites presentes en las aguas residuales no domésticas (ARnD). En esta etapa se realiza la dosificación de ácido cítrico o ácido sulfúrico para el control de pH. Adicionalmente, se lleva a cabo el monitoreo de pH y temperatura, aunque este proceso no se encuentra sistematizado, efectuándose antes de que las aguas residuales sean enviadas a la planta de tratamiento externa (PTAR). El sistema cuenta con una capacidad instalada de 53,22 m³, de los cuales 19 m³ corresponden al compartimiento final, desde donde se realiza el envío hacia la PTAR. El caudal estimado de salida es de aproximadamente 36,3 gal/min, con un promedio de seis descargas diarias hacia la planta de tratamiento. Como referencia, se incluye una captura de pantalla del registro correspondiente al día 18 de febrero de 2025.

Figura 4.

Frecuencia de descarga de fat-Trap general a ptar.

18/2/2025			
Nº de pico	Hora de inicio	Hora de fin	Tiempo de bombeo (min.)
1	02:19	03:01	42
2	05:47	06:18	31
3	10:26	10:44	18
4	12:35	13:23	48
5	15:05	15:17	12
6	20:59	21:59	60



Nota: Autor

5.3 Cuantificación y caracterización de los Efluentes.

Con base a los parámetros establecidos se dio inicio al análisis de resultados obtenidos con base al muestreo durante dos meses de estas corrientes. Estos resultados plasmados son los promedios de todos los análisis que se hicieron en ese lapso.

5.3.1 Planta de refinación

Tabla 5.

Resultados de puntos de muestreos de planta de refinación.

Planta De Refinación			
Punto de muestreo	Tanque de recuperación de Aceite	Tanque de agua-soda del Desodorizador	Tanque de agua-soda de intercambiadores de calor
Parámetros			
<i>Temperatura °C</i>	45,3	42,5	39,5
<i>pH</i>	5,02	7,61	11,27
<i>Acidez</i>	4,9	-	-
Composición (%m/m)			
<i>Sólidos</i>	9,60%	0%	2%
<i>MeOH</i>	-	-	-

<i>Methylester</i>	10%	0%	0%
<i>PFAD</i>	0%	0%	0%
<i>Agua</i>	80,40%	98%	91%
<i>NaOH al 50%</i>	-	-	6,91%
<i>Á. Cítrico</i>	0%	2%	0%
<i>Caudal kg/h</i>	833,3	2479,7	673,75

Nota: Autor

La tabla presenta el análisis de los principales puntos de generación de aguas residuales no domésticas (ARnD) en la unidad de refinación evidencia una alta variabilidad en los parámetros fisicoquímicos evaluados, especialmente en pH, composición química y caudal. Los valores de pH, que oscilan entre 5,02 y 11,27, reflejan el uso de distintas sustancias en cada etapa del proceso, mientras que la presencia de sólidos, metiléster y NaOH señala la existencia de residuos con potencial impacto ambiental. El tanque de agua-soda del desodorizador presenta el mayor caudal registrado (2479,7 kg/h), considerándose un punto crítico dentro del sistema. En conjunto, los tres puntos analizados concentran las mayores cargas contaminantes líquidas, por lo que constituyen áreas prioritarias para la implementación de medidas de control, optimización del pretratamiento y fortalecimiento del sistema de gestión de aguas residuales.

5.3.2 Unidad de filtración

Tabla 6.

Resultados de puntos de muestreos de unidad de filtración.

Unidad de Filtración	
Punto de muestreo	Línea de Unidad de Filtración
Parámetros	
<i>Temperatura °C</i>	35,1
<i>pH</i>	6,3
<i>Acidez</i>	-
Composición (%m/m)	

<i>Sólidos</i>	0,04%
<i>MeOH</i>	12%
<i>Methylester</i>	28%
<i>PFAD</i>	0,3%
<i>Agua</i>	59,6%
<i>Á. Cítrico</i>	0%
<i>Caudal kg/h</i>	315,2

Nota: Autor

Este punto de muestreo, correspondiente a la línea de la unidad de filtración, presenta características relevantes desde el enfoque de generación de aguas residuales no domésticas (ARnD). La corriente analizada muestra una temperatura moderada (35,1 °C) y un pH ligeramente ácido (6,3), compatibles con una mezcla de componentes orgánicos y acuosos.

En cuanto a su composición química, se evidencia una alta presencia de metiléster (28 %) y metanol (12 %), lo que sugiere un arrastre considerable de producto y solvente. El contenido de agua (59,6 %) y la baja concentración de sólidos (0,04 %) indican una corriente mayoritariamente líquida, aunque con una significativa carga orgánica.

Con un caudal de 315,2 kg/h, este punto, aunque de menor flujo en comparación con otros, representa una fuente importante de carga contaminante debido a su alta concentración de compuestos valorizables y potencialmente peligrosos.

5.3.3 Planta de biocombustible

Tabla 7.

Resultados de puntos de muestreos de planta biocombustible.

Planta De Biocombustible			
Punto de muestreo	Drenaje de centrifuga	Tanque que actúa como sello hidráulico	Intercambiador de calor
Parámetros			
<i>Temperatura °C</i>	67,3	44,9	74,5
<i>pH</i>	3,95	6,91	8,21

<i>Acidez</i>	-	-	-
Composición (%m/m)			
<i>Sólidos</i>	0%	0%	0%
<i>MeOH</i>	13,6%	30,3%	2,5%
<i>Methylester</i>	0,42%	0%	0%
<i>PFAD</i>	0%	0%	0,00%
<i>Agua</i>	86%	69,67%	98%
<i>Á. Cítrico</i>	0%	0%	0%
<i>Caudal kg/h</i>	1512	183,4	109,5

Nota: Autor

Los tres puntos evaluados (drenaje de centrífuga, tanque con sello hidráulico e intercambiador de calor) reflejan diferencias significativas en temperatura, composición química y caudal.

- Drenaje de centrífuga: presenta la mayor carga líquida (1512 kg/h) y una temperatura elevada (67,3 °C). Tiene alto contenido de MeOH (13,6 %) y agua (86 %), lo que lo convierte en un punto crítico de generación de residuos peligrosos por metanol.
- Tanque con sello hidráulico: muestra el mayor contenido de MeOH (30,3 %), junto con un caudal moderado (183,4 kg/h) y mezcla de agua (69,67 %). Esta corriente representa un riesgo importante por su alta carga orgánica volátil, a pesar de su menor flujo.
- Intercambiador de calor: tiene la mayor temperatura (74,5 °C) pero el caudal más bajo (109,5 kg/h). Su composición es mayoritariamente agua (98 %) con un bajo contenido de MeOH (2,5 %), por lo que representa un impacto menor frente a los otros puntos.

En síntesis, el drenaje de centrífuga se identifica como el principal punto crítico por su alto caudal y contenido de metanol, mientras que el tanque con sello hidráulico representa un riesgo relevante por su elevada carga orgánica volátil. El intercambiador de calor presenta un impacto menor. Estos resultados permiten priorizar el control y monitoreo en los puntos con mayor aporte de contaminantes al sistema.

5.3.4 Fat-trap general

Tabla 8.

Resultados de puntos de muestreos de fat-trap general.

Fat-Trap General			
Punto de muestreo	Salida de Planta De Refinación	Salida de Planta De Biocombustible	Salida hacia PTAR
Parámetros			
<i>Temperatura °C</i>	67,3	39,5	43,2
<i>pH</i>	3,95	4,2	4,33
<i>Acidez</i>	-	1	4,19
Composición (%m/m)			
<i>Sólidos</i>	0,8%	0,52%	2%
<i>MeOH</i>	1,0%	8,30%	3,11%
<i>Methylester</i>	2,0%	2,38%	0,40%
<i>PFAD</i>	0%	0,03%	0,01%
<i>Agua</i>	96,30%	88,50%	94,46%
<i>Á. Cítrico</i>	0%	0,29%	0,08%
<i>Caudal kg/h</i>	4341,66	1765	6106,66

Nota: Autor

Las tres corrientes muestran características distintas, pero con una clara tendencia de dilución y mezcla.

- **Salida de planta de refinación:** tiene la mayor temperatura (67,3 °C) y un caudal elevado (4341,66 kg/h). Es principalmente agua (96,3 %), pero contiene trazas de sólidos (0,8 %), metiléster (2 %) y MeOH (1 %), que pueden ser preocupantes

desde el punto de vista ambiental.

- **Salida de planta de biocombustible:** presenta una concentración alta de MeOH (8,3 %) y metiléster (2,38 %), con un caudal mucho menor (1765 kg/h), pero representa una corriente de mayor carga contaminante por unidad de volumen.
- **Salida hacia PTAR:** combina ambas corrientes, resultando en el mayor caudal (6106,66 kg/h). Aunque los contaminantes se diluyen (por ejemplo, MeOH baja a 3,11 %), la carga total sigue siendo considerable. La acidez permanece elevada (4,19), con un pH ácido (4,33), lo que exige tratamiento adecuado.

La corriente combinada hacia la PTAR, aunque presenta menor concentración de contaminantes, transporta la **mayor carga másica** de residuos por su alto caudal. Las salidas de refinería y biodiésel deben ser gestionadas cuidadosamente para reducir la carga orgánica (MeOH y metiléster) antes del tratamiento final.

Con base en la corriente de salida hacia la planta de tratamiento externa (PTAR), se debe tener en cuenta que esta constituye el afluente que ingresa al sistema de tratamiento para su posterior disposición final. En la Tabla 9 se presenta una comparación entre los valores obtenidos para la corriente de efluentes generada en la planta de biocombustibles y los parámetros exigidos por la PTAR, con el fin de identificar los aspectos que requieren mejora en términos de calidad y eficiencia del tratamiento.

Tabla 9.

Resultados comparativos de los afluentes de la planta de biocombustibles antes del tratamiento final frente a los parámetros requeridos por la planta de tratamiento externa.

PARÁMETRO	PLANTA DE BIODIÉSEL	PARÁMETROS EXIGIDOS POR PTAR
<i>Temperatura °C</i>	43,2	40
<i>pH</i>	4,33	7,5 – 8,5

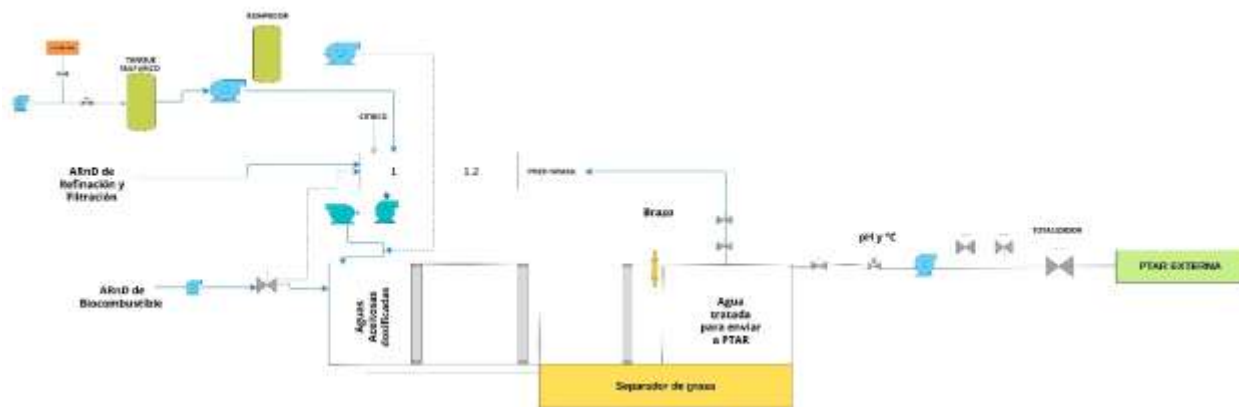
<i>Acidez</i>	4,19	-
<i>Solidos Suspendidos</i>	2%	0.0556 %
<i>MeOH</i>	3,11%	-
<i>Grasas y aceites</i>	0,41%	0.1446 %
<i>Agua</i>	94,46%	-
<i>Á. Cítrico</i>	0,08%	-
<i>Caudal</i>	6106,66	-

Nota: Autor

Los resultados evidencian la necesidad de **revisar y optimizar el manejo de ciertas corrientes líquidas en la planta**, con el fin de asegurar su compatibilidad con los criterios normativos para su tratamiento y disposición final. Esto puede abordarse mediante estrategias de mejora en procesos internos, control en la fuente o tratamientos complementarios, según las necesidades del sistema.

5.4 Desarrollo e implementación del plan de monitoreo y control de calidad de efluentes

Figura 5.
Diagrama específico de fat-trap general



Nota: Autor

Con base en la caracterización fisicoquímica de los efluentes generados en las diferentes unidades operativas de la planta., y su respectiva comparación frente a los valores máximos

permisibles establecidos por la planta de tratamiento externa, se identificaron desviaciones significativas en parámetros críticos como pH, grasas y aceites, y sólidos suspendidos totales. Dichos hallazgos evidencian la necesidad de implementar un plan estructurado de mejora que permita optimizar el sistema de pretratamiento, garantizando el cumplimiento de parámetros para su tratamiento final en la PTAR externa y la sostenibilidad operativa del proceso.

5.4.1 Formular acciones de mejoras técnicas y operativas.

A partir de la evaluación de resultados, se proponen las siguientes acciones correctivas y preventivas orientadas a reducir la carga contaminante en los vertimientos y mejorar la eficiencia del tratamiento primario:

Optimización de la neutralización química del pH mediante control automatizado de la dosificación de agentes acidificantes (ácido cítrico o sulfúrico) en puntos estratégicos del sistema Fat-Trap General.

Fortalecimiento de los sistemas de separación físico-química para grasas y sólidos suspendidos, evaluando la incorporación de tecnologías complementarias como unidades de flotación por aire disuelto (DAF) o filtros de retención de partículas finas.

Segregación de corrientes críticas con alta carga de metanol (MeOH) o acidez, como aquellas provenientes del drenaje de centrifugas y el tanque de sello hidráulico, para su redireccionamiento hacia sistemas de tratamiento diferenciado o alternativas de reutilización interna.

Estas acciones están orientadas a reducir tanto la carga orgánica como la presencia de compuestos no biodegradables antes del envío de las aguas residuales a la PTAR externa.

5.4.2 Diseño del sistema de monitoreo de ARnD

Con el fin de garantizar un control continuo y sistemático de la calidad de los efluentes, se propone la estructuración de un sistema de monitoreo que combine herramientas analíticas, tecnológicas y operativas:

Monitoreo en puntos estratégicos:

- Puntos de control definidos: salida de planta de refinería, planta de biodiésel, unidad de filtración y Fat-Trap general.
- Frecuencia de muestreo: Dos veces por semana.
- Parámetros monitoreados: temperatura, pH, sólidos suspendidos totales (SST), grasas y aceites (G&A), metanol (MeOH), y caudal.
- Equipos requeridos: medidores de pH y temperatura en línea, muestreadores automáticos y totalizadores de caudal.

Registro y trazabilidad digital:

- Integración de los datos en una plataforma digital (Excel automatizado).
- Reporte mensual de resultados con alertas por desviaciones frente a los valores acordados para el tratamiento final en la PTAR externa.

Tabla 10.*Modelo de registro y trazabilidad.*

FECHA	PUNTO DE MUESTREO	PARÁMETRO	VALOR MEDIDO (%)	LÍMITE ACORDADO CON PTAR EXTERNA	UNIDAD	CUMPLE / NO CUMPLE	OBSERVACIONES
dd/mm/aaaa	Identificación del punto de muestreo a analizar	Temperatura	%	40	°C	Definir si el parámetro analizado cumple con los valores acordados para tratamiento en la PTAR externa	Si se llega a presentar alguna eventualidad o si se tiene que hacer control sobre este punto ya que no hay avance sobre el cumplimiento de los límites establecidos
dd/mm/aaaa		pH	%	7,5 – 8,5	-		
dd/mm/aaaa		Sólidos Suspendidos	%	0,0556	%		
dd/mm/aaaa		Grasas y Aceites	%	0,1446	%		
dd/mm/aaaa		MeOH	%	Controlado	%		

Nota: Autor

Segregación de corrientes críticas:

- Aislamiento de efluentes con altos niveles de MeOH y acideces provenientes del drenaje de centrifugas y tanque de sello hidráulico.
- Redireccionamiento para reúso, almacenamiento o tratamiento diferenciado.

5.4.3 Protocolos operativos estandarizados (POEs)

Para asegurar la correcta implementación y sostenibilidad de las acciones propuestas, se diseñarán Protocolos Operativos Estandarizados que regulen las actividades técnicas clave del sistema de tratamiento:

- POE para toma y análisis de muestras: definiciones claras sobre puntos de muestreo, métodos de preservación y análisis en laboratorio, con base en normativas técnicas como ASTM 1293 (pH), SM 5520B (grasas y aceites), y NTC 287 (MeOH).
- POE para operación del sistema Fat-Trap: lineamientos para la dosificación química, control de pH, verificación del sistema de bombeo y limpieza de compartimentos.
- POE para respuesta ante eventos fuera de norma: procedimiento estandarizado para detección de desviaciones, detención de vertimientos críticos y activación de medidas correctivas inmediatas.

5.4.4 Sistema de control de calidad

La implementación del sistema de monitoreo será reforzada mediante un esquema de control de calidad interno que contemple:

Indicadores clave de desempeño (KPIs), tales como:

- Porcentaje de muestras fuera de la normativa.
- Eficiencia del Fat-Trap (entrada/salida de SST y G&A).
- Desviación semanal de pH frente a la media operativa.

Auditorías internas mensuales: Orientadas a la revisión de registros, validación de la ejecución de POEs y análisis de cumplimiento normativo.

Capacitación técnica continua al personal operativo: En normatividad ambiental, manejo seguro de sustancias químicas, operación de trampas de grasa y análisis de calidad del agua.

5.4.5 Plan de mantenimiento para trampas de grasas (Fat-Traps)

La eficiencia del sistema Fat-Trap depende directamente de su estado operativo. Por lo tanto, se establecerá un programa estructurado de mantenimiento preventivo y correctivo:

- **Mantenimiento preventivo:** limpieza rutinaria de compartimientos, revisión de bombas y sensores, cada 48 horas.
- **Mantenimiento correctivo:** atención inmediata ante obstrucciones, fallas de bombeo o descontrol de parámetros (pH, caudal).

- **Bitácora de mantenimiento digital:** registro detallado de frecuencia, acciones realizadas, fallos detectados y tiempos de respuesta.

La implementación de estas acciones integradas permitirá fortalecer el sistema de pretratamiento de efluentes industriales de la planta asegurando una gestión más eficiente, trazable y alineada con los requerimientos ambientales vigentes, al tiempo que se minimizan los riesgos operacionales y se promueve el cumplimiento normativo sostenible.

Conclusiones

A través del diagnóstico realizado al sistema de pretratamiento de efluentes industriales de la planta de biocombustible., se logró identificar puntos críticos de generación de aguas residuales no domésticas (ARnD) en las plantas de refinación, biodiésel y unidad de filtración. Dichos puntos presentan variaciones significativas en parámetros fisicoquímicos que afectan la calidad de la corriente entregada a la PTAR externa para su tratamiento y vertimiento final.

El análisis comparativo frente a la Resolución 0631 de 2015 permitió establecer que la corriente combinada de salida hacia la PTAR excede los límites establecidos para **pH, grasas y aceites y sólidos suspendidos totales**, lo cual evidencia la necesidad de fortalecer el tratamiento previo en la planta y mantener el tratamiento posterior en la PTAR externa.

La caracterización de las corrientes específicas mostró que existen flujos con alta carga orgánica (especialmente metanol y metiléster), provenientes de operaciones como el drenaje de centrífugas o el sello hidráulico. Estas corrientes deben ser tratadas de forma diferenciada o segregadas para mitigar su impacto ambiental.

Se planteó una propuesta integral de mejora que incluye la implementación de protocolos operativos estandarizados (POEs), el diseño de un sistema de monitoreo digital automatizado, y la adopción de un plan de mantenimiento preventivo para el sistema Fat-Trap. Estas herramientas permitirán optimizar el desempeño del sistema y asegurar el cumplimiento normativo.

Finalmente, se diseñó un modelo de registro y trazabilidad digital que facilita el seguimiento periódico de los parámetros monitoreados, la identificación de desviaciones y la toma

oportuna de decisiones, alineando la gestión operativa con los requisitos de sostenibilidad ambiental.

Recomendaciones

Establecer un sistema de monitoreo continuo con frecuencia mínima de dos veces por semana en los puntos críticos, priorizando el seguimiento de los parámetros que presentan mayor riesgo de incumplimiento (pH, SST, G&A y MeOH).

Implementar el archivo de trazabilidad digital propuesto (Excel automatizado) para fortalecer la toma de decisiones, la sistematización de resultados y la generación de reportes con alertas ante desviaciones.

Aplicar acciones correctivas como la dosificación controlada de ácidos (cítrico o sulfúrico) en el Fat-Trap general, y la evaluación de tecnologías de separación física (DAF, filtros) para mejorar la remoción de grasas y sólidos.

Promover la capacitación continua del personal operativo en normativas ambientales, control de calidad y operación de sistemas de tratamiento, con el fin de asegurar la correcta aplicación de los protocolos establecidos.

Evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de segregación para las corrientes con alta concentración de metanol, orientado a su posible reutilización, tratamiento especializado o neutralización previa.

Referencias bibliográficas

- Choya, A. (2015). *Planta de tratamiento de aguas residuales procedentes de la producción de biodiesel*.
- Colombia. Congreso de la República. (1979). Ley 9 de 1979: Por la cual se dictan medidas sanitarias. Diario Oficial No. 35.116.
- Colombia. Congreso de la República. (1994). Ley 142 de 1994: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios. Diario Oficial No. 41.433.
- Julio Cesar Marín. (2015). *Tratamiento de aguas residuales de una industria procesadora de pescado en reactores anaeróbicos discontinuos* [Tesis].
- Leticia Raquel. (2018). *Tratamiento de efluentes acuosos provenientes de la industria de biodiesel utilizando tecnología de membranas* [Tesis].
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). Decreto 3930 de 2010.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 de 2021.
- PCi Membranes. (2024). *Grease removal solutions for industrial water*.