



Estimación de la dosificación de coagulante y floculante en la planta de tratamiento de agua residual A90 de Enka de Colombia

Maria Paula Rozo Charris

Informe de práctica empresarial presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniera Química

Asesor

Adriana Marcela Osorio Correa, Doctora en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Química

Medellín

2023

Cita

(Rozo Charris, 2023)

Referencia

Rozo Charris, M., (2023). *Estimación de la dosificación de coagulante y floculante en la planta de tratamiento de agua residual A90 de Enka de Colombia* [Presencial]Universidad de Antioquia, Medellín.

Estilo APA 7 (2020)



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio Cesar Saldarriaga

Jefe departamento: Lina Maria Gonzáles 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 proyecto está dedicado a todas las personas que estuvieron presentes durante mi desarrollo académico, por el apoyo recibido y por la empatía en todas las situaciones acontecidas. A Dios por darme las capacidades necesarias para completar mis metas y a mi familia por siempre estar presente con su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Gracias a la Universidad de Antioquia por haberme permitido formarme y aprender día a día, a la profesora Adriana Osorio por su compañía y sugerencias durante la elaboración de este proyecto, a la compañía Enka de Colombia que me permitió realizar mis prácticas académicas, a mis compañeros de prácticas que me enseñaron el valor de la empatía y el compañerismo laboral, a mi jefe Sergio Mesa por todo el conocimiento compartido y la ayuda durante la elaboración del proyecto.

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 8 |
| Abstract | 9 |
| Introducción | 10 |
| 1 Objetivos | 11 |
| 1.1 Objetivo general | 11 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 11 |
| 2 Marco teórico | 12 |
| 3 Metodología | 19 |
| 4 Resultados | 22 |
| 5 Análisis..... | 36 |
| 6 Conclusiones | 38 |
| Referencias | 40 |
| Anexos..... | 40 |
| Control de preparación de floculante | 40 |
| Control de cambio y concentración de coagulante y floculante..... | 42 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Parámetros de cumplimiento resolución 0631 Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible (Resolución 631 de 2015, 2021). | 17 |
| Tabla 2. Control de preparación floculante. | 19 |
| Tabla 3. Control de cambio y concentración de coagulante y floculante. | 20 |
| Tabla 4. Variables o factores para el diseño de experimentos. | 20 |
| Tabla 5. Diseño de experimentos factorial 2^4 | 21 |
| Tabla 6. Definición de niveles (valores) para cada factor del DOE. | 22 |
| Tabla 7. Resultados experimentales del DOE. | 23 |
| Tabla 8. Comparación de turbidez a distintos pH. | 26 |
| Tabla 9. Resultados procedimiento de escalamiento. | 27 |
| Tabla 10. Ahorro de coagulante al disminuir el pH. | 29 |
| Tabla 11. Ahorro de floculante al disminuir el pH. | 29 |
| Tabla 12. Comparación de precios de químicos para cambios de flujo en el DAF. | 32 |
| Tabla 13. Costo por hora de coagulante y floculante según las variaciones del flujo del DAF. | 33 |
| Tabla 14. Cotización de equipos faltantes para instalar la línea de control | 34 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Diagrama de bloques PTAR A90. Elaboración propia..... | 15 |
| Figura 2. Diagrama de Pareto de los efectos, software Minitab. | 24 |
| Figura 3. Gráfica de probabilidad normal de los efectos, software Minitab. | 24 |
| Figura 4. Gráfica de probabilidad normal de turbidez | 25 |
| Figura 5. Gráficas de interacción para resultante, software Minitab. | 25 |
| Figura 6. Gráfica de efectos principales de la resultante, software Minitab. | 26 |
| Figura 7. Muestras tomadas a lo largo del procedimiento. | 28 |
| Figura 8. Lazo de control de flujo para dosificación de coagulante y floculante. Elaboración propia..... | 30 |
| Figura 9. Sensor-transmisor de flujo. Figura 10. Bomba coagulante. Figura 11. Bomba de floculante..... | 34 |
| Figura 12. Comparación de Hipótesis planteadas. | 35 |
| Figura 13. Comparación de Hipótesis planteadas. | 36 |
| Figura 14. Costo de operación de Coagulante según la concentración..... | 37 |
| Figura 15. Costo de operación de Floculante según la concentración. | 37 |

Siglas, acrónimos y abreviaturas

| | |
|-------------|--|
| APA | American Psychological Association |
| ppm | Partes por millón |
| PTAR | Planta de tratamiento de agua residual |
| DAF | Flotación de aire disuelto |
| DOE | Diseño de experimentos |
| UdeA | Universidad de Antioquia |

Resumen

El tratamiento de aguas residuales es esencial para el funcionamiento adecuado de las empresas. Enka de Colombia se enfrenta al desafío de gestionar eficientemente los residuos hídricos de sus plantas productivas. Durante la elaboración de este proyecto, se identificaron diversos aspectos a mejorar en el proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales, PTAR A90, centrándose en la clarificación final del agua y en el desempeño del equipo principal, el sistema de flotación por aire disuelto, DAF. Para abordar esta situación, se estableció el objetivo principal de estimar la dosificación de coagulante y floculante mediante un diseño de experimentos que evalúe cambios en las condiciones de operación y la generación de un sistema de control que mejorará el uso de cada químico según el trabajo de las bombas. Además, se descubrió que reducir el pH e implementar la línea de control propuesta genera ahorros económicos y de productos químicos. Por lo tanto, se concluyó que era necesario implementar las dos estrategias propuestas para mejorar la clarificación primaria del agua y lograr un ahorro eficiente de los recursos económicos requeridos para la operación de la PTAR A90.

Palabras clave: PTAR A90, Tratamiento de agua residual, Coagulante, Floculante, Clarificación de agua, ahorro.

Abstract

The treatment of wastewater is essential for the proper functioning of companies. Enka de Colombia faces the challenge of efficiently managing the water waste from its production plants. During the development of this project, various aspects were identified for improvement in the wastewater treatment plant process, specifically the final water clarification and the performance of the main equipment, the dissolved air flotation (DAF) system. To address this situation, the main objective was established to estimate the dosage of coagulant and flocculant through a design of experiments that evaluates changes in operating conditions and the creation of a control system that improves the use of each chemical based on pump operation. Additionally, it was discovered that reducing the pH and implementing the proposed control line generates economic and chemical savings. Therefore, it was concluded that implementing the two proposed strategies was necessary to improve the primary water clarification and achieve efficient savings of the economic resources required for the operation of the PTAR A90.

Keywords: PTAR A90, Wastewater treatment, coagulant, flocculant, water clarification, savings.

Introducción

Enka de Colombia es una compañía con múltiples procesos de producción como son la obtención de fibras y filamentos por medio del reciclaje de botellas PET donde en primera instancia se debe realizar un lavado exhaustivo a las botellas que son utilizadas en el proceso, por esta razón y por la necesidad de tener una fuente hídrica constante, Enka tiene permiso de captación de agua de la quebrada El Salado de Girardota lo que determina el retornar de un porcentaje de agua captada por ley (Resolución 631 de 2015, 2021).

Actualmente Colombia tiene regulaciones para los efluentes que desembocan en fuentes hídricas del país (Resolución 631 de 2015, 2021), creando la necesidad de generar un buen tratamiento de agua residual en cada compañía, por esto, Enka de Colombia tiene dos plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) para cada una de sus plantas de reciclaje (A90 y A97).

La planta de reciclaje A90 es una de las plantas más antiguas en la compañía por lo que su PTAR presenta varias fallas por mantenimiento, falta de cuidado y paso de los años, esta PTAR está constituida por un sistema DAF (flotación por aire disuelto) en el cual se retiran los lodos (sólidos que se deben retirar del agua), un reactor biológico anaerobio donde los microorganismos presentes generan un proceso de metanización y consumo de la carga orgánica que se encuentra en el agua, obteniendo así agua más limpia cerca de los lineamientos de pH, demanda química de oxígeno (DQO), color y cantidad de sólidos presentes en el agua.

El proceso en el DAF funciona gracias a la adición de coagulante y floculante los cuales son químicos que tienen como fin formar flocs de lodos para facilitar su retiro mediante los remos del sistema, en la dosificación de estos químicos se encontraron problemas por falta de control y automatización en el proceso ya que se dosifica el mismo caudal sin tener en cuenta cambios en el sistema, por esto, el proyecto tiene como objetivo principal estimar la dosificación de coagulante y floculante de la PTAR A90 teniendo en cuenta distintos factores como el caudal presente en el proceso, el funcionamiento de las bombas dosificadoras y el tratamiento manual que tienen los operarios en turno, con esto se pretende generar las condiciones adecuadas para la dosificación de los químicos y crear un plan de automatización que permita la estabilización del proceso en línea.

Teniendo en cuenta que la estimación de coagulante y floculante no se puede plantear de forma constante debido a que depende de la calidad del agua y la turbidez de entrada al proceso se realizó un diseño de experimentos con el fin de estimar que condiciones optimizan el uso de

químicos teniendo un rango de concentración de coagulante y floculante adquirido según la toma de datos constantes y realizando la variación de pH. También, se analiza el desfase de caudal de coagulante y floculante que se tiene en las bombas solicitado la acción por parte del área de producción con el fin de tener cilindros aforadores que permitan la regulación constante del caudal por parte del operario. Con la recopilación de información y la evidencia que se ha tenido durante el proyecto, se plantea un plan de control con el objetivo principal de regulación de caudal en las bombas dosificadoras según el caudal del DAF, con esto se encontró la necesidad de ejecutar prontamente el plan de control y la disminución de condición de operación de pH para obtener una mejor clarificación en el proceso según lo hallado en el diseño de experimentos.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Estimar la dosificación de coagulante y floculante en la planta de tratamiento de agua residual A90 de Enka de Colombia

1.2 Objetivos específicos

- Definir la dosificación de coagulante y floculante a escala de laboratorio.
- Analizar las condiciones actuales de operación de las bombas de dosificación de coagulante y floculante.
- Proponer la dosificación y condiciones adecuadas de operación de las bombas.
- Generar un plan de automatización de las bombas de dosificación de coagulante y floculante al sistema de flotación por aire disuelto, DAF.

2 Marco teórico

Términos de uso común en la operación de la planta de tratamiento de agua residual

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales. (RAS 0330, 2017).

Agua residual: Es el residuo líquido generado en los diferentes procesos productivos, los cuales se caracterizan por su alta carga de residuos contaminantes con alto contenido de carga orgánica y sólidos. (BBVA, 2022)

Carga orgánica: Es la materia orgánica disuelta en el agua residual, lo que se expresa en el flujo másico de materia orgánica por unidad de volumen, es decir, como la velocidad a la que se suministra al sistema la materia orgánica disuelta (kg DQO/ m³). Entre mayor sea la carga orgánica, mayor será la relación alimento: microorganismos, y más rápido crecerán las bacterias del sistema que consumen el sustrato. (ReyesLara & Reyes-Mazzoco, 2009)

Reactor: Es un recipiente donde ocurre una o varias reacciones a partir de procesos biológicos realizados por microorganismos. (Enka de Colombia, 2018)

Lodo: Suspensión de un sólido en un líquido proveniente de los procesos de potabilización o del tratamiento de aguas residuales municipales. (RAS 0330, 2017). Este lodo es aquel que se busca retirar antes de ingresar al reactor.

Lodo anaerobio: Es el lodo usado como inóculo para el arranque de procesos biológicos anaerobios, este lodo se puede cultivar localmente en el reactor y es el encargado de consumir la carga orgánica suministrada. Este lodo que también se conoce como los microorganismos del reactor y no requieren oxígeno para crecer. (Enka de Colombia, 2018)

pH: Es la medida de la acidez y la basicidad del agua residual. Si el agua tiene un PH de 7 es neutro; si es menor de 7 es ácido y si es mayor de 7 es básico. Temperatura: Medida de calentamiento y enfriamiento de una sustancia determinada por medio de un termómetro.

DQO: Demanda química de oxígeno, es la cantidad de oxígeno que necesita un agente químico para convertir la materia orgánica en agua y gas carbónico, indica el grado de contaminación que puede contener el agua residual. (Enka de Colombia, 2018).

DBO: Demanda biológica de oxígeno, es la cantidad de oxígeno necesaria por los microorganismos para convertir la materia orgánica en agua, gas carbónico y bacterias. (Enka de Colombia, 2018).

Alcalinidad: Es la capacidad del agua para neutralizar ácidos debido a los carbonatos y bicarbonatos presentes en ella, expresada en miligramos por litro de carbonato de calcio equivalente. (Enka de Colombia, 2018).

Sedimentación: Es la remoción de partículas más pesadas que el agua por acción de la fuerza de gravedad. Mediante este proceso se eliminan materiales en suspensión empleando un tiempo de retención adecuado. (Enka de Colombia, 2018)

Coagulante: Materiales químicos que se adicionan al agua para lograr la descarga de todas las partículas coloidales dando origen a la formación de medios más grandes (flóculos), que sedimentan más rápidamente. (Flórez, 2010). En este proceso se utiliza Hidroxicloruro de Aluminio como coagulante.

Floculante: Sustancia química que se adiciona al agua luego de agregar coagulante para formar sólidos suspendidos. (Flórez, 2010).

Sólidos sedimentables: Fracción del total de sólidos en el agua que se separan de la misma por acción de la gravedad, durante un periodo determinado y unas condiciones preestablecidas. (Cárdenas, 2008).

Sólidos disueltos: Fracción del total de sólidos en el agua que pasan a través de un papel de filtro estandarizado. Incluyen la materia coloidal, los compuestos orgánicos solubles e inorgánicos (sales). (Cárdenas, 2008).

Sólidos en suspensión: Fracción del total de sólidos en el agua que pueden ser separados por filtración a través de un papel de filtro estandarizado. Incluyen los sólidos volátiles (materia orgánica). (Cárdenas, 2008).

Prueba de jarras: Es un ensayo a escala laboratorio indispensable al momento de implementar procesos fisicoquímicos para la clarificación de agua, siendo una herramienta valiosa y confiable en la selección productos químicos, cantidades y dosificaciones requeridas en este tipo de aplicaciones. Consiste en tener muestras de volumen conocido del agua a clarificar y se debe adicionar a cada frasco (generalmente son 4) una concentración conocida de coagulante y floculante, variando en cada recipiente la concentración de coagulante para así determinar que concentraciones se deben usar para clarificar el agua en el proceso real.

En cuanto el proceso real, se debe tener en cuenta que, al hablar de agua residual, hay un proceso preliminar de donde se capta el agua se trata en la planta de tratamiento, en este caso la PTAR A90 trata el agua con la que se lavan las botellas en la planta de reciclaje PET A90, por lo que esta agua contiene un gran porcentaje de sólidos (tapas y etiquetas de las botellas) y un pH muy alto (12) debido a que en este proceso se adiciona soda cáustica y en ocasiones detergente.

El proceso que se lleva a cabo se puede evidenciar en la figura 1.

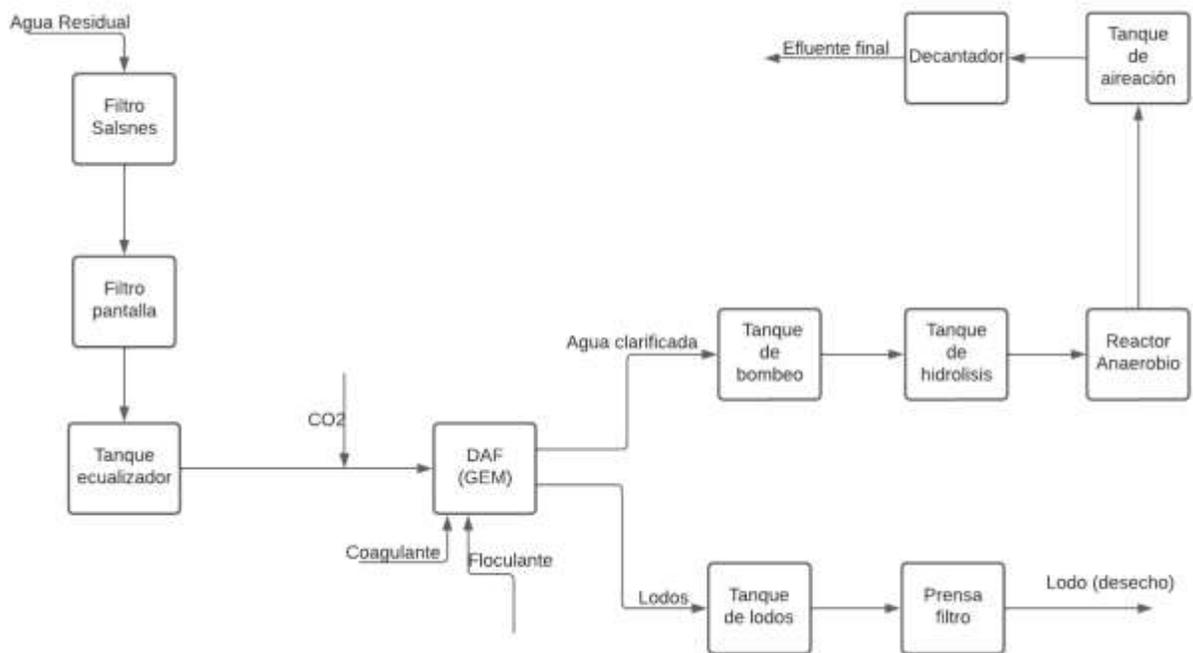


Figura 1. Diagrama de bloques PTAR A90. Elaboración propia

El agua ingresa al proceso preliminar de tratamiento de agua con un pH de 12-14, con una turbidez y DQO bastante alta, por lo que el tratamiento se encarga de disminuir el pH, retirar en lo posible todos los sólidos suspendidos y de llevar el agua a cumplimiento de normas de vertimiento.

Filtro Salsnes: Este filtro se encuentra en la planta de reciclaje A90 y tiene como fin eliminar sólidos suspendidos residuos de tapas y etiquetas. Utiliza paneles filtrantes cubiertos con una malla fina que retiene los sólidos mientras permite el paso del agua. Los sólidos se acumulan en los paneles y se limpian periódicamente mediante un raspado automático. El filtro mejora la calidad del agua residual antes de su tratamiento adicional y reduce los problemas de obstrucción y mantenimiento en la planta.

Filtro pantalla: Es el segundo filtro que se encuentra antes del tratamiento de agua, retiene sólidos de un tamaño específico a través de una malla mientras que el agua más limpia puede seguir con el proceso.

Tanque ecualizador: Este es el tanque de recibimiento del agua que tiene como propósito mantener una agitación constante con el fin de evitar que los sólidos puedan decantar y quedar reposados en el fondo.

Inyección de CO₂: La inyección de dióxido de carbono (CO₂) se utiliza para reducir el pH del agua. El CO₂ disuelto en el agua reacciona para formar ácido carbónico, lo que reduce el pH. En este caso en específico se lleva el agua hasta un pH neutro (7) y de esta forma se continua el proceso de tratamiento en el DAF.

DAF: El equipo de flotación por aire disuelto es utilizado para eliminar sólidos suspendidos, grasas y aceites del agua. Se inyecta aire en el agua residual, formando burbujas de aire que se adhieren a las partículas y las hacen flotar hacia la superficie. Las partículas flotantes o lodos se recogen y se eliminan dejando el agua clarificada continuar con el proceso.

Inyección de Coagulante y Floculante: Para la formación de lodos en el DAF es necesario agregar coagulante y floculante para unir los sólidos suspendidos y poder retirarlos mediante la flotación por aire disuelto. La adición de estos químicos depende de la calidad inicial del agua y se dosifican según los resultados de la prueba de jarras. El coagulante se adiciona en un rango de 700-1400ppm y el floculante en un rango de 30-100ppm.

Tanque de lodos: En este tanque se recolectan los lodos (desechos) que se separan en el proceso de flotación por aire disuelto.

Prensa filtro: Este equipo se encarga de realizar una separación solido-liquido mediante la filtración a presión, el lodo se somete a cierta presión y se deshidrata generando un lodo seco con el cual se puede hacer la disposición final.

Tanque de bombeo: Ha este tanque ingresa el agua clarificada del proceso de flotación por aire disuelto y se retiene según este el nivel del tanque de hidrolisis.

Tanque de hidrólisis: También conocido como TH, este tanque se encarga de generar una homogenización del agua clarificada mediante una bomba que genera agitación constante.

Reactor anaerobio: Es el tanque principal del proceso ya que en este se realiza la mayor remoción de materia orgánica, es un reactor biológico donde los microorganismos se alimentan de la carga orgánica (desechos) presente en el agua con el fin de disminuir sólidos disueltos, DQO y turbidez.

Tanque de aireación: Este tanque tiene como fin oxidar los sulfuros presentes en el agua que generan mal olor convirtiéndolos a sulfatos, eso se realiza teniendo aireación constante en el tanque.

Decantador: Retiene los lodos que vienen presentes en el agua que no se alcanzaron a retener en el reactor, en este equipo, los lodos sedimentan y el agua queda en la superficie. El efluente de este tanque debe cumplir con las normas de vertimiento.

Normas de vertimiento: Para poder verter cualquier efluente a una fuente hídrica como un río se debe cumplir la regulación del ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible precisamente la resolución 0631, y teniendo en cuenta del tipo de efluente se deben cumplir las normas, en este caso, Enka se encuentra en el sector de actividades asociadas con servicios y otras actividades en reciclaje de materiales plásticos y similares por lo que se deben cumplir los parámetros que se ilustran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de cumplimiento resolución 0631 Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible (Resolución 631 de 2015, 2021).

| PARAMETRO | UNIDADES | GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA | TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS | RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS Y SIMILARES | RECICLAJE DE TAMBORES |
|---|---------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------|
| Generales | | | | | |
| pH | Unidades de pH | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L O ₂ | 200,00 | 2.000,00 | 500,00 | 1.000,00 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/L O ₂ | 150,00 | 800,00 | 200,00 | 600,00 |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | mg/L | 100,00 | 400,00 | 200,00 | 150,00 |
| Sólidos Sedimentables (SSED) | mL/L | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 1,00 |
| Grasas y Aceites | mg/L | 20,00 | 50,00 | 20,00 | 20,00 |
| Compuestos Semivolátiles Fenólicos | mg/L | | Análisis y Reporte | | |
| Fenoles | mg/L | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Formaldehído | mg/L | | | Análisis y Reporte | |
| Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |

Como se evidencia en la tabla 4290 se debe cumplir con un pH de 6 a 9, DQO menor a 500mg/L O₂, DBO menor a 200 mg/L O₂, SST de 200 mg/L, SSED de 1mg/L, grasas y aceites 20mg/L y demás parámetros que se deben cumplir para evitar contaminación del río y multas por incumplimiento.

3 Metodología

Para el desarrollo del proyecto se tuvo un enfoque mixto ya que se debe tener en cuenta que la dosificación de coagulante y floculante no podrá ser específica o fija debido al cambio de agua en el proceso.

Inicialmente para analizar el trabajo que realizaban las bombas dosificadoras, se generaron visitas constantes a la PTAR con el fin de evidenciar posibles mejoras que se pueden emplear para un trabajo oportuno en cada una de ellas, se evaluó con qué frecuencia se cambia el caudal para ajustar la clarificación del agua y se realizaron aforos para confirmar el caudal que se muestra en el panel de cada bomba, así, se pudo identificar las condiciones actuales en las que se encuentran las bombas y el uso que le dan los operarios.

Por otro lado, se recopilaron datos sobre la dosificación y preparación que se realiza para floculante y coagulante, la tabla 2 tiene como fin medir el consumo de floculante, generando un control de preparación y consumo en cada uno de los tanques donde se prepara el floculante, el formato se llena con la fecha y la hora en la que se prepara el tanque y se debe digitar a que fecha y hora se consume en totalidad todo el tanque, así se puede determinar en cuanto tiempo se gastan 4.73kg de floculante disueltos en el tanque de 250galones.

Tabla 2. Control de preparación floculante.

| Tanque de floculante | Fecha y Hora | |
|----------------------|--------------|---------|
| | Preparación | Consumo |
| 1 | | |
| 2 | | |
| 1 | | |
| 2 | | |

El segundo formato que se tiene es para determinar las dosis que se utiliza durante el turno, ya que el agua en un solo turno puede requerir cambio de dosis de coagulante y floculante, también, sirve para generar un control sobre el caudal que se está digitando en las bombas ya que así podemos observar si el caudal corresponde a la concentración encontrada en las pruebas de jarras.

Tabla 3. Control de cambio y concentración de coagulante y floculante.

| | Turno | Fecha | Caudal GEM | Coagulante | | Floculante | |
|--------|-------|-------|------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | | | ppm | Caudal bomba | ppm | Caudal bomba |
| Inicio | 1 | | | | | | |
| Cambio | | | | | | | |
| Inicio | 2 | | | | | | |
| Cambio | | | | | | | |
| Inicio | 3 | | | | | | |
| Cambio | | | | | | | |

Con la información recopilada en el segundo formato se buscó encontrar las dosificaciones más frecuentes planteando así los rangos en los que trabaja el proceso, con el objetivo de realizar un diseño de experimentos que ayude a estimar a escala laboratorio la mejor dosificación de coagulante y floculante.

En este diseño de experimentos se tuvieron en cuenta otras variables que pueden afectar el proceso como lo es el pH y la cantidad de sólidos grandes que no se retienen en el filtro inicial que tiene la PTAR. En la tabla 4 se establecen las variables para el DOE.

Tabla 4. Variables o factores para el diseño de experimentos.

| | Coagulante (ppm) | Floculante (ppm) | pH | Filtración |
|-------|------------------|------------------|----|------------|
| Rango | Alto | Alto | 7 | Si |
| | Bajo | Bajo | 6 | No |

Se planteó el experimento a distintos pH con el fin de encontrar el pH óptimo al que se podría trabajar en el proceso, reduciendo la dosificación de coagulante y floculante, para esto, la muestra de agua que se toma para el experimento debe ser del punto de entrada al GEM teniendo en cuenta que esta muestra tenía un pH de 7 gracias a la adición de CO₂ y contaba con una cantidad

significativa de sólidos que no pudieron ser filtrados en el proceso anterior (reciclaje). Para modificar las condiciones actuales del agua (pH de 7 y sin filtración) se utilizó ácido clorhídrico para disminuir el pH cuando fuera requerido y un filtro con malla de aproximadamente 0.5mm.

Luego de definir los rangos del diseño de experimentos, con ayuda del software minitab se plantearon las corridas mínimas para un diseño factorial de 4 factores cada uno con 2 niveles.

Tabla 5. Diseño de experimentos factorial 2⁴

| OrdenEst | OrdenCorrida | PtCentral | Bloques | Coagulante (ppm) | Floculante (ppm) | pH | Filtración |
|----------|--------------|-----------|---------|------------------|------------------|----|------------|
| 13 | 1 | 1 | 1 | Bajo | Bajo | 7 | No |
| 3 | 2 | 1 | 1 | Bajo | Alto | 6 | Si |
| 10 | 3 | 1 | 1 | Alto | Bajo | 6 | No |
| 5 | 4 | 1 | 1 | Bajo | Bajo | 7 | Si |
| 9 | 5 | 1 | 1 | Bajo | Bajo | 6 | No |
| 16 | 6 | 1 | 1 | Alto | Alto | 7 | No |
| 6 | 7 | 1 | 1 | Alto | Bajo | 7 | Si |
| 12 | 8 | 1 | 1 | Alto | Alto | 6 | No |
| 11 | 9 | 1 | 1 | Bajo | Alto | 6 | No |
| 4 | 10 | 1 | 1 | Alto | Alto | 6 | Si |
| 2 | 11 | 1 | 1 | Alto | Bajo | 6 | Si |
| 8 | 12 | 1 | 1 | Alto | Alto | 7 | Si |
| 1 | 13 | 1 | 1 | Bajo | Bajo | 6 | Si |
| 14 | 14 | 1 | 1 | Alto | Bajo | 7 | No |
| 7 | 15 | 1 | 1 | Bajo | Alto | 7 | Si |
| 15 | 16 | 1 | 1 | Bajo | Alto | 7 | No |

Realizando las 16 corridas se tomó la turbidez en cada una de ellas siendo esta la resultante que ayudaría a determinar qué características se pueden elegir como óptimas ya que teniendo estas, se realizó el experimento en la planta con el fin de comparar la validez del ensayo.

Al estimar la cantidad de coagulante y floculante se obtuvo el costo por mes que se tendría con las nuevas condiciones de trabajo con el fin de comparar los costos actuales con los futuros.

Con este procedimiento se pudieron cumplir a cabalidad los tres primeros objetivos ya que mediante el análisis de resultados se pudo determinar la dosificación y las condiciones adecuadas para la operación de las bombas.

Por otro lado, para proponer un plan de automatización se inició por el diagrama del proceso y los lazos de control que se requieren para el control óptimo de las bombas evitando un consumo excesivo de coagulante y floculante, luego de esto se realizaron las debidas cotizaciones de sensores/indicadores y equipos de PLC necesarios para que el sistema funcione debidamente.

4 Resultados

Realizando el debido seguimiento al proceso se encontró que los operarios deben cambiar la dosificación de químicos dos o tres veces por turno para que el agua se mantenga clarificada, estas dosificaciones se mantienen en un rango de 600-1000ppm para el coagulante y 30-60ppm de floculante, esto se puede observar en el anexo 2 que corresponde a la tabla 3 diligenciada por el operario en turno, estos rangos son los que se han tomado para realizar el diseño de experimentos, por lo que la tabla 6 se complementa de la siguiente forma

Tabla 6. Definición de niveles (valores) para cada factor del DOE.

| OrdenEst | OrdenCorrida | PtCentral | Bloques | Coagulante (ppm) | Floculante (ppm) | pH | Filtración |
|----------|--------------|-----------|---------|------------------|------------------|----|------------|
| 13 | 1 | 1 | 1 | 600 | 30 | 7 | No |
| 3 | 2 | 1 | 1 | 600 | 60 | 6 | Si |
| 10 | 3 | 1 | 1 | 1000 | 30 | 6 | No |
| 5 | 4 | 1 | 1 | 600 | 30 | 7 | Si |
| 9 | 5 | 1 | 1 | 600 | 30 | 6 | No |
| 16 | 6 | 1 | 1 | 1000 | 60 | 7 | No |
| 6 | 7 | 1 | 1 | 1000 | 30 | 7 | Si |
| 12 | 8 | 1 | 1 | 1000 | 60 | 6 | No |
| 11 | 9 | 1 | 1 | 600 | 60 | 6 | No |
| 4 | 10 | 1 | 1 | 1000 | 60 | 6 | Si |
| 2 | 11 | 1 | 1 | 1000 | 30 | 6 | Si |
| 8 | 12 | 1 | 1 | 1000 | 60 | 7 | Si |
| 1 | 13 | 1 | 1 | 600 | 30 | 6 | Si |
| 14 | 14 | 1 | 1 | 1000 | 30 | 7 | No |
| 7 | 15 | 1 | 1 | 600 | 60 | 7 | Si |
| 15 | 16 | 1 | 1 | 600 | 60 | 7 | No |

Teniendo en cuenta las corridas planteadas por el software Minitab, se realizan los 16 experimentos y se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 7. Resultados experimentales del DOE.

| OrdenEst | OrdenCorrida | PtCentral | Bloques | Coagulante (ppm) | Floculante (ppm) | pH | Filtración | Turbidez |
|----------|--------------|-----------|---------|------------------|------------------|----|------------|----------|
| 13 | 1 | 1 | 1 | 600 | 30 | 7 | No | 579 |
| 3 | 2 | 1 | 1 | 600 | 60 | 6 | Si | 183 |
| 10 | 3 | 1 | 1 | 1000 | 30 | 6 | No | 133 |
| 5 | 4 | 1 | 1 | 600 | 30 | 7 | Si | 457 |
| 9 | 5 | 1 | 1 | 600 | 30 | 6 | No | 146 |
| 16 | 6 | 1 | 1 | 1000 | 60 | 7 | No | 221 |
| 6 | 7 | 1 | 1 | 1000 | 30 | 7 | Si | 247 |
| 12 | 8 | 1 | 1 | 1000 | 60 | 6 | No | 149 |
| 11 | 9 | 1 | 1 | 600 | 60 | 6 | No | 194 |
| 4 | 10 | 1 | 1 | 1000 | 60 | 6 | Si | 138 |
| 2 | 11 | 1 | 1 | 1000 | 30 | 6 | Si | 153 |
| 8 | 12 | 1 | 1 | 1000 | 60 | 7 | Si | 187 |
| 1 | 13 | 1 | 1 | 600 | 30 | 6 | Si | 155 |
| 14 | 14 | 1 | 1 | 1000 | 30 | 7 | No | 278 |
| 7 | 15 | 1 | 1 | 600 | 60 | 7 | Si | 346 |
| 15 | 16 | 1 | 1 | 600 | 60 | 7 | No | 284 |

Según los resultados de turbidez obtenidos, el software genera las siguientes respuestas evidenciando los factores significativos, una distribución normal y las combinaciones que pueden representar baja turbidez.

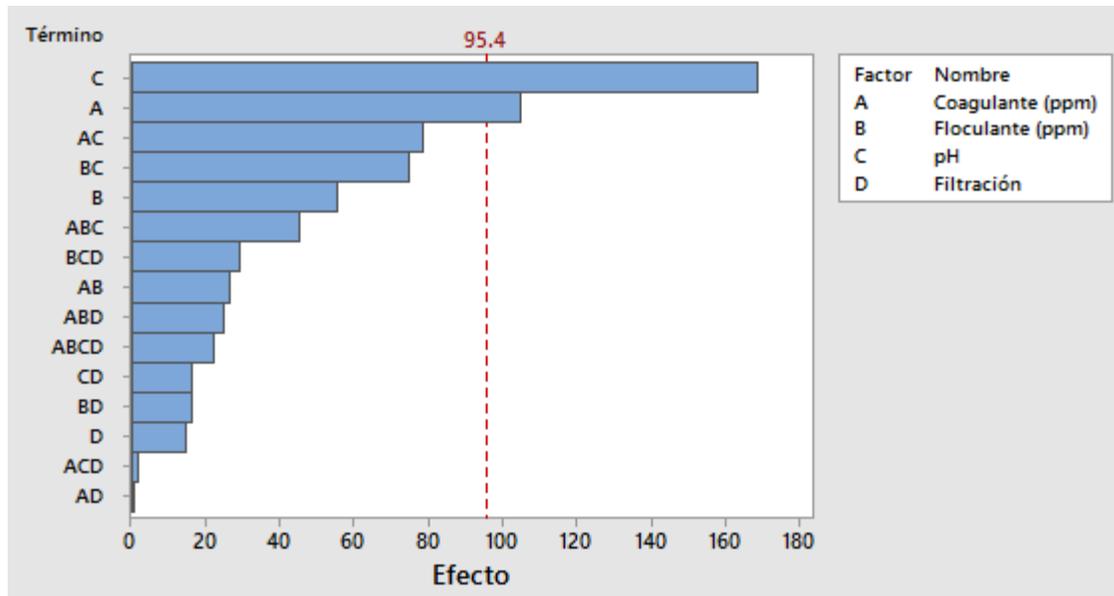


Figura 2. Diagrama de Pareto de los efectos, software Minitab.

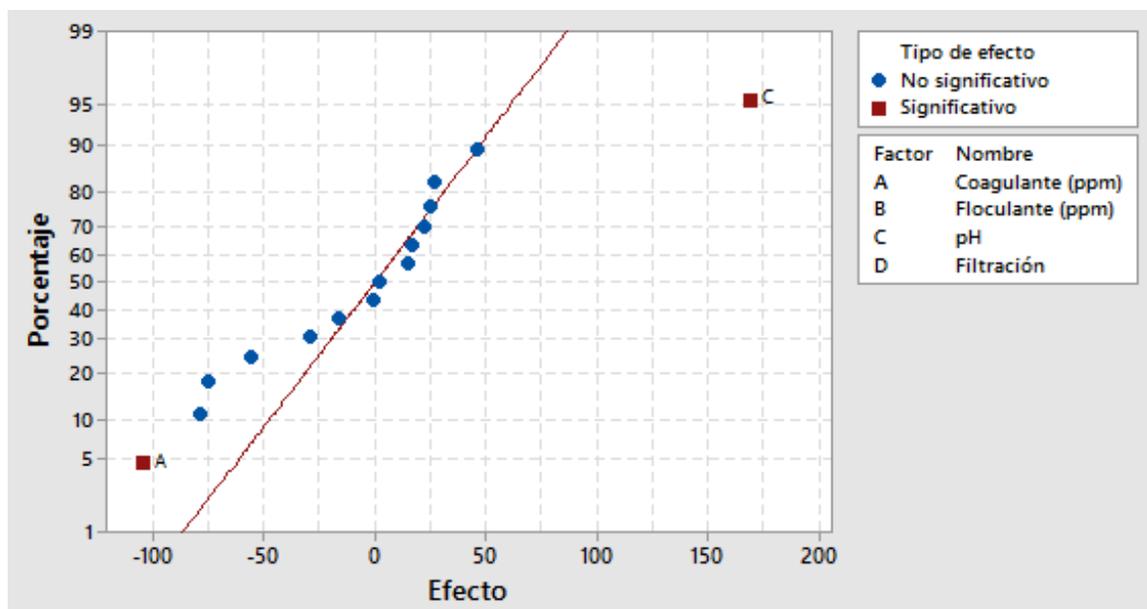


Figura 3. Gráfica de probabilidad normal de los efectos, software Minitab.

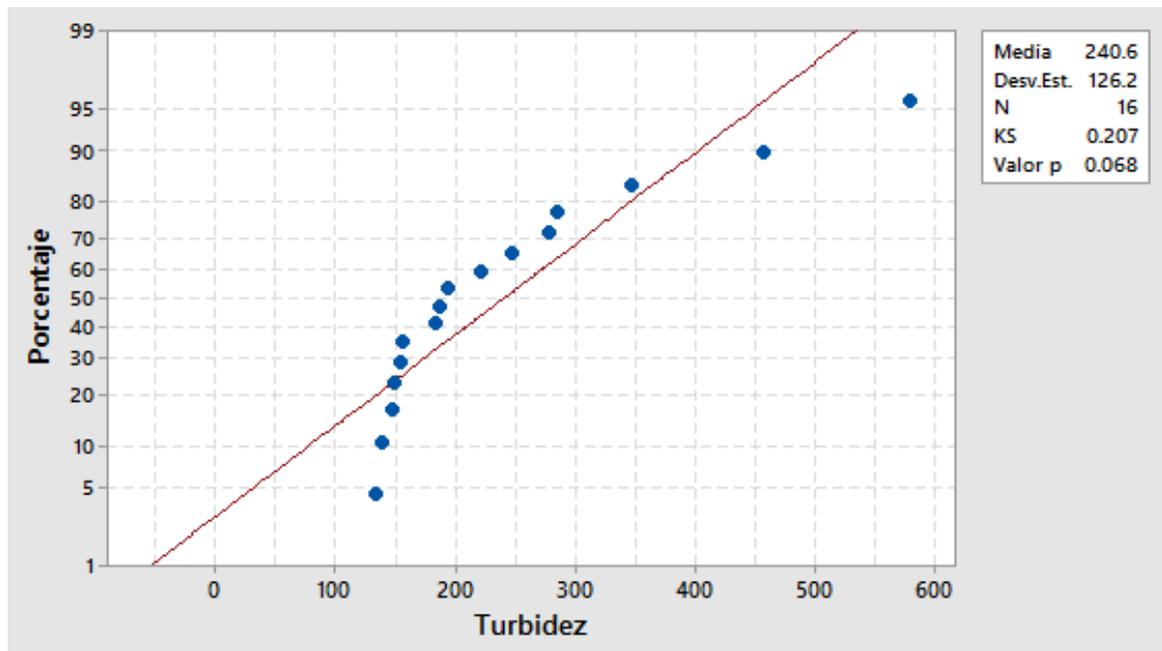


Figura 4. Gráfica de probabilidad normal de turbidez

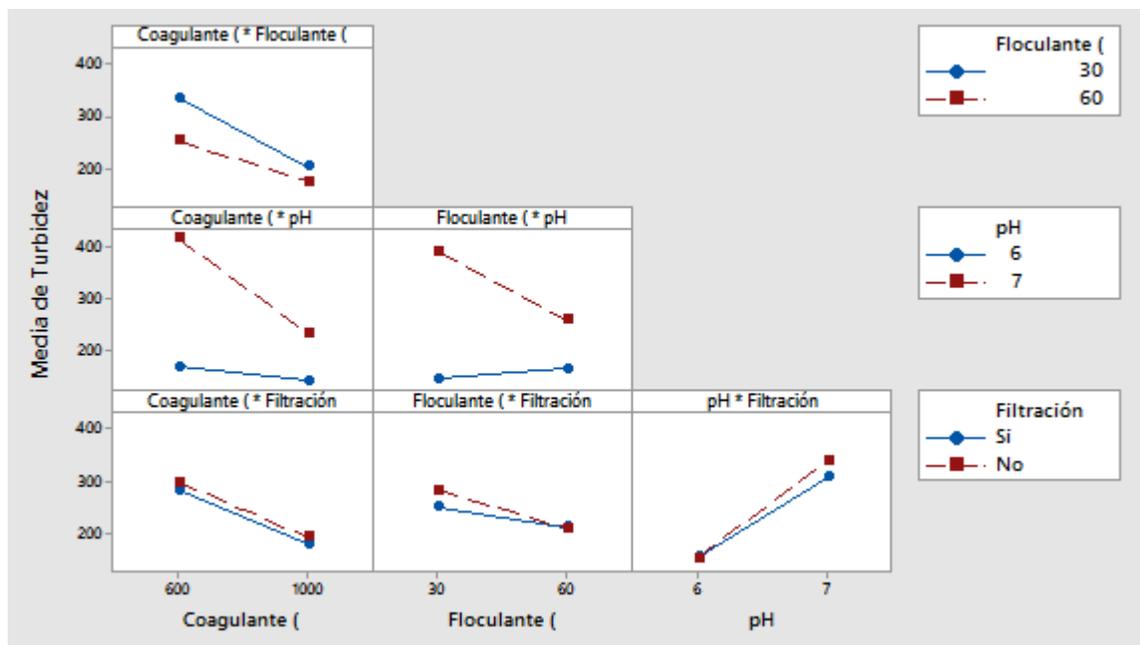


Figura 5. Gráficas de interacción para resultante, software Minitab.

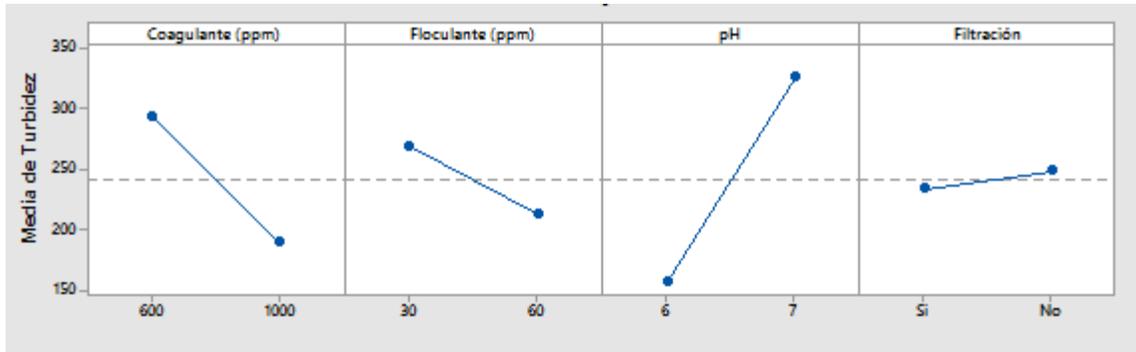


Figura 6. Gráfica de efectos principales de la resultante, software Minitab.

Como se ilustra en la figura 6 el factor que genera una mayor respuesta es el pH ya que a menor pH se obtiene una menor turbidez. Por lo que se evaluó que ahorro se puede tener de coagulante y floculante al usar un pH mas bajo.

Evaluando la posible disminución de pH en la planta para realizar el escalado de resultados, se evidencio que solo es posible disminuir el pH hasta 6.7 gracias a que en la planta se disminuye el pH con CO₂ y al ingresar una cantidad muy alta incapaz de solubilizarse con el agua, la bomba que proporciona el agua al GEM cavita.

Evidenciando la maxima capacidad de CO₂ que se puede permitir, se realizaron diferentes pruebas de jarras en donde se buscó que cantidad de coagulante y floculante (ppm) se debe usar a un pH de 6.7 para obtener una turbidez igual a la de un pH de 7, con esto se pudo ver el ahorro que se podría obtener con la disminucion de pH.

El procedimiento se realizó comparando la turbidez de 180 NTU obtenida con 1000ppm de coagulante y 60ppm de floculante y en diferentes jarras con la misma muestra de agua pero a un pH de 6.7 se inició a disminuir la concentracion presente de coagulante y floculante como se evidencia en la tabla, cabe aclarar que la turbidez varía respecto a lo hayado en la tabla 7 ya que es una muestra (balde) diferente de agua.

Tabla 8. Comparación de turbidez a distintos pH.

| Prueba | Coagulante | Floculante | Turbidez | pH |
|--------|------------|------------|----------|-----|
| 1 | 1000 | 60 | 182 | 7 |
| 2 | 1000 | 60 | 157 | 6.7 |
| 3 | 900 | 52 | 148 | 6.7 |
| 4 | 800 | 50 | 152 | 6.7 |

| | | | | |
|---|-----|----|-----|-----|
| 5 | 800 | 40 | 206 | 6.7 |
| 6 | 850 | 40 | 180 | 6.7 |

Como se evidencia en la tabla 8 para obtener una turbidez de 182NTU es posible utilizar 850 ppm de coagulante y 40ppm de floculante con un pH de 6.7 lo que podría generar un ahorro de 150ppm de coagulante y 20ppm de floculante lo que a largo plazo se puede visualizar como un ahorro monetario bastante alto.

Para comprobar los resultados obtenidos en escala laboratorio, se realizo la misma prueba en la planta, teniendo la hipotesis de que se puede ahorrar coagulante y floculante al disminuir el pH, para esto se hace el siguiente procedimiento:

1. Mantener estable el proceso con un pH de 7, en este caso se hizo prueba de jarras y se establecio trabajar con 900 ppm de coagulante y 90 ppm de floculante, tomar turbidez del agua de salida cuando el proceso se encuentre estable
2. Disminuir el pH a 6.7 y esperar que se estabilice el proceso, tomar turbidez.
3. Disminuir la concentracion de coagulante y floculante inyectado y tomar turbidez

Tabla 9. Resultados procedimiento de escalamiento.

| Paso | Coagulante | Floculante | Turbidez | pH |
|------|------------|------------|----------|-----|
| 1 | 900 | 90 | 302 | 7 |
| 2 | 900 | 90 | 161 | 6.7 |
| 3 | 700 | 50 | 66.1 | 6.7 |



Figura 7. Muestras tomadas a lo largo del procedimiento.

En la figura 6 se ilustran las muestras tomadas en cada paso y se evidencia el cambio de clarificación que se tiene al utilizar un pH de 6.7.

En cuanto a dinero, se calcula el ahorro teniendo en cuenta que por día (24 horas) se trata en promedio 120m³/h de agua y por los datos recolectados se utilizan 1000ppm de coagulante y 60ppm de floculante, al disminuir el pH a 6.7 sabiendo que se ahorra aproximadamente 200ppm de coagulante y 20ppm de floculante o más.

Se realiza el siguiente calculo,

Precio coagulante: \$2.246/kg

Precio floculante: \$18.930/kg

Costo por día coagulante a pH de 7:

$$1000 \frac{mg}{L} * 120 \frac{m^3}{dia} * 2.246 \frac{COP}{kg} * \frac{1kg}{1000000mg} * \frac{1000L}{1m^3} = 269.520 \frac{COP}{dia}$$

Y de la misma forma se halló el costo por día por mes y por año de coagulante y floculante a los diferentes pH

Tabla 10. Ahorro de coagulante al disminuir el pH.

| Coagulante | pH 7 | pH 6.7 |
|----------------------|--------------|--------------|
| Dia | \$ 269.520 | \$ 229.092 |
| mes | \$ 8'085.600 | \$ 6'872.760 |
| Ahorro mensual-anual | 15% | |

Tabla 11. Ahorro de floculante al disminuir el pH.

| Floculante | pH 7 | pH 6.7 |
|----------------------|--------------|--------------|
| Dia | \$136.296 | \$90.864 |
| mes | \$ 4'088.880 | \$ 2'725.920 |
| Ahorro mensual-anual | 33.33% | |

Con el cambio de pH se hace un ahorro total entre los dos químicos de aproximadamente 48% anual.

Por otro lado, buscando la disminución de costos por el uso de químicos se plantea el control y automatización de dosificación de coagulante y floculante creando un lazo de control dependiente del flujo que se tiene al ingreso del GEM, es decir que, si el flujo aumenta, el flujo de coagulante y floculante debe aumentar teniendo como constante la concentración (ppm) que se debe utilizar en el proceso, fijada por el operario en turno, como se ilustra en la figura 7.

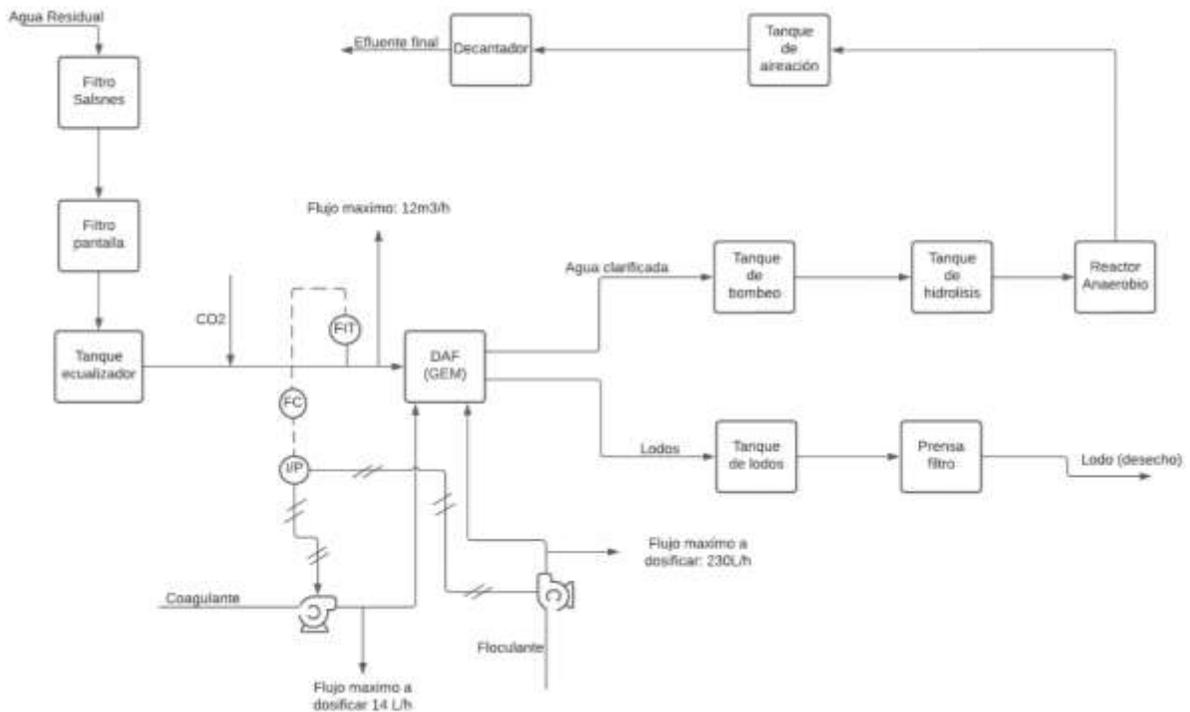


Figura 8. Lazo de control de flujo para dosificación de coagulante y floculante. Elaboración propia

El caudal del DAF (GEM) varía según la presión de trabajo que se tenga en la tubería gracias al ingreso de CO_2 y de agua, experimentalmente se evidencio que el caudal disminuye luego de trabajar por un tiempo o aumenta al hacer el lavado de curvas e insertos las cuales son las tuberías de entrada al DAF. Sin el lazo de control, las bombas están dosificando un flujo constante sin tener en cuenta el cambio de flujo de entrada al DAF lo que significa que al aumentar o disminuir este flujo se está aportando una concentración menor o mayor a la requerida para el proceso.

Por ejemplo, si el flujo inicial de entrada es $10\text{m}^3/\text{h}$ y el operario selecciono a través de la prueba de jarras 1000ppm de coagulante y 60ppm de floculante, se debe realizar el siguiente cálculo para estimar la dosificación de las bombas, teniendo la densidad de coagulante 1370g/L y de floculante 1000g/L .

Para coagulante:

$$1000 \frac{g}{m^3} * 10 \frac{m^3}{h} * \frac{1L}{1370g} = \frac{7.29L}{h}$$

Para floculante al 0.5%

$$60 \frac{g}{m^3} * 10 \frac{m^3}{h} * \frac{1L}{1000g} * \frac{1}{0.005} = \frac{120L}{h}$$

Si el flujo incrementa a 11 m³/h y se mantienen constantes los flujos de coagulante y floculante en 7.29 L/h y 120 L/h respectivamente, se estarían ingresando 907.93 ppm (partes por millón) de coagulante y 54.54 ppm de floculante al sistema. Estos niveles de concentración podrían resultar en una sobredosificación de los productos químicos, lo cual puede afectar negativamente la clarificación del agua.

Si el caudal se reduce a 9 m³/h y se mantienen constantes los flujos de coagulante y floculante en 7.29 L/h y 120 L/h respectivamente, se estarán introduciendo al sistema concentraciones de 1248.4 ppm de coagulante y 75 ppm de floculante. Estas concentraciones excesivas pueden llevar a una sobredosificación y resultar en una clarificación deficiente del agua. La sobredosificación de coagulante y floculante puede generar la formación de flóculos demasiado grandes o poco densos, lo que afectaría negativamente la eficiencia del proceso de clarificación.

Al tener la línea de control se podrá variar el flujo de dosificación de químicos automáticamente y se podrán evitar daños en la clarificación del agua, lo que implica que pasen menos solidos a la siguiente fase del reactor, en costos se puede ver de la siguiente forma:

Para coagulante a 10m³/h

$$7.29 \frac{L}{h} * 1370 \frac{g}{L} * 2.246 \frac{COP}{kg} * \frac{1kg}{1000g} = 22.431 \frac{COP}{h}$$

Para floculante a 10m³/h

$$120 \frac{L}{h} * 0.005 * 1000 \frac{g}{L} * 18930 \frac{COP}{kg} * \frac{1kg}{1000g} = 11.358 \frac{COP}{h}$$

Cuando cambia el flujo de entrada al DAF se debe calcular el nuevo caudal de dosificación al que trabajarán las bombas de los químicos,

Para coagulante:

$$1000 \frac{g}{m^3} * 9 \frac{m^3}{h} * \frac{1L}{1370g} = \frac{6.56L}{h}$$

Para floculante al 0.5%:

$$60 \frac{g}{m^3} * 9 \frac{m^3}{h} * \frac{1L}{1000g} * \frac{1}{0.005} = \frac{108L}{h}$$

Económicamente se podría dar el siguiente cambio,

Para coagulante a 9m3/h

$$6.56 \frac{L}{h} * 1370 \frac{g}{L} * 2.246 \frac{COP}{kg} * \frac{1kg}{1000g} = 20.185 \frac{COP}{h}$$

Para floculante a 9m3/h

$$108 \frac{L}{h} * 0.005 * 1000 \frac{g}{L} * 18930 \frac{COP}{kg} * \frac{1kg}{1000g} = 10.222 \frac{COP}{h}$$

En la tabla 12 se aprecia de forma concreta la comparación,

Tabla 12. Comparación de precios de químicos para cambios de flujo en el DAF.

| Caudal m ³ /h | Precio/h | |
|--------------------------|------------|------------|
| | Coagulante | Floculante |
| 10 | \$22.431 | \$11.358 |

| | | |
|-----------------|----------|----------|
| 9 | \$20.185 | \$10.222 |
| Ahorro por hora | 10% | 10% |

En el caso hipotético descrito en la Tabla 12, si el caudal disminuye y no se tiene control sobre ello, ya sea de forma automática o por parte del operario, se observaría un incremento del 10% en el gasto cada hora en que se mantenga constante el flujo de las bombas dosificadoras.

Esto implica que, debido a la disminución del caudal, el sistema de dosificación seguiría inyectando la misma cantidad de producto químico o sustancia, lo que resultaría en una sobre dosificación relativa al nuevo caudal más bajo. Como consecuencia, se produciría un aumento del 10% en el gasto del producto químico o sustancia por hora en comparación con la dosificación adecuada al caudal original.

Si el caso es más significativo, se presentarían variaciones en el costo por hora y en el ahorro al tener la línea de control

Tabla 13. Costo por hora de coagulante y floculante según las variaciones del flujo del DAF.

| Producto | Costo por hora a diferentes caudales del DAF | | | | | |
|------------|--|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 12m ³ /h | 11m ³ /h | 10m ³ /h | 9m ³ /h | 8m ³ /h | 7m ³ /h |
| Coagulante | \$26.952 | \$24.706 | \$22.460 | \$20.214 | \$17.968 | \$15.722 |
| Floculante | \$13.629 | \$12.493 | \$11.358 | \$10.222 | \$9.086 | \$7.950 |

Teniendo en cuenta lo anterior, queda claro que es necesario implementar un sistema de control para reducir los costos a largo plazo. Por lo tanto, se inició la investigación de los elementos necesarios que deben ser cotizados y adquiridos para poner en marcha el proyecto. En este caso, inicialmente se evaluaron las bombas que se tienen actualmente y las señales que tienen para el encendido y apagado, también se evaluó el sensor transmisor y si se tiene PLC con espacio disponible para el control de las dos bombas dosificadoras.

En cuanto a las bombas se tiene disponibilidad para conectar salidas de 4-20mA capaces de llevar la señal al PLC, el sensor transmisor tiene la capacidad para comunicar su señal al PLC que se encuentra en la PTAR y el PLC tiene las entradas necesarias para conectar las dos señales de las bombas dosificadoras. En la figura 8, 9 y 10 se ilustran los equipos mencionados anteriormente



Figura 9. Sensor-transmisor de flujo. Figura 10. Bomba coagulante. Figura 11. Bomba de floculante.

Debido a que en la planta se encuentran la mayoría de los implementos, se realizó la cotización de los implementos faltantes encontrados con ayuda del área de electricidad e instrumentación,

Tabla 14. Cotización de equipos faltantes para instalar la línea de control

| Equipo | Precio |
|------------------|--------------|
| SWITCH 1005N | \$ 859.257 |
| Módulo de salida | \$ 1.438.839 |
| Panel Siemens | \$ 3.841.272 |
| Total | \$ 6.139.368 |

Con esto, la inversión requerida para el proyecto es de COP 6.2MM la cual se podría recuperar en 1.6 años teniendo en cuenta el mínimo ahorro y que el DAF trabaja 2 veces al turno por 2 horas, 6 días a la semana durante un mes, según el anexo 4897, con una disminución de caudal de 1m³/h, se ahorran aproximadamente 2246COP/h de coagulante y 1135COP/h de floculante. Con esta inversión, en un año se podría generar un ahorro de COP5'843.750.

Teniendo en cuenta las propuestas planteadas para obtener una mejor clarificación del agua, si se ejecutan las dos estrategias al tiempo se incrementaría el ahorro pronosticado, por ejemplo, teniendo como base de cálculo inicial 1000ppm de coagulante y 60ppm de floculante se plantean las siguientes hipótesis,

Hipótesis 1: Caudal de 12 m³/h con disminución de 1 m³/h sin control, pH de 7 con concentración de 1000 y 60ppm

Hipótesis 2: Caudal con 12 m³/h con disminución de 1 m³/h con línea de control, pH de 6.7 y concentración de 850 y 40ppm

Si observamos cada una de las hipótesis durante un lapso de 2 horas de trabajo de DAF se evidencia el ahorro generado al trabajar con un pH de 6 e instalar la línea de control que disminuya la dosificación de químicos al disminuir el caudal del DAF pasada una hora. La comparación de los datos actuales (hipótesis 1) y la incorporación de las propuestas (hipótesis 2) se ilustran en las figuras 12 y 13.

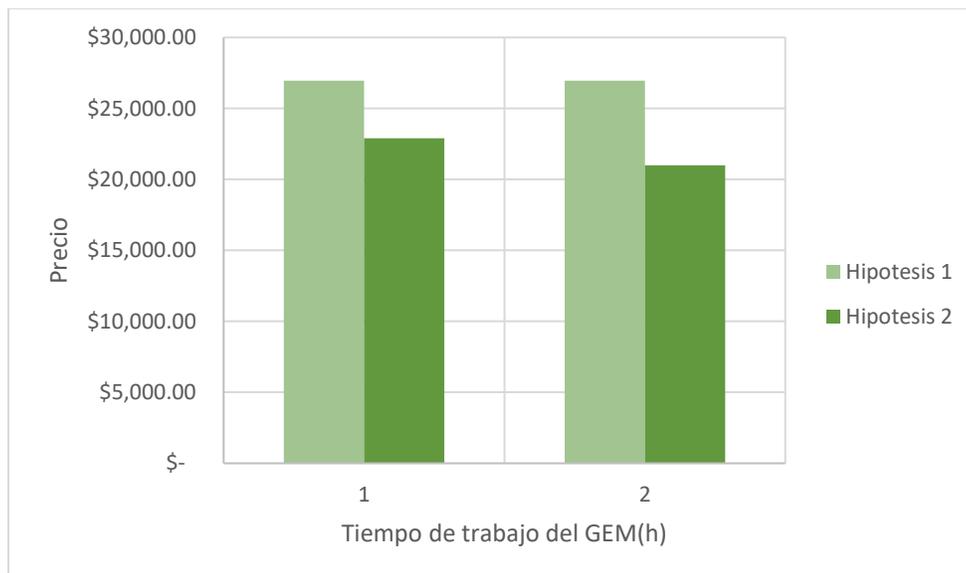


Figura 12. Comparación de Hipótesis planteadas.

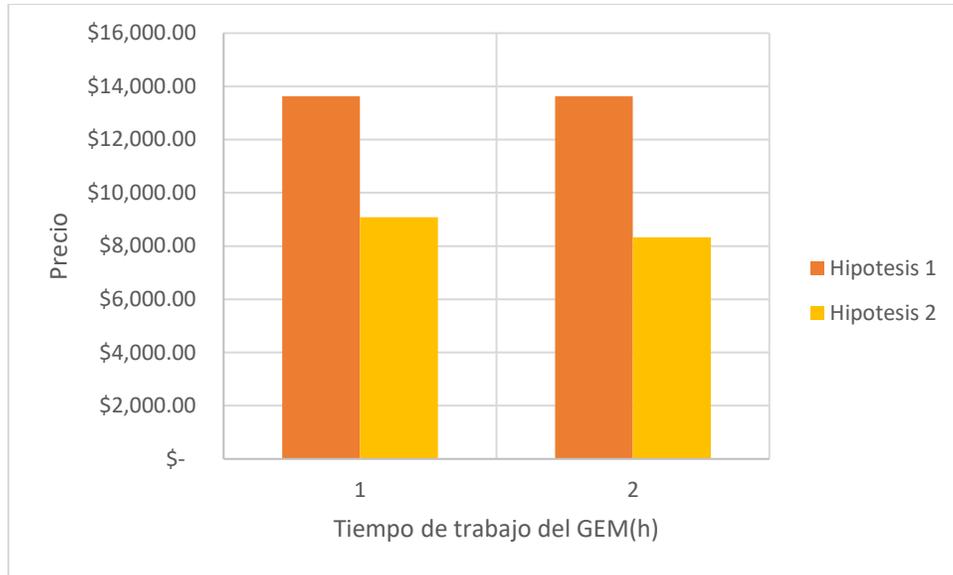


Figura 13. Comparación de Hipótesis planteadas.

Al seguir con la hipótesis 1 no se genera un ahorro. Mientras que al implementar la hipótesis 2 se genera un ahorro inicial del 15% y 33.33% y al pasar una hora de trabajo (disminución de caudal) se puede ahorrar el 60% en total gracias a la línea de control.

5 Análisis

Debido a la recopilación inicial de datos se genera un enfoque en la investigación y desarrollo del proyecto, con esto, se pudieron elegir los valores para realizar el diseño de experimentos que según la gráfica 3 y 4, cumplen el criterio de valor $p > 0.05$, lo cual no anula la hipótesis de tener una distribución normal. Teniendo en cuenta los demás resultados arrojados por Minitab, se evidencia que el factor más importante para disminuir la turbidez es el pH bajo ya que así, se pueden obtener ahorros de químicos y financieros.

El ahorro financiero que se presenta debido a que la disminución del pH es proporcional a la concentración, lo que implica que al trabajar a mayor ppm de coagulante y floculante se generaran mayores costos como se ilustra en las figuras 14 y 15.

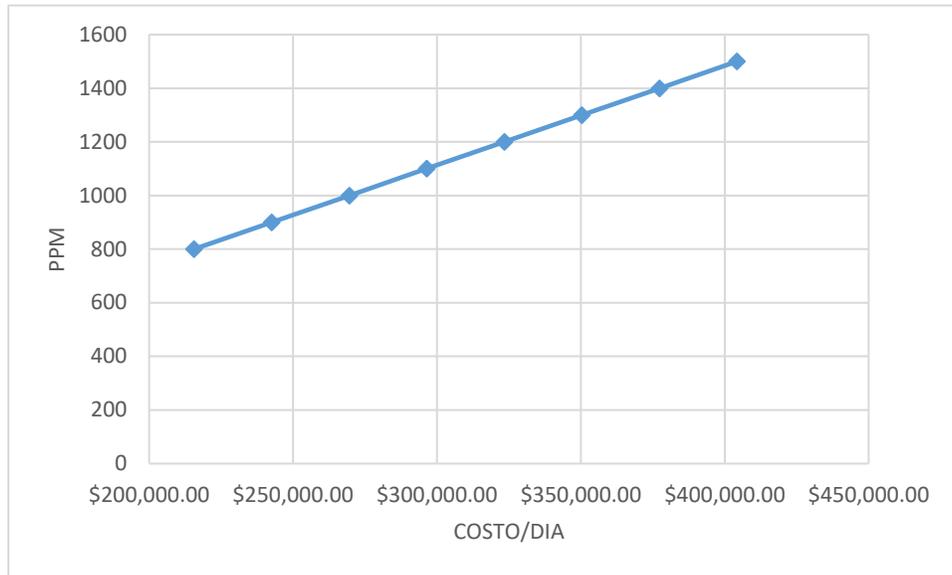


Figura 14. Costo de operación de Coagulante según la concentración.

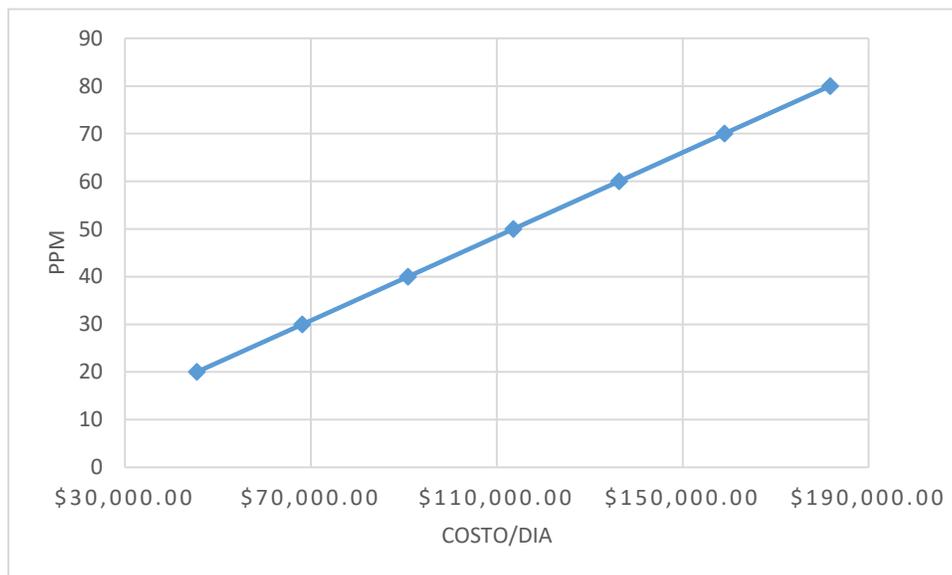


Figura 15. Costo de operación de Floculante según la concentración.

El porcentaje de reducción de costos aproximado de 48% representa un valor variable gracias a la operación constante del DAF, ya que el ahorro se calculó bajo condiciones estándar y estables de la planta donde se certifica según los aforos de las bombas, que se este regulando correctamente la dosificación de los químicos, así se podría tener claro un ahorro aproximado de 48% siguiendo las relaciones entre las concentraciones utilizadas.

En cuanto al ahorro de químicos y la relevancia que esto tiene en el proceso, la disminución de pH genera una mejor clarificación del agua disminuyendo mínimamente la dosificación 150ppm de coagulante y 40ppm de floculante lo que determina que el proceso puede llegar a ser más óptimo y disminuir el porcentaje de arrastre evidenciado en las rondas diarias hechas a la PTAR, también se demostró que la disminución de dosificación puede variar después de un tiempo de residencia de agua en el DAF lo que generará un incremento en el porcentaje de ahorro total.

El factor de filtración utilizado en el diseño de experimentos no fue significativo gracias a que se utilizó un filtro con tamaño de agujero bastante grande para lo requerido, aun así, se evidencia un cambio en el volumen de los lodos gracias a que las partículas grandes se retenían en el filtro, teniendo esto en cuenta, se plantea poner un filtro a la salida del DAF con el fin de retener la mayor cantidad de lodos que pasan por arrastre en el agua clarificada.

Los costos de implementación de la estrategia de control son mínimos en comparación con el ahorro mínimo esperado. Además, la inversión se recupera en menos de dos años. Por otra parte, la línea de control aporta cambios significativos al proceso al mejorar la clarificación y mitigar la sobredosificación. El ahorro anual es de aproximadamente 5MM lo que equivale a un beneficio en un proceso que únicamente genera costos y retribuciones legales.

Las dos estrategias planteadas acopladas entre sí presentan una mayor rentabilidad para la planta de tratamiento de agua lo que indica que se puede reinvertir el dinero en generar un plan de mantenimiento preventivo el cual es indispensable para la continuación del trabajo de la PTAR.

6 Conclusiones

La toma de datos preliminares es indispensable para la elaboración del diseño de experimentos, el cual arroja un resultado de distribución normal y permite la elaboración del experimento a escala industrial.

Mediante el diseño de experimentos fue posible definir la dosificación de coagulante y floculante a escala de laboratorio teniendo en cuenta que depende de las condiciones variables del agua a tratar.

Al analizar las bombas de dosificación de coagulante y floculante se estableció la necesidad de instalar cilindros de aforos que permitieran el control de caudal en cada una de estas, validando los datos tomados para el diseño de experimentos.

Se propone la dosificación y condiciones adecuadas de operación de las bombas mediante el escalamiento del diseño de experimentos elaborado a escala laboratorio, estableciendo que el pH de 6.7 generara un ahorro económico y de químicos.

Se generó un plan de automatización de las bombas de dosificación de coagulante y floculante al sistema de flotación por aire disuelto, DAF, que pretende disminuir el exceso de coagulante y floculante en el proceso creando un ahorro económico.

La implementación de las estrategias mencionadas en el proyecto, minimizarían los costos de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales por lo que es necesario ejecutar la línea de control propuesta y gradualmente, la disminución de pH para evaluar en periodos largos la rentabilidad y la clarificación en el proceso.

La clarificación del agua depende de varios factores que se tuvieron en cuenta en el diseño de experimentos por lo que se obtienen resultados acordes a lo esperado y se presentan planes de ejecución que permitirán que el reactor tenga una rápida estabilidad y el efluente final cumpla con los criterios de vertimiento que rigen en la resolución 0631 del Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible.

Implementar las dos estrategias planteadas genera mayor ahorro y mejora la clarificación del agua por lo que se hace indispensable el uso de estas para la continua mejora del proceso.

Enka de Colombia requiere evaluar el trabajo de su planta de tratamiento de agua para mejorar el vertimiento de agua tratada a la fuente hídrica.

Referencias

BBVA. (2022, 29 noviembre). *¿Qué son y cómo se pueden clasificar las aguas residuales?* BBVA noticias. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-y-como-se-pueden-clasificar-las-aguas-residuales/>

Cárdenas, d. c. (2008). optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales para su reuso en el proceso productivo de una industria de jabones. *universidad de la salle*.

Enka de Colombia. (2018). *Manual de PTAR ENKA*.

Flórez, j. j. m. (2010). clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxicloriguro de aluminio. *dyna*, 78(165), 18-27. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7761289.pdf>

Resolución 631 de 2015. (2021, 8 noviembre). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-631-de-2015/>

Reyes-Lara, s., & Reyes-Mazzoco, r. (2009). Efecto de las cargas hidráulica y orgánica sobre la remoción másica de un empaque estructurado en un filtro percolador. *revista mexicana de ingeniería química*, 8(1), 101-109. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62011375009.pdf>

Anexos

Anexo 1.

Control de preparación de floculante

| T1 | | |
|--------|-------|--------|
| Fecha | Hora | Tiempo |
| 23-feb | 16:50 | 12 |
| 24-feb | 4:42 | |
| 24-feb | 4:45 | 11 |
| 25-feb | 16:00 | |
| 25-feb | 16:10 | 18 |
| 27-feb | 0:40 | |
| 27-feb | 0:50 | 12 |
| 28-feb | 23:56 | |

| | | |
|--------|-------|----|
| 3-mar | 13:00 | 15 |
| 4-mar | 6:30 | |
| 4-mar | 6:35 | 13 |
| 5-mar | 7:30 | |
| 5-mar | 7:35 | 10 |
| 6-mar | 5:30 | |
| 6-mar | 5:30 | 11 |
| 7-mar | 6:30 | |
| 7-mar | 6:40 | 10 |
| 8-mar | 4:20 | |
| 8-mar | 4:30 | 18 |
| 9-mar | 23:45 | |
| 9-mar | 23:50 | 21 |
| 11-mar | 8:20 | |
| 11-mar | 8:23 | 10 |
| 11-mar | 18:30 | |
| 12-mar | 3:00 | 11 |
| 12-mar | 14:10 | |

| T2 | | |
|--------|-------|--------|
| Fecha | Hora | Tiempo |
| 23-feb | 18:20 | 25 |
| 24-feb | 19:00 | |
| 24-feb | 19:10 | 19 |
| 26-feb | 14:00 | |
| 26-feb | 14:20 | 20 |
| 27-feb | 16:10 | |
| 27-feb | 16:20 | 34 |
| 1-mar | 2:53 | |
| 1-mar | 2:53 | 68 |
| 4-mar | 18:02 | |
| 5-mar | 17:00 | 24 |
| 6-mar | 17:10 | |
| 6-mar | 17:10 | 23 |
| 7-mar | 16:30 | |
| 7-mar | 16:40 | 34 |
| 9-mar | 1:34 | |
| 9-mar | 2:15 | 16 |
| 10-mar | 18:10 | |

Anexo 2.

Control de cambio y concentración de coagulante y floculante

| | Turno | Fecha | Caudal GEM | Coagulante | | Floculante | |
|--------|-------|-------|------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | | | | ppm | Caudal bomba | ppm | Caudal bomba |
| Inicio | 1 | | | | | | |
| Cambio | | | | | | | |
| Inicio | 2 | | | | | | |
| Cambio | | | | | | | |
| Inicio | 3 | | | | | | |
| Cambio | | | | | | | |