



Modernización y optimización de la planta de tratamiento de agua residual industrial de la central termoeléctrica la sierra EPM

Diego Alberto Calle Villegas

Informe de prácticas para optar el título de ingeniero químico.

Asesores:

Asesor externo: Ingeniero químico Luis Fernando Ostos Cusba

Asesor interno: Lina María González Rodríguez, Ingeniera Química, Ph.D. en Ciencias Químicas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Química
Medellín, Antioquia, Colombia
2022

Cita	(Calle-Villegas, 2022)
Referencia	Calle-Villegas, D. A. (2022). <i>Modernización y optimización de la planta de tratamiento de agua residual industrial de la central termoeléctrica la sierra EPM</i> [Semestre de Industria]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia UdeA.
Estilo APA 7 (2020)	



Empresas Públicas de Medellín-Central termoeléctrica La Sierra- Plantas de agua



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este documento está dedicado a Nelson Pérez Vargas por el apoyo incondicional que me ha brindado, y ser esa persona que me dio alientos en los momentos que sentí deseos de rendirme.

Gracias

Agradecimientos

A Dios padre por darme la vida, la salud y el trabajo para lograr culminar mis estudios.

A mi familia por hacer posible el día a día, los consejos, los desayunos después de un largo trasnocho, el apoyo y la motivación.

A Los profesores especialmente Felipe Bustamante, Aida Luz Villa, Lina María González y todos los demás, por educar, motivar, enseñar y sobre todo inspirar.

Al grupo EPM, mi tutor el ingeniero Luís Ostos, los tecnólogos Edwin y Jhonatan, por haberme brindado su confianza y haber sido un apoyo en esta etapa de formación para el desarrollo de este gran proyecto.

A mi amigos: Simón, Paola, Yirleny, Leonardo, María José, Daniel, Carlos y demás compañeros, gracias por haber vivido juntos tantos momentos y recuerdos que hicieron de este proceso de formación menos difícil.

GRACIAS

Tabla de contenido

Resumen	12
Abstract	13
Introducción	14
1 Planteamiento del problema	16
2 Justificación.....	17
3 Objetivos	18
3.1 General:	18
3.2 Específicos:.....	18
4 Marco teórico	19
4.1 Aguas residuales industriales.....	19
4.2 Caracterizaciones para medir la calidad del agua.....	19
4.2.1 Demanda química de oxígeno (DQO):.....	20
4.2.2 Biodegradabilidad del caudal de entrada	21
4.2.3 Medición de la cantidad de grasas y aceites.....	22
4.2.4 Medición de sólidos suspendidos	23
4.2.5 Medición de sulfatos	24
4.2.6 Medición del color aparente	25
4.2.7 Medición de turbiedad.....	25
4.2.8 Medición de Temperatura	25
4.2.9 Medición del potencial de hidrógeno	25
4.2.10 Calibración de la determinación química de oxígeno	26
4.3 Tratamiento de aguas residuales.....	27
4.3.1 Oxidación de aguas residuales:	28
4.3.2 Coagulación:.....	29
4.3.3 Floculación:	29
4.3.4 Sedimentación:	30
4.3.5 Test de jarras:	30
4.3.6 Neutralización:	30
4.4 Normatividad de vertimientos	31
5 Metodología	32

5.1	Fases del proyecto	32
5.2	Metodologías de monitoreo para agua residual industrial.....	32
5.3	Método de ensayo para determinación de la demanda química de oxígeno	33
5.4	Método de ensayo para determinación de grasas y aceites.	34
5.5	Método de ensayo para determinación de sólidos suspendidos	36
5.6	Metodología para la calibración del método determinación química de oxígeno.....	38
5.7	Metodologías espectrofotometría UV-Visible.....	40
5.7.1	Sulfatos.....	40
5.7.2	Color Aparente	40
5.7.3	Metodología para medición de turbiedad.....	41
5.8	Metodología para la calibración del método determinación de sólidos suspendidos.....	41
5.9	Metodología para la calibración del método determinación de grasas y aceites.....	42
5.10	Test de Jarras para la determinación de la dosis óptima.....	43
5.11	Metodología para el aforo de las bombas de dosificación:.....	44
5.12	Medición en campo.....	45
5.12.1	Multiparámetro.....	45
6	Resultados y análisis	46
6.1	Descripción de la planta y equipos	46
6.1.1	Separador de grasas y aceites API.....	46
6.1.2	Foso de bombeo de aguas residuales.....	47
6.1.3	Drenajes.....	48
6.1.4	Tanque de oxidación Química.....	54
6.1.5	Difusores de membrana.....	55
6.1.6	Decantador Lamelar	56
6.1.7	Proceso de clarificación	58
6.1.8	Dosificación de químicos	59
6.1.9	Diagrama del proceso y vistas de la planta en modelo 3D.....	63
6.2	Inspección y resultados de la modernización de la planta.....	69
6.2.1	Lista de chequeo y actividades en la planta residual industrial.....	69
6.3	Resultados de la modernización	72
6.3.1	Selección y compra de equipos para planta	72
6.3.2	Selección y compra de equipos para laboratorio.....	75
6.3.3	Resultados de modernización en planta	75
6.4	Tiempos de residencia	77

6.5	Validación de metodologías	79
6.6	Test de Jarras	82
6.6.1	Resultados de prueba de dosificación de coagulante y floculante	82
6.6.2	Resultados de aforo	86
6.7	Caracterización del efluente	87
6.8	Seguimiento inicial de parámetros de calidad de agua residual industrial	88
6.9	Medición final con condiciones del proceso optimizadas	91
7	Conclusiones	93
8	Referencias	95
9	Recomendaciones	97
Anexos	99

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación del índice de biodegradabilidad.	21
Tabla 2. Límites permisibles de parámetros de agua residual según la resolución 0631 de 2015.	31
Tabla 3. Evaluación de eficiencias de remoción para el separador API.	47
Tabla 4. Evaluación de eficiencias de remoción para el tanque de oxidación química.	55
Tabla 5. Evaluación de eficiencias de remoción para el tanque de oxidación química con los difusores repuestos.	56
Tabla 6. Evaluación de eficiencias de remoción para el sedimentador lamelar.	57
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de la soda caustica.	59
Tabla 8. Resultados del ensayo de ajuste de pH con aguas residuales industriales.	60
Tabla 9. Resultados de dosificación y aforo de la bomba de soda caustica.	60
Tabla 10. Resultados de ensayo de determinación química de oxígeno en función de las condiciones de pH en el tanque de oxidación.	60
Tabla 11. Condiciones de dosificación en planta.	61
Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del policloruro de aluminio.	62
Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas del floculante.	62
Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas del ácido clorhídrico.	62
Tabla 15. Inspección de tanques, equipos principales y válvulas.	69
Tabla 16. Inspección de instrumentos de planta de tratamiento residual.	71
Tabla 17. Especificaciones y modelos homologados de bombas.	73
Tabla 18. Gradientes de velocidad en procesos de planta calculados con datos de hojas de especificaciones.	74
Tabla 19. Especificaciones y modelo homologado del agitador.	74
Tabla 20. Relación de tareas y resultados de la modernización y operación de la planta.	75
Tabla 21. Medición de tiempos de residencia para cada subsistema de la planta.	77
Tabla 22. Resultados de la validación del método de grasas y aceites.	80
Tabla 23. Resultados de la validación del método de sólidos suspendidos.	80
Tabla 24. Resultado de la curva de calibración para la DQO.	81
Tabla 25. Parámetros iniciales del agua cruda al inicio del proceso de clarificación.	83
Tabla 26. Test de jarras variando la dosificación de coagulante manteniendo la concentración de floculante constante.	83
Tabla 27. Test de jarras con la dosis optima anterior variando la concentración de floculante.	84
Tabla 28. Dosis optima de coagulante para diferentes características de agua residual a la entrada.	85
Tabla 29. Caracterización del efluente.	88
Tabla 30. Medición final con condiciones de proceso optimizadas.	91
Tabla 31. Especificaciones del lecho de secado.	99
Tabla 32. Propiedades fisicoquímicas de lodos con 17% de concentración.	100
Tabla 33. Resultados de la prueba de acción antiespumante.	107

Lista de figuras

Figura 1. Foso de bombeo de aguas residuales.	48
Figura 2. Drenaje de 8” para separadores API fuel oil y ciclo simple.	48
Figura 3. Drenaje de 8” para separadores API fuel oil y ciclo simple.	50
Figura 4. Drenaje de planta residual industrial.	51
Figura 5. Drenaje de sistemas de bombeo y contraincendios.	51
Figura 6. Drenaje de planta de agua desmineralizada demivapor.	52
Figura 7. Drenaje de tanque separador de la unidad 3.	52
Figura 8. Drenaje de aguas pluviales que se encuentra cerrado.	53
Figura 9. Segundo drenaje de aguas pluviales.	53
Figura 10. Ducto de rebose en el foso de aguas residuales.	54
Figura 10. Diagrama del proceso de clarificación de agua residual. (Consejería de Medio Ambiente, 2000).	58
Figura 6. Diagrama P&ID tratamiento de aguas residuales industriales (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997).	64
Figura 13. Vista del proceso de clarificación de la planta residual industrial.	65
Figura 14. Vista del proceso de tratamiento de agua residual industrial.	65
Figura 15. Vista del proceso de oxidación en la planta de tratamiento residual industrial.	66
Figura 16. Vista del proceso de dosificación de químicos de la planta de tratamiento.	66
Figura 17. Vista del proceso de oxidación de la planta de tratamiento.	67
Figura 18. Vista de la planta de tratamiento de agua residual industrial.	68
Figura 19. Vista del foso de bombeo de aguas residuales industriales.	68
Figura 20. Ajuste lineal de la curva de calibración de determinación química de oxígeno.	81
Figura 21. Test de jarras variando la concentración de coagulante y manteniendo constante la dosis de floculante.	83
Figura 22. Test de jarras variando la concentración de floculante y manteniendo constante la dosis de coagulante.	84
Figura 23. Curva de aforo para bomba dosificadora de policloruro de aluminio.	86
Figura 24. Curva de aforo para bomba dosificadora de Sedisol (floculante).	86
Figura 25. Curva de aforo para bomba dosificadora de ácido clorhídrico.	87
Figura 26. Histórico de oxígeno disuelto a la entrada y salida de la planta de tratamiento residual.	89
Figura 27. Histórico de potencial de hidrógeno a la entrada y salida de la planta de tratamiento residual.	89
Figura 28. Histórico de turbiedad a la entrada y salida de la planta de tratamiento residual. Nota: Color a la entrada corresponde al eje izquierdo y viceversa.	90
Figura 29. Histórico de color (UPC) a la entrada y salida de la planta de tratamiento residual. Nota: Color a la entrada corresponde al eje izquierdo y viceversa.	90
Figura 30. Diseño de la red de tubería para bombeo de lodos residuales.	100
Figura 31. Detalle de diseño de tubería en el exterior.	101
Figura 32. Vista superior de detalle de tubería de bombeo.	101
Figura 33. Detalle red de tubería desde la tolva planta de tratamiento de agua residual.	101
Figura 34. Vista superior diseño de bombeo para lodos residuales.	102

Figura 35. Límite de fluencia e índice de consistencia para fluidos que se comportan como plásticos de Bingham.	103
Figura 36. Factor de fricción en función del número de Hedstrom y Reynolds.	103
Figura 37. Especificación técnica y condiciones comerciales de la bomba seleccionada.	105
Figura 22. Test de jarras variando la concentración de floculante y manteniendo constante la dosis de coagulante.	107

Anexos

Anexo A Diseño de un sistema de bombeo para tratamiento de lodos en lechos de secado para la planta de tratamiento de agua residual industrial (Andreoli, Sperling, Fernandez, & Ronteltap, 2007), (Carthew, Goehring, & Van Teylingen, 1983), (Larson, 1999), (Metcalf & Eddy, 1977), (Vesilind & Davis, 1988)	99
Anexo B Antiespumantes (Richards, 2021).....	106

Siglas, acrónimos y abreviaturas

EPM	Empresas Públicas de Medellín
PTARI	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales
IWTP	Industrial Wastewater Treatment Plant
PTARD	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas
API	Separador de Grasas y Aceites
SST	Sólidos Suspendidos Totales
DBO₅	Demanda Biológica de Oxígeno en 5 días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
GYA	Grasas y Aceites

Resumen

La depuración de contaminantes presentes en las aguas residuales industriales en la central termoeléctrica La Sierra EPM, se hace a través de la PTARI que consta básicamente de procesos primarios. Debido a la obsolescencia y falta de algunos equipos e instrumentos en la planta, se encontraron problemas de operación para el funcionamiento durante largos lapsos de tiempo, teniendo en cuenta que la capacidad de diseño no contaba con los vertimientos actuales. Además, a parte del monitoreo externo semestral no se existía ningún tipo de monitoreo interno de control para evaluar la eficiencia de remoción de los equipos y la calidad de agua a ser vertida. El objetivo del presente proyecto fue determinar la modernización de acuerdo con la obsolescencia tecnológica.

Este proyecto se ejecutó en varias fases con el propósito de garantizar la operabilidad de la planta de acuerdo con la demanda del tratamiento. Se realizó un diagnóstico del estado de la planta y se siguió con los procesos de compra para recuperar los equipos dañados y faltantes, a la par se hizo un estudio e implementación de las principales metodologías de análisis para el seguimiento y control de la planta. De igual manera, se hizo un estudio de las condiciones de trabajo en la planta para mejorar los procesos de tratamiento utilizando como herramienta el análisis con las metodologías implementadas en EPM. Como resultados finales del proyecto se logró recuperar el funcionamiento total de la planta, aumento de las eficiencias de remoción de contaminantes y monitoreo para ejecutar decisiones en el proceso.

Palabras clave: Planta de tratamiento, aguas residuales, parámetros fisicoquímicos, normatividad legal, eficiencia de remoción.

Abstract

The contaminants removal presents in industrial wastewater at the La Sierra EPM thermoelectric plant is done through the IWTP which basically consists of primary processes. Due to the obsolescence and lack of some equipment and instruments in the plant, operational problems were found for operation for long periods of time, considering that the design capacity did not include the current discharges. In addition, apart from the six-monthly external monitoring, there was no type of internal control monitoring to evaluate the removal efficiency of the equipment and the quality of the water to be discharged. The objective of this project was to determine the modernization of the IWTP according to technological obsolescence.

This project was executed in different phases with the purpose to warranty the operability of the plant in accordance with the treatment demand. An analysis of the state of the plant was carried out and the purchase processes were continued to recover both the damaged and missing equipment, at the same time a study and implementation of the main analysis methodologies for the monitoring and control of the plant was carried out. Likewise, a study of the working conditions in the plant was carried out to improve the treatment processes using analysis with the methodologies used in EPM as a tool. As final results of the project, it was possible to recover the total operation of the plant, increase in the efficiency of removal of contaminants and monitoring to make decisions in the process.

Keywords: Treatment plant, wastewater, physicochemical parameters, legal regulation, removal efficiency.

Introducción

La central termoeléctrica la sierra EPM cuenta con dos sistemas de tratamiento de aguas residuales para el ciclo simple, uno para las aguas residuales domésticas y otro para las aguas residuales industriales (PTARI). La descarga del ciclo simple se conjuga en un único vertimiento conformado por la mezcla de las aguas provenientes de ambos sistemas de tratamiento y es denominado Descarga Ciclo Simple. El efluente de ambas plantas se conduce hacia la fuente receptora río Magdalena, cuyo punto de descarga se encuentra ubicado en el sector denominado la Coquera, aguas abajo de la descarga del ciclo combinado (Universidad pontificia Bolivariana, 2015).

A la planta de tratamiento de aguas residuales industriales llegan los vertimientos generados en el taller, guaje de lavado de vehículos, drenajes de químico provenientes de las diferentes plantas de tratamiento (agua desmineralizada, agua de servicio y PTARI), drenaje de purgas durante la generación de energía, área de mantenimiento de equipos, laboratorio químico y separador de grasas y aceites.

Las aguas derivadas de actividades industriales, procedentes de la zona de talleres, lavado y mantenimiento, caracterizadas principalmente por la presencia de trazas de aceites, son conducidas a dos sistemas API, construidos con dos compartimientos, uno de los cuales actúa como decantador y el otro como desnatador (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014). Estas aguas son enviadas a la planta de tratamiento PTARI donde existen procesos fisicoquímicos: oxidación con aire, coagulación-floculación, sedimentación y neutralización donde se acondiciona el pH del agua al permisible para su derramado (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997) , y los residuos de aceite removidos son almacenados en una bodega temporal y posteriormente entregados a un gestor debidamente legalizado para su incineración, La bodega se encuentra cubierta, el piso se encuentra protegido por una placa de concreto, con un drenaje para contingencias las cuales en caso de derrame serian conducidas nuevamente al API (Universidad pontificia Bolivariana, 2015). En los últimos años gran parte de la operación de la planta ha sido manual siendo necesario forzamiento de señales en los instrumentos para el normal funcionamiento de esta.

En cuanto al tiempo de operación, se debe tener en cuenta que las plantas de tratamiento de aguas residuales no operan de forma continua y que dependen de la generación eléctrica de la central. A condiciones iniciales de diseño, el tiempo de operación de la planta PTARI se estipulaba aproximadamente en 10 horas/día (Universidad pontificia Bolivariana, 2015).

Por otra parte, el vertimiento de residuos líquidos para la central termoeléctrica está reglamentado por la resolución 0631 de 2015, la cual fija los valores límites y parámetros permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público; La Resolución 0631 de 2015 en el capítulo 5, artículo 14, define los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas y aguas residuales no domesticas a cuerpos de aguas superficiales para unidades de generación eléctrica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

1 Planteamiento del problema

El último monitoreo ambiental reportó que los sistemas de aguas residuales industriales cumplieron a cabalidad los límites máximos establecidos en la Resolución 631 de 2015 para los parámetros de pH, temperatura, DBO5, DQO, SST, SSED, G y A, fenoles, hidrocarburos, cloruros, sulfatos, metales pesados (arsénico, cadmio, zinc, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y hierro). De esta manera se puede afirmar que los vertimientos realizados por estos sistemas no causarán mayores impactos a las fuentes receptoras (Servicios Geograficos y Ambientales , 2020).

Actualmente, debido a factores como falta de equipos, obsolescencia de algunos instrumentos y vida útil la planta, se plantea ejecutar una modernización de acuerdo con la obsolescencia tecnológica, analizadores en línea, sistemas de dosificación, el cual será ejecutado en varias fases con el propósito de garantizar la operabilidad de la planta de acuerdo con la demanda del tratamiento.

2 Justificación

Basado en los antecedentes ya mencionados, se hace necesario entonces actualizar el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas, y a partir del estudio de las condiciones de operación, mejorar el tratamiento y lograr precisar las necesidades de automatización que disminuyan la operación manual de la planta, todo esto en harás de continuar prestando servicios adecuados y sustentables de tratamiento de conformidad con las normas vigentes en materia ambiental. El proyecto se realizará en tres etapas: descripción del tratamiento de aguas residuales actual y un diagnóstico del estado de esta, el monitoreo periódico de los parámetros de calidad y medición de la eficiencia del proceso analizando los parámetros fisicoquímicos del agua a la alimentación de la planta y a la salida, y las alternativas de optimización y control en la operación, mantenimiento y diseño. Se espera entonces garantizar la operación de la planta y mantener el rango de eficiencia de eliminación de carga contaminante del proceso.

3 Objetivos

3.1 General:

Determinar el proceso de modernización de la planta de tratamiento de aguas residuales PTARI que garantice la operación de la planta y mantenga el rango de eficiencia de remoción de carga contaminante del proceso.

3.2 Específicos:

- Establecer el estado y las condiciones actuales de operación de la planta.
- Evaluar cada proceso de la planta para reconocer los puntos críticos a mejorar y la actualización o reposición de equipos.
- Examinar e implementar metodologías para el análisis de los parámetros necesarios que permitan determinar la eficiencia del sistema de tratamiento.
- Monitorear periódicamente los parámetros de calidad de agua residual a fin de poder confirmar que estos se mantengan dentro del rango permisible.
- Diagnosticar las necesidades de automatización para disminuir la operación manual de la planta y lograr un mejor control de esta.

4 Marco teórico

4.1 Aguas residuales industriales

Las aguas residuales industriales son efluentes de agua que provienen de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales (METCALF-EDDY, 1977).

Estas pueden de manera directa o indirecta percibir aportes de material graso e hidrocarburos, generados en áreas donde se realiza mantenimiento de equipos y manipulación de aceites, grasas, combustibles y arrastre por escorrentía (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014).

4.2 Caracterizaciones para medir la calidad del agua

El conocimiento de las características que miden la calidad de agua es fundamental para establecer el tipo de tratamiento, evacuación de las aguas residuales, así como también la gestión de la calidad medio ambiental.

Para la caracterización del agua residual se emplean tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación precisa de la composición química del agua residual, como análisis cualitativos para el conocimiento de las características físicas y biológicas.

Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos en suspensión (SST) que hace referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual (Valencia Arboleda, 2000), la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, el pH, el color que es característico de aguas residuales y la turbiedad que se mide comparando la intensidad de la luz dispersada en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones.

Por otra parte, el estudio de las características químicas de las aguas residuales aborda la medición de parámetros como la demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, la materia orgánica e inorgánica y la cantidad de gases.

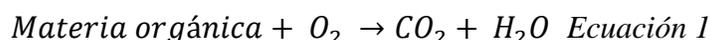
Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica (Metcalf & Eddy, 1977). Estos contaminantes orgánicos dan como resultado la disminución del oxígeno, producto de la degradación biológica de los compuestos (E. & E., 2014).

Una breve definición de los parámetros de medición se muestra a continuación.

4.2.1 Demanda química de oxígeno (DQO):

Indica el contenido de materia orgánica del cuerpo de agua; se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable mediante un agente químico oxidante, generalmente el dicromato de potasio es el agente oxidante por su característica de oxidar casi todos los compuestos orgánicos e inorgánicos (menos aceites livianos) en un medio ácido y a alta temperatura (Metcalf & Eddy, 1977).

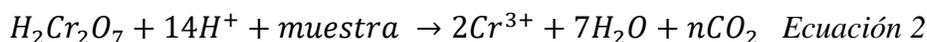
Bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo dando lugar a la formación de dióxido de carbono y agua, como se indica en la siguiente ecuación:



Para muestras de procedencia específica la DQO puede relacionarse empíricamente con la DBO, el carbono orgánico o el contenido de materia orgánica.

Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con un exceso conocido de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). El método colorimétrico mide la absorbancia del excedente del Cr^{6+} (el que queda sin reaccionar, color amarillo); este absorbe a una longitud de onda de 420 nm. También se puede determinar la absorbancia del Cr^{3+} formado (color verde) a una longitud de onda de 600 nm. Se establecen curvas de calibración con base a unos patrones (Empresas Públicas de Medellín, 2020).

La materia orgánica oxidable se calcula en términos de oxígeno equivalente. La reacción involucrada es:



En el análisis de aguas residuales con alta DQO deben hacerse diluciones preliminares, para reducir el error inherente en la medida de pequeños volúmenes de muestra.

Para la validación del método se prepara una solución de ftalato de potasio de DQO conocida, la cual permite verificar la precisión y exactitud del método, así como la variabilidad del analista. El método de demanda química de oxígeno en agua por el método de reflujo cerrado y colorimétrico es de acuerdo con el método 5220 D del “Standard methods for the examination of water and wastewater 23 Ed”. (APHA/AWWA/WPCF, 1994)

4.2.2 Biodegradabilidad del caudal de entrada

La biodegradabilidad permite determinar la capacidad que posee el vertimiento a ser degradado por acción microbiana, relacionando la DBO5 y la DQO. Se determina con la siguiente ecuación.

$$\text{Indice de biodegradabilidad} = \frac{DBO_5}{DQO} \quad \text{Ecuación 3}$$

La clasificación del índice de biodegradabilidad puede verse en la **Tabla 1**:

Tabla 1.

Clasificación del índice de biodegradabilidad.

Rango	Biodegradabilidad
0<0.4	Baja
0.4<0.7	Media
0.7<1	Alta

La relación entre la DBO5 y la DQO indica la importancia de los vertidos dentro de las aguas residuales y su posibilidad de biodegradación (Servicios Geograficos y Ambientales , 2020).

DBO y DQO mantienen su relación para cada tipo de agua. La dependencia entre ellas no es igual para todos los procesos o matrices, es decir un agua residual urbana puede tener un 50% de la DQO en forma de DBO (o como factor aplicable a la DQO 0.5), pero las diferentes aguas

industriales tienen diferentes porcentajes. Los porcentajes por supuesto pueden variar según los casos, pero la relación para cada tipo de proceso entre DBO/DQO es diferente (Induanalisis, 2019).

Para el agua residual industrial tratada según el último monitoreo externo, se observó que en todos los sistemas presentan niveles de biodegradabilidad baja y media, reflejando la presencia de compuestos complejos y/o resistentes a la biodegradabilidad biológica (Servicios Geograficos y Ambientales , 2020).

4.2.3 Medición de la cantidad de grasas y aceites

En la determinación de grasas y aceites no se mide una cantidad absoluta de una sustancia específica, se miden cuantitativamente un grupo de sustancias con características físicas similares de acuerdo con su solubilidad en determinados compuestos orgánicos.

Aceites y grasas son definidas como cualquier material recuperado como una sustancia soluble en el solvente. Este incluye otros materiales extraídos por el solvente en la muestra acidificada (tales como compuestos de sulfuro, ciertos tintes orgánicos y clorofila) y no volatilizados durante el ensayo (Empresas públicas de Medellín, 2020).

Este análisis es importante en aguas residuales porque ciertos constituyentes medidos en el análisis de aceites y grasas pueden influenciar los sistemas de tratamiento de aguas residuales, si se presentan en excesiva cantidad ellos pueden interferir en los procesos de oxidación aeróbicos y anaeróbicos y producir una disminución de la eficiencia en el tratamiento de agua residual (Empresas públicas de Medellín, 2020).

Las aguas de alimentación a la planta residual contienen aceites lubricantes provenientes de las actividades en talleres, lavado de garajes y calles. En el agua residual parte de estos aceites flotan y una fracción se pueden depositar en los sedimentos. La presencia de ellos ocasiona un recubrimiento de la superficie del agua, ya que son insolubles en ella, interfiriendo así en el normal desarrollo de la vida biológica y causando problemas de mantenimiento tanto en la red de alcantarillado como también en los sistemas de tratamiento utilizado para la depuración del agua.

Es por ello que resulta importante su eliminación para evitar la formación de películas de grasa y la acumulación de material desagradable (Harvey, 2002).

La extracción es un método que se basa en la diferencia de la solubilidad del compuesto que se desea separar en dos disolventes distintos. La extracción se logra por la adición de un disolvente orgánico adecuado inmiscible con el agua y con la capacidad de solubilizar la máxima cantidad del compuesto que se desea extraer. Después se agita la mezcla para así aumentar la superficie de contacto y lograr una distribución más rápida del compuesto a extraer entre las dos fases. Al dejar reposar, las dos fases se separan espontáneamente por decantación, debido a la diferencia de densidades entre ellas, con lo que la fase orgánica que contiene el producto deseado se separa mediante una simple decantación de la fase acuosa. Por lo general, después de la extracción, la fase acuosa aún contiene cierta cantidad del compuesto, por lo que se repite el proceso de extracción por lo general tres veces más con el disolvente orgánico puro para lograr la máxima separación. Al finalizar la extracción, se elimina el disolvente orgánico por destilación o evaporación (Harvey, 2002).

El contenido de aceite y grasa viene dado por el aumento de peso y se expresa en mg/L. Este método se puede aplicar en el análisis de aguas residuales superficiales, industriales o domésticas.

El método de determinación de grasas y aceites en muestras de agua es de acuerdo con los métodos 5520 A, D del “Standard methods for the examination of water and wastewater 23 Ed”. El método es netamente empírico, resultados duplicados con un alto grado de precisión se pueden obtener solo si se realiza el método teniendo en cuenta los detalles indicados para la extracción por el método Soxhlet (APHA/AWWA/WPCF, 1994).

4.2.4 Medición de sólidos suspendidos (Empresas públicas de Medellín, 2020)

La definición de sólidos abarca todos los materiales provenientes de aguas potables, aguas contaminadas, aguas industriales, lodos, etc., que permanecen como residuo después de la evaporación y secado a una temperatura aproximada de 105°C. Los sólidos que pueden estar presentes en una muestra de agua se clasifican en dos categorías: disueltos y suspendidos.

Los sólidos suspendidos pueden clasificarse en sedimentables: aquellos que se depositan en una hora, por estar constituidos por partículas pesadas; y los no sedimentables, formados por partículas livianas que no alcanzan a depositarse en una hora.

Para todas las categorías de sólidos se pueden distinguir una fracción volátil y una fracción fija. Desde el punto de vista ambiental los sólidos son importantes por diversas razones: aguas con alto contenido de sólidos pueden ser laxantes y pierden propiedades organolépticas.

La evaluación de sólidos suspendidos es extremadamente valiosa en los análisis de aguas contaminadas y de aguas residuales, pues permite valorar la concentración y determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento en el trabajo de control a la contaminación de corrientes. La medida de los sólidos suspendidos se considera tan significativa como la DBO₅.

El principio del ensayo se basa en que los sólidos suspendidos están constituidos por la materia suspendida que permanece en un filtro de fibra de vidrio de 1.2 μm , cuando se filtra una muestra de agua previamente agitada. A partir del residuo obtenido en la determinación de sólidos suspendidos y calcinarlos a 550°C.

El método de determinación de Sólidos suspendidos en muestras de agua secados a 103°C-105°C es de acuerdo con el método 2540 D del "Standard methods for the examination of water and wastewater 23 Ed". (APHA/AWWA/WPCF, 1994)

4.2.5 Medición de sulfatos (HACH, 2000)

Los iones de sulfato en la muestra reaccionan con el bario en el reactivo Sulfaver 4 y forman una turbidez de sulfato de bario insoluble. La cantidad de turbidez formada es proporcional a la concentración de sulfato. El Sulfaver 4 también contiene un agente estabilizante para mantener el precipitado en suspensión. Los resultados de la prueba se miden a 450 nm.

El método está adaptado de Standard methods for the examination of water and wastewater 23 Ed. (APHA/AWWA/WPCF, 1994).

4.2.6 Medición del color aparente (HACH, 2000)

Se puede expresar el color como color “aparente” o “verdadero”. El color aparente incluye el color de materia disueltas más el color de las sustancias en suspensión. El programa para la medición se calibra en unidades de color basadas en el estándar recomendado por APHA de 1 unidad de color que es igual a 1 mg/L de platino como ion de cloroplatinado. Los resultados se miden a 465 nm.

El método está adaptado de Standard methods for the examination of water and wastewater 23 Ed. (APHA/AWWA/WPCF, 1994).

4.2.7 Medición de turbiedad (SENA y Ministerio de desarrollo económico, 1999)

La turbiedad es el efecto óptico causado por la dispersión y absorción de los rayos luminosos que pasan a través del agua que contiene pequeñas partículas en suspensión. La turbiedad del agua se determina a través de un turbidímetro, el cual está formado por una fuente de luz; un sistema de lectura de la luz que pasa a través del agua contenida en un recipiente blanco transparente o de la luz que dispersan las partículas y una escala de medida. Se expresa en unidades nefelométricas o en unidades de turbiedad.

4.2.8 Medición de Temperatura (SENA y Ministerio de desarrollo económico, 1999)

Es importante por el efecto sobre las propiedades físicas, afecta la velocidad de las reacciones químicas y la solubilidad de los gases, amplía sabores y olores, y determina el desarrollo de los organismos presentes.

4.2.9 Medición del potencial de hidrógeno (IDEAM, 2007)

El término pH es una forma de expresar la concentración de ión hidrógeno o, más exactamente, la actividad del ión hidrógeno. En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez total o la alcalinidad total. En el suministro de aguas es un factor que debe considerarse con respecto a la coagulación química, la desinfección, el ablandamiento y el control de corrosión. Tanto por estos factores como por las relaciones que existen entre pH, alcalinidad y acidez es importante entender los aspectos teóricos y prácticos del pH.

El principio básico de la medida electrométrica del pH se fundamenta en el registro potenciométrico de la actividad de los iones hidrógeno por el uso de un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia, o un electrodo combinado. La fuerza electromotriz (fem) producida por el sistema electroquímico varía linealmente con el pH y puede verificarse por la obtención de una gráfica de pH vs. fem para diferentes soluciones de pH conocido. El pH de la muestra se determina por interpolación. Casi todos los aparatos usados hoy en día utilizan el electrodo de vidrio, en combinación con un electrodo de calomel, empleado como electrodo de referencia, para medir el pH. El potencial entre los electrodos es proporcional a la concentración de iones hidrógeno en solución.

El sistema de electrodos se calibra siempre con soluciones de pH conocido. De acuerdo con el fabricante y el tipo de medidor de pH, cada aparato posee sus propias características e instrucciones de uso.

4.2.10 Calibración de la determinación química de oxígeno (Harris, 2012)

El método empleado se basa en la reacción de una muestra de agua contaminada (por ejemplo, un supuesto vertido industrial) con un oxidante enérgico, como es el dicromato potásico, en medio ácido con Ag^+ como catalizador y la determinación por colorimetría de la cantidad de dicromato de potasio consumida en este proceso.

Los compuestos orgánicos oxidables actúan reduciendo el dicromato, Cr (VI), a ion crómico Cr (III). La cantidad de dicromato consumido proporciona una medida de la concentración de contaminantes en el agua.

La utilización de la colorimetría (absorción visible-ultravioleta) para la determinación de la DQO en esta práctica se basa en los diferentes espectros de absorción del Cr (VI) (de color naranja, absorbe en longitudes de onda en torno a 440 nm) y el Cr (III) (de color verde, absorbe en torno a 600 nm), por lo que ambas especies se pueden detectar independientemente.

Se realiza la calibración de la técnica con disoluciones patrón de Ftalato potásico (sustancia orgánica reductora), cuya DQO es bien conocida.

La reacción de oxidación del ftalato es:



Por lo que una disolución de 850 mg/L de ftalato ácido de potasio requiere 1000 mg/L de O_2 para su oxidación (esto es, **la DQO de 850 mg/L de ftalato es de 1000 mg/L**)

Concentración de solución del patrón para determinada DQO:

$$\left[\text{Concentración patrón} \frac{mg}{L} \right] = \frac{DQO \left(\frac{mg O_2}{L} \right) * 204.22}{7.5 * 32} \text{ Ecuación 5}$$

El volumen para tomar de la solución madre para determinada concentración

$$V (mL) = \frac{\left[\text{Concentración patrón} \frac{mg}{L} \right] * V_{aforar} (mL)}{\left[\text{Concentración solución madre} \frac{mg}{L} \right]} \text{ Ecuación 6}$$

4.3 Tratamiento de aguas residuales

La serie de procesos químicos, físicos y biológicos que se le suministra al agua residual y que al procesarse logra eliminar todos los contaminantes que son desprendidos por el uso diario de las personas y las industrias son denominados tratamientos de agua residual (Kemmer, 1987).

Las aguas residuales se clasifican en domésticas y no domésticas. Las domésticas son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a: descarga de los retretes y servicios sanitarios, descarga de los sistemas de aseo personal, áreas de cocina y pocetas de lavado de elementos de aseo. Mientras que las no domésticas son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicio distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

El proceso de tratamiento incluye sistemas preliminares, primarios, secundarios y terciarios o avanzados.

En la etapa preliminar se remueven los sólidos flotantes de gran tamaño, la arena y la grasa presente en aguas negras. Con esta etapa agentes indeseables son eliminados mediante procesos de cribado, trampas de separación de grasas y aceites, pre-aireación entre otros.

En la etapa primaria se busca la eliminación de los sólidos en suspensión mediante coagulación, floculación y sedimentación.

En la etapa secundaria los objetivos principales es eliminar la materia orgánica en estado coloidal y en disolución a través de procesos de oxidación, se tienen procesos anaerobios y aerobios.

Finalmente, la etapa terciaria del tratamiento de aguas residuales contempla procesos de eliminación de agentes patógenos para aumentar estándares requeridos en la calidad del agua para ser descargada en mares, ríos, lagos y demás cuencas hidrográficas.

Las etapas del proceso contemplan las siguientes operaciones unitarias:

4.3.1 Oxidación de aguas residuales:

La Oxidación es definida como la transferencia de uno o más electrones desde un agente reductor a un agente oxidante. En los procesos de oxidación con aire de materia orgánica, este es distribuido mediante difusores de membrana en el fondo del tanque actuando como agente oxidante y a su vez con la agitación facilita la mezcla de agua y sosa para regulación del pH. Los productos finales de la oxidación completa son el dióxido de carbono y agua. (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997), (Calgon AOT Handbook, 1996).

Los Tratamientos avanzados no hacen parte de los procesos convencionales, en estos tratamientos podemos incluir los POAs. Los Procesos de Oxidación Avanzada son aprovechados para el tratamiento de aguas residuales domésticas e Industriales cuando no son efectivos los tratamientos convencionales o como complemento de estos para tratar a contaminantes orgánicos más complejos que no han podido ser removidos; como son por ejemplo los contaminantes emergentes recalcitrantes como fármacos, aditivos de la industria textil, cosmética, los plastificantes, etc. Entre los Tratamientos de Oxidación Avanzada podemos incluir a la ozonización (O₃), la ozonización en combinación con peróxido de hidrógeno o agua oxigenada (O₃/H₂O₂), la irradiación ultravioleta (UV), la irradiación ultravioleta con ozono (UV/O₃), la irradiación

ultravioleta con agua oxigenada (UV/H₂O₂), la irradiación ultravioleta con ozono y agua oxigenada (O₃/UV/H₂O₂), la cavitación hidrodinámica y acústica, los procesos Fenton (Fe²⁺/H₂O₂), el foto-Fenton, la oxidación electroquímica, la fotocatalisis, etc. (Pinos, 2018).

Los Procesos de Oxidación Avanzada tienen como ventajas la transformación química de los contaminantes, en la mayoría de los casos, sin la generación de lodos; la efectividad en la eliminación de contaminantes orgánicos complejos refractarios que no son removidos con los tratamientos convencionales; la mejora de las características organolépticas del agua tratada; la posibilidad de tratar contaminantes que se encuentran en muy baja concentración; el aumento de la biodegradabilidad de los contaminantes que quedan en las aguas pudiendo ser tratadas con procesos biológicos convencionales; algunos de los procesos aportan en la desinfección microbiológica del agua.

4.3.2 Coagulación:

La coagulación desestabiliza los coloides eliminando las dobles capas eléctricas que rodean las partículas, dando lugar a la formación de pequeños núcleos. Esta desestabilización se consigue añadiendo un coagulante que neutraliza las cargas eléctricas de la superficie que mantienen separadas a las partículas (García Taravilla & Martí, 2017, pp 112-113). Algunos de los coagulantes utilizados son el cloruro férrico (FeCl₃), el sulfato de aluminio (sulfato de alúmina) [Al₂(SO₄)₃], sulfato férrico [Fe₂(SO₄)₃] o sulfato ferroso (FeSO₄) (Kemmer, 1987). Factores que influyen en la coagulación son los tiempos de retención, la temperatura, la dosificación del coagulante y el pH (Cardenas Andía, 2000).

4.3.3 Floculación:

La floculación consiste en la aglomeración de las partículas desestabilizadas formando grumos y flóculos cada vez mayores, que al pesar más hacen posible la sedimentación. Una forma de conseguir la floculación es mediante agitación, lenta y uniforme, que permite que las partículas se junten de forma mecánica. Sin embargo, para acelerar este proceso, normalmente se recurre a floculantes químicos (García Taravilla & Martí, 2017, pp 112-113). Algunos polímeros aniónicos

usados comúnmente son polielectrolitos como la poliacrilamida y la poliacrilamida hidrolizada (Kemmer, 1987).

En el caso de la floculación deben evaluarse factores como el tiempo de retención, gradiente de velocidad y la concentración y naturaleza de las partículas (Cardenas Andía, 2000).

4.3.4 Sedimentación:

Se entiende por sedimentación a aquellos fenómenos mediante los cuales los sólidos en suspensión en un fluido son separados del mismo, debido al efecto de la gravedad (García Taravilla & Martí, 2017, pp 112-113). En un sentido más amplio el termino sedimentación comprende un grupo de acciones diferentes según el tipo y concentración de solidos o partículas en suspensión. Una forma de maximizar el área de decantación reduciendo el tamaño del sedimentador y en consecuencia su coste es utilizando varias placas paralelas. De esta forma se consigue dividir la alimentación de entrada en el equipo en varias secciones paralelas donde sedimentan los sólidos. El resultado de esta división en secciones paralelas es que el área de sedimentación es igual a la suma del área de las placas. Para conseguir evacuar los sólidos las placas, se inclinan con un ángulo de unos 55° (García Taravilla & Martí, 2017, pp 112-113).

4.3.5 Test de jarras:

La coagulación química y la dosificación apropiada de reactivos deben ser seleccionadas por la simulación del paso de la clarificación en un laboratorio a escala. La prueba de jarras es la que mejor simula la química de la clarificación y la operación llevada a cabo. Un arreglo simple de vasos de precipitado y paletas permite comparar varias combinaciones químicas las cuales están sujetas a condiciones hidráulicas similares (Comunidad Andina, 2005).

Para que el dosificador descargue las cantidades optimas, es necesario saber qué cantidad se descarga en unidad de tiempo (García Taravilla & Martí, 2017, pp 112-113).

4.3.6 Neutralización:

Las aguas residuales deben neutralizarse para ajustar su valor de pH. Solo mediante este proceso podrán cumplir los requisitos de las distintas unidades de proceso que conforman los sistemas de tratamiento de aguas residuales (Ramalho, 2003)

El control de pH se hace mediante control retroalimentado manipulando la dosificación del químico se ácido o básico (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997).

4.4 Normatividad de vertimientos (*Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015*)

El vertimiento de residuos líquidos para la central termoeléctrica está reglamentado por la resolución 0631 de 2015, la cual fija los valores límites y parámetros permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público; La Resolución 0631 de 2015 en el capítulo 5, artículo 14, define los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas y aguas residuales no domésticas a cuerpos de aguas superficiales para unidades de generación eléctrica.

Los límites permisibles se muestran en la **Tabla 2.** a continuación:

Tabla 2.

Límites permisibles de parámetros de agua residual según la resolución 0631 de 2015.

Parámetro	Unidad	Valor límite (Resolución 0631 de 2015)
Temperatura	°C	40
pH	Unidades de pH	6-9
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200
Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)	mg/L O ₂	150
Sólidos suspendidos totales	mg/L	5
Grasas y aceites	mg/L	20
Fenoles	mg/L	0.2
Cloruros	mg/L	250
Sulfatos	mg/L	250

5 Metodología

5.1 Fases del proyecto

El desarrollo del proyecto se dividió en tres fases:

Fase I: En esta fase se recogió los datos iniciales con los que se iba a realizar el proyecto, consistió en la evaluación de los procesos y la condición preliminar de la planta, sus condiciones de servicio, las características del caudal de entrada, el chequeo de equipos y la reposición de equipos que estaban obsoletos o que hacían falta en la planta.

Fase II: Una vez se hizo la reposición de equipos, mediante el análisis de los datos recogidos se realizó un diagnóstico general de la planta, determinando los puntos fuertes y débiles en la operación de esta para puesta en marcha. Por otra parte, se evaluaron metodologías para la medición de los parámetros establecidos con el fin de lograr el seguimiento de la remoción en carga y calcular la eficiencia del sistema basado en la demanda química de oxígeno, grasas y aceites, pH, temperatura y cantidad de sólidos suspendidos.

Fase III: Establecidas las fases de la operación de la planta que se iban a intervenir para la optimización, se propuso los nuevos procesos a realizar en la planta, las variaciones en las condiciones de operación actuales, así como modificaciones en proceso, periodos de limpieza para las mismas estructuras con el fin de evitar acumulación de materiales que retarden la operación de la planta estudiando tiempos de residencia, dosificación de químicos y cambios que permitan mejorar la eficiencia de los equipos en el tratamiento de las aguas residuales industriales. Esta fase entregó como resultado el funcionamiento en semiautomático de la planta con metodologías establecidas para el monitoreo y las nuevas condiciones óptimas en el funcionamiento de la misma.

5.2 Metodologías de monitoreo para agua residual industrial

Con el propósito de garantizar la calidad del agua residual industrial y doméstica en parámetros fisicoquímicos, de los diferentes sistemas de tratamiento de agua y debido al control ambiental existente que regula el vertimiento sobre aguas superficiales, se requiere realizar un

tratamiento previo, para conseguir mantener los parámetros en los niveles permitidos y así cumplir con la reglamentación bajo la resolución 0631 de 2015.

Por tal motivo, fue necesario llevar un control de las cargas contaminantes a la entrada y salida de las plantas de tratamiento residual, a través de la implementación de metodologías de análisis para aguas residuales basadas en el standard methods, que permitieron tomar decisiones y ajustes a los sistemas de tratamiento. Entre ellas la medición de la demanda química de oxígeno que indica la carga orgánica total en el agua residual, la DQO es uno de los parámetros más importantes en el análisis de aguas residuales. Entre otras cosas, los valores de DQO se usan para la supervisión de la capacidad de purificación de las depuradoras.

Las otras metodologías implementadas fueron sólidos suspendidos, grasas y aceites con las cuales se busca determinar la eficiencia de remoción de los separadores API y el sistema de clarificación.

5.3 Método de ensayo para determinación de la demanda química de oxígeno (Empresas Públicas de Medellín, 2020)

Los materiales, equipos y reactivos usados fueron los siguientes:

Materiales

Equipos:

- Reactor para microDQO.
- Espectrofotómetro.

Vidriería:

- Viales.
- Pipetas graduadas de 2 mL, 5 mL y 10 mL
- Pipetas volumétricas.

Reactivos:

- Soluciones patrón de dicromato de potasio 1000 mg/L O₂, 5000 mg/L de O₂
- Reactivo de dicromato de potasio, sulfato de plata y ácido sulfúrico.

El procedimiento realizado fue el siguiente:

Preparación y digestión de las muestras.

- Se homogenizó la muestra.
- Luego se precalentó el reactor aproximadamente a $150 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Se adicionó 2 mL de muestra en los viales que contienen el reactivo para determinación de DQO. Posterior se mezcló por inversión.
- Se colocó los viales en digestión durante 2 horas.
- Se dejó enfriar hasta temperatura de 40°C en el termorreactor.
- Se colocaron los viales en la gradilla y se dejó enfriar lentamente a temperatura ambiente para evitar la formación de precipitados.

Lecturas de las muestras

La muestra se leyó en el espectrofotómetro a 600 nm, la absorbancia para cada blanco muestra y estándar, después de haber hecho cero en el equipo se obtuvo la concentración de DQO en mg/L O₂.

5.4 Método de ensayo para determinación de grasas y aceites. (Empresas públicas de Medellín, 2020)

Para el ensayo se hizo uso de los siguientes materiales, reactivos y equipos.

Materiales**Equipos:**

- Balanza analítica.
- Desecador.
- Campana extractora.
- Estufa.

Vidriería:

- Embudo de separación de 250 mL graduado.
- Embudo de vidrio.
- Papel filtro.

- Matraz o Erlenmeyer.
- Varilla de agitación.
- Erlenmeyer.

Reactivos:

- Hexano para análisis químicos: punto de ebullición 69°C.
- Sulfato de sodio anhidro.

El procedimiento fue el siguiente:

- Antes de iniciar el ensayo se lavó los materiales de vidrio, secado en horno a 105°C y desecado hasta peso constante. Se pesó el Erlenmeyer donde se agregó el hexano con las grasas y aceites extraídas.
- El recipiente de la muestra se encuentra aforado hasta 200 mL para el muestreo.
- **Extracción:** Se trasvasó la muestra al embudo de separación y se adicionó 30 mL de hexano. Se agitó vigorosamente el embudo de separación por 2 min aproximadamente.
- Durante la agitación se liberó constantemente la presión dentro del embudo, esto se hizo abriendo la llave, ya que al agitar un disolvente volátil aumenta su presión de vapor, lo cual genera una sobrepresión en el embudo y puede provocar que el tapón se libere bruscamente perdiendo muestra.
- Se dejó reposar para la separación de las fases. Luego se hizo la separación de la fase acuosa en el mismo recipiente donde se tomó la muestra, y la fase orgánica en un beaker aparte.
- Se repitió los pasos anteriores hasta hacer mínimo tres extracciones según la apariencia de la muestra
- Si hay formación de emulsión, en el beaker donde se adicionó la fase orgánica se agregaba 10 g de sulfato de sodio anhidro y se hacía agitación con varilla de vidrio para romper la emulsión.
- En papel filtro humedecido con hexano se adicionó más sulfato de anhidro y se drenó la muestra.

- En estufa se evaporó el solvente en campana de extracción a una temperatura cercana a 105°C, una vez evaporado se llevó al desecador y se dejó enfriar hasta peso constante.
- Se pesó el residuo seco.

Para el reporte de datos, se calculó las grasas y aceites con la siguiente ecuación:

$$GYA, \frac{mg}{L} = \frac{(P_f - P_i)}{V} \text{ Ecuación 7}$$

Donde:

P_f: peso final del matraz de extracción (mg).

P_i: peso inicial del matraz de extracción (mg).

V: volumen de la muestra en Litros.

5.5 Método de ensayo para determinación de sólidos suspendidos (Empresas públicas de Medellín, 2020)

Los materiales utilizados para esta metodología fueron:

Materiales

Equipos:

- Estufa.
- Balanza analítica.
- Bomba de vacío.
- Mufla para trabajar a 550°C.

Vidriería:

- Crisoles.
- Probetas graduadas 50 mL, 100 mL, 1000 mL.
- Sistema de filtración en polisulfona que consta de matraz con desprendimiento lateral, embudo, sostenedor de papel filtro y pinza.
- Desecador.
- Discos de fibra de vidrio Whatman GF/C (1.2 μm) o equivalente.

El procedimiento fue el siguiente:

- Preparación del filtro de fibra de vidrio: se ubicó el filtro con el lado rugoso hacia arriba en el equipo de filtración, se aplicó vacío e hizo tres lavados sucesivos con porciones de 20 mL de agua destilada, se pasó completamente el agua por el filtro y se retiró del equipo de filtración.
- Se llevó a Estufa a 105 °C por un tiempo mínimo de una hora y máximo de dos horas.
- Se sacó el filtro del horno y llevo a desecador por un tiempo mínimo de una hora y máximo de dos horas. Si por algún motivo el filtro se dejaba en el desecador un tiempo mayor al tiempo máximo permitido, se llevaba nuevamente al horno y se dejaba a temperatura de análisis durante una hora y luego se enfriaba nuevamente en desecador dentro del tiempo establecido.
- Se colocó el disco de fibra de vidrio previamente tratado y pesado en el porta filtro del sistema de filtración, se filtró aproximadamente 20 mL de agua destilada para humedecer el filtro. Se filtró 100 mL de muestra para obtener un residuo de muestra entre 2.5 y 200mg, se enjuagó tres veces el embudo con agua destilada para arrastrar los residuos de las paredes. Se continuó con la filtración durante tres minutos más.
- Se retiró el filtro y se secó en estufa a 103°-105°C por un tiempo mínimo de dos horas en el crisol.
- Se enfrió en el desecador por un tiempo mínimo de una hora y máximo de dos horas si por algún motivo el filtro se deja en el desecador un tiempo mayor al tiempo máximo permitido, se llevaba nuevamente al horno y se enfriaba nuevamente en desecador dentro del tiempo establecido.
- Se sacó los filtros del desecador y se pesó inmediatamente.

Para el reporte de datos la concentración de sólidos suspendidos se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Sólidos suspendidos totales } \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A-B)*1000*1000}{\text{Volumen de muestra mL}} \text{ Ecuación 8}$$

Donde:

A: (peso del residuo seco + peso de la capsula) (g).

B: peso de la capsula (g).

5.6 Metodología para la calibración del método de determinación química de oxígeno

Los materiales, equipos y reactivos utilizados para la metodología fueron los siguientes:

Aparatos y material

Equipos:

- Termorreactor.
- 1 gradilla para tubos de ensayo
- Espectrofotómetro UV-visible
- 7 matraces aforados de 100 mL
- 2 vasos de precipitados de 50mL
- Pipetas graduadas.

Reactivos:

- Disolución patrón de Ftalato ácido de potasio, 850 mg/L.
- Kit de reactivo para determinación de DQO: ácido sulfúrico 80–98 %, dicromato potásico 0,38–1,26 % y sulfato de mercurio (II) 0,74 –1,50 %. La solución neutra “NULL” contiene ácido sulfúrico 51–65 %.

El procedimiento experimental fue el siguiente:

Antes de comenzar se preparó las disoluciones de los distintos reactivos, asegurándose que la placa calefactora estuviera encendida y ajustada la temperatura a 150°C.

Preparación de disoluciones patrón y muestras problema

- Se pesó 0.42511 g del ftalato ácido de potasio previamente triturado y secado a 110°C (hasta peso constante) y se disolvió en agua destilada diluyendo a 500 mL en matraz aforado.
- Se rotuló claramente los 7 matraces de 100 mL.
- Luego se añadió los siguientes volúmenes de patrón de ftalato ácido de potasio (850 mg/L):

Matraz 1: 0 mL; Matraz 2: 5 mL; Matraz 3: 10 mL, Matraz 4: 20 mL; Matraz 5: 40 mL; Matraz 6: 60 mL; Matraz 7: 100 mL.

- Finalmente se aforó cada matraz hasta 100 mL. Agitar muy bien.

Adición de oxidante

- Se rotuló claramente 7 test de reactivo para DQO.
- Para la adición se abrió el tubo de test, manteniéndolo inclinado, se cubrió lentamente el contenido con 2.0 mL de solución de muestra de cada matraz (sin mezclarlo).
- Se enroscó fuertemente el tapón del tubo de test, sujetando el tubo por el tapón de rosca, se agitó (se debe tener precaución, el tubo se calienta / la solución está turbia hasta que se calienta) y luego se colocó en el calefactor.
- Al cabo de 2 h se sacó los tubos de test del bloque calefactor, se agitó otra vez transcurridos unos 10 min (todavía caliente) y se dejó enfriar a temperatura ambiente. Se Limpió el tubo de test por el exterior y se procedió hacer la medición.

Lecturas de absorbancia.

- En el espectrofotómetro, se midió el espectro de absorción UV-visible en el intervalo 605-620 nm (600nm) de las muestras patrón de ftalato. Se utilizó agua destilada no digerida como cubeta de referencia del aparato (Agua más reactivos).
- Posteriormente se construyó la recta de calibrado representando ($A_{\text{patrones}} - A_{\text{blanco}}$) frente a la DQO de los patrones utilizados. A_{blanco} es la absorbancia del matraz 1 (el blanco, sin materia orgánica), que no se incluyó en la gráfica.
- Con la recta se hizo el ajuste a una curva lineal, obteniendo pendiente, intercepto y coeficiente de regresión.
- Se montó el programa en el espectrofotómetro de acuerdo a los parámetros solicitados por el equipo.

5.7 Metodologías espectrofotometría UV-Visible (HACH, 2000)

5.7.1 Sulfatos

Los materiales, equipos y reactivos utilizados para la metodología fueron los siguientes:

Aparatos y material

Equipos:

- Espectrofotómetro

Reactivos:

- Bolsas de polvo de reactivo de sulfato Sulfafer 4.

Vidriería

- Celdas de muestra 10 mL

Procedimiento

- Se lleno una celda de 10 mL con agua de la muestra.
- Posterior se adicionó el contenido del sobre de reactivo agitando en forma de remolino hasta dilución completa.
- Se dejo reaccionar por 5 minutos.
- Se lleno una segunda celda con 10 mL de agua de la muestra. Esta fue el blanco.
- Se leyó el blanco y la muestra a 450 nm.

5.7.2 Color Aparente (HACH, 2000)

Los materiales, equipos y reactivos utilizados para la metodología fueron los siguientes:

Aparatos y material

Equipos:

- Espectrofotómetro

Vidriería

- Celdas de muestra 10 mL

Procedimiento

- Se lleno una celda de 10 mL con agua de la muestra.
- Se lleno una segunda celda con 10 mL de agua desionizada. Esta fue el blanco.
- Se leyó el blanco y la muestra a 465 nm.

5.7.3 Metodología para medición de turbiedad (HACH, 2000)

Los materiales, equipos y reactivos utilizados para la metodología fueron los siguientes:

Aparatos y material**Equipos:**

- Turbidímetro portátil modelo 2100 P

Vidriería

- Cubetas de muestra con tapa.

Procedimiento

Para el procedimiento se agitó la cubeta con 10 mL de la muestra, posteriormente se colocó en el equipo se cerró la tapa y se hizo la medición de turbidez. El equipo entrega los resultados en unidades nefelométricas de turbidez.

5.8 Metodología para la calibración del método determinación de sólidos suspendidos**Equipos:**

- Balanza analítica.

Reactivos:

- Celite 545.

Vidriería:

- Matraz aforado de 250 mL, 500 mL y 1 L

El procedimiento aplicado fue el siguiente:

Se pesó 0.02532 g de Celite 545 y 0.02511 g de replicado y se disolvió en 250 mL de agua desionizada ambas muestras. Se Agitó durante 15 minutos para lograr mezcla completa.

Una vez preparado el patrón se hizo el procedimiento de determinación de sólidos suspendidos para validar la metodología y precisión del analista.

5.9 Metodología para la calibración del método de determinación de grasas y aceites**Reactivos:**

- Acetona grado reactivo.
- Ácido Esteárico grado reactivo.
- n-hexadecano para análisis.

Equipos:

- Balanza analítica.

Vidriería:

- Matraz aforado de 100 mL.
- Mortero.
- Pipeta aforada 10 mL

El procedimiento aplicado fue el siguiente:

Se disolvió 0.20014 g de ácido esteárico previamente macerado y 0.20782 g de hexadecano en 50 mL de acetona grado reactivo. Para lograr una dilución completa se fue agregando poco a poco los solutos.

Esta solución fue utilizada como patrón de control en el análisis de grasas. Para validar la concentración del estándar de 4000 mg/L se tomó 10 mL del estándar con pipeta aforada, y se adicionó a un beaker limpio, seco y previamente pesado, el estándar se dejó evaporar hasta

sequedad. Se pesó el residuo y finalmente se calculó la concentración la cual deber ser 40 ± 1 mg. Cuando no se cumple la condición anterior, debe prepararse nuevamente el estándar.

5.10 Test de Jarras para la determinación de la dosis óptima (Central termoeléctrica La sierra EPM, 2018)

Para determinar la dosificación de coagulante y floculante en el proceso de clarificación del agua residual industrial, se realizó una prueba de jarras que consiste en un arreglo simple de vasos de precipitado y paletas que permite comparar varias combinaciones químicas, las cuales están sujetas a condiciones hidráulicas similares. Esta prueba se realiza con el fin de determinar la concentración optima de coagulante y floculante para obtener un floc con las mejores condiciones.

Aparatos y materiales

Equipos:

- Test de jarras.

Vidriería:

- Gotero.
- Vasos precipitados de 50 mL y 100 mL.
- Matraz aforado de 1000 mL.

Reactivos:

- Clarisol 3176 (Policloruro de aluminio) 19%
- Sedisol 3220 (polielectrolito catiónico)

Para esto se hizo el siguiente procedimiento:

- Preparación de la solución madre:
- **Coagulante:**

Se pesó en la balanza analítica 10.0012 g de policloruro de aluminio +/- 19% y se aforó a 1000 mL en un balón volumétrico, de esta manera la concentración de la solución es la siguiente:

$$\frac{10000 \text{ mg}}{1 \text{ L}} = 10000 \text{ ppm} = 1\%$$

Por cada mililitro que se tome de la solución madre equivale a 10 ppm

- **Floculante:**

Se pesó en la balanza analítica 1.0025 g de polímero catiónico y se diluyó en 1000 mL de agua en balón volumétrico con calentamiento para completa dilución. El resultado fue el siguiente:

$$\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ L}} = 1000 \text{ ppm} = 0.1\%$$

Por cada mililitro que se tome de la solución madre equivale a 1 ppm.

- Se midió la turbiedad, pH, conductividad del agua cruda.
- Se conectó el equipo de jarras para comprobar funcionamiento.
- Con una probeta se adicionó 1 Litro de agua a la muestra en cada jarra.
- Inicialmente se programó mezcla rápida a 120 RPM y con 6 goteros se midió los volúmenes de la solución madre del coagulante según la concentración considerada para cada jarra.
- Se dejó mezclar durante 1 minuto. Seguidamente se agregó la dosis estima de floculante en cada jarra.
- Terminado el tiempo de mezcla rápida, se bajó la velocidad a una mezcla lenta de 35 rpm durante 15 minutos y observó el comportamiento de las jarras.
- Se retiró las paletas de las jarras y se dejó sedimentar los flóculos.
- Al finalizar se analizó turbiedad, color y pH final.

5.11 Metodología para el aforo de las bombas de dosificación:

Para la construcción de las curvas reales de aforo de las bombas de dosificación, se procedió a medir el caudal entregado con una probeta y midiendo el tiempo de llenado. Estas curvas se construyen con el objetivo de conocer el aforo real para ajustar la dosificación de químicos de acuerdo a la necesidad del proceso.

5.12 Medición en campo

En campo se contó con los equipos de muestreo necesarios para la medición de los parámetros tales como equipo multiparámetro, termómetro, cronómetro, entre otros; además se cuenta con baldes para la recolección de las muestras, elementos de protección personal e higiene para la toma de las muestras como guantes, que garantizan la adecuada realización del monitoreo. Las muestras tomadas en campo fueron llevadas al laboratorio para su análisis.

5.12.1 Multiparámetro

Se utilizó el multiparámetro digital HQ40D marca HACH de dos canales para las mediciones de calidad de agua; con este equipo se puede monitorear variables como: pH, temperatura del agua, conductividad y oxígeno disuelto. Para cada variable se tiene una sonda diferente, a excepción de la sonda de pH que permite conocer la temperatura del agua. Este equipo permite calibrar las sondas en campo, en condiciones propias de cada área.

6 Resultados y análisis

6.1 Descripción de la planta y equipos

6.1.1 Separador de grasas y aceites API (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997)

Consiste en un tanque metálico en cuyo interior va situado un módulo de placas onduladas construido en poliéster y fibra de vidrio. El tanque proporciona la superficie efectiva necesaria para que se produzca la separación del aceite presente en el agua por flotación natural como consecuencia de la diferencia de densidades entre el agua y el aceite.

El agua para tratar entra en el separador, a través de la tobera de entrada, a una primera cámara donde se tranquiliza el flujo y se decantan los posibles sólidos que puedan ser arrastrados. A continuación, pasa a través de la pantalla de distribución, cuya misión es la de proporcionar al fluido un régimen laminar, a la cámara de separación propiamente dicha, donde va situado el módulo de placas.

En esta cámara se produce la separación de las gotas de aceite, obligando al fluido a pasar por entre las placas del módulo, donde gracias a la superficie efectiva que presenta, y a fenómenos de coalescencia que se produce en la cresta de las ondulaciones, el aceite asciende en contracorriente hasta la superficie formando una capa superficial que es retirada mediante la desnatadora de que va provisto. Esta desnatadora se regula convenientemente con el fin de ajustar su nivel de recogida, según el espesor de la capa formada. A continuación, el agua pasa a una tercera cámara, donde existe una desnatadora, cuya misión es la de retirar el aceite que haya podido ser arrastrado a través del módulo.

De aquí el agua libre de aceites se evacua a la cámara de salida mediante un vertedero tubular con cabezal regulable mediante rosca, cuyo objetivo es mantener el nivel del líquido dentro del separador y ajustarlo en concordancia con las desnatadoras, con el fin de que la capa de aceites sea convenientemente retirada.

El diseño del separador de grasas y aceites parte de las siguientes premisas:

- Caudal de tratamiento: 7 m³/h
- Densidad de aceite: 0.85-0.95 g/cm³
- Concentración media de aceite: 174 ppm
- Sólidos en suspensión: 1000 ppm

- Concentración de aceite a la salida 10-15 ppm
- Concentración de sólidos a la salida: 10 ppm Max: 50 ppm

Actualmente la planta cuenta con tres separadores: descarga de ciclo simple, descarga de ciclo combinado y un separador ubicado en la zona de fuel oil.

Las eficiencias de remoción reportadas en el diseño son: 90% grasas y 95% sólidos suspendidos.

Se evaluó la eficiencia de remoción del separador API para sólidos suspendidos, grasas y aceites y DQO. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3.

Evaluación de eficiencias de remoción para el separador API.

Parámetro	Entrada	Salida	Eficiencia remoción
DQO (mg O₂/L)	1592.4	101.9	94%
Sólidos suspendidos (mg/L)	351.7	87.4	75.14%
Grasas y Aceites (mg/L)	11874.25	1235.25	89.59%

Según los resultados de la **Tabla 3**. Se puede concluir que el separador de grasas y aceites tiene una alta eficiencia de separación de los contaminantes medidos, sin embargo, el alto arrastre de grasas que llegan al foso de bombeo de aguas residuales tiene su origen en otras causas.

Se deduce también que los altos valores de demanda química se deben principalmente a metales reductores, grasas y aceites, pequeñas concentraciones de compuestos fenólicos, y materiales no biodegradables.

6.1.2 Foso de bombeo de aguas residuales

La planta de tratamiento de agua residual industrial (PTARI) cuenta con un pozo ubicado en el exterior, en el cual se hacen las descargas provenientes de diferentes puntos de la planta, y a partir del mismo se hace la alimentación a dicha planta. En la foto a continuación se puede observar dicho pozo:

Figura 1.

Foso de bombeo de aguas residuales.



Este pozo cuenta con dos bombas centrifugas sumergibles (1 en servicio + 1 en reserva), boya de nivel la cual, alcanzando un nivel muy bajo, actúa como interruptor parando las bombas y sirviendo de protección de funcionamiento en seco (vacío).

Las dimensiones de la balsa de recogida son: 6.20m x 3.90m x 3.90m con un volumen aproximado de 66 m³.

6.1.3 Drenajes

- **En el Área de almacenamiento de aceites combustibles**

En esta área se encuentra un separador de grasas y aceites el cual es alimentado de diferentes corrientes de drenaje en esta área y la trinchera. Una vez tratadas las corrientes, la salida del separador es enviada directamente al pozo de tratamiento de agua residual. Esta descarga se hace por el ducto mostrado en la siguiente imagen.

Figura 2.

Drenaje de 8" para separadores API fuel oil y ciclo simple.



- **En el edificio de turbina de la unidad 1**

Esta área está provista de un sumidero de recolección de drenajes que conecta directamente al separador de grasas y aceites ubicado en la unidad 1. A este sumidero llegan las siguientes corrientes:

- Drenajes de equipos en el área de transformadores con sumideros provistos de bombas sumergibles con capacidades de 20 gpm. (Transformadores principal y auxiliar Unidad 1, Transformador LCI). Esta descarga está contaminada con aceites dieléctricos que son utilizados para refrigerar los transformadores anteriores.
- Drenaje de equipos en el área de transformadores TST, sumideros que cuentan con bombas sumergibles para una capacidad de 20gpm. La descarga contiene el mismo componente del drenaje anterior.
- Drenaje de equipos receptores de aire.
- Drenaje de cada equipo de compresor de aire.
- Drenaje de equipo del generador con motor Diesel.
- Salida del tanque neutralizante que recibe corrientes de la sala de baterías provisto de sumidero con tapa y tuberías resistentes al ácido.
- Drenaje de pisos de unidad 1 y unidad 2.
- Drenaje de las turbinas de gas. Donde se lubrican los ejes que están en contacto con los cojinetes. Aguas contaminadas con aceites.

Todas estas corrientes descargan en el sumidero anterior y después son enviadas al separador de grasas y aceites. Otra corriente que es descargada en el separador es la que viene desde el piso de la bodega y el taller.

Estas corrientes tratadas unidas a la corriente de agua de lavado son enviadas directamente al pozo de agua residual por el ducto que se observa en la imagen a continuación:

Figura 3.

Drenaje de 8" para separadores API fuel oil y ciclo simple.



- **En el edificio de turbina de la unidad 2**

- Drenajes de equipos en el área de transformadores con sumideros provistos de bombas sumergibles con capacidades de 20 gpm. (Transformadores principal y auxiliar Unidad 1, Transformador LCI). Esta descarga está contaminada con aceites dieléctricos que son utilizados para refrigerar los transformadores anteriores.
- Drenaje de las turbinas de gas. Donde se lubrican los ejes que están en contacto con los cojinetes. Aguas contaminadas con aceites.

Esta área cuenta también cuenta con un sumidero que recibe las corrientes anteriores y las envía directamente al separador de aceites y grasas de la unidad 1.

- **Drenajes en la planta de tratamiento de agua residual y de servicio.**

- Drenaje de pisos.
- Descarga del tanque de oxidación.
- Descarga de retrolavado de filtros de antracita y carbón activado.
- Descarga de tanques.

La descarga se hace por el ducto observado en la siguiente imagen.

Figura 4.

Drenaje de planta residual industrial.



- **Drenaje del sistema de bombeo y agua contraincendios.**

La descarga se hace por el ducto observado en la siguiente imagen.

Figura 5.

Drenaje de sistemas de bombeo y contraincendios.



- **Drenaje de planta de tratamiento de agua desmineralizada.**
 - Drenaje de agua de retrolavados y regeneración de suavizadores.
 - Drenaje de lavados químicos.
 - Drenaje de clarificadores.

La descarga se hace por el ducto observado en la siguiente imagen:

Figura 6.

Drenaje de planta de agua desmineralizada demivapor.



- **Drenaje de tanque de separador proveniente de la Unidad 3**

Este efluente no estaba contemplado en el diseño inicial de la planta debido a que ciclo combinado fue implementado unos años después del arranque de la planta. Aquí se hace la descarga proveniente del tanque enterrado al lado del pozo que recibe los drenajes de la unidad 3 y que descarga mediante el ducto observado en la siguiente imagen.

Figura 7.

Drenaje de tanque separador de la unidad 3.



- **Drenaje de pluviales.**

Anteriormente las descargas de aguas pluviales se hacían en el pozo de agua residual. Actualmente, se hace en el humedal. El ducto que se encuentra tapado y se puede ver la siguiente imagen:

Figura 8.

Drenaje de aguas pluviales que se encuentra cerrado.



Adicionalmente, existe una descarga adicional observada en la siguiente imagen.

Figura 9.

Segundo drenaje de aguas pluviales.



Este pozo también cuenta con un ducto en caso de darse un rebose, este se encuentra ubicado en la siguiente imagen. En caso de que el nivel alcance este punto se descarga por un ducto que sale finalmente al río.

Figura 10.

Ducto de rebose en el foso de aguas residuales.



6.1.4 Tanque de oxidación Química

Las aguas residuales industriales contienen con frecuencia efluentes líquidos con compuestos orgánicos de elevada toxicidad y/o estabilidad química y/o baja biodegradabilidad, por ejemplo, los hidrocarburos clorados. La oxidación química es el proceso utilizado para la eliminación de estas sustancias, esta tiene lugar por etapas, con formación de productos intermedios. En caso de una oxidación completa de sustancias orgánicas, estas se transforman en los productos finales inorgánicos, agua y dióxido de carbono.

La oxidación es un proceso químico de tratamiento de flujos residuales industriales, por el cual, mediante una reacción entre reactivo y contaminante, se produce una transferencia electrónica, que origina un cambio sustancial en el comportamiento químico de ambos. Así, un elemento contaminante peligroso en un flujo residual, es transformado en un elemento no peligroso, como es el caso de ciertos compuestos nitrogenados, sulfurados o los cianurados (Consejería de Medio Ambiente, 2000).

El agua procedente del foso de aguas residuales se bombea a un tanque rectangular de 12 m³ fabricado en PFRV y abierto superiormente. En el fondo del tanque se encuentra situada una parrilla de difusores de membrana que proporciona el aire como agente oxidante, este actúa además agitando el agua y facilitando la mezcla agua-sosa, la cual se adiciona como agente corrector de pH. El pH debe ajustarse entre 9-10. El aire es inyectado mediante dos sopladores lobulares uno en línea y otro en stand by. Para la alimentación hacia el proceso de clarificación se cuenta con dos

bombas de husillo excéntrico que son adecuadas para fluidos con alta viscosidad y presencia de sólidos.

Se evaluó la eficiencia de remoción del tanque de oxidación para sólidos suspendidos, grasas y aceites y DQO. Esto se hizo con las condiciones iniciales de la planta. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4.

Evaluación de eficiencias de remoción para el tanque de oxidación química.

Parámetro	Entrada	Salida	Eficiencia remoción
DQO (mg/L O₂)	386.10	328.60	14.90%
Sólidos suspendidos (mg/L)	65.60	48.60	25.91%
Grasas y Aceites (mg/L)	64.75	55.25	14.67%

Según los resultados de la **Tabla 3.** y **Tabla 4.** se consiguió bajas eficiencias de remoción para los parámetros medidos, esto es causa principalmente de que los difusores de membrana se encuentran rotos, generándose burbujas gruesas que más que transferir el oxígeno necesario para la reacción de oxidación, agita y bombea el agua, además de que no hay ajuste de pH. Por estas razones y considerando las bajas eficiencias de remoción es necesario reponer las membranas para generar tamaños de burbuja más pequeños para de esta manera mejorar la difusión del aire generando zonas de alta concentración de oxígeno para las reacciones.

6.1.5 Difusores de membrana (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997)

El tanque de oxidación cuenta con 10 difusores de membrana que son los sistemas de aireación. Estos están compuestos por dos tubos de PVC conectados a una pieza en T. Alrededor de estos tubos se desarrolla una membrana de E.P.D.M que difunde el aire distribuido por su interior (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997).

La burbuja tiene un tamaño de 0.5-1 mm que asciende lentamente hasta la superficie.

El modelo tubular tiene una superficie efectiva grande que proporciona mayor transferencia de oxígeno y contribuye a una mayor permanencia de la burbuja en el agua a tratar. Algunas ventajas de usar estos sistemas son (BARMATEC, 2016):

- Tiene una muy buena eficiencia.
- Se necesita un menor número de difusores en comparación con los circulares.
- Las membranas se sustituyen fácilmente.
- El consumo de aire, en comparación con una parrilla de difusores circulares, es menor.

Una vez reemplazados los difusores se evaluó la eficiencia de remoción del tanque de oxidación para sólidos suspendidos, grasas y aceites y DQO, con ajuste de pH entre 9 y 10. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 5.

Evaluación de eficiencias de remoción para el tanque de oxidación química con los difusores repuestos.

Parámetro	Entrada	Salida	Eficiencia remoción
DQO (mg/L O₂)	570.6	193.3	66.12%
Sólidos suspendidos (mg/L)	277.5	63.3	77.19%
Grasas y Aceites (mg/L)	889.4	28	96.85%

Tomando como referencia la **Tabla 4.** en comparación con lo obtenido en la tabla anterior, las eficiencias de remoción tuvieron un aumento considerable. Esto demuestra que la reposición y la mejora de los difusores de aire, mejoró la cantidad de oxígeno disponible para la oxidación de materia orgánica e inorgánica, asimismo de que el ajuste de pH garantiza las condiciones para las mismas reacciones. También se observa una alta remoción de grasas y aceites que posiblemente se hayan saponificado con la soda caustica.

6.1.6 Decantador Lamelar (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997)

Consiste en un tanque metálico en cuyo interior va situado un módulo de placas onduladas construido en poliéster y fibra de vidrio. Su función es la de proporcionar la superficie efectiva necesaria para que se produzca la decantación de los sólidos en suspensión presentes en el agua, como consecuencia de la diferencia de densidades entre el agua y los sólidos.

Para el diseño se consideraron las siguientes premisas:

- Diferencia de densidad sólidos-agua $\geq 0.1 \text{ g/cm}^3$.
- Tamaño de las partículas a separar $\geq 60 \text{ }\mu\text{m}$.
- Velocidad de decantación $\geq 0.7 \text{ m/h}$.
- Inclinación de lamelas 55° .
- Separación entre lamelas: 50 mm.
- Superficie de decantación: 10 m^2 equivalentes.

El agua para tratar entra en el decantador, a través de la tobera de entrada, a una primera cámara donde se produce la decantación de los sólidos de mayor tamaño. A continuación, pasa a la cámara de decantación propiamente dicha, donde está situado el módulo de placas.

En esta cámara se produce la sedimentación de las partículas sólidas, obligando al fluido a pasar por entre las placas del módulo en sentido ascendente, donde gracias a la superficie efectiva que presenta, y a fenómenos de coalescencia que se producen en los senos de las ondulaciones, los sólidos descienden en contracorriente hasta depositarse en la tolva de fondo, de donde son retirados periódicamente a criterio del operario.

El agua libre de sólidos en suspensión se evacúa del separador a través de una cámara de salida provista de un vertedero regulable. Opcionalmente el separador podrá ir provisto de un desnatador superficial regulable, con el fin de poder retirar convenientemente la posible capa de flotantes que pueda formarse por la presencia en el agua de aceites o grasas de menor densidad. Este desnatador se regula convenientemente con el fin de ajustar su nivel de recogida, según el espesor de la capa de aceite formada.

Se determinó la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos para el proceso de clarificación de la planta, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 6.

Evaluación de eficiencias de remoción para el sedimentador lamelar.

Parámetro	Entrada	Salida	Eficiencia remoción
DQO (mg/L O₂)	328.60	88.60	73.0%
Sólidos suspendidos (mg/L)	48.60	3.90	91.98%
Grasas y aceites (mg/L)	64.75	8.50	86.87%

Conforme a los resultados de la tabla anterior, se observan altos porcentajes de remoción, esto permite concluir que el tren de clarificación si cumple efectivamente la depuración de los sólidos suspendidos, las grasas, los aceites y la materia orgánica presente en el agua de alimentación. De tal manera que el área efectiva de sedimentación es adecuada para lograr la decantación de los flocs formados durante la coagulación y floculación. Esto también permite concluir que no deben hacerse modificaciones al tren de clarificación.

6.1.7 Proceso de clarificación

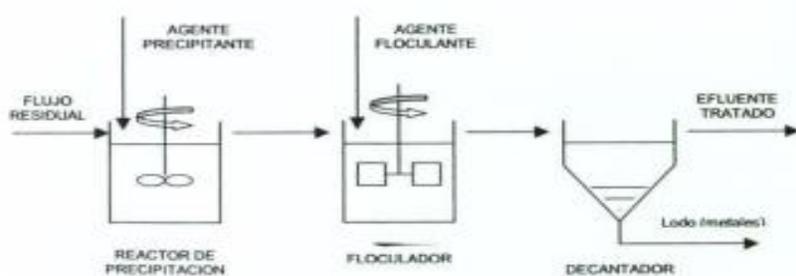
Por clarificación se entiende al proceso de formación, por acción de los reactivos apropiados, de compuestos insolubles de aquellos elementos contaminantes que, interviniendo en la composición de un flujo residual líquido, se pretendan eliminar del mismo (Consejería de Medio Ambiente, 2000).

La clarificación consiste en la eliminación de todo tipo de partículas, sedimentos, aceites y materia orgánica del agua. La técnica de clarificación es ampliamente utilizada en la remoción de turbiedad y color del agua e implica la utilización de coagulantes o polielectrolitos. Estos provocan que las finas partículas que determinan la turbiedad se agrupen, formando flóculos cuya precipitación y remoción son mucho más simple (ACOUA Tecnología, s.f.)

El proceso de clarificación en la planta se hace en tres etapas separadas: coagulación, floculación y sedimentación (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997). La imagen a continuación muestra el proceso de clarificación.

Figura 11.

Diagrama del proceso de clarificación de agua residual. (Consejería de Medio Ambiente, 2000).



Nota. Adaptado de Técnicas de prevención de la generación de suelos contaminados tomo I La gestión de los residuos peligrosos (p. 120), Consejería de Medio ambiente, 2000, Comunidad Europea.

6.1.8 Dosificación de químicos

▪ Soda cáustica

El hidróxido de sodio se dosifica al tanque de oxidación para regular el pH al objeto de que la reacción de oxidación sea efectiva. Por ejemplo, la velocidad de degradación de fenoles es el doble si el pH pasa de 8 a 11, y para compuestos cianurados, las reacciones son instantáneas para condiciones de pH por encima de 12 (Consejería de Medio Ambiente, 2000).

El tanque donde se prepara este químico tiene una capacidad de 1000 L, no cuenta con un agitador pues el producto no es diluido, sino que se adiciona con la concentración comercial, dos bombas dosificadoras de diafragma marca Milton Roy.

Tabla 7.

Propiedades fisicoquímicas de la soda caustica.

Concentración	50%
Densidad aproximada	1.53 kg/L
Contenido en Sosa	763 g/L

Para determinar la dosificación de este reactivo se hizo un test de jarras variando la cantidad de soda en cada vaso de precipitado de 1 L, además se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- 24 gotas del gotero es 1 mL.
- Caudal a tratar 7 m³/h
- Según las especificaciones de la soda caustica es al 50% con una densidad de 1.53 kg/L

$$ppm NaOH = \frac{1530 \text{ g producto}}{L} * \frac{1000mg}{1g} = 1530000 \text{ ppm Ecuación 9}$$

Es decir que por cada mL que se tome de la solución madre son 1530 ppm dosificados.

Prueba con Jarras

Tabla 8.

Resultados del ensayo de ajuste de pH con aguas residuales industriales.

pH	7.32	9.04	10	11.09	12	13
Volumen dosificado (mL)	0	0.041	0.125	0.33	1.45	<30mL
ppm	0	62.8	191.3	504.9	2218.5	<45900

Para el aforo de la bomba se determina con la siguiente ecuación

$$Aforo \left(\frac{mL}{min} \right) = \frac{flujo \text{ H}_2\text{O} \left(\frac{m^3}{h} \right) * Dosis \text{ óptima (ppm)} * 100}{concentración \text{ sln } \% \frac{v}{v} * \rho \left(\frac{g}{mL} \right) * 60} \text{ Ecuación 10}$$

Se reemplaza los datos en la anterior ecuación para cada dosis y se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 9.

Resultados de dosificación y aforo de la bomba de soda caustica.

Dosis (ppm)	Aforo (mL/min)
0	0.00
62.8	4.79
191.3	14.59
504.9	38.50
2218.5	169.17
<45900	3500.00

Ahora con el fin de determinar la dosis de soda cáustica óptima para que las reacciones de oxidación se lleven a cabo, se propuso variar el pH y medir la demanda química de oxígeno a la salida. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 10.

Resultados de ensayo de determinación química de oxígeno en función de las condiciones de pH en el tanque de oxidación.

pH	DQO out (mg/L O₂)
8.04	283.3
9.24	235.6
10.04	203.4
11.02	148.0
12.00	141.3

Según los resultados de la tabla anterior, se puede concluir que la tendencia de la DQO es a disminuir con aumentos de pH en el tanque de oxidación, sin embargo, aunque los valores de DQO en los ajustes de pH más alto mostraron ser los mejores, no es recomendable trabajar bajo estas condiciones ya que el coagulante pierde su efecto de neutralización de cargas según su pH de trabajo entre 5 y 9. La DQO obtenida entre los valores de pH 11 y 12, mejoran la condición para que las reacciones de oxidación tengan lugar en el proceso acelerando la cinética de oxidación de algunos contaminantes presentes en el agua (Consejería de Medio Ambiente, 2000).

Como conclusión de este ensayo, se fijó una dosificación de soda tal que el pH se mantenga entre el rango de 9-10, que mejore la remoción de contaminantes presentes de acuerdo con la determinación química obtenida, reaccione con las grasas remanentes del separador de grasas y aceites y no afecte las condiciones de trabajo para el coagulante en el proceso de clarificación en la remoción de materia orgánica.

Como recomendación para el proceso, debe ajustarse el pH deseado antes de poner en marcha la planta, según el ensayo para mantener el pH en un valor constante siempre que arranque la bomba de alimentación de agua del pozo debe mantenerse el stroke de la bomba en los siguientes valores:

Tabla 11.

Condiciones de dosificación en planta.

Stroke	pH
30	9
60	10
80	11

- **Policloruro de Aluminio**

Se usa como coagulante, es inorgánico a base de sal polimérica de policloruro de aluminio. Tiene bajo peso molecular. Presenta ventajas como fácil aplicación, rango de pH alto, bajas dosificaciones y es económico.

El tanque donde se prepara este químico tiene una capacidad de 1000 L, cuenta con un agitador de tipo hélice marina y dos bombas dosificadoras de diafragma marca Milton Roy.

Tabla 12.*Propiedades fisicoquímicas del policloruro de aluminio.*

Concentración	10%
Densidad aproximada	1.32 kg/L
pH	1.6

- **Polielectrolito catiónico**

Utilizado como floculante para mejorar la sedimentación de los sólidos coagulados, es un floculante catiónico en polvo recomendado para la sedimentación de sólidos suspendidos en unidades de tratamiento de agua. Igualmente, co-ayuda a la deshidratación de los lodos generados Cuéllar et al. (2016).

El tanque donde se prepara este químico tiene una capacidad de 1000 L, cuenta con un agitador de tipo hélice marina y dos bombas dosificadoras de diafragma marca Milton Roy.

Tabla 13.*Propiedades fisicoquímicas del floculante.*

Tipo	Catiónico
Densidad aproximada	1.01 kg/L
Preparación	Al 0.05 % de concentración

- **Ácido clorhídrico**

Para compensar el aumento del pH, se inyecta ácido clorhídrico en el agua tratada para neutralizar.

El tanque donde se prepara este químico tiene una capacidad de 1000 L, no cuenta con un agitador pues el producto no es diluido, sino que se adiciona con la concentración comercial, dos bombas dosificadoras de diafragma marca Milton Roy.

Tabla 14.*Propiedades fisicoquímicas del ácido clorhídrico.*

Concentración	32%
Densidad aproximada	1.16 kg/L
Contenido en ácido	371 g/L

Para la dosificación del químico, durante las pruebas de pH, se estableció arrancar el stroke de la bomba dosificadora con el mismo stroke establecido en la bomba de dosificación de hidróxido

de sodio. Mientras la operación sea en manual debe verificarse en el display del sensor que el pH si se mantenga entre el rango de 5-9 según la normatividad, en caso contrario disminuir o aumentar el stroke.

Para la aplicación del químico teniendo en cuenta las condiciones de almacenamiento y los vapores procedentes del ácido concentrado que pueden causar asfixia en lugares cerrados y corrosión en los techos, se tomó la determinación de diluir el producto para una concentración del 15-20 % en volumen, con lo cual se deben trabajar con caudales altos de dosificación manteniendo el stroke entre 60 y 70.

6.1.9 Diagrama del proceso y vistas de la planta en modelo 3D

En el siguiente diagrama P&ID se observan los equipos relacionados al flujo del producto del proceso de tratamiento de aguas residuales industriales y su instrumentación. Del mismo modo, se realizó un modelado de la planta en la herramienta SketchUp donde se observan las principales vistas del proceso.

Figura 13.

Vista del proceso de clarificación de la planta residual industrial.

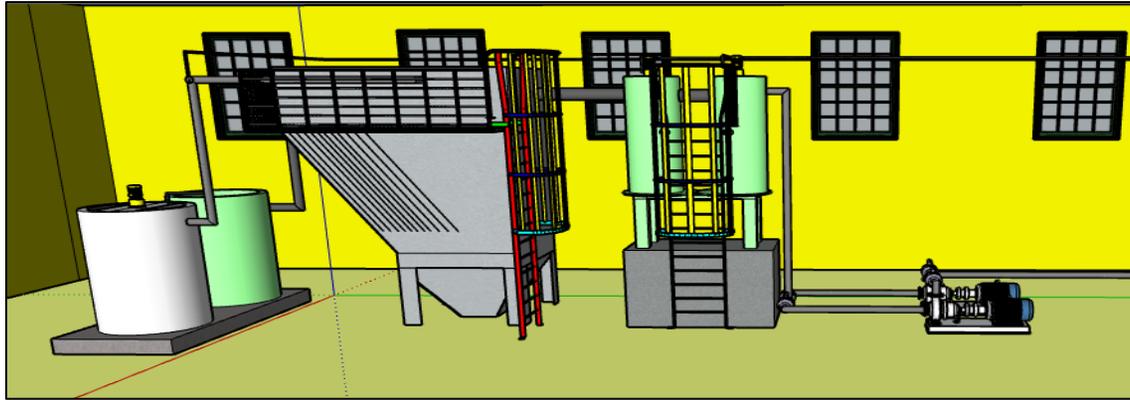


Figura 14.

Vista del proceso de tratamiento de agua residual industrial.

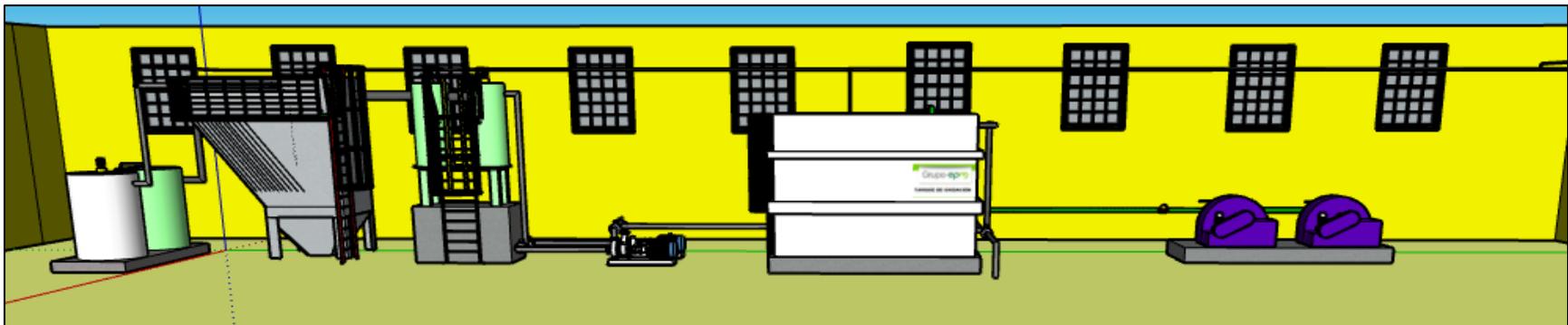


Figura 15.

Vista del proceso de oxidación en la planta de tratamiento residual industrial.

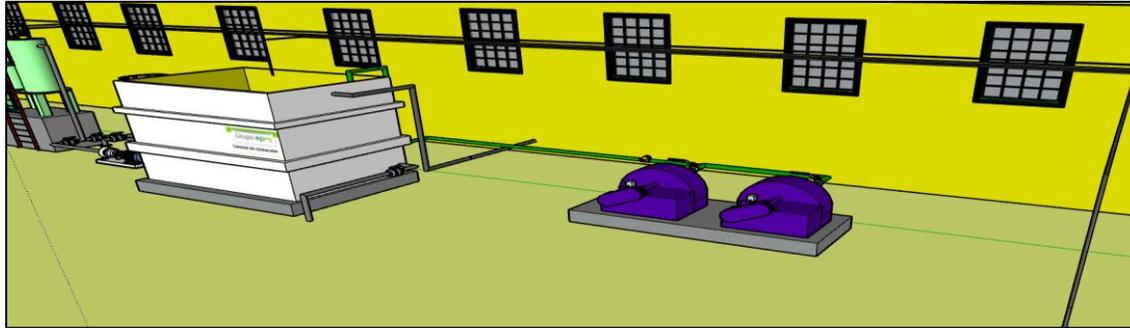


Figura 16.

Vista del proceso de dosificación de químicos de la planta de tratamiento.



Figura 17.

Vista del proceso de oxidación de la planta de tratamiento.

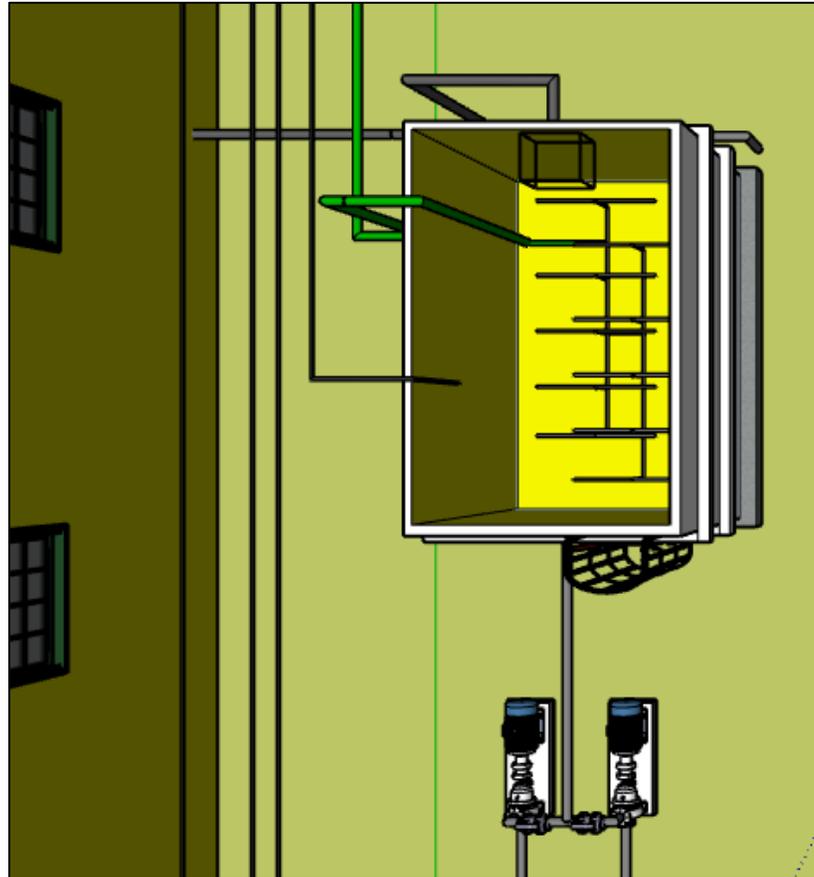


Figura 18.

Vista de la planta de tratamiento de agua residual industrial.

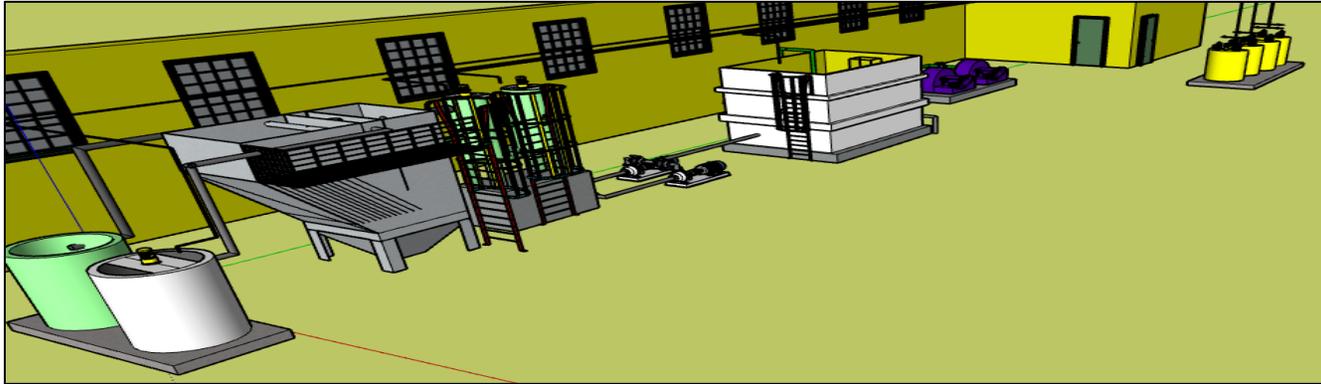
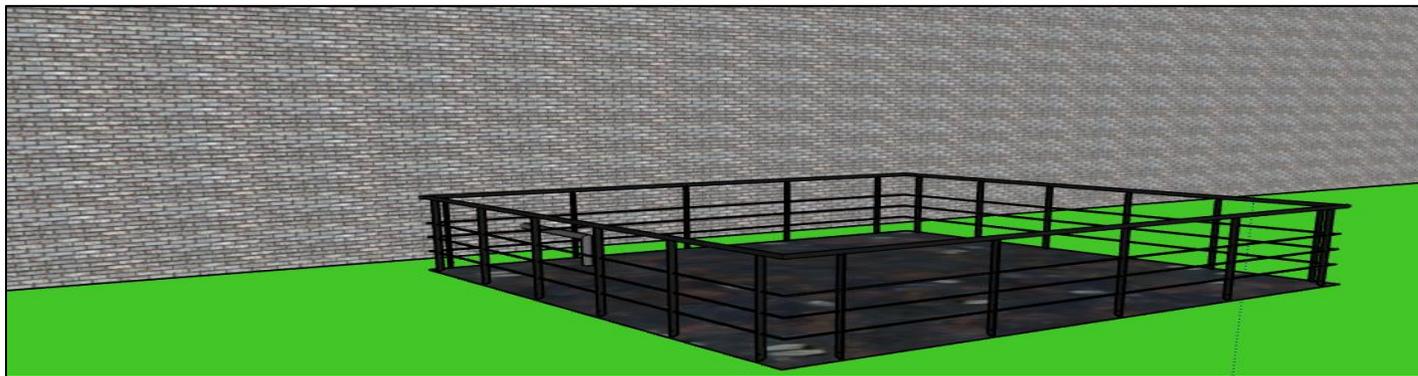


Figura 19.

Vista del foso de bombeo de aguas residuales industriales.



6.2 Inspección y resultados de la modernización de la planta

6.2.1 Lista de chequeo y actividades en la planta residual industrial

En concordancia con las actividades preliminares de inspección para ejecutar los trabajos de recuperación y modernización, la **Tabla 15.** contiene la lista que muestra el chequeo realizado y las acciones tomadas para cada caso.

Tabla 15.

Inspección de tanques, equipos principales y válvulas.

TAG	EQUIPO	UBICACIÓN	ESTADO	ACCIONES
OFC-TNK-181	Tanque De dosificación de policloruro de aluminio	Tren de dosificación a la entrada de la planta.	Parcial	Requiere bomba de dosificación, el agitador se encuentra funcionando. Para futuro control de nivel es necesario reponer la boya. La preparación del producto ya se encuentra especificada. Una vez esté en funcionamiento se desarrollarán las tablas de dosificación. Nota: Se encontró en documentos dosificaciones altas de este producto.
OFC-TNK-181	Tanque De dosificación de polielectrolito	Tren de dosificación a la entrada de la planta.	Parcial	Requiere bomba de dosificación, el agitador se encuentra funcionando. Para futuro control de nivel es necesario reponer la boya. La preparación del producto ya se encuentra especificada. Una vez esté en funcionamiento se desarrollarán las tablas de dosificación. Nota: Se encontró en documentos dosificaciones altas de este producto
OFC-TNK-189	Tanque De dosificación de ácido clorhídrico	Tren de dosificación	No hay existencia.	Instalar tanque en la línea correspondiente, hay un tanque con la misma capacidad existente en la planta este puede ser usado. Falta sensor de nivel para automatizar y proteger bomba. Nota: La dosificación de esté depende si hay que hacer ajuste, no hay datos de dosificación debe evaluarse.
OSA-FAN-199	Soplante 1	Al lado del tanque de oxidación	Malo	El soplante no tiene algunos accesorios que garantizan el funcionamiento. Durante la inspección el mecánico sugirió que algunos repuestos se pueden comprar y podría recuperarse ese soplante. Alternativa la compra de este para garantizar funcionamiento de la planta en caso de fallo del que hay disponible.
OSA-FAN-200	Soplante 2	Al lado del tanque de oxidación	Regular	El soplante funcionó cuando se encendió. Corroborar que si entrega el caudal del aire suficiente.
OWW-TNK-204	Tanque de coagulación	Proceso	Parcial	El tanque no presenta problemas. Verificar que el agitador funcione se forzó señal y este no encendió. Cambiar brida de conexión presenta fugas.
OWW-TNK-206	Tanque de floculación	Proceso	Parcial	El tanque no presenta problemas. Verificar que el agitador funcione se forzó señal y este no encendió.
OWW-TNK-208	Decantador lamelar	Proceso	Parcial	El tanque no presenta problemas. Corregir fugas en la purga de lodos.
OWW-TNK-204	Tanque de neutralización	Proceso	Parcial	El tanque no presenta problemas. Falta el agitador. El tanque necesita un pH metro que indique y transmita la señal para la automatización y control de pH 8.
OWW-TNK-211	Tanque de recogida de aceites	Proceso	Parcial	El tanque no requiere ningún ajuste ni modificación.
OWW-TNK-201	Tanque de oxidación	Proceso	Regular	El tanque debe limpiarse. En la parrilla de difusores debe reemplazarse las membranas que garanticen tamaño de burbuja < 5mm, estas ya están cotizadas.

Modernización y optimización de la planta de tratamiento de agua residual de la central...

				<p>Se necesita un pH metro en línea que indique y transmita la señal para futura automatización. También reponer el transmisor de nivel ultrasónico para futuro lazo de nivel.</p> <p>El tanque tiene fugas por el fondo.</p> <p>Se necesita instalar interruptor de caudal para poder mantener el nivel y evitar el rebose.</p>
OCF-TNK-183	Tanque de hidróxido de sodio	Proceso	Parcial	<p>El tanque esta provisto de una resistencia eléctrica que debe inspeccionarse que esté funcionando en caso de requerirse. está provisto de un termómetro el cual debe revisarse y una boya de nivel que es necesario saber si está para ser repuesta.</p> <p>Se llego a la conclusión de que se dispondrá de un tanque de menor capacidad que llega el 8 de octubre para la dosificación del químico.</p>

TAG	INSTRUMENTO	UBICACIÓN	ESTADO	ACCIONES
OPI-1411	Manómetro indicador de presión	Descarga de soplantes	Malo	Debe ser cambiado para garantizar la medición de la presión de salida del soplante y con el rango adecuado.
V-252	Válvula de bola salida PMP-181	Descarga de bomba de policloruro de aluminio	Bueno	Ninguna
V-253	Válvula de bola salida PMP-181	Descarga de bomba de policloruro de aluminio	Bueno	Ninguna
V-254	Válvula de bola salida PMP-185	Descarga de bomba de polielectrolito	Bueno	Ninguna
V-255	Válvula de bola salida PMP-185	Descarga de bomba de polielectrolito	Bueno	Ninguna
V-256	Válvula de bola salida PMP-189	Descarga de bomba de ácido clorhídrico	Bueno	Ninguna
V-257	Válvula de bola salida PMP-189	Descarga de bomba de ácido clorhídrico	Bueno	Ninguna
V-225	Válvula de bola salida PMP-193	Descarga de bomba de soda caustica	Bueno	Ninguna
V-226	Válvula de bola salida PMP-193	Descarga de bomba de soda caustica	Bueno	Ninguna
V-228	Válvula de bola salida OWW-PMP-197	Descarga de bomba sumergible en el foso de agua residual	Regular	No tiene manija
V-230	Válvula de bola salida OWW-PMP-198	Descarga de bomba sumergible en el foso de agua residual	Bueno	Ninguna
V-231	Válvula de bombeo a decantación.	Succiones bombas de husillo	Bueno	Ninguna
V-232	Válvula de bombeo a decantación.	Succiones bombas de husillo.	Bueno	Ninguna
V-234	Válvula de bombeo a decantación.	Descargas bombas de husillo	Bueno	Hay fuga organizar la válvula.
V-234	Válvula de bombeo a decantación.	Descargas bombas de husillo	Bueno	Ninguna
V-229	Válvula de cheque en foso de agua residual	Descarga de bombas sumergibles del foso de agua residual	Bueno	Ninguna
V-233	Válvula de cheque en el bombeo de decantación.	Descarga de bombas de husillo excéntrico.	Bueno	Ninguna
V-235	Válvula de cheque en el bombeo de decantación.	Descarga de bombas de husillo excéntrico.	Bueno	Ninguna
V-249	Válvula de cheque descarga de sopladores	Descarga de sopladores	Bueno	Ninguna
V-1437	Válvula de foso de lodos	Fondo de tanque lamelar	Parcial	Es necesario inspeccionar funcionamiento.

TAG	INSTRUMENTO	UBICACIÓN	ESTADO	ACCIONES
OCF-PMP-197	Bomba de alimentación a planta	Foso de agua residual.	Parcial	La bomba esta funcionando correctamente. Debe instalarse un interruptor de caudal para proteger de funcionamiento en seco.
OCF-PMP-199	Bomba de alimentación a planta	Foso de agua residual.	Parcial	La bomba está funcionando correctamente. Debe instalarse un interruptor de caudal para proteger de funcionamiento en seco.
OCF-PMP-182	Bomba dosificadora de policloruro de aluminio	Tanque de dosificación de policloruro de aluminio	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-183	Bomba dosificadora de policloruro de aluminio	Tanque de dosificación de policloruro de aluminio	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-186	Bomba dosificadora de polielectrolito.	Tanque de dosificación de polielectrolito	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-187	Bomba dosificadora de polielectrolito.	Tanque de dosificación de polielectrolito	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-190	Bomba dosificadora de ácido clorhídrico.	Tanque de dosificación de ácido clorhídrico.	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-191	Bomba dosificadora de ácido clorhídrico.	Tanque de dosificación de ácido clorhídrico.	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-190	Bomba dosificadora de ácido clorhídrico.	Tanque de dosificación de ácido clorhídrico.	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-191	Bomba dosificadora de ácido clorhídrico.	Tanque de dosificación de ácido clorhídrico.	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-195	Bomba dosificadora de soda caustica.	Tanque de dosificación de soda caustica.	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OCF-PMP-196	Bomba dosificadora de soda caustica.	Tanque de dosificación de soda caustica.	Malo	Reponer bombas de dosificación.
OWW-PMP-202	Bomba de husillo excéntrico.	Bombeo a sistema de decantación.	Parcial	Inspeccionar eléctricamente, no arranca cuando se acciona el relé.
OWW-PMP-203	Bomba de husillo excéntrico.	Bombeo a sistema de decantación.	Parcial	Funciona adecuadamente.

Para los instrumentos también se ejecutó el mismo procedimiento, estos resultados de diagnóstico se observan en la **Tabla 16**.

Tabla 16.

Inspección de instrumentos de planta de tratamiento residual.

Nombre	TAG	Salida	Ubicación	Observación
Boya/interruptor	OLSLH-1407/A	SW	Foso bombeo alimentación planta.	Elemento no presente
Boya/interruptor	OLSLH-1407/B	SW	Foso bombeo alimentación planta.	Elemento no presente

Boya/interruptor	OLSLH-1407/C	SW	Foso bombeo alimentación planta.	Elemento no presente
Boya/interruptor	OLS-1413/A	SW	Tanque de oxidación	Elemento no presente
Boya/interruptor	OSL-1413/B	SW	Tanque de oxidación	Elemento no presente
pH-metro	OQE-1412	4-20 mA	Tanque de oxidación	Equipo obsoleto y con daño aparente
Caudalímetro electromagnético	OFT-1417	4-20 mA	Descarga bomba de husillo	Equipo obsoleto y con daño aparente
pH-metro	OQE-1418	4-20 mA	Tanque de neutralización	Equipo obsoleto y con daño aparente
Sonda nivel	OLSL-1401	SW	Tanque de almacenamiento de policloruro de aluminio	Elemento no presente
Sonda nivel	OLSL-1402	SW	Tanque de almacenamiento de floculante.	Elemento no presente
Sonda nivel	OLSL-1403	SW	Tanque de almacenamiento de ácido clorhídrico	Elemento no presente
Sonda nivel capacitivo	OLSL-1404	SW	Tanque de almacenamiento de soda caustica.	Verificar funcionamiento
SONDA TEMPERATURA	OTT-1405	4-20 mA	Tanque de almacenamiento de soda caustica.	
Interruptor de caudal	OFSL-1408	SW	OWW-PMP-197	Elemento no presente
Interruptor de caudal	OFSL-1409	SW	OWW-PMP-198	Elemento no presente
Interruptor de caudal	OFS-1414	SW	OWW-PMP-202	Elemento no presente
Interruptor de caudal	OFS-1415	SW	OWW-PMP-203	Elemento no presente
Termómetro	OTI-1406	--	Tanque de almacenamiento de soda caustica.	Medidor descalibrado
Boya/interruptor	OLSH-1419	SW	Tanque de recogida de aceites	Verificar funcionamiento
Sonda nivel ultrasónica	OLT-1420	4-20 mA	Tanque de oxidación.	Equipo obsoleto y con daño aparente

6.3 Resultados de la modernización

6.3.1 Selección y compra de equipos para planta

Una vez definida las necesidades de equipos, con ayuda de manuales y hojas de especificación se hizo la selección de los equipos con las descripciones deseadas para el proceso. Algunos criterios fueron los siguientes:

- En el caso de las bombas dosificadoras, se buscaron bombas tipo diafragma con la misma marca de las que había inicialmente. Para esto se suministró con los datos de placa: caudales, presión de operación de acuerdo si la dosificación se hace a un tanque o habría que vencer alguna presión en un tubo, y tipo de fluido a dosificar para definir el material del diafragma. Con estos datos se hizo la homologación.

Los resultados de homologación se muestran a continuación:

Tabla 17.

Especificaciones y modelos homologados de bombas.

Tipo de producto	Cantidad	Especificaciones Técnicas				Modelo	Modelo final
		Tipo	Pmax	Caudal	Motor		
Bomba dosificadora de Policloruro de aluminio (Coagulante)	2	Membrana serie D	12 bar	0-3.3 L/h	0.18 kW, 120 V, IP 55, 60/50 Hz	P151-398TI	Bomba dosificadora electromagnética LMI serie PD051-838NI
Bomba dosificadora de Sedisol (Polielectrolito catiónico)	2	Membrana serie D	12 bar	0-22.2 L/h	0.18 kW, 120 V, IP 55, 60/50 Hz	C131-25HV	Bomba dosificadora electromagnética LMI serie C131-25HV
Bomba dosificadora de ácido clorhídrico (Neutralización)	2	Membrana serie D	12 bar	0-3.3 L/h	0.18 kW, 120 V, IP 55, 60/50 Hz	P151-398TI	Bomba dosificadora electromagnética LMI serie PD051-838NI
Bomba dosificadora de Sosa caustica (Regulación de pH)	2	Membrana serie D	12 bar	0-22.2 L/h	0.18 kW, 120 V, IP 55, 60/50 Hz	C131-25HV	Bomba dosificadora electromagnética LMI serie PD041-828NI

- Para el agitador en el tanque de neutralización se evaluó las condiciones de mezcla rápida haciendo uso del gradiente de velocidad, este se calcula con la siguiente ecuación:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu * V}} \text{ Ecuación 11}$$

Donde:

P: Potencia introducida al agua, W.

V: volumen del tanque, m³.

μ: viscosidad dinámica del agua, Pa S.

G: Gradiente de velocidad, s⁻¹.

En la siguiente tabla con las especificaciones de equipos existentes se evaluó el gradiente de cada proceso.

Tabla 18.

Gradientes de velocidad en procesos de planta calculados con datos de hojas de especificaciones.

Proceso	Gradiente de velocidad s^{-1}
Coagulación	742.83
Floculación	160
Neutralización	747.84

La mezcla rápida es una operación empleada en el tratamiento del agua con el fin de dispersar diferentes sustancias químicas y gases. En plantas de purificación de agua el mezclador rápido por lo general el propósito de dispersar rápido y uniformemente el coagulante o químico a través de toda la masa o flujo de agua (Romero Rojas, 2000).

Para definir el gradiente en mezcla rápida existen heurísticas que están basadas en el tiempo de residencia, en el caso de tiempos de residencia mayores a 40 segundos se recomiendan gradientes de $700 s^{-1}$ aproximadamente (Romero Rojas, 2000), lo cual en el caso del agitador de neutralización con tiempo de residencia de 20 minutos es adecuado. Para tal fin se hace la homologación del agitador con los datos del que había anteriormente.

Los datos suministrados al fabricante incluyen: material del eje hélice, tipo de propela (hélice), diámetro de la hélice, velocidad de salida, diámetro del tanque y fluido.

El agitador especificado se muestra a continuación:

Tabla 19.

Especificaciones y modelo homologado del agitador.

Tipo de producto	Cantidad	Especificaciones Técnicas						Modelo homologado
		Material	Tipo y dimensión	Motor agitador	Dimensiones del tanque	Dimensiones del eje	Marca	
Agitador mezcla rápida (Neutralización PTARI)	1	Acero revestido de polietileno	Hélice marina - diámetro impulsor 140 mm	0.75 kW, 460V, III, 60 Hz, 1800 rpm	Diámetro: 1.0m - Altura: 1.6 m	Diámetro: 20mm (1 in) - Longitud: 1400 mm	Marca Dosapro Milton Roy Tipo CH-1-2N	VD1A-12B290I

- La compra de pH metros en línea estuvo sujeta a especificar las características del agua residual al proveedor y con esto elegir el equipo más adecuado. Se suministro datos como SST, grasas y aceites, tipo de agua, conductividad. Una particularidad del sensor

es que esta provisto de un diafragma anillo de PTFE repelente de suciedad con gel de alta viscosidad KCL, lo cual lo hace resistente ante la suciedad del agua.

- La compra del tanque de almacenamiento de soda caustica para posterior dosificación solo contempló capacidad y material. El modelo seleccionado es un tanque de polietileno de capacidad de 1000 Litros.

6.3.2 Selección y compra de equipos para laboratorio

Para la implementación de los análisis de laboratorio, con apoyo los instructivos y de otras dependencias se hizo la compra de equipos, vidriería y reactivos. Este proceso se llevó en varias etapas cotización, catalogación y compra.

6.3.3 Resultados de modernización en planta

Una vez definida las actividades se consiguen los resultados de modernización a continuación en la **Tabla 20**. Esta relación de tareas y efecto son los resultados más significativos que permitieron no solo la recuperación de la operación de la planta, sino lograr además la automatización parcial de procesos necesarios para garantizar un funcionamiento en periodos de tiempo más largos y mantener variables importantes en un valor constante.

Tabla 20.

Relación de tareas y resultados de la modernización y operación de la planta.

Tarea	Objetivo	Resultado
- Inspección inicial eléctrica	Determinar la funcionalidad de los equipos e instrumentos actuales.	Agitadores en tanques de dosificación química en funcionamiento. Soplantes uno en funcionamiento otro en desuso por falta de elementos mecánicos.
- Proceso de compra de bombas de dosificación marca Milton Roy. - Proceso de compra de Agitador de tanque de neutralización marca Novatec. - Proceso de compra de tanque de soda caustica.	Reponer equipos para dosificación de químicos necesarios en el proceso de tratamiento.	Mediante la homologación de los equipos faltantes con la ayuda de los manuales y las especificaciones técnicas, la planta quedó con su tren de dosificación de químicos completo y agitación en el proceso de neutralización.
- Cambio del punto de dosificación de soda caustica.	Implementar la dosificación de soda caustica en un tanque de menor capacidad dentro de la planta.	Actualmente la planta cuenta con un tanque de capacidad alta para preparar la soda caustica al 50%, después de analizar algunos parámetros que se tuvieron en cuenta en el diseño inicial de la planta, se

Modernización y optimización de la planta de tratamiento de agua residual de la central...

		decidió cambiar el punto de dosificación en la línea que toma desde el tanque y descarga en el tanque de oxidación, para esto se colocó un tanque de menor capacidad en la zona de dosificación y se derivó la línea anterior añadiendo también una válvula para no dejar el tanque más grande indisponible.
- Proceso de compra e instalación de pH metro en línea.	Medir y controlar en situ el potencial de hidrogeno en el tanque de oxidación y el tanque de neutralización.	Los medidores de pH en línea de la planta no se encontraron en funcionamiento, por lo tanto, se hizo la reposición de estos equipos. En el momento servirán para tener la medida en situ, en un futuro cuando se instale el PLC se podrá automatizar la dosificación de químicos a cierto pH óptimo. Para compra de estos equipos fue necesario suministrar la calidad de agua en cuanto a SST, G y A, conductividad entre otras.
- Cambio de membranas en los difusores de aire.	Garantizar la difusión de aire para la oxidación química de los contaminantes en el flujo residual entrante al tanque de oxidación.	En la inspección inicial se encontró que los difusores tenían las membranas rotas, por lo que se hizo un proceso de compra para cambiar las membranas por unas de marca SSI aeración en EPDM y con un tamaño de burbuja fina de 1 mm para la aplicación de aguas residuales con trazas de grasas y aceites. Los planos de los difusores sirvieron para hacer la homologación.
- Instalación de boyas de nivel en el tanque de oxidación y la balsa de recogida de aguas residuales.	Controlar el nivel de aguas residuales en el tanque de oxidación.	Debido a que los sensores de nivel se encuentran obsoletos, uno de los principales inconvenientes de la operación de la planta es el nivel del tanque de oxidación, para esto se instaló dos boyas de nivel conectadas en serie, una para regular la cota de nivel en el tanque de oxidación y la otra en el pozo residual para proteger las bombas sumergibles de succión en seco.
- Reparación de fugas líneas de descarga bombas de husillo, bridas de conexión tanques de coagulación y floculación, purga de lodos sedimentador lamelar.	Corregir fugas por accesorios rotos en líneas del proceso.	Con la corrección de las fugas se evita la corrosión de soportes metálicos y correcto funcionamiento de las líneas de proceso.
- Enclavamiento de la bomba dosificadora de soda caustica al circuito de la boya de la bomba de la balsa de recogida de aguas residuales.	Mantener el pH estable en el tanque de oxidación cuando pare o arranque la bomba de alimentación del tanque de oxidación.	Al no existir un controlador para mantener el pH constante en el tanque de oxidación, se solicitó enclavar la bomba dosificadora de soda caustica al circuito que apaga o enciende la bomba de alimentación al mismo tanque, esto con el objetivo de que cada vez que la bomba pare también se apague la bomba dosificadora para que no siga alimentando soda caustica y el pH no suba del set point establecido. Una vez la señal permita que la bomba entre en operación nuevamente, la bomba dosificadora también iniciará y compensará el pH del agua influente. Esta mejora es provisional hasta que se tenga el PLC instalado.

Estos resultados garantizan la operabilidad de la planta, sin embargo, siguen existiendo necesidades de automatización que solo serán logradas cuando exista el controlador o PLC, algunas de ellas pueden ser mencionadas a continuación:

- Paro de la bomba de husillo cuando el tanque de oxidación se quede sin nivel.
- Paro de bombas dosificadoras cuando los tanques de dosificación queden sin nivel. Así mismo el paro de las bombas de husillo en caso de no haber químicos en el proceso de clarificación.
- Regulación de dosificación de soda y ácido clorhídrico de acuerdo a las señales entregadas por los sensores de pH en línea.
- Control de nivel del tanque de oxidación mediante el sensor de nivel tipo radar.
- Deben colocarse las boyas de nivel en cada tanque de dosificación que sirva para detener el proceso de tratamiento cuando se presenten bajos niveles de químicos y como protección de las bombas dosificadoras.
- Instalación de los interruptores de caudal en cada bomba para detectar el flujo en las tuberías del proceso lo cual sirva de protección de la bomba.
- Protección de agitadores.
- Alternancia de sopladores para evitar desgastes en estos equipos. Para tal fin debe reponerse el soplante en desuso, El arranque de los soplantes en automático será alternativo, de forma que cada una de ellas funcione un número de horas similar.

6.4 Tiempos de residencia

El caudal nominal de la planta es de 0.887 L/s (3.18 m³/h). A la entrada de la planta hay un contador, para determinar el flujo de alimentación al tanque de oxidación se contabilizó el número de vueltas en el indicador en un tiempo determinado (7.41 m³/h). De acuerdo con los volúmenes de los tanques se calcula los tiempos de residencia en cada equipo de tratamiento.

$$\tau = \frac{V}{Q} \text{ Ecuación 12}$$

Tabla 21.

Medición de tiempos de residencia para cada subsistema de la planta.

Equipo	Volumen (m³)	Caudal (m³/h)	Tiempo de residencia (min)
Tanque de oxidación	12	3.18	226.42
Coagulante	0.5	3.18	10
Floculante	0.5	3.18	10
Tanque de neutralización	1	3.18	18.86

Para el sedimentador de tanque lamelar se tiene que el distanciamiento entre placas es de 50 mm y la inclinación es de 55° , además de los planos mecánicos se conoce que la altura del empaque de lamelas es 1.5 m (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997).

Se calcula entonces la longitud diagonal de las lamelas:

$$l = \frac{1.480}{\text{sen } 55^\circ} = 1.81m$$

La velocidad ascensional de flujo se calcula con el flujo total de entrada y el área equivalente de sedimentación total que es proveída por el fabricante 10 m^2 (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997):

$$v_{FA} = \frac{3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{10 \text{ m}^2} = 0.3 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Ahora el tiempo de retención se calcula como:

$$\tau = \frac{0.3 \frac{\text{m}}{\text{h}}}{1.81 \text{ m}} = 0.165 \text{ h}$$

Este tiempo que tarda el flujo en ascender por la lamela, el tiempo de retención total se calcula con el volumen restante del tanque que según las dimensiones y los planos es de 3.44 m^3 (S. Felguera montajes y mantenimiento, 1997)

$$\tau = \frac{3.44 \text{ m}^3}{3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 1.15 \text{ h}$$

El tiempo total de retención en el sedimentador lamelar es:

$$\tau = (1.15 + 0.165) \text{ h} = 1.315 \text{ h} (78.9\text{min})$$

El número de Reynolds para el flujo entre las lamelas se obtiene a continuación, para la densidad y la viscosidad se asumen valores del agua a 20°C :

$$Re = \frac{v_{FA} * \rho * h}{\mu}$$

$$Re = \frac{(8.33 \times 10^{-5}) * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{0.05}{\tan 55^\circ}}{0.001 \text{ Pa} * \text{s}} = 2.91$$

En el caso de la coagulación se necesita una mezcla o agitación rápida, de alta energía, para dispersar adecuadamente el coagulante y promover las colisiones de partículas consiguiendo una buena coagulación y formación de los micro flóculos. El exceso de mezcla no afecta la coagulación, pero de ser insuficiente dejará este paso incompleto. El tiempo de

contacto adecuado en la cámara de mezcla rápida es típicamente de 1 a 3 minutos (Bratby, 1980), en el caso del tanque existente está en 10 minutos lo cual está por encima, pero es aceptable por las consideraciones anteriores.

Para floculación la mezcla es lenta y los tiempos de contacto de diseño para la floculación varían de 15 o 20 minutos a una hora o más (Bratby, 1980). Para el tanque existente hay un tiempo de residencia de 10 minutos, lo cual está por debajo, sin embargo, se ha observado una formación de floc adecuada, por lo cual se puede seguir trabajando con las condiciones mecánicas existentes.

Para el sedimentador lamelar con flujo en contracorriente, el área equivalente de sedimentación es la suficiente para obtener una buena decantación de los flocs formados en el proceso. En el caso de la velocidad de flujo ascendente debe ser menor de un valor crítico a partir del cual existiría resuspensión de los sólidos, algunos autores establecen este valor en 5×10^{-2} m/s, mientras que velocidades de sedimentación son aceptables en el rango de 0.5 a 5 m/h. También se reporta que estas condiciones de diseño evitan las turbulencias y los cortocircuitos Gutiérrez et al. (s.f.). Para el sedimentador de la planta cumple con ambos parámetros de diseño no observándose resuspensión de los flocs y con un Reynolds menor a 250 para un régimen de flujo laminar, además de observarse en el proceso turbidez menores a 10 NTU, lo cual manifiesta buena calidad de agua tratada.

Por otra parte, la agitación fue evaluada haciendo uso del gradiente de velocidad en la **Tabla 18**. para el caso de coagulación se requiere mezcla rápida que se logra con el agitador existente, la potencia dada al flujo dentro del tanque y el tiempo de residencia. De la misma forma, en el tema de floculación si la velocidad de mezcla es muy alta, los flóculos pueden romperse, gradientes entre 70 y 20 s^{-1} son recomendados Villegas et al. (1976), para el tiempo de residencia de 10 minutos, el gradiente obtenido de 160 s^{-1} es adecuado y permite un buen crecimiento del tamaño de floc. Con estas consideraciones se tiene por concepto que los agitadores cumplen el fin de mezcla en cada parte del proceso.

6.5 Validación de metodologías

A continuación, se muestra los resultados de las validaciones de cada metodología con los patrones preparados.

▪ Grasas y aceites (4000 ppm)

Para la confirmación de la concentración del patrón se llevó a horno hasta sequedad, se pesó el residuo, dando 38.60812 mg. Como cumple el rango ya antes mencionado de 40 ± 1 mg se puede continuar con el proceso de validación.

En el proceso del patrón se prepara una solución de menor concentración tomando 1 mL del patrón y diluyendo en agua. El cálculo de la concentración final se muestra a continuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2 \text{ Ecuación 13}$$

$$4000 \text{ ppm} * 1 \text{ mL} = C_2 200 \text{ mL}$$

$$C_2 = 20 \text{ ppm}$$

Los resultados de la validación son mostrados en la tabla siguiente:

Tabla 22.

Resultados de la validación del método de grasas y aceites.

Muestra	Volumen de la muestra (mL)	Peso inicial del Erlenmeyer (g)	Peso final del Erlenmeyer (g)	Gramos residuo (g)	Grasas y aceites (mg/L)	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación.
1	200	112.58195	112.58585	0.0039	19.5	20	0.354	1.77%
2	200	128.04270	128.04680	0.0041	20.5			

▪ Sólidos suspendidos (100 ppm)

Los resultados de la validación se muestran a continuación:

Tabla 23.

Resultados de la validación del método de sólidos suspendidos.

Muestra	Volumen de la muestra (mL)	Gramos medidos Celite (g)	Peso inicial del crisol con el filtro (g)	Peso final del crisol con el filtro (g)	Gramos residuo (g)	Sólidos suspendidos (mg/L)	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación.
1	250	0.02532	57.45791	57.48346	0.02555	102.20	100.88	1.32	1.31%
2	250	0.02511	68.23326	68.25815	0.02489	99.56			

▪ Determinación química de oxígeno Ftalato de potasio.

Para la solución patrón se pesó 0.42511 g de ftalato ácido de potasio y se llevó a dilución en matraz aforado de 1000 mL.

A partir del patrón se hizo las correspondientes diluciones como en el procedimiento de calibración de DQO y se corrió la metodología.

Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 24**.

Resultado de la curva de calibración para la DQO.

Tabla 24.

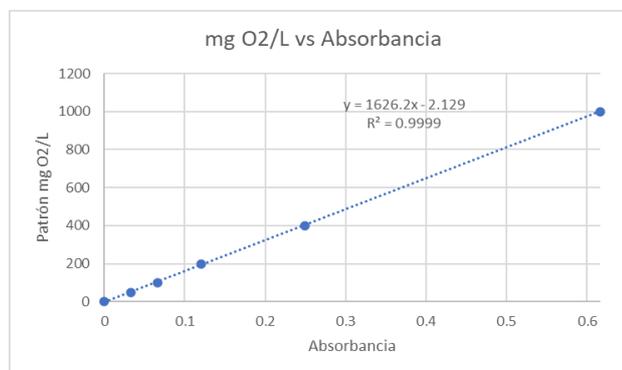
Resultado de la curva de calibración para la DQO.

Patrón (mg/L O₂)	Absorbancia
0	0
50	0.033
100	0.066
200	0.12
400	0.249
1000	0.616

Con los datos registrados se hace un ajuste lineal para obtener la ecuación de la curva y el coeficiente de regresión. Este ajuste es esbozado en la siguiente gráfica:

Figura 20.

Ajuste lineal de la curva de calibración de determinación química de oxígeno.



La ecuación obtenida para la calibración del método fue:

$$DQO \frac{mg O_2}{L} = 1626.2 * (abs) - 2.129 \quad \text{Ecuación 14}$$

El procedimiento final fue agregar la curva de calibración al espectrofotómetro con el fin de crear el programa para la medición de las muestras.

Cabe anotar que la curva de calibración debe hacerse cada vez que se cambie el lote de reactivos para asegurar la precisión del método.

Con la calibración con estándares de concentración conocida y siguiendo las recomendaciones de los métodos de ensayo, se asegura la validez de los resultados. Para las primeras metodologías en las cuales se calculó el coeficiente de variación que mide la dispersión relativa de los valores de la muestra en torno a la media muestral se obtuvo valores muy bajos indicando una dispersión baja y mayor representatividad de la media muestral de estos datos, esto también significa que la distribución de los datos es bastante homogénea. A partir de estas validaciones también se pudo establecer los tiempos de cada tratamiento (secado, desecado, evaporación de solvente), el uso de la menor cantidad de vidriería y las buenas prácticas que conlleven a obtener resultados confiables de acuerdo a las mediciones requeridas. Es recomendable que la evaluación de estas metodologías quede sujeta a análisis estadísticos más robustos que busquen evaluar precisión, exactitud, repetibilidad y otros, que por causas de tiempo no pudieron ser evaluados en este proyecto, sin embargo, con los resultados de cada uno de los patrones, se concluye que los datos que se obtengan pueden ser representativos si se sigue apropiadamente las recomendaciones a continuación:

- Para secado de vidriería y filtros utilizar horno a temperatura de 105°C y no por más de 2 horas.
- Para asegurar peso constante en el desecador, debe dejarse la muestra desecando durante 3 horas máximo excepto en sólidos suspendidos.
- En la evaporación del hexano para el método de grasas y aceites, dejar en horno a 105°C entre 40-45 minutos. Estar inspeccionando. Para el desecado es recomendable dejar en el desecador si es posible hasta el otro día de haberse hecho el ensayo.
- Para determinaciones de grasas y aceites en el API, la muestra puede requerir más de tres extracciones.
- Cabe puntualizar que las mediciones de grasas y aceites son aproximaciones que no son completamente exactas, pues cuando se toma la muestra, las capas de aceite no son uniformes en el tanque, el punto y la profundidad con que se recolecte la muestra hace variar la cantidad de aceite.

6.6 Test de Jarras

6.6.1 Resultados de prueba de dosificación de coagulante y floculante

Este procedimiento se hizo para obtener las dosis óptimas de químicos en el proceso de clarificación de agua residual. Para el floculante se partió de la concentración comúnmente

usada en los procesos de clarificación de la central, este valor es 0.5 ppm. Para el coagulante se hizo la variación de la dosis y se tomó como concentración el valor con la mejor turbiedad y velocidad de formación del floc.

La caracterización del agua cruda al proceso de clarificación puede observarse en la **Tabla 25**:

Tabla 25.

Parámetros iniciales del agua cruda al inicio del proceso de clarificación.

Parámetro	Agua de entrada
Color aparente (UPC)	901
pH (Und pH)	7.04
Turbiedad (NTU)	130

La siguiente **Tabla 26**. muestra los resultados obtenidos para la combinación inicial de químicos.

Tabla 26.

Test de jarras variando la dosificación de coagulante manteniendo la concentración de floculante constante.

Jarra	1	2	3	4	5	6
Dosis de coagulante (ppm)	10	20	30	40	50	60
Dosis de floculante (ppm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Turbiedad	6	4	5	5	7	7
pH	7.04	7.04	7.04	7.04	7.04	7.04

La imagen a continuación muestra el montaje de test de jarras con el resultado fotográfico.

Figura 21.

Test de jarras variando la concentración de coagulante y manteniendo constante la dosis de floculante.



De acuerdo con los resultados se toma como valor aceptable el obtenido en la jarra 2 por la calidad del agua al final y la formación del floc. El color aparente final del agua fue de 62 UPC.

Ahora para determinar el efecto del floculante en el proceso de clarificación, se mantuvo la concentración de coagulante óptima obtenida en el primer ensayo y se modificó la concentración de floculante. Los resultados son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 27.

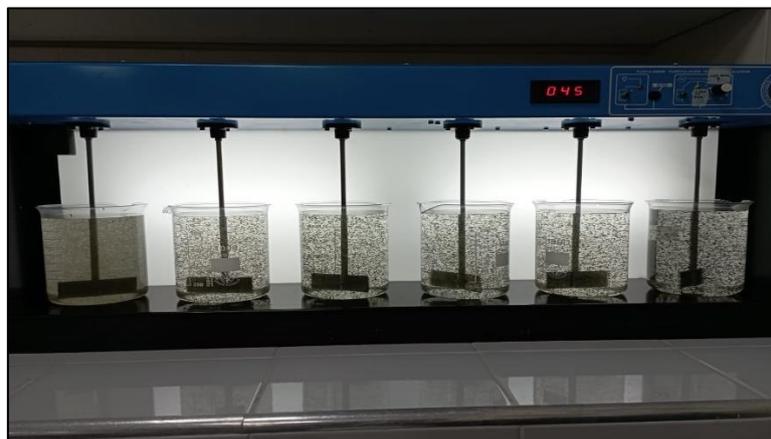
Test de jarras con la dosis óptima anterior variando la concentración de floculante.

Jarra	1	2	3	4	5	6
Dosis de coagulante (ppm)	20	20	20	20	20	20
Dosis de floculante (ppm)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Turbiedad	4	3	2	2	4	4
pH	7.04	7.04	7.04	7.04	7.04	7.04

La imagen a continuación muestra el montaje con los resultados logrados físicamente.

Figura 22.

Test de jarras variando la concentración de floculante y manteniendo constante la dosis de coagulante.



Tomando los resultados, se puede advertir que a medida que se aumenta la concentración de floculante se logra una mejora notable en la turbidez del agua, esto como consecuencia de que los flocs logran tener un tamaño más grande, lo cual es beneficio para la sedimentación. Debe entenderse que el diseño del floc depende de diferentes variables como la naturaleza y características del sólido a ser separado, tamaño y concentración, naturaleza fisicoquímica del

agua, usos y características de coagulantes y floculantes, grado de agitación y tiempo, así como de los sistemas de tratamiento y sus condiciones de operación.

Por otra parte, el uso del floculante, si bien es cierto no cambia las características intrínsecas del floc, pero si afecta la velocidad de su formación y el tamaño de este. Debe tenerse en cuenta que el floc puede ser manipulado para hacerlo lo más adecuado posible al proceso de separación. En el caso de la sedimentación lo ideal es un floc grande y pesado, sin embargo, cabe mencionar que un exceso de floculante puede llevar a la formación de flocs grandes, porosos y livianos lo cual no es conveniente para su sedimentación pues pueden flotar y arrastrarse en el agua tratada, esta premisa se observó en las dos últimas jarras donde la turbiedad comenzó a aumentar.

Con las consideraciones anteriores se toma como valor óptimo de floculante 1.5-2 ppm. En el caso del coagulante esta dosificación puede variar según la calidad del agua a tratar, puede que haya casos en los cuales la cantidad necesaria para eliminar las cargas negativas en los sólidos suspendidos presentes en el agua se mayor o menor al valor obtenido en este ensayo. La tabla a continuación muestra algunos resultados obtenidos para agua residual con diferentes características.

Tabla 28.

Dosis optima de coagulante para diferentes características de agua residual a la entrada.

Turbidez inicial	pH	Dosis optima	Aforo	Turbidez final
23.4	8.06	10	3.8462	1.3
58.2	8.11	30	11.538	3.78
107	7.33	95	34.61	11.6

Finalmente, con los valores aceptables del ensayo se hace la dosificación en planta.

Para el escalamiento de los resultados obtenidos en planta se hace los siguientes cálculos de aforo para coagulante y floculante respectivamente:

$$Aforo \left(\frac{mL}{min} \right) = \frac{flujo \ H_2O \left(\frac{m^3}{h} \right) * Dosis \ óptima \ (ppm) * 100}{concentración \ sln \ \% \frac{v}{v} * \rho \left(\frac{g}{mL} \right) * 60} \quad Ecuación \ 15$$

$$Aforo \left(\frac{mL}{min} \right) = \frac{caudal \left(\frac{m^3}{h} \right) * Dosis \ (ppm) * 100}{concentración \ \left(\% \frac{m}{v} \right) * 60} \quad Ecuación \ 16$$

La concentración del tanque de coagulante 10% v/v y de floculante es de 0.05 % m/v. La densidad del coagulante es 1.3 g/mL. Se obtiene entonces el aforo de las bombas.

$$Aforo \left(\frac{mL}{min} \right) = \frac{3 \left(\frac{m^3}{h} \right) * 20 * 100}{10 * 1.3 \left(\frac{g}{mL} \right) * 60} = 7.692 \frac{mL}{min}$$

$$Aforo \left(\frac{mL}{min} \right) = \frac{3 \left(\frac{m^3}{h} \right) * 2 (ppm) * 100}{0.05 * 60} = 200 \frac{mL}{min}$$

Con estos valores se ajusta el stroke de la bomba dosificadora. Para aforar se mueve el stroke de la bomba dosificadora y con la probeta y un cronometro se mide el caudal de químico en la descarga de la bomba. Esto se hace hasta que se logre el caudal deseado, en el siguiente literal se encuentra el aforo de las bombas principales lo cual es un estimado rápido para ajustar el caudal. Debe tenerse en cuenta que estos aforos son solo válidos para los químicos que se están dosificando y para el arreglo de la tubería de descarga, además de que la eficiencia de la bomba con el tiempo se va disminuyendo, por lo cual debe volverse a aforar cada bomba.

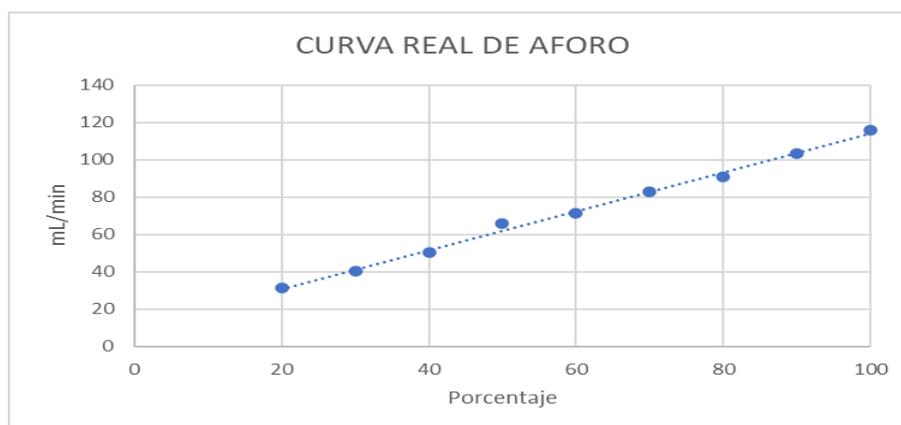
6.6.2 Resultados de aforo

Con el procedimiento de aforo de las bombas dosificadoras, se obtuvo las siguientes curvas para cada químico:

- **Bomba dosificadora de coagulante (policloruro de aluminio)**

Figura 23.

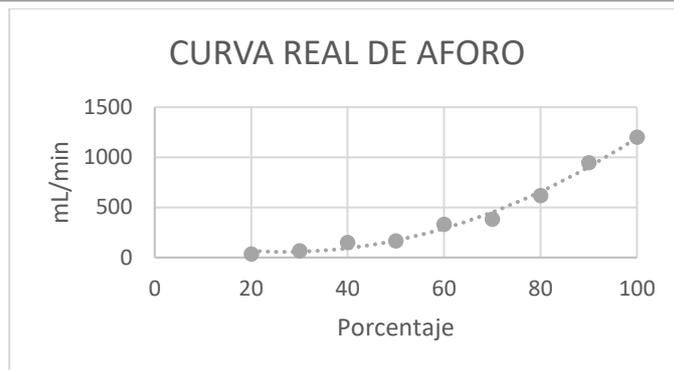
Curva de aforo para bomba dosificadora de policloruro de aluminio.



- **Bomba dosificadora de floculante (Sedisol)**

Figura 24.

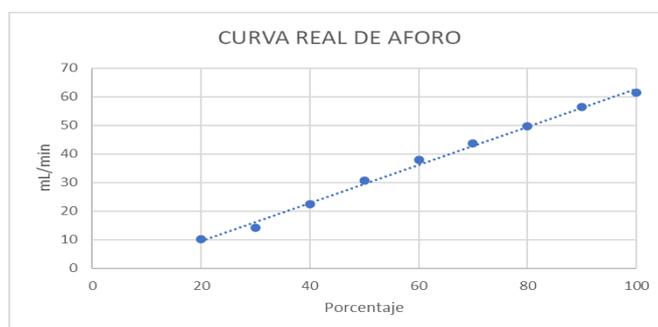
Curva de aforo para bomba dosificadora de Sedisol (floculante).



- **Bomba dosificadora de soda caustica**

Figura 25.

Curva de aforo para bomba dosificadora de ácido clorhídrico.



6.7 Caracterización del efluente

Para determinar las condiciones del agua vertida se hizo la caracterización de algunos parámetros con las metodologías existentes en el laboratorio. Así mismo, se hace la comparación de estos resultados con la medición de uno de los monitoreos realizados en el 2019-1 y el valor límite establecido por la resolución. **La Tabla 29.** muestra estos datos.

Tabla 29.*Caracterización del efluente.*

Parámetro	Unidad	Medición 2019-1 (Servicios Geograficos y Ambientales , 2020)	Medición en el laboratorio	Valor límite (Resolución 0631 de 2015) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)
Temperatura	°C	31.9	30.2	40
pH	Unidades de pH	7.25	7.51	6-9
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	42.1	88.6	200
Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)	mg/L O ₂	6.16	-	150
Sólidos suspendidos totales	mg/L	>5	3.9	5
Grasas y aceites	mg/L	10	8.5	20
Fenoles	mg/L	0.08	-	0.2
Cloruros	mg/L	17	-	250
Sulfatos	mg/L	7.54	1	250

Se debe tener en cuenta que las condiciones de medición fueron reportadas para un efluente con muestra puntual, la concentración de los contaminantes puede variar de acuerdo con la calidad del afluente. Se observa que se cumple con todas las disposiciones de la misma resolución.

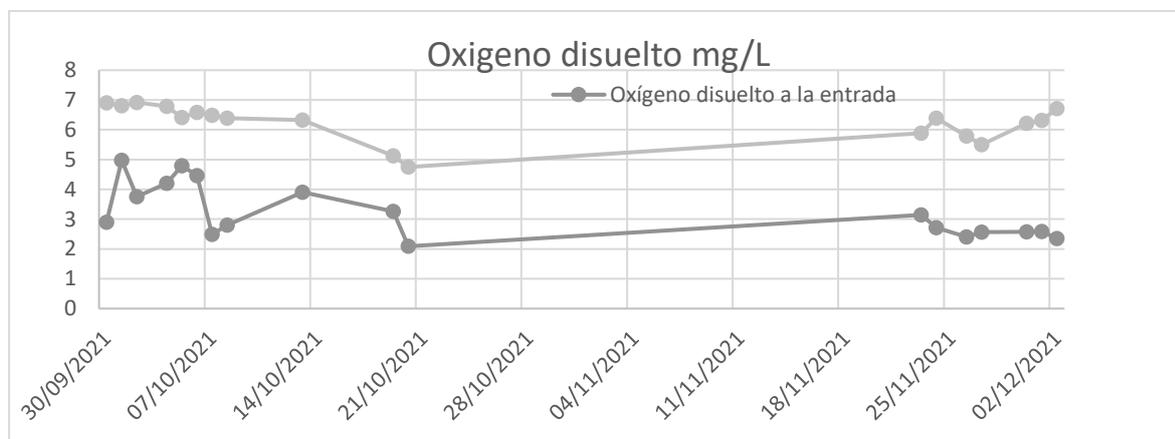
6.8 Seguimiento inicial de parámetros de calidad de agua residual industrial

En el inicio de operación de la planta mientras llegaban los equipos de análisis de DQO, sólidos suspendidos, grasas y aceites, se hizo un seguimiento de los parámetros básicos, con el fin de llevar un control de la operación e identificar como estaba la calidad del agua tratada a condiciones iniciales de planta.

En los gráficos puede verse el comportamiento del oxígeno disuelto, potencial de hidrogeno, turbiedad y color.

Figura 26.

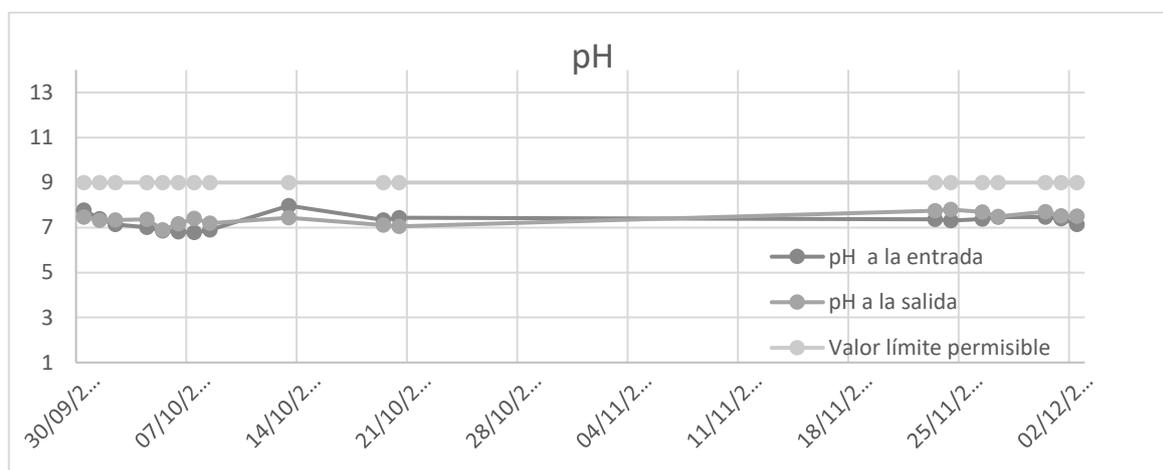
Histórico de oxígeno disuelto a la entrada y salida de la planta de tratamiento residual.



Este gráfico muestra que, con las condiciones iniciales de la planta, se logra aumentar la cantidad de oxígeno disuelto presente en el agua residual al final del tratamiento, esto es un indicativo de que el sistema de tratamiento en el proceso de clarificación logra depurar la alta carga de materia orgánica. Sin un tratamiento previo la materia orgánica para ser degradada requeriría el oxígeno disuelto presente en el agua disminuyendo los niveles a criterio ambiental.

Figura 27.

Histórico de potencial de hidrógeno a la entrada y salida de la planta de tratamiento residual.



Para el caso del pH la **figura 27**. Muestra que, tanto para la entrada como la salida del agua residual permanece dentro del rango de pH establecido por la resolución 0631 de 2015. Esto es conveniente, pero no es el único parámetro necesario para satisfacer la condición de que el agua es adecuada para ser vertida. Se puede notar que en la mayor parte de las observaciones el pH a la salida se mantuvo más alto que el del agua a la entrada, a pesar de que no se hizo

ningún ajuste de químicos, se encontró que el agua a la salida del tanque de oxidación siempre tuvo un pH más alto que a la entrada, lo cual puede ser consecuencia de las reacciones de oxidación con formación de compuestos que aumentan el pH.

Figura 28.

Histórico de turbiedad a la entrada y salida de la planta de tratamiento residual. Nota: Color a la entrada corresponde al eje izquierdo y viceversa.

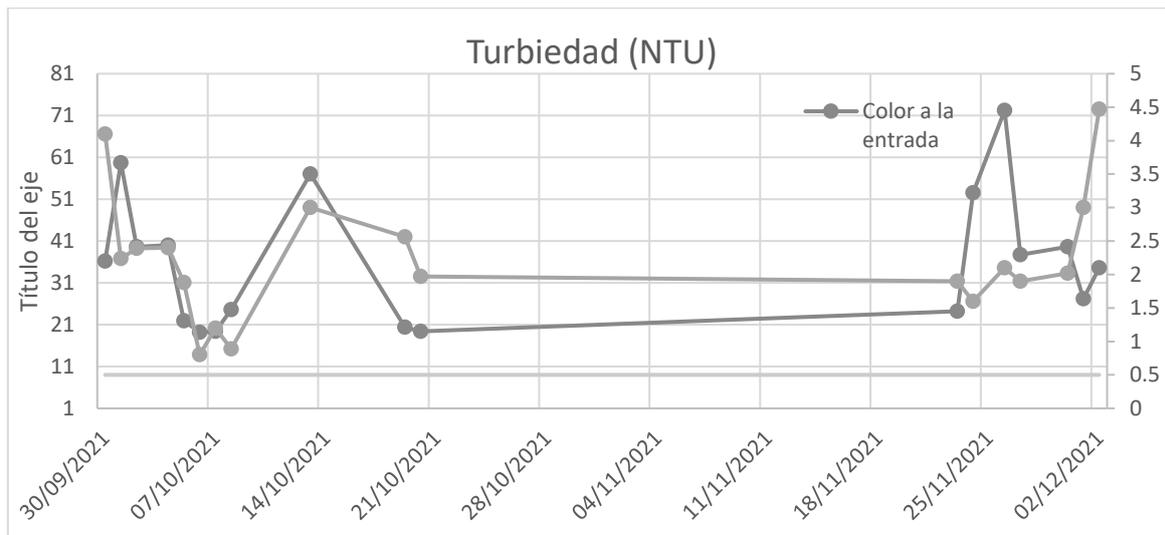
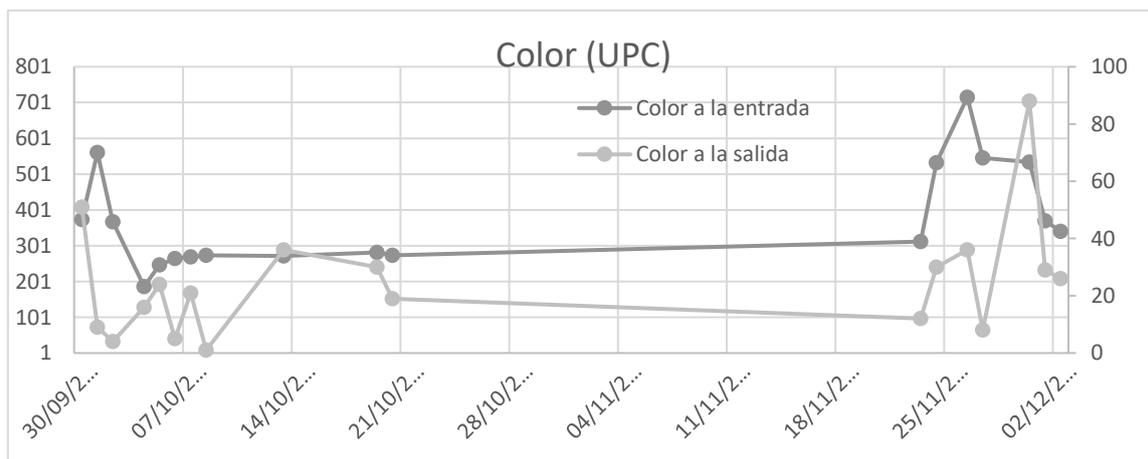


Figura 29.

Histórico de color (UPC) a la entrada y salida de la planta de tratamiento residual. Nota: Color a la entrada corresponde al eje izquierdo y viceversa.



Estas dos últimas figuras muestran la tendencia de las condiciones evaluadas para control de proceso y determinación del subsistema de clarificación de agua. Ambas variables guardan una relación estrecha, para la mayor parte de las mediciones que se tomaron, se notó que a menor valor de la turbidez el color presentaba la misma tendencia a ser menor, esto se

debe a que la turbidez aumenta la dispersión de la luz y al mismo tiempo aumenta el valor del color aparente, lo cual se convierte en una interferencia para el valor real de esta última variable.

La tendencia de estos gráficos muestra como las condiciones del agua residual en el pozo de alimentación no es constante, sin embargo, para ambas variables se logra una reducción considerable, lo cual como en el caso anterior muestra un sistema eficiente en términos de remoción de carga orgánica.

Tanto la turbidez como el color son algunas características que indican particularmente la calidad del agua tratada y la existencia de materia orgánica y ciertos metales como el hierro, manganeso entre otros.

6.9 Medición final con condiciones del proceso optimizadas.

Como parte final de la evaluación de las condiciones optimizadas del proceso, se hizo un monitoreo al efluente final. Estos resultados junto con los valores límite según la resolución se muestran a continuación:

Tabla 30.

Medición final con condiciones de proceso optimizadas

Parámetro	Unidad	Agua tratada	Valor límite (Resolución 0631 de 2015)
Temperatura	°C	30.2	40
pH	Unidades de pH	6.55	6-9
Demanda Química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	55.5	200
Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)	mg/L O ₂	-	150
Sólidos suspendidos totales	mg/L	5.6	5
Grasas y aceites	mg/L	10.8	20
Fenoles	mg/L	-	0.2
Cloruros	mg/L	-	250
Sulfatos	mg/L	4	250
Oxígeno disuelto	mg/L	7.51	-

Con estos resultados finales se puede hacer varias apreciaciones, inicialmente, es claro que la calidad de agua a la entrada de la planta va ser variable dependiendo de los vertimientos de cada fuente, y que las muestras puntuales no son muy representativas del tratamiento

completo de la planta, por tal motivo, aunque la calidad de agua no es mejor que la obtenida en la caracterización inicial de la **Tabla 29**. Se puede afirmar que para la calidad de agua de esa muestra puntual la concentración de contaminantes logra ser disminuida a niveles bajos que están en concordancia con los límites permisibles, aunque el de sólidos suspendidos sea el único que se salga de la norma mínimamente. Ahora bien, se logra disminuciones estimables de contaminación que son confirmadas por la cantidad de oxígeno disuelto que es el valor más alto que se ha obtenido desde que se han hecho monitoreos.

Por otra parte, puede considerarse que la clarificación pudo haber sido mejorada con otra dosis de coagulante lo cual disminuya aún más los sólidos suspendidos que exceden la norma. En otros diagnósticos se observó algunos arrastres de flocs livianos que pueden contaminar la muestra a la salida.

7 Conclusiones

- La caracterización fisicoquímica de las aguas residuales contribuyó a comprobar si los elementos mecánicos pertenecientes a la planta de tratamiento desarrollaban sus operaciones unitarias bajo condiciones eficientes para la disminución de carga orgánica. La reducción en la medida de parámetros como color y turbiedad a través del sistema indica que la planta dispone de las condiciones mecánicas necesarias para realizar sus procesos de remoción de carga orgánica.
- El valor del oxígeno disuelto aumenta a medida que el proceso de tratamiento es ejecutado, lo que indica que la remoción de carga orgánica realizada por las estructuras hidráulicas es eficiente puesto que el oxígeno disuelto (OD) limita la capacidad auto purificadora en los cuerpos de agua. Durante los muestreos se demostró que el valor de oxígeno disuelto en el efluente de la PTAR es superior a 7 mg/L.
- La implementación de metodologías de ensayo para los parámetros de aguas residuales, fue satisfactoria y permitió establecer hacer un seguimiento del tratamiento actual de las aguas residuales industriales. Por falta de tiempo se recomienda a futuro hacer un estudio estadístico robusto de los resultados en cada ensayo para garantizar mayor confiabilidad de los datos obtenidos.
- La medición de la demanda Química de Oxígeno (DQO) en cada una de los sistemas, fue la manera de establecer la cantidad de materia orgánica que podía remover el sistema, y así demostrar si el tratamiento desarrollaba sus procesos de remoción eficientemente. Este parámetro es el más importante a la hora de evaluar sistemas de tratamiento.
- Aunque es evidente la necesidad de un controlador para protección de equipos, reposición de químicos y mantener condiciones constantes en el proceso, con las mejoras logradas se puede tener una operación semiautomática que garantiza al menos una operación continua de la planta. Es claro, que como la planta fue diseñada para una capacidad menor que la actual, requiere mucho tiempo para poder funcionar y depurar el agua cuando el pozo residual esté lleno, no obstante, para la anterior consecuencia mientras los circuitos provisionales de control y los químicos estén preparados y no presenten bajos niveles en los tanques de dosificación, la planta puede operar varios días de seguido.

-
- Para la conservación y alargamiento de la vida útil de las membranas difusoras de aire, es recomendable al final de la operación de la planta, vaciar el tanque de oxidación para evitar la sedimentación de lodos que obstruyan los poros de las membranas difusoras de aire. También hacer lavados periódicos en el mismo tanque que ayude a retirar lodos que se acumulen durante la misma operación.
 - En adelante es preciso hacer mantenimientos y limpiezas constantes a los tanques del proceso para eliminar el arrastre de lamas y sólidos que no logran decantarse y aportan concentraciones a la salida del agua tratada.
 - El aumento de las eficiencias de remoción en los procesos de oxidación, ayuda a que el sistema de clarificación reciba menor cantidad de carga para ser tratada y conseguir mantener los niveles de contaminantes en el límite permisible.
 - La tecnología existente de oxidación es aceptable para la calidad de agua cruda de alimentación, se logran bajas concentraciones de DQO en la salida y aumento en el oxígeno disuelto del agua. Implementar tecnologías avanzadas de oxidación puede mejorar la remoción de aquellos compuestos resistentes a la oxidación convencional, sin embargo, los valores medidos de DQO a la entrada son relativamente bajos, además de que estas tecnologías pueden requerir inversiones iniciales altas.
 - Los químicos utilizados para la dosificación en los diferentes procesos de la planta mostraron ser adecuados para el fin del tratamiento.

8 Referencias

- ACOUA Tecnología. (s.f.). *Ingeniería en tratamiento de aguas y procesos*. (Clarificación) Recuperado el 2022 de Enero de 3, de <http://acquatecnologiaperu.com/works/clarificacion>
- Albosa. (s.f.). *Bomba de tornillo helicoidal*. Recuperado el 04 de Enero de 2021, de <https://www.albosa.com/productos/bombas-de-tornillo-helicoidal/>
- Andreoli, C., Sperling, v., Fernandez, M., & Ronteltap, F. (2007). *Sludge Treatment and Disposal*. IWA Publishing , 6, London.
- APHA/AWWA/WPCF. (1994). *Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th*. Washington D. C.: American public Health Association.
- Autoridad nacional de licencias ambientales. (2014 p-37). *Resolución 0884 de 2014*. Bogotá.
- BARMATEC. (2016). *¿Por qué los difusores tubulares se rompen?* Recuperado el 04 de Enero de 2022, de <https://www.iagua.es/noticias/espana/barmatec/16/09/21/que-difusores-tubulares-se-rompen>
- Betz laboratories Inc., (1991). *Industrial water conditioning*.
- Bratby, J. (1980). *Coagulation and flocculation with emphasis on water and wastewater treatment*. Croydon UK.
- Calgon AOT Handbook. (1996). *Calgon Carbon Oxidation Technologies*. Markham, Ontario, Canada.
- Cardenas Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. Lima: SEDAPAL.
- Carthew, G., Goehring, C., & Van Teylingen, J. (1983). Development of Dynamic Head Loss Criteria for Raw Sludge pumping . *Journal of the water pollution control federation*(55), 472-483.
- Central termoeléctrica La sierra EPM. (2018). *Instructivos para la evaluación fisicoquímica del agua-vapor Gestión calidad-control químico*. Puerto Nare.
- Comunidad Andina. (2005). *Manual de estadísticas ambientales CAN*. Santa Cruz de la Sierra.
- Consejería de Medio ambiente. (2000). *Técnicas de prevención de la generación de suelos contaminados tomo I La gestión de los residuos peligrosos*. Comunidad Europea.
- Cuéllar, J., Montaña , R., & Libreros, J. (2016, pp 21). *Automatización de planta industrial para el tratamiento de la calidad del agua que ingresa a una caldera*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- E., R., & E., R. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *industrial data revista de investigación*, 15(1), 71-80.
- Empresas públicas de Medellín. (2020). *Método de ensayo determinación de grasas y aceites*. Medellín: CET normalización y laboratorios.
- Empresas públicas de Medellín. (2020). *Método de ensayo para determinación de sólidos totales, suspendidos, disueltos, volátiles y sedimentables*. Medellín: CET normalización y laboratorios.
- Empresas públicas de Medellín. (2020). *Método de ensayo para la determinación de la demanda química de oxígeno*. Medellín: CET normalización y laboratorios.
- García Taravilla, V., & Martí, E. (2017, pp 112-113). *Operaciones básicas en la industria química*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Gutiérrez, A., & Bueno de las Heras, J. (s.f.). *Los sedimentadores lamelares en el tratamiento de aguas residuales*. Departamento de ingeniería química y tecnología del medio ambiente.
- HACH. (2000). *Manual de análisis de agua 2da edición*. Loveland, Colorado.
- Harris, D. (2012). *Análisis Químico cuantitativo 3ra edición*. Barcelona: Reverte.

-
- Harvey, D. (2002). *Química Análítica moderna*. España: Mc Graw-hill .
- IDEAM. (2007). *pH en agua por electometria*.
- Induanalisis. (2019). *DBO Y DQO*. Obtenido de https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/dbo_y_dqo_31.
- Kemmer, F. (1987). *The NALCO water Handbook*. McGraw-Hill, Inc.,.
- Larson, R. (1999). *The Structure and Rheology of complex fluids* . *Oxford University Press*.
- Metcalf & Eddy. (1977). *Quality Engineering Wastewater*. USA.
- METCALF-EDDY. (1977). *Tratamiento y depuración de aguas residuales*. Barcelona: Labor S.A.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015 p.62). *Resolución 0631 de 2015*. Bogotá
- Pinos, V. (2018). *Procesos de oxidación avanzada*.
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España.: Reverté S.A.
- Richards, A. (09 de Junio de 2021). *Tatamiento de aguas residuales y antiespumantes*. (Lankem) Recuperado el 04 de Enero de 2021, de <https://www.lankem.com/post/tratamiento-de-aguas-residuales-y-antiespumantes?lang=es>
- Romero Rojas, J. (2000). *Purificación del agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería.
- SENA y Ministerio de desarrollo económico. (1999). *Calidad del agua*. Bogotá: Ministerio de desarrollo económico.
- S. Felguera montajes y mantenimiento. (1997). *Manual de operación y mantenimiento de planta de tratamiento de aguas*.
- Servicios geograficos y ambientales enero-diciembre. (2020). *Informe de monitoreo ambiental*. Puerto Naré.
- Universidad pontificia Bolivariana. (2015). *Análisis del vertimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales de la central termoeléctrica la Sierra*. Medellín.
- Valencia Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: Mc Graw Hill p.30.
- Vesilind, P., & Davis, H. (1988). Using the capillary suction time device for characterizing sludge dewaterability. *Water Science and Technology*(20), 203-205.
- Villegas, R., & Letterman, R. (1976). Optimizing flocculator Power Input. *Journal of the environmental Divison*.

9 Recomendaciones

- Para el tratamiento de los lodos del proceso de clarificación y teniendo en cuenta que los análisis realizados por parte de la empresa, han confirmado que estos no son peligrosos, se propuso entonces deshidratar estos lodos en un lecho de secado de grava y arena ubicado en el exterior de la planta, para luego ser neutralizados con cal y finalmente dispuestos para ser enterrados o llevados a un relleno. Para esto se contempló tomar los lodos directamente de la tolva del sedimentador lamelar con una bomba de tornillo excéntrico y diseñar el sistema de bombeo homologando también la bomba con las especificaciones obtenidas en el anexo 10.1. El estudio hidráulico del sistema diseñado reveló ser sencillo de implementar y adecuado para la operación normal de la planta, además de ser un tratamiento simple y apropiado para el sistema existente.
- Como el estudio de eficiencia realizado al tanque separador API, obtuvo excelentes resultados de remoción de sólidos suspendidos, DQO, grasas y aceites, se concluye entonces que la estructura tiene el diseño adecuado para la separación esperada, y que la causa de la mala calidad de agua y arrastre de grasas es netamente operación. Por esta razón se hace necesario hacer un diagnóstico de las condiciones de operación, lapso de tiempo entre tratamientos y mantenimiento del equipo, ya que el arrastre tan alto de grasas implica condiciones no deseadas en cada uno de los subsistemas de la planta de tratamiento de agua residual industrial.
- Debido a que el vertido final de agua residual es una mezcla tanto de doméstica como industrial y aunque el caudal de la primera es más pequeño, se recomienda evaluar el funcionamiento óptimo del pozo séptico específicamente la aireación del filtro percolador.

Este arreglo consiste en modificar la entrada de aire colocando una tubería que entra por el respiradero de la loza que tapa la arqueta de control y sumergirla por el tubo por donde se desborda el agua residual doméstica ya tratada, la tubería deberá ser tan larga que alcance el punto de salida.

De esta forma se garantiza una mejor solución de aire que es necesario para que los microorganismos junto con los nutrientes del agua residual degraden la materia orgánica. El mecanismo de difusión será por tiro natural estableciendo diferencias de densidad entre el aire a la entrada y el aire a la salida. Para evaluar esta mejora se deberá analizar la demanda química de biológica de oxígeno a la salida sin hacer el cambio y

luego de haber implementado la mejora. Al inyectarse el aire en contracorriente se aumenta el tiempo de contacto con el agua descendiendo de la tubería perforada.

- Aunque el ensayo de antiespumantes realizado en el anexo 10.2 no fue concluyente para los químicos utilizados, se recomienda seguir haciendo pruebas con antiespumantes acuosos que no sean fuente de contaminación para el agua residual tratada como en el caso del antifoam MCM a base de grasas. Contar con un antiespumante es necesario para las condiciones en las cuales se usen detergentes o agentes tensoactivos para el lavado de superficies o equipos, pues dadas las altas condiciones de agitación por los difusores en el tanque de oxidación, se forma una alta cantidad de espuma que impide la operación normal de la planta.
- Con el fin de aumentar la capacidad de producción de la planta para disminuir los tiempos de operación de la planta, es interesante estudiar la posibilidad de aprovechar la estructura existente de la planta de agua potable que se encuentra fuera de servicio, cuyo tren de clarificación es igual que el de la planta de residual y está diseñado para un caudal de 7 m³/h. Por otra parte, considerar en caso de reponer el tanque de oxidación aumentar el tamaño de este para seguir garantizando los tiempos de residencia en caso de encontrar viable esta recomendación.
- Una vez adquirida la nevera para conservación de muestras, para lo monitoreos posteriores a la salida debe implementarse las muestras compuestas que son las mezclas de muestras simples recogidas en el mismo punto en distintos momentos, cuyo volumen en la composición es proporcional al caudal y que de cierta manera representan mejor el tratamiento en una operación continua.

Anexos

Anexo A Diseño de un sistema de bombeo para tratamiento de lodos en lechos de secado para la planta de tratamiento de agua residual industrial (Andreoli, Sperling, Fernandez, & Ronteltap, 2007), (Carthew, Goehring, & Van Teylingen, 1983), (Larson, 1999), (Metcalf & Eddy, 1977), (Vesilind & Davis, 1988)

Revisión de condiciones actuales:

- La planta cuenta con un sedimentador de placas inclinadas para la sedimentación de los flóculos formados en el proceso de clarificación aguas arriba.
- Los lodos residuales son almacenados en un foso ubicado en la parte exterior de la planta.
- La planta residual domestica cuenta con un lecho de secado de arena y grava, sin embargo, no cuenta con tubería de drenaje para los lixiviados.

Para el diseño del lecho de secado se asumirá una purga semanal con un caudal de 2 m³/h y concentración de lodos calculada de 12.6 % (calculada en el laboratorio)

Tabla 31.

Especificaciones del lecho de secado.

Geometría de la cama de secado	
Parámetro	Valor
Longitud (m)	2.74
Ancho (m)	1.20
Alto (m)	1.20
Área del lecho (m ²)	3.28
Profundidad del lodo aplicado (m)	0.2

Tiempo de llenado del lecho de secado	
Parámetro	Valor
Flujo de lodo (m ³ /h)	3 m ³ /h
% Composición del lodo (g/mL)	12.6%
Volumen del lecho	0.7 m ³
Tiempo de llenado (minutos)	15 minutos

Volumen total de arena requerida	
Parámetro	Valor
Profundidad de grava, m	0.3048
Profundidad de arena, m	0.2286
Vol. Arena, m ³	1
Vol. grava, m ³	0.75

En el área de secado es necesario instalar una tubería perforada para recoger los lixiviados para retornar a la balsa de recogidas de aguas residuales industriales.

Mantener la velocidad del caudal con un valor óptimo alrededor de 1 m/s. Al aumentar la velocidad, en general se incrementa la pérdida de carga. Por otra parte, una velocidad demasiado baja incrementa la sedimentación de las partículas y los costes de la inversión.

Las bombas más adecuadas para trasiego de fangos espesados son las de tornillo helicoidal.

▪ Propiedades

Para estimar la densidad del lodo obtenido en el sedimentador lamelar, se buscó información de lodos con características similares. Densidades reales aproximadas de 1.83 g/mL son reportadas para lodos con humedades del 83% aproximadamente.

Tabla 32.

Propiedades fisicoquímicas de lodos con 17% de concentración.

Propiedad	Valor
Viscosidad aparente, Pa*s	0.0385
Densidad real, kg/m ³	1830

DISEÑO DE LA LÍNEA

Figura 30. Diseño de la red de tubería para bombeo de lodos residuales.

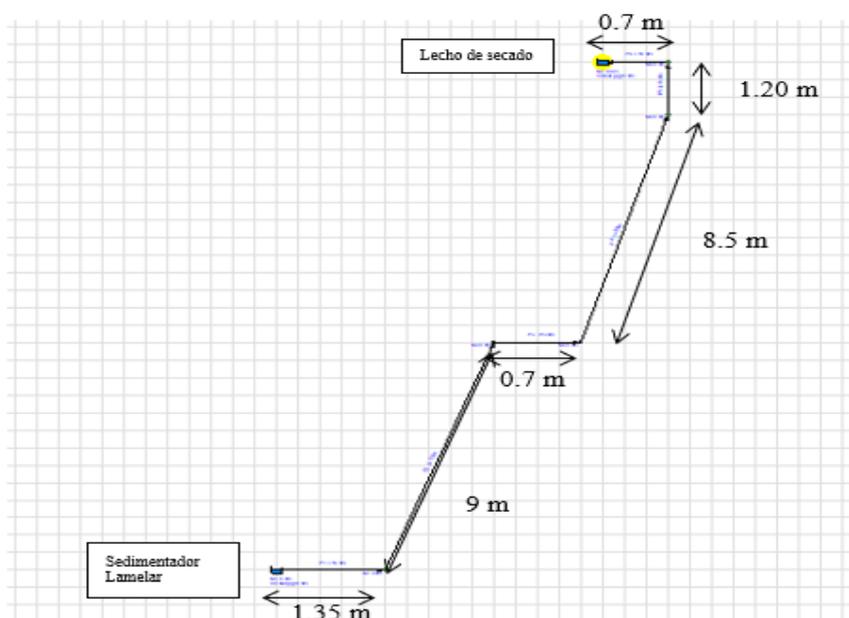


Figura 31.

Detalle de diseño de tubería en el exterior.

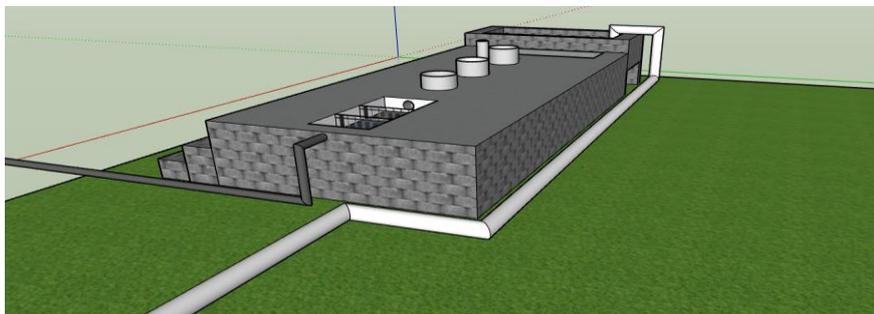


Figura 32.

Vista superior de detalle de tubería de bombeo.

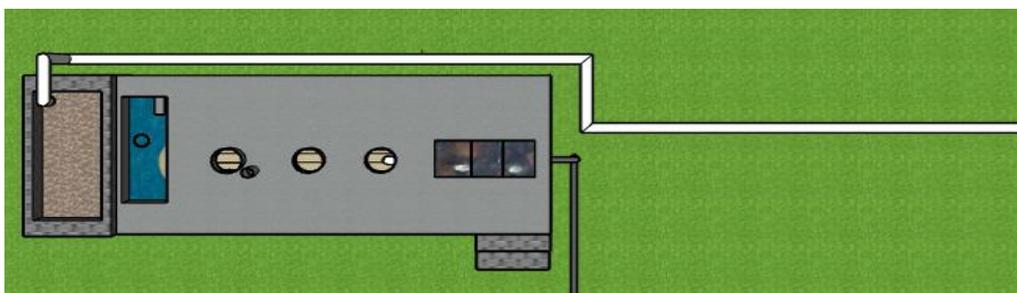


Figura 33.

Detalle red de tubería desde la tolva planta de tratamiento de agua residual.

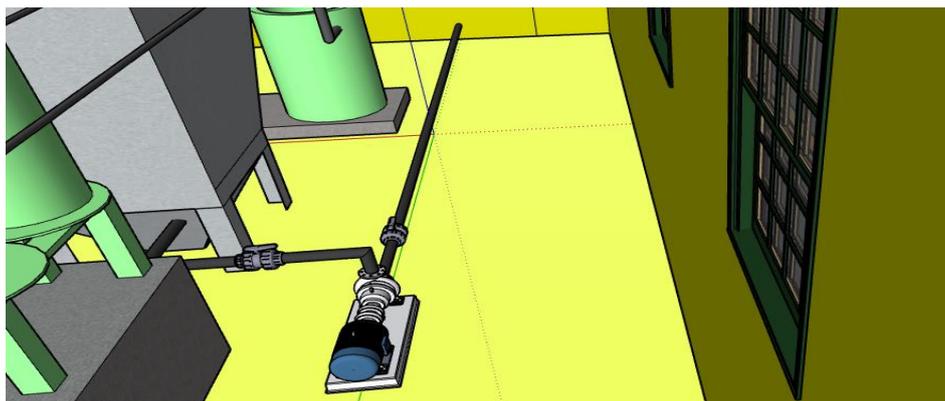
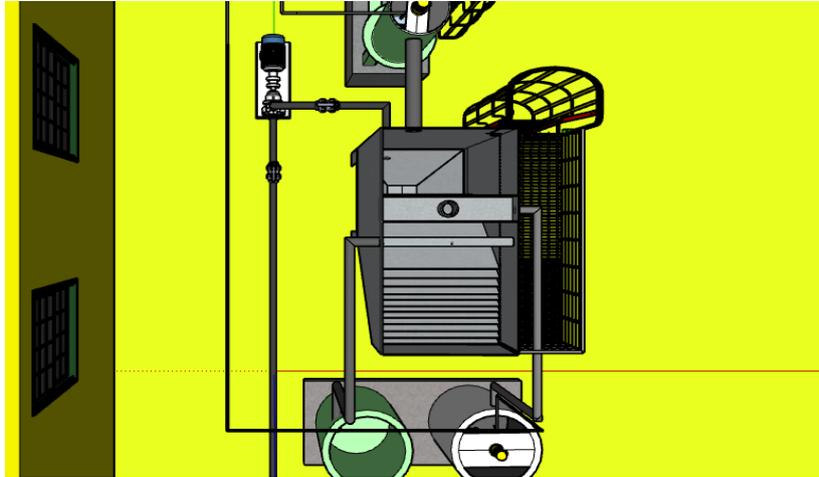


Figura 34.

Vista superior diseño de bombeo para lodos residuales.



- **Cálculo del diámetro**

Se calcula el diámetro de la tubería requerido.

El caudal estimado de 3 m³/h (8.33x10⁻⁴m³/s).

La velocidad aproximada en la tubería de 1-1.2 m/s.

Con estos datos se obtiene el diámetro de la tubería.

$$D = \sqrt{\frac{Q*4}{\pi}} = 0.032 \text{ cm Ecuación 17}$$

Se selecciona una tubería de PVC más próxima, siendo esta de 1 ¼” (32mm)

Recalculando la velocidad del fluido:

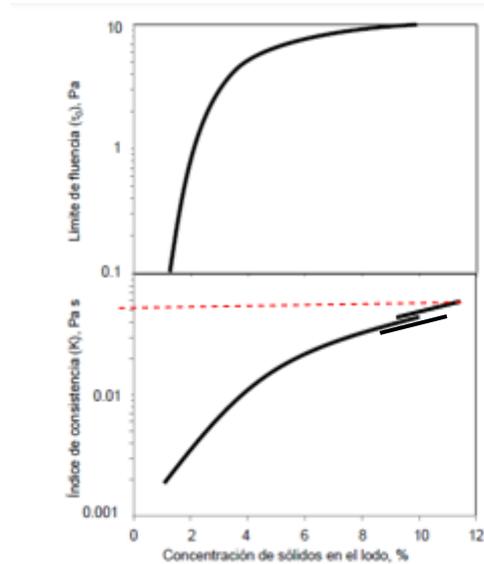
- **Cálculo de caída de presión**

Asumiendo que los lodos se comportan como un plástico de Bingham se calcula el límite de fluencia y el índice de consistencia en lodos utilizando los gráficos.

A partir del contenido en sólidos del 12% se obtiene que

Figura 35.

Límite de fluencia e índice de consistencia para fluidos que se comportan como plásticos de Bingham.



$$\tau_0 = 10 \text{ Pa}$$

$$K = 0.015 \text{ Pa s}$$

Calculando ahora los números de Reynolds y Hedstrom

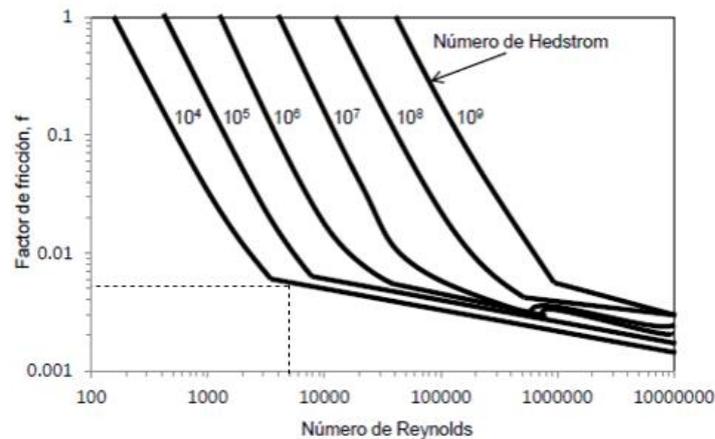
$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{1830 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1.035 \frac{\text{m}}{\text{s}} * (0.032\text{m})}{0.015 \frac{\text{kg}}{\text{m*s}}} = 4040$$

$$He = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{1830 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10 \frac{\text{kg}}{\text{m*s}^2} * (0.032\text{m})^2}{\left(0.015 \frac{\text{kg}}{\text{m*s}}\right)^2} = 83285$$

Utilizando la siguiente figura se obtiene el factor de fricción.

Figura 36.

Factor de fricción en función del número de Hedstrom y Reynolds.



$$f = 0.0014$$

Para el cálculo de la cabeza y la potencia de la bomba requerida se aplica la ecuación de Bernoulli entre los puntos a y b:

$$h_b = \frac{v_b^2}{2g} - \frac{v_a^2}{2g} + z_b - z_a + \frac{P_b - P_a}{\rho * g} + h_i \text{ Ecuación 18}$$

Para las pérdidas:

$$h_i = \sum h_{\text{tubería recta}} + h_{\text{accesorios}} \text{ Ecuación 19}$$

$$h_{\text{tubería recta}} = \frac{2 * f * L * v^2}{D * g} \text{ Ecuación 20}$$

$$h_{\text{accesorios}} = k * \frac{v^2}{2 * g} \text{ Ecuación 21}$$

Reemplazando en las ecuaciones:

El tramo de tubería hasta el lecho de secado es de 21.24 m, con 5 codos estándar de 90° (K=0.75)

$$h_{\text{tubería recta}} = \frac{2 * 0.0014 * 21.24 \text{ m} * \left(1.035 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0.032 \text{ m} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.2029 \text{ m}$$

$$h_{\text{accesorios}} = 5 * 0.75 * \frac{\left(1.035 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 2 * 2.2 * \frac{\left(1.035 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.444 \text{ m}$$

$$h_b = 1.2 \text{ m} + 0.65 \text{ m} = 1.85 \text{ m}$$

Para obtener la potencia necesaria

$$P_b = 1.85 \text{ m} * \left(\frac{8.333 * 10^{-4} \text{ m}^3}{\text{s}}\right) * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1830 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 28 \text{ W}$$

- **SELECCIÓN DE BOMBA** (Albosa, s.f.)

Las bombas de tornillo o de cavidad progresiva están diseñadas para el bombeo de productos viscosos de una manera fiable y segura, incorporando materiales de la mayor calidad y cumpliendo con los requerimientos técnicos más exigentes de las aplicaciones industriales y de tratamiento de fangos de distintas procedencias y características.

Estas bombas son idóneas tanto para caudales elevados como para caudales más reducidos. Su diseño en una, dos y cuatro etapas, permiten el bombeo de producto en diferentes condiciones de presión atmosférica.

El funcionamiento de este tipo de bombas está basado en el movimiento excéntrico del rotor o tornillo helicoidal dentro de un estator o parte estática, desplazándose así el producto bombeado de una forma continuada y constante hasta el punto de descarga de la bomba, formando una “cavidad progresiva”.

Tipo de bomba: Tornillo o de cavidad progresiva.

- **Homologación de bomba con el proveedor**

De acuerdo a los cálculos realizados y la selección de la bomba tipo tornillo helicoidal, se hizo la homologación de la bomba con el proveedor y la especificación técnica del equipo, así como las demás condiciones comerciales, se encuentran en la presente imagen.

Figura 37.

Especificación técnica y condiciones comerciales de la bomba seleccionada.

1. ITEM 1. BOMBA DE TORNILLO HELICOIDAL NETZSCH MODELO NM038BY01L06B	
BOMBA TIPO "NETZSCH/NEMO®" MODELO - NM038BY01L06B	
EJECUCION DE LA BOMBA	
Tirantes y Tuercas	Acero Inoxidable AISI 304
Carcasa	Hierro Fundido
Ejes	Acero Inoxidable AISI 420
Rotor	Acero Carbono SAE 1045 - cromado especial UM 20
Estator	Estator SBE
Articulaciones	Tipo pasador con sellado "SM" NBR
Sellado del eje	Sello Mecánico Simple - Opcional Sello Invertido Para Lodos
Sentido de rotación	Izquierda
Instalación	Horizontal
Conexión de succión	Brida DN 3" - perforación según ASME B 16.1 - 125 PSI - vertical
Conexión de descarga	Brida DN 2 1/2" - perforación según ASME B 16.1 - 125 PSI - horizontal.
Pintura	Color gris RAL 7031/ estator verde B60G plano de pintura nº 3
Performance	Ensayo estándar NDB - 114
CONDICIONES DE OPERACIÓN	
Fluido	Agua Lodos
Contenido de sólidos	12 %
Temperatura de bombeo	20 - 25°C
pH	No Informado.
Densidad	No Informado.
Viscosidad	100 cP.
Caudal de proyecto	(3 m³/h)
Caudal nominal	(3 m³/h)
Presión de succión	Positiva
Presión de descarga	2 - 4 bar
Revoluciones	149 Rpm
Potencia absorbida	0.941 kW
Tensión de alimentación	220 / 440 V



Anexo B Antiespumantes (Richards, 2021)

Las espumas son sistemas coloidales por la delgadez de las capas que rodean las burbujas de gas, éstas son de dimensiones coloidales o las capas tienen propiedades coloidales. Esta espuma es normalmente creada por movimientos mecánicos que generan la captura de aire o algún otro gas.

La acumulación de lodos y espuma son dos desafíos indeseables, complejos e impredecibles para muchas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Las causas de la formación de espuma en una planta de tratamiento de aguas residuales son variadas y pueden deberse a procesos químicos, biológicos o mecánicos. En los sistemas de tratamiento secundario, la espuma normalmente es causada por actividad biológica. También puede resultar de acción mecánica, contaminación química, tensioactivos en el afluente o algunos tratamientos con polímeros. Aparte de la causa, la formación de espuma en las áreas de tratamiento secundario y de efluentes finales puede provocar problemas ambientales, de salud y seguridad.

El enfoque tradicional consiste en dosificar continuamente antiespumante en el proceso a una velocidad que normalmente se ajusta para hacer frente a la espuma durante los picos de demanda. Sin embargo, esta cantidad es, en su mayoría, demasiado alta ya que en algunos sistemas hay poca o ninguna generación de espuma la mayor parte del tiempo.

Los antiespumantes a evaluar fueron los siguientes:

- **ANTIFOAM BS20**

Es un antiespumante de silicona soluble en agua, diseñado para controlar la espuma en sistemas acuosos en una gran variedad de procesos industriales, en un amplio rango de pH, temperaturas y gran variedad de sustancias formadoras de espuma. El agente activo es polidimetilsiloxano. Trabaja eficientemente a muy bajas concentraciones.

- **ANTIFOAM 9955 15R**

Es un agente desespumante compuesto de alcoholes grasos y derivados de ácidos grasos, agentes dispersantes y estabilizantes. Tiene un efecto estable en temperaturas entre 25°C a 40°C. Este puede ser diluido en agua y su dosificación es directamente a un punto de fácil aspersión.

- **ANTIFOAM MCM**

Es una combinación sinérgica de compuestos des espumantes y antiespumantes que pueden ser utilizado en múltiples procesos industriales. Controla la formación de espuma superficial y el aire atrapado. Su composición principal es aceites minerales, solventes orgánicos y aditivos.

- **Procedimiento:**

Se toma una muestra de agua con espuma de la planta residual y con un gotero se hace la adición del antiespumante, se espera un tiempo y se evalúa la acción del químico.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 33.

Resultados de la prueba de acción antiespumante.

Parámetro	BS20	9955 15R	MCM
Cantidad (mL)	0.83	0.83	0.54
Tiempo de acción	No hubo remoción	Mayor tiempo de acción	Inmediato
Estabilidad	No presenta	Regular	Buena
Observaciones	No logra remover la espuma	Alta cantidad de espuma remanente	Contamina la muestra con grasa

En la imagen a continuación puede observarse los resultados aparentes del ensayo.

Figura 38.

Test de jarras variando la concentración de floculante y manteniendo constante la dosis de coagulante.



En relación con la **Tabla 33.** y la imagen anterior, puede notarse que para las muestras de BS20 y 9955 15R no se logra remover la espuma y para el caso del MCM a base de aceite la muestra se contamina, pero se logra disminuir la cantidad de espuma. Con estos ensayos, si bien no se obtuvo resultados favorecedores para el proceso, se concluye que se debe seguir experimentando con otro tipo de antiespumantes a base de agua, minerales o agentes tensoactivos no iónicos, que sirva para las situaciones en las cuales se da formación de espuma en abundancia por causa de vertimientos contaminados con detergentes y agentes tensoactivos como el bioclean usado en la planta.